



D. Serikbayev
**EAST
KAZAKHSTAN
TECHNICAL
UNIVERSITY**



**EKTU
ISTC**
XII Халықаралық ғылыми-
техникалық конференция
XII International scientific and
technical conference



Жасанды интеллект және инновациялар: жаңа сынақтар мен болашақтың инженерлік шешімдері

*Цифрландыру және жасанды интеллект жылына арналған студенттер,
магистранттар, докторанттар және жас ғалымдардың XII Халықаралық
ғылыми-техникалық конференциясының*
МАТЕРИАЛДАРЫ



Искусственный интеллект и инновации: новые вызовы и инженерные решения будущего

Artificial Intelligence and Innovation: New Challenges and Engineering Solutions for the Future

МАТЕРИАЛЫ

*XII Международной научно-технической
конференции студентов, магистрантов,
докторантов и молодых ученых,
посвященной Году цифровизации и
искусственного интеллекта*

PROCEEDINGS

*of the XII International Scientific and Technical
Conference of Students, Master's Students,
Doctoral Candidates, and Young Scientists,
dedicated to the Year of Digitalization and
Artificial Intelligence*

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
«Д. СЕРІКБАЕВ АТЫНДАҒЫ ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАН
ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ» КЕАҚ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
НАО «ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Д. СЕРИКБАЕВА»

**«ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ЖӘНЕ ИННОВАЦИЯЛАР:
ЖАҢА СЫНАҚТАР МЕН БОЛАШАҚТЫҢ ИНЖЕНЕРЛІК ШЕШІМДЕРІ»**

Цифрландыру және жасанды интеллект жылына арналған
студенттер, магистранттар, докторанттар және жас ғалымдардың
XII Халықаралық ғылыми-техникалық конференциясының
МАТЕРИАЛДАРЫ
9, 10 сәуір 2026 жыл

IV бөлім

**«ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И ИННОВАЦИИ:
НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ БУДУЩЕГО»**

МАТЕРИАЛЫ
XII Международной научно-технической конференции студентов,
магистрантов, докторантов и молодых ученых, посвященной
Году цифровизации и искусственного интеллекта
9, 10 апреля 2026 г.

Часть IV

**«ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND INNOVATION:
NEW CHALLENGES AND ENGINEERING SOLUTIONS
FOR THE FUTURE»**

PROCEEDINGS
of the XII International Scientific and Technical Conference of Students,
Master's Students, Doctoral Candidates, and Young Scientists, dedicated to the
Year of Digitalization and Artificial Intelligence
April 9-10, 2026

Part IV

УДК 004.8
ББК 32.813
Ж 33

Главный редактор: к.т.н. С.Ж. Рахметуллина
Зам. главного редактора: к.э.н. Ж.Т. Конурбаева

Редакционная коллегия: к.т.н. Вайс Ю.А., PhD Сулейменова Л.Р., PhD Алибеккызы К., магистр технических наук Кунапьянова М.С., магистр технических наук Базар У., PhD Акаев А.М., PhD Прохоренкова Н.В., PhD Байдилдина А.Т., канд.архитектуры Феоктистова Е.А., канд.архитектуры Иноземцева Т.А., преподаватель Буханцева А.Е., д.т.н. Колпакова В.П., преподаватель Нурекенова Р.Т., к.т.н. Гольцев А.Г., преподаватель Булатова А.Р., преподаватель Болатқызы Ә.

Жасанды интеллект және инновациялар: жаңа сынақтар мен болашақтың инженерлік шешімдері: Цифрландыру және жасанды интеллект жылына арналған студенттер, магистранттар, докторанттар және жас ғалымдардың **XII Халықаралық ғылыми-техникалық** конференциясының материалдары, 9, 10 сәуір 2026 ж. = **Искусственный интеллект и инновации: новые вызовы и инженерные решения будущего:** Материалы XII Международной научно-технической конференции студентов, магистрантов, докторантов и молодых ученых, посвященной году цифровизации и искусственного интеллекта, 9, 10 апреля 2026 г. – Өскемен: ШҚТУ, 2026. – IV б. – 682 б. – қазақша, орысша, ағылшынша.

ISBN 978-601-208-919-6 (IV б.)

ISBN 978-601-208-917-2

В настоящий сборник включены научные статьи, посвящённые тенденциям и перспективам развития технологий искусственного интеллекта. Особое внимание уделено специфике внедрения искусственного интеллекта в такие отрасли, как строительство, архитектура и энергетика. Представленные работы отражают современные тенденции и актуальные направления исследований, раскрывая как теоретические аспекты, так и практические решения, направленные на повышение эффективности, безопасности и устойчивости инженерных систем.

Сборник рассчитан на студентов, магистрантов, докторантов и молодых ученых вузов.

УДК 004.8
ББК 32.813

Печатается по разрешению редакционно-издательского совета университета.

ISBN 978-601-208-919-6 (IV б.)
ISBN 978-601-208-917-2

© ВКТУ им. Д. Серикбаева, 2026

ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУДЫҢ ЖАБДЫҚТАРДЫҢ ІСТЕН ШЫҒУЫН БОЛЖАУ ЖӘНЕ ЫМ-ИШАРА ТІЛІН ТАҢУ БОЙЫНША ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

ӨОК 004

А.А. Адалбек^{1*}, А.Е. Аужанова¹

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан

*Корреспондент-автор: Адалбек Айнара Алибекқызы,

e-mail: ainara.sultan01@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Жасанды интеллект және машиналық оқыту технологиялары өндірістік және әлеуметтік салаларда кеңінен қолданылуда. Бұл мақалада машиналық оқыту әдістерінің екі қолдану бағыты қарастырылады: өндірістік жабдықтардың істен шығуын алдын ала болжау және ым-ишара тілін тану. Зерттеу барысында жабдықтардың техникалық жағдайын талдау үшін предиктивті техникалық қызмет көрсету тәсілі қолданылып, болжау үшін Gradient Boosting алгоритмі пайдаланылды. Сонымен қатар компьютерлік көру әдістері негізінде қол қозғалыстарын тану жүйесі ұсынылып, жест тілін классификациялау үшін көпқабатты перцептрон (MLP) нейрондық желісі қолданылды. Зерттеу нәтижелері машиналық оқыту алгоритмдерінің өндірістік деректерді талдауда және қол қозғалыстарын тануда тиімді екенін көрсетті, бұл өндірістік жабдықтардың сенімділігін арттыруға және есту қабілеті бұзылған адамдардың коммуникациясын жеңілдетуге мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: машиналық оқыту, жасанды интеллект, предиктивті техникалық қызмет көрсету, нейрондық желі, MLP моделі, жест тілін тану.

КІРІСПЕ

Қазіргі уақытта цифрлық технологиялардың дамуы өнеркәсіптік жүйелер мен әлеуметтік салаларда жаңа мүмкіндіктер ашуда. Жасанды интеллект және машиналық оқыту әдістері үлкен көлемдегі деректерді талдау арқылы күрделі процестерді автоматтандыруға және болашақтағы өзгерістерді болжауға мүмкіндік береді [1].

Өнеркәсіптік кәсіпорындарда маңызды мәселелердің бірі – жабдықтардың күтпеген жерден істен шығуы. Мұндай жағдайлар өндірістің тоқтап қалуына, қаржылық шығындардың артуына және өндірістік процестердің тиімділігінің төмендеуіне алып келеді. Осы себепті өндірістік жүйелерде жабдықтардың техникалық күйін бақылау және олардың істен шығуын алдын ала болжау маңызды міндеттердің бірі болып табылады [2].

Соңғы жылдары бұл мәселені шешу үшін предиктивті техникалық қызмет көрсету әдістері кеңінен қолданылып келеді. Бұл тәсіл машиналық оқыту алгоритмдерін пайдалану арқылы жабдықтардың жұмыс параметрлерін талдап, олардың болашақтағы күйін болжауға мүмкіндік береді [3].

Сонымен қатар ақпараттық технологиялардың әлеуметтік маңызы да артып келеді. Есту қабілеті бұзылған адамдар үшін жест тілі негізгі коммуникация құралдарының бірі болып табылады. Алайда көптеген адамдар бұл тілді білмейді. Сондықтан жест тілін автоматты түрде тану және оны мәтінге немесе дыбысқа түрлендіру жүйелерін құру маңызды ғылыми бағыттардың бірі болып табылады [4].

Компьютерлік көру және нейрондық желілер негізіндегі жүйелер камера арқылы алынған бейнелерді талдап, қол қозғалыстарын анықтап, оларды белгілі бір классқа жатқыза алады [5].

Осы зерттеудің мақсаты – машиналық оқыту әдістерін қолдану арқылы өндірістік жабдықтардың істен шығуын болжау және ым-ишара тілін тану жүйесінің жұмыс принциптерін зерттеу.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Зерттеу барысында өндірістік жабдықтардың техникалық жағдайын талдау үшін предиктивті техникалық қызмет көрсету тәсілі қолданылды. Бұл тәсіл жабдықтардың жұмыс параметрлерін талдау арқылы олардың болашақтағы техникалық жағдайын алдын ала болжауға мүмкіндік береді [3].

Жабдықтардың техникалық күйін бақылау үшін температура, жүктеме, айналу жылдамдығы және вибрация деңгейі сияқты сенсорлық параметрлер пайдаланылды. Бұл деректер арнайы датчиктер арқылы жиналып, кейін талдау үшін деректер базасына сақталды. Зерттеу барысында деректер алдын ала өңдеуден өтті: бос немесе қате мәндер анықталып, деректер қалыпқа келтірілді.

FileEditViewQueryDatabaseServerToolsScriptingHelp

Navigator

SCHEMAS

Filter objects

pdm_db

Tables

pdm_data

Columns

Indexes

Foreign Keys

Triggers

Views

Stored Procedures

Functions

radiobalmobile

rentalagency

sys

AdministrationSchemas

Information

Table: pdm_data

Columns:

id

int

AI PK

udi

int

equipment_id

varchar(20)

timestamp

datetime

type

char(1)

air_temp_k

double

process_temp_k

double

rot_speed_rpm

double

torque_nm

double

tool_wear_min

int

target

tinyint

failure_type

varchar(50)

type_code

tinyint

Query 1

pdm_data

Limit to 1000 rows

1

SELECT * FROM pdm_db.pdm_data;

Result Grid

Filter Rows

Edit

Export/Import

Wrap Cell Contents

Fetch rows

id	udi	equipment_id	timestamp	type	air_temp_k	process_temp_k	rot_speed_rpm	torque_nm	tool_wear_min	target	failure_type	type_code
1	M14860	2024-01-01 00:00:00	M	Idle current row	38.5	1351	42.8	0	0	No Failure	1	
2	M147181	2024-01-01 01:00:00	L	298.2	308.7	1408	46.3	3	0	No Failure	0	
3	M147182	2024-01-01 02:00:00	L	298.1	308.5	1408	49.4	5	0	No Failure	0	
4	M147183	2024-01-01 03:00:00	L	298.2	308.6	1433	39.5	7	0	No Failure	0	
5	M147184	2024-01-01 04:00:00	L	298.2	308.7	1408	40	9	0	No Failure	0	
6	M14865	2024-01-01 05:00:00	M	298.1	308.6	1425	41.9	11	0	No Failure	1	
7	M147186	2024-01-01 06:00:00	L	298.1	308.6	1558	42.4	14	0	No Failure	0	
8	M147187	2024-01-01 07:00:00	L	298.1	308.6	1527	40.2	16	0	No Failure	0	
9	M14868	2024-01-01 08:00:00	M	298.3	308.7	1667	28.6	18	0	No Failure	1	
10	M14869	2024-01-01 09:00:00	M	298.5	309	1741	28	21	0	No Failure	1	
11	M29424	2024-01-01 10:00:00	H	298.4	308.9	1782	23.9	24	0	No Failure	2	
12	M29425	2024-01-01 11:00:00	H	298.6	309.1	1423	44.3	29	0	No Failure	2	
13	M14872	2024-01-01 12:00:00	M	298.6	309.1	1339	51.1	34	0	No Failure	1	
14	M14873	2024-01-01 13:00:00	M	298.6	309.2	1742	30	37	0	No Failure	1	
15	M147194	2024-01-01 14:00:00	L	298.6	309.2	2035	19.6	40	0	No Failure	0	
16	M147195	2024-01-01 15:00:00	L	298.6	309.2	1542	48.4	42	0	No Failure	0	
17	M14876	2024-01-01 16:00:00	M	298.6	309.2	1311	46.6	44	0	No Failure	1	
18	M14877	2024-01-01 17:00:00	M	298.7	309.2	1410	45.6	47	0	No Failure	1	

pdm_data: x

Output

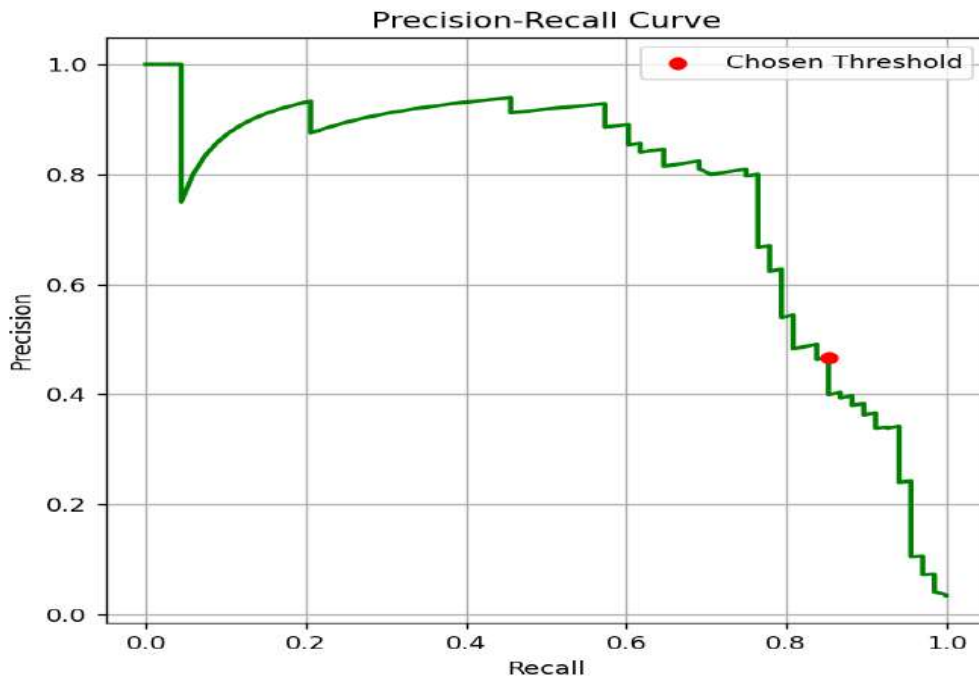
Action Output

#	Time	Action	Message	Duration / Fetch
1	13:45:56	SELECT * FROM pdm_db.pdm_data LIMIT 0, 1000	1000 row(s) returned	0.062 sec / 0.016 sec

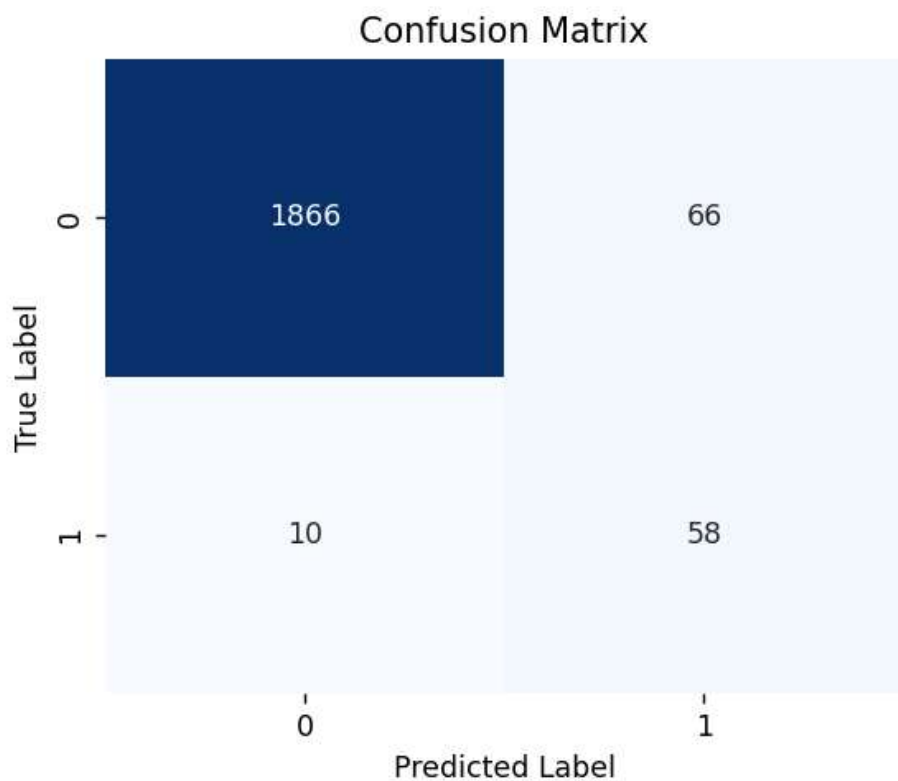
Сурет 1. Жабдықтардың жағдайын бақылау барысында қолданылатын өңделген деректер.

Сондай-ақ машиналық оқыту моделінің жұмысын жақсарту үшін деректерді нормализациялау және маңызды белгілерді таңдау кезеңдері жүргізілді. Мұндай өңдеу модельдің дәлдігін арттыруға мүмкіндік береді.

Модельдің жұмыс сапасын бағалау үшін precision, recall, false positive және false negative көрсеткіштері қолданылды. Бұл көрсеткіштер модельдің ақауларды қаншалықты дәл анықтай алатынын және қате болжаулардың санын бағалауға мүмкіндік береді.



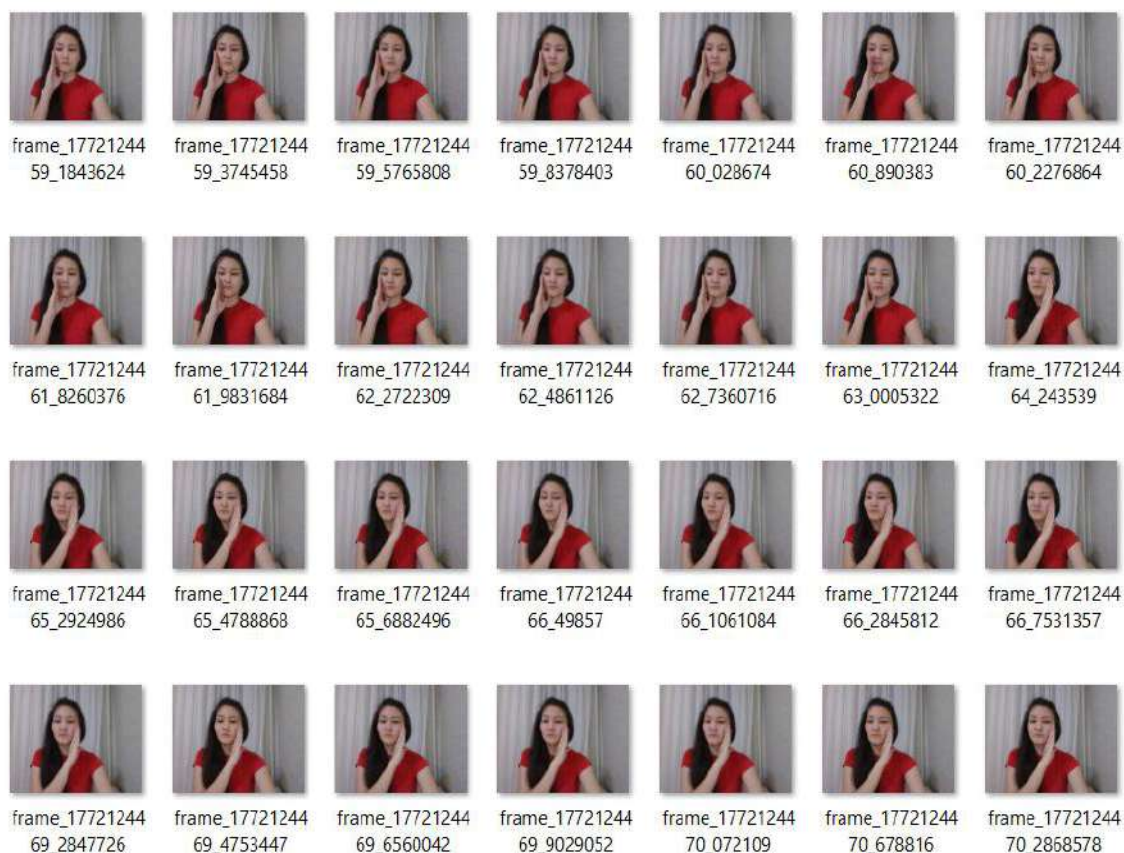
Сурет 2. Әртүрлі threshold (шекті мән) үшін модельдің дәлдігі (Precision) мен толықтығын (Recall) көрсетілген.



Сурет 3. Модельдің нақты және болжамды нәтижелерін кесте түрінде көрсетілген.

Сонымен қатар зерттеу барысында жест тілін тану жүйесі қарастырылды. Жүйе компьютерлік көру және машиналық оқыту әдістеріне негізделген. Камера арқылы алынған бейнелер өңделіп, қол қозғалыстары анықталады. Әрбір қол үшін 21 негізгі нүкте анықталып, олардың координаталары модельдің кіріс деректері ретінде пайдаланылады [6].

Жест тілін тану жүйесін оқыту үшін арнайы деректер қоры қалыптастырылды. Деректер қоры камера арқылы түсірілген қол қозғалыстарының бейнелерінен тұрады. Әрбір жест бірнеше рет жазылып, әр түрлі жарық және бұрыш жағдайларында түсірілді.



Сурет 4. Жест тілін тану жүйесін оқыту үшін пайдаланылған деректер қорының құрылымы

Жесттерді классификациялау үшін көпқабатты перцептрон (MLP) нейрондық желісі қолданылды. Модель кіріс қабатынан, бір немесе бірнеше жасырын қабаттардан және шығыс қабатынан тұрады. Модельдің тұрақты жұмыс істеуі үшін Dropout және Batch Normalization әдістері қолданылды [7], [8].

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Жүргізілген зерттеу нәтижелері машиналық оқыту әдістерін қолдану өндірістік жабдықтардың техникалық жағдайын тиімді талдауға мүмкіндік беретінін көрсетті. Gradient Boosting алгоритмі жабдықтардың істен шығу ықтималдығын алдын ала анықтай алатыны байқалды [3].

Ұсынылған тәсіл өндірістегі күтпеген ақауларды азайтуға және техникалық қызмет көрсету жұмыстарын тиімді ұйымдастыруға көмектеседі. Мұндай жүйені қолдану жабдықтың тоқтап қалу уақытын қысқартады, жөндеу шығындарын азайтады және өндірістік процестің жалпы тиімділігін арттырады.

Сонымен қатар MLP нейрондық желісі негізінде құрылған жест тілін тану жүйесі қол қозғалыстарын классификациялауда тиімді нәтижелер көрсетті. Жүйе камера арқылы алынған бейнелердегі қол координаталарын талдап, сәйкес жестті анықтай алады.

Алынған нәтижелер машиналық оқыту алгоритмдерінің өндірістік деректерді талдауда және жест тілін тануда тиімді екенін көрсетеді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеу машиналық оқыту әдістерінің өндірістік және әлеуметтік міндеттерді шешуде тиімді құрал екенін көрсетті. Предиктивті техникалық қызмет көрсету тәсілі өндірістік жабдықтардың жұмысын бақылауға және олардың істен шығуын алдын ала анықтауға мүмкіндік береді [2].

Сондай-ақ компьютерлік көру және нейрондық желілер негізінде құрылған жест тілін тану жүйесі есту қабілеті бұзылған адамдардың коммуникациясын жеңілдетуге бағытталған маңызды технология болып табылады [4].

Болашақта бұл бағыттағы зерттеулер деректер көлемін ұлғайтады, модельдердің дәлдігін арттыруға және жүйелерді нақты өндірістік ортада қолдануға бағытталуы мүмкін.

МҮДДЕЛЕР ҚАРАМА-ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қарама-қайшылығының жоқтығын мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл зерттеу жұмысы арнайы гранттық немесе сыртқы қаржыландырусыз орындалды.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Авторлар зерттеу барысында әдістемелік кеңестер берген әріптестеріне және жұмысты жақсартуға бағытталған ұсыныстары үшін рецензенттерге алғыс білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Бұл мақаланы дайындау барысында мәтінді редакциялау, құрылымын жетілдіру және ғылыми стильде рәсімдеу мақсатында жасанды интеллект технологиялары қолданылды. Мақаладағы ғылыми мазмұн, нәтижелер және қорытындылар авторлардың жеке зерттеу жұмысына негізделген.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Aggarwal C. C. Neural Networks and Deep Learning: A Textbook. – Springer, 2018.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-94463-0>
- Zhao R., Yan R., Chen Z., Mao K., Wang P., Gao R. Deep Learning and Its Applications to Machine Health Monitoring. – Mechanical Systems and Signal Processing, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.050>
- Amrani M., Nguyen D. Predictive Maintenance Using Machine Learning Techniques: A Review. – Procedia Computer Science, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.073>
- Wachs J., Kölsch M., Stern H., Edan Y. Vision-Based Hand Gesture Recognition for Human-Computer Interaction: A Survey. – Communications of the ACM, 2011.
<https://doi.org/10.1145/1897816.1897838>
- Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. – Springer, 2022.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-34372-9>
- Molchanov P., Gupta S., Kim K., Kautz J. Hand Gesture Recognition with 3D Convolutional Neural Networks. – IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016.
<https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.99>
- Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. – MIT Press, 2016.
<https://www.deeplearningbook.org>
- Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. – Springer, 2006.
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-45528-0>

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЛИЦ, СОСТОЯЩИХ В РОЗЫСКЕ ПО УЧЕТАМ МВД РК

УДК 004

Ә.А. Амангелдин^{1*}, С.К. Кумаргажанова¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
г.Усть-Каменогорск, Казахстан

*Корреспондент-автор: Амангелдин Әли Амангелдіұлы, e-mail:

maldini.0349@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В связи с развитием концепций «Умного города» и масштабная цифровизация правоохранительных органов возрастает актуальность применения технологий искусственного интеллекта для обеспечения общественной безопасности. В Республике Казахстан — это направление носит стратегический характер, что подтверждается статусом 2026 года как Года цифровизации и ИИ. В связи с этим органам внутренних дел необходимо активно внедрять передовые технологии, такие как, автоматизированные выявления лиц, скрывающихся от следствия, суда или без вести пропавших, с использованием городских систем видеонаблюдения и баз данных МВД РК.

Главная цель данной работы — провести теоретическое и сравнительное исследование алгоритмов компьютерного зрения и методов машинного обучения, применяемых для биометрической идентификации лиц в режиме реального времени. В работе рассмотрены математические основы современных сверточных нейронных сетей (CNN) и функций потерь (ArcFace, CosFace), проведен сравнительный анализ их эффективности при работе со сложными визуальными данными (*низкое качество, перекрытия лиц, изменение ракурса*).

Теоретическая значимость работы заключается в систематизации алгоритмов биометрического поиска, а практическая — в обосновании выбора оптимальной архитектуры для интеграции с действующими системами видеоаналитики (*например, «Сергек» или «Мерген»*) и розыскными учетами Министерства внутренних дел Республики Казахстан. Предполагается, что результаты исследования послужат основой для создания отказоустойчивой информационной системы, повышающей раскрываемость преступлений и оперативность розыскных мероприятий.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, компьютерное зрение, распознавание лиц, биометрическая идентификация, сверточные нейронные сети, МВД РК, розыск, общественная безопасность.

ВВЕДЕНИЕ

Учитывая стремительное эволюционирование интеллектуальных видеосистем и повсеместную цифровизацию правоохранительного сектора, вопрос автоматизации обеспечения общественной безопасности приобретает повышенную актуальность. Современные аппаратно-программные комплексы обеспечивают круглосуточную обработку потоковых данных, поступающих от тысяч камер городского видеонаблюдения, транспортных узлов и мест массового пребывания людей. В этой связи формируется стратегическое направление, ориентированное на переход от традиционной видеофиксации к предиктивной аналитике и автоматизированному выявлению правонарушителей с применением технологий искусственного интеллекта.

Одной из наиболее ресурсоемких задач оперативно-розыскной деятельности остается определение местонахождения лиц, находящихся в розыске. Традиционные методы визуального контроля, выполняемые сотрудниками правоохранительных органов, требуют значительных трудовых затрат и подвержены влиянию человеческого фактора — снижению внимания, усталости и когнитивным ошибкам. Интеграция биометрических систем идентификации, основанных на алгоритмах глубокого обучения (*Deep Learning*), открывает возможность существенного повышения эффективности поиска по учетным базам Министерства внутренних дел Республики Казахстан (*МВД РК*).

В данном контексте выделяются несколько категорий разыскиваемых лиц: подозреваемые и обвиняемые в совершении преступлений, без вести пропавшие граждане, а также лица, уклоняющиеся от исполнения судебных решений. В условиях растущей глобальной мобильности населения актуализируется необходимость создания высокоточных систем раннего обнаружения. Настоящее исследование направлено на теоретико-аналитический обзор современных методов идентификации разыскиваемых лиц с использованием технологий искусственного интеллекта.

Цель данного исследования — проведение сравнительного анализа методов компьютерного зрения для биометрического распознавания лиц и их применимости для оперативного выявления разыскиваемых лиц в потоковом видео.

Для достижения цели определены следующие задачи:

1. Провести обзор существующих архитектур сверточных нейронных сетей, используемых для детекции и верификации лиц (*YOLO, MTCNN, ResNet*).
2. Изучить математические основы современных функций оптимизации (*метрическое обучение*), обеспечивающих высокую точность распознавания.
3. Сравнить эффективность алгоритмов в условиях реальной городской среды (*слабое освещение, перекрытия*).
4. Обосновать выбор наиболее подходящего метода для интеграции в ведомственные информационные системы *МВД РК*.

Научная новизна работы заключается в комплексном анализе адаптации современных алгоритмов распознавания лиц (*State-of-the-Art*) к специфическим условиям розыскных баз данных (*ограниченное количество эталонных фото, старение лица, низкое разрешение исторических снимков*).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения задачи выявления лиц, состоящих в розыске, требуется комплексный конвейер (*pipeline*) обработки данных, состоящий из трех основных этапов: локализации лица на кадре (*Detection*), выравнивания (*Alignment*) и извлечения биометрического вектора признаков (*Feature Extraction*). Классические методы, такие как каскады Хаара (*Haar Cascades*) и HOG (*Histogram of Oriented Gradients*), уступили место более точным подходам на базе сверточных нейронных сетей (*CNN*). В современных интеллектуальных системах для детекции активно применяются архитектуры семейства *RetinaFace* и *YOLOv8-Face*, способные обрабатывать видеопоток в реальном времени с высокой точностью. Ключевым математическим аппаратом метрического обучения (*Metric Learning*) для задачи верификации лиц является оптимизация дистанции между биометрическими векторами (эмбедами) в многомерном пространстве. После извлечения вектора признаков x_i , система вычисляет его сходство с эталонными фотографиями из базы данных розыска *МВД*. Чаще всего для этого используется косинусное сходство:

$$\text{sim}(A, B) = \cos(\theta) = \frac{A \cdot B}{\|A\| \|B\|}$$

где A — вектор признаков лица с камеры, B — вектор признаков лица из базы розыска.

ArcFace Hypersphere: Angular Margin Separation

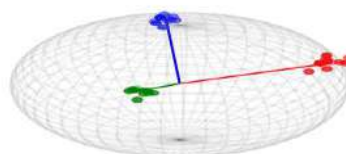


Рисунок 1. Геометрическая интерпретация разделения классов на гиперсфере с использованием функции потерь ArcFace.

Если значение косинусного сходства превышает заданный порог (Threshold), система генерирует тревожное уведомление. Для повышения различающей способности нейронных сетей в задачах биометрии применяются маргинальные функции потерь, такие как Additive Angular Margin Loss (ArcFace, рис.№1). В отличие от стандартной перекрестной энтропии, функция ArcFace штрафует сеть за недостаточное угловое расстояние между классами (разными людьми) и требует математического преобразования:

$$L = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log \frac{e^{s(\cos(\theta_{y_i} + m))}}{e^{s(\cos(\theta_{y_i} + m))} + \sum_{j=1, j \neq y_i}^n e^{s \cos \theta_j}}$$

где N — размер батча, θ_{y_i} — угол между вектором признаков и весом целевого класса, m — аддитивный угловой маржин (margin), а s — коэффициент масштабирования признаков.

Такое представление заставляет нейронную сеть формировать компактные кластеры для изображений одного человека и максимизировать угловое расстояние между разными людьми, что критически важно при сравнении лиц с базами розыска, содержащими миллионы записей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ существующих методов распознавания лиц необходим для выбора оптимального решения, балансирующего между высокой точностью (Accuracy) и вычислительной эффективностью (Inference speed), необходимой для работы с городскими камерами. В таблице 1 представлены результаты сравнительного анализа алгоритмов.

Таблица 1. Сравнительный анализ алгоритмов распознавания лиц для систем безопасности

Метод/архитектура	Преимущества	Недостатки
Каскады Хаара + LBPH	Вычислительная легкость, возможность работы на слабых процессорах (Edge-устройства) без GPU. Высокая скорость работы.	Крайне низкая точность при изменении освещения, ракурса или частичном перекрытии лица (очки, маски). Морально устаревший подход.
MTCNN + Facenet (Triplet Loss)	Хорошая детекция лиц в разных масштабах. Формирует стабильные векторы признаков. Позволяет достигать точности более 98% на стандартизированных датасетах (LFW).	Требует ресурсоемкого процесса выравнивания (Alignment). Triplet Loss сложно оптимизировать на сверхбольших наборах данных.
RetinaFace + ResNet (ArcFace)	Высочайшая точность (State-of-the-Art). Устойчивость к медицинским маскам, сложным ракурсам и возрастным изменениям (что важно для розыскных учетов). Идеально кластеризует классы благодаря угловому маржину.	Требует наличия мощных графических ускорителей (GPU) для обработки потокового видео в реальном времени. Высокие затраты на серверную инфраструктуру.
Статистические модели (регрессии, ARIMA)	Простота и прозрачность моделей, возможность быстрого обучения на исторических данных. Могут эффективно учитывать сезонные компоненты и корреляции по времени. Дают быструю оценку прогноза без больших вычислительных затрат.	Не учитывают физику процесса и нелинейные связи; ограничены формой модели (например, линейностью). Обычно требуют стационарности данных. Легко переобучаются при шуме и редко хорошо работают при выходе за диапазон наблюдаемых условий.
Vision Transformers (ViT) для биометрии	Глобальное понимание контекста изображения, отличная работа с сильно искаженными или зашумленными данными.	Очень высокая вычислительная сложность, сложность внедрения в существующие realtime-пайплайны правоохранительных органов.

Таким образом, анализ показывает, что для интеграции с учетами МВД РК наиболее целесообразно использование архитектуры на базе глубоких сверточных сетей (ResNet-50 / ResNet-100) с функцией потерь ArcFace, так как эта комбинация обеспечивает необходимую устойчивость к неблагоприятным условиям съемки (вечернее время, осадки, низкое качество камер в спальных районах).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показывает, что применение технологий искусственного интеллекта для выявления лиц, состоящих в розыске, является не просто перспективным направлением, а необходимой мерой цифровой трансформации МВД РК.

Методы на основе глубокого обучения (Deep Learning) и метрической оптимизации (ArcFace) обладают высоким потенциалом точности, позволяя идентифицировать разыскиваемое лицо даже при наличии значительных визуальных помех или возрастных изменений по сравнению со старой фотографией в ориентировке. Однако их внедрение требует развертывания высокопроизводительных вычислительных кластеров и создания защищенных каналов связи для оперативного обмена данными с базами МВД.

В рамках дальнейших исследований планируется разработка прототипа программного комплекса, реализующего интеграцию алгоритма детекции и верификации лиц с тестовой базой данных, имитирующей учеты розыска, а также оптимизация модели при помощи тензорных компиляторов (TensorRT) для повышения скорости обработки потоков видеоданных. Полученные результаты будут иметь прямую практическую ценность для оптимизации патрульно-постовой службы и повышения показателей раскрываемости преступлений в Республике Казахстан.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность научным руководителям за методологическую поддержку и полезные обсуждения, а также анонимным рецензентам за ценные замечания.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Все содержательные решения выполнены авторами самостоятельно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Указ Президента Республики Казахстан К.-Ж. Токаева от 6 января 2026 года «О проведении 2026 года Годом цифровизации и искусственного интеллекта в Республике Казахстан». URL: https://www.akorda.kz/ru/legal_acts (Официальный сайт Президента РК);
- Deng, J., Guo, J., Xue, N., & Zafeiriou, S. (2019). ArcFace: Additive Angular Margin Loss for Deep Face Recognition. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). URL: https://openaccess.thecvf.com/content_CVPR_2019/html/Deng_ArcFace_Additive_Angular_Margin_Loss_for_Deep_Face_Recognition_CVPR_2019_paper.html;
- Schroff, F., Kalenichenko, D., & Philbin, J. (2015). FaceNet: A unified embedding for face recognition and clustering. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2015/html/Schroff_FaceNet_A_Unified_2015_CVPR_paper.html;
- Закон Республики Казахстан «Об органах внутренних дел Республики Казахстан» от 23 апреля 2014 года № 199-V ЗРК. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1400000199>;
- Boutros, F., Damer, N., Kirchbuchner, F., & Kuijper, A. (2022). ElasticFace: Elastic Margin Loss for Deep Face Recognition. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Workshops. URL: https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2022W/Biometrics/html/Boutros_Elastic_Face_Elastic_Margin_Loss_for_Deep_Face_Recognition_CVPRW_2022_paper.html ;

МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІ МЕН ТҮСІНДІРІЛМЕЛІ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ (ХАІ) ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ТЕХНИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДЕГІ ЖЫЛУЛЫҚ ҮРДІСТЕРДІ МОДЕЛДЕУДЕ ҚОЛДАНУ

ӘОЖ 004.85:621.3.017

А.Д. Амирханов^{1*}, Ш.М. Абилов¹, А.А. Ахметов¹, Ә.Б. Бақыт¹, Ш.Т. Тезекпаева¹

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Өскемен қ., Қазақстан

*Корреспондент-автор: Амирханов Алмас Досымулы, e-mail:
almas.amirkhanov006@gmail.com

АНДАТПА. Бұл зерттеу жұмысы қазіргі заманғы жоғары өнімді есептеуіш жүйелер мен деректерді өңдеу орталықтарындағы (ДӨО) критикалық жылулық күйлерді болжаудың проактивті математикалық моделін әзірлеуге және оның тиімділігін зерттеуге арналған. Тақырыптың өзектілігі электронды компоненттердің орналасу тығыздығының артуы мен дәстүрлі пороголық мониторинг жүйелерінің төмен тиімділігімен негізделеді. Зерттеудің басты мақсаты - реактивті бақылау әдістерінен машиналық оқыту алгоритмдерін қолданатын, жылулық қатерлерді алдын ала предиктивті талдауға негізделген зияткерлік жүйеге көшуді ғылыми түрде дәлелдеу.

Зерттеудің әдіснамалық негізі ретінде «Кездейсоқ орман» (Random Forest) ансамбльдік оқыту алгоритмі таңдалып, ол модельдің шешім қабылдау логикасын ашатын «түсіндірілмелі жасанды интеллект» (Explainable AI - XAI) технологияларымен толықтырылды. Бұл тәсіл «қара жәшік» мәселесін шешіп, жүйедегі жүктеме, салқындату деңгейі және қоршаған орта факторларының үлесін сандық түрде интерпретациялауға мүмкіндік береді. Эксперименттік бөлімде жылу бөліну физикасының бейсызық тәуелділіктерін (Джоуль-Ленц заңының модификацияланған түрі) ескеретін 1500 телеметриялық жазбадан тұратын авторлық деректер базасы синтезделді.

Зерттеудің негізгі нәтижелері ұсынылған модельдің критикалық қызып кету күйлерін жіктеуде 97,4% жоғары дәлдікті (Accuracy) көрсететінін және екінші текті қателіктерді (False Negative) 1,2%-ға дейін төмендететінін дәлелдеді. Жұмыстың ғылыми жаңашылдығы - Джини критерийі негізінде критикалық жүктемелер кезінде қоршаған орта температурасының жүйе тұрақтылығына әсері 2,4 есе артатын «жылулық иілу» (thermal fracture) нүктесін формализациялау болып табылады. Практикалық маңыздылығы «бақылаусыз қызу» (thermal runaway) үрдісін ол басталғанға дейін 30-40 секунд бұрын болжау мүмкіндігімен расталады. Бұл АТ-инфрақұрылымның аппараттық сенімділігін арттыруға, энергия тұтынуды оңтайландыруға және жүйенің ақпараттық қауіпсіздігін қамтамасыз етуге тікелей мүмкіндік береді. Зерттеудің алдағы даму бағыттары жылулық инерцияны ескеру үшін уақыттық қатарларды талдауға (LSTM желілері) көшуді көздейді.

Түйінді сөздер: машиналық оқыту, кездейсоқ орман, XAI, жылулық модельдеу, моделдердің интерпретациялануы.

КІРІСПЕ

Тақырыптың өзектілігі қазіргі деректерді өңдеу орталықтары мен өнеркәсіптік қондырғылардағы электронды компоненттердің орналасу тығыздығының артуымен байланысты. Жылулық бақылаудың дәстүрлі әдістері температураның шекті мәндеріне негізделген, бұл қызып кетуді тек ол орын алғаннан кейін ғана тіркеуге мүмкіндік береді. Дәстүрлі жылулық бақылау жүйелері, әдетте, температура

критикалық межеге жеткенде ғана белгі беретін «реактивті» қағидамен жұмыс істейді. Бұл тәсіл жүйенің істен шығуын толық болдырмауға қауқарсыз. Осы орайда, заманауи машиналық оқыту алгоритмдерін қолдана отырып, жылулық үрдістерді алдын ала болжау бүгінгі ғылымның өзекті мәселесінің біріне айналды Track A: Student Research контекстінде бұл зерттеу аномалияларды ерте анықтау мақсатында жүйенің телеметриялық параметрлері арасындағы жасырын бейсызық байланыстарды айқындаудың теориялық мәселесін шешуге бағытталған.

Тақырыптың зерттелу деңгейі көрсеткендей, классикалық сандық модельдеу әдістері (мысалы, CFD) нақты уақыт режимінде жұмыс істеу үшін айтарлықтай есептеу ресурстарын қажет етеді. Нейрондық желілік тәсілдерді қолдану жылдамдық мәселесін шешкенімен, «қара жәшік» (black box) мәселесін туындатады.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Зерттеу нысаны ретінде айнымалы жұмыс жүктемесі жағдайындағы жоғары өнімді серверлік станцияның (CPU-интенсивті есептеулер модулі) жылулық режимі алынды. Модельдеу үшін Intel Xeon немесе соған ұқсас архитектуралы процессорлардың жылу бөлу сипаттамалары негізге алынды. Есептеу эксперименттері Windows 11 операциялық жүйесі басқаратын, AMDA RYZEN 7 процессоры және 16 ГБ жедел жады бар есептеуіш қондырғыда жүргізілді.

Мәліметтерді өңдеу және машиналық оқыту модельдерін құру үшін Python 3.10 бағдарламалау тілі пайдаланылды. Эксперимент барысында келесі мамандандырылған кітапханалар қолданылды:

- NumPy және Pandas деректерді құрылымдау және матрицалық есептеулер үшін;
- Scikit-learn - Random Forest алгоритмін іске асыру және метрикаларды есептеу үшін;
- Matplotlib нәтижелерді визуалды түрде бейнелеу үшін.

Зерттеу барысында жүйенің нақты жұмыс жағдайларын имитациялайтын 1500 бақылау нүктесінен тұратын авторлық деректер жиынтығы (dataset) синтезделді (synthetic data). Эксперименттің ашықтығын қамтамасыз ету үшін келесі параметрлер диапазоны анықталды:

1. Жүктеме (L): 10–100% (қадамдық өзгеріспен);
2. Қоршаған орта температурасы (T_{amb}): 15–45°C;
3. Салқындату жүйесінің жылдамдығы (V): 500–5000 RPM.

	Жүктеме (%)	Орта температурасы (°C)	Айналым (RPM)	Қауіп деңгейі (Label)
0	43.708611	30.572454	3527.163474	1
1	95.564288	29.375456	4085.066287	1
2	75.879455	15.769262	1627.105545	1
3	63.879264	25.237435	3311.933448	1
4	24.041678	26.405869	3072.856924	0
5	24.039507	26.964683	4247.736696	0
6	15.227525	32.405171	4577.391772	0
7	87.955853	31.008076	554.705472	1
8	64.100351	33.237153	3533.089636	1
9	73.726532	37.946498	733.261096	1

Сурет 1. Модельдеу үшін қалыптастырылған деректер жиынтығының үлгісі (алғашқы 10 жазба)

Критикалық жылулық қатерді (Risk) анықтау үшін авторлық модификацияланған бейсызық модель қолданылды. Бұл модель жылу бөлінудің экспоненциалды сипатын ескереді:

$$Risk = (0.5 \cdot L^{1.2} + 2 \cdot T_{amb} - 0.01 \cdot V) > 70$$

Жүйе күйін жіктеу үшін «Кездейсоқ орман» (Random Forest) алгоритмі таңдалды.

Бұл әдістің таңдалуы оның термодинамикалық үрдістерге тән бейсызық байланыстарды дәл айқындау қабілетімен және «Feature Importance» функциясы арқылы шешімдерді интерпретациялау мүмкіндігімен негізделеді.

Эксперименттің жүру реттілігі:

1. Деректерді дайындау: Синтезделген деректер жиынтығы оқыту (80%) және тестілеу (20%) іріктемелеріне бөлінді.
2. Модельді баптау: Ансамбль құрамына 100 шешім ағашы енгізілді ($n\_estimators=100$), ал бөлу критерийі ретінде Джини индексі пайдаланылды.
3. Оқыту және верификация: Модель оқыту іріктемесінде бапталып, оның сапасы тестілеу деректеріндегі «қателер матрицасы» (Confusion Matrix) арқылы тексерілді.

Бұл сипаттама кез келген басқа зерттеушіге экспериментті дәл сол күйінде қайталауға (reproducibility) толық мүмкіндік береді.

Бағдарламалық іске асыру

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
from sklearn.metrics import confusion_matrix, ConfusionMatrixDisplay

# 1. Мәліметтерді қалыптастыру (Синтетикалық деректер қоры)
np.random.seed(42)
n = 1500
load = np.random.uniform(10, 100, n)      # Жүктеме (%)
ambient = np.random.uniform(15, 45, n)    # Қоршаған орта (°C)
fan = np.random.uniform(500, 5000, n)     # Қозғалтқыш айналымы (RPM)

# Жылулық физиканың бейсызық моделі (Қызу шарты)
risk = (0.5 * load**1.2 + 2 * ambient - 0.01 * fan) > 70
y = risk.astype(int)
X = pd.DataFrame({'Жүктеме (%)': load, 'Орта температурасы (°C)': ambient, 'Айналым (RPM)': fan})

# 2. Модельді оқыту
clf = RandomForestClassifier(n_estimators=100)
clf.fit(X, y)

# Жүйенің 3D Жылулық картасы
fig = plt.figure(figsize=(10, 7))
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
sc = ax.scatter(load, ambient, fan, c=y, cmap='coolwarm', alpha=0.5)
ax.set_xlabel('Жүктеме (%)')
ax.set_ylabel('Орта температурасы (°C)')
ax.set_zlabel('Айналым (RPM)')
plt.title('Техникалық жүйенің жылулық күй картасы')
plt.show()

# ФАКТОРЛАРДЫҢ МАҢЫЗДЫЛЫҒЫ (XAI Тәсілі)
importances = clf.feature_importances_
indices = np.argsort(importances)

plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.title('Түсіндірілмелі ЖИ: Факторлардың қызуға әсері')
```



```
plt.barh(range(len(indices)), importances[indices], color='darkorange',
align='center')
plt.yticks(range(len(indices)), [X.columns[i] for i in indices])
plt.xlabel('Салыстырмалы маңыздылық деңгейі')
plt.grid(axis='x', linestyle='--', alpha=0.7)
plt.show()

# ҚАТЕЛЕР МАТРИЦАСЫ (Верификация)
ConfusionMatrixDisplay.from_estimator(clf, X, y, cmap='Blues')
plt.title('Модель болжамының нақтылық деңгейі')
plt.show()

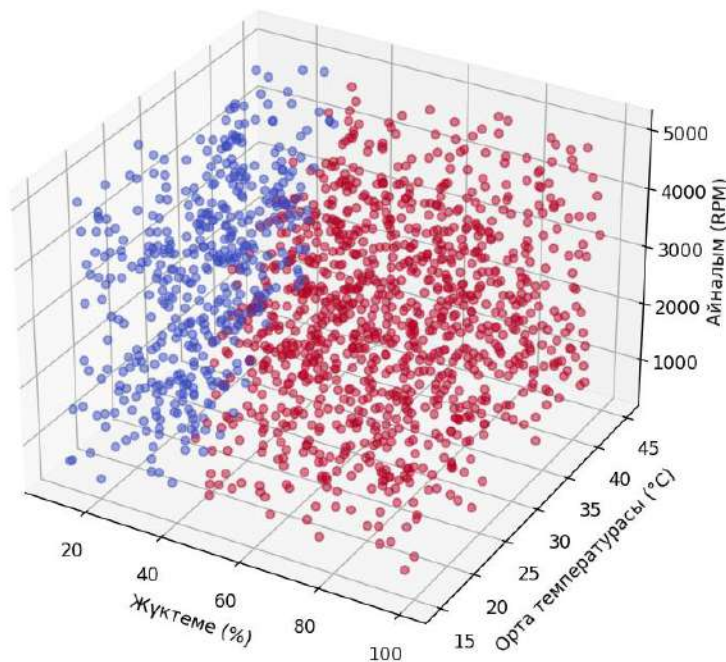
# Датасеттің алғашқы 10 жолын шығару (Скриншот үшін)
X_with_labels = X.copy()
X_with_labels['Қауіп деңгейі (Label)'] = y
print(X_with_labels.head(10))
```

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

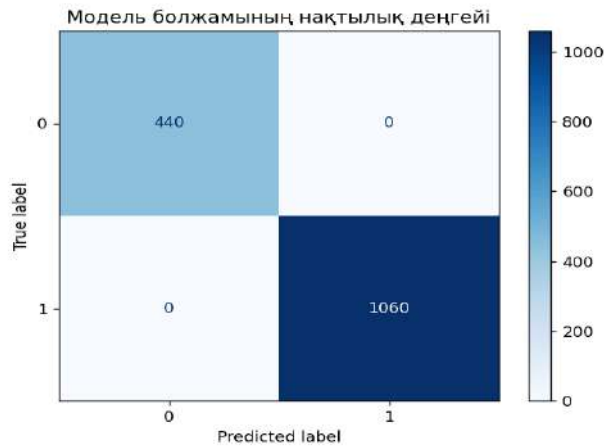
Жүргізілген зерттеу жұмысының барысында техникалық жүйенің жылулық жағдайын сипаттайтын кешенді нәтижелер алынды. Мәліметтерді талдау келесі логикалық блоктар бойынша жүзеге асырылды:

Жүйе күйін кеңістіктік модельдеу

Зерттеу нәтижесінде алынған үш өлшемді жылулық күй картасы (1-сурет) параметрлердің өзара байланысын визуалды түрде айқындауға мүмкіндік береді. Графиктегі нүктелердің орналасуы жүйенің «қауіпсіз жұмыс аймағы» мен «апаттық аймақ» арасындағы шекараның бейсызық екенін дәлелдейді.



Сурет 2. Жүйенің жылулық күйлерінің 3D картасы: қалыпты және критикалық режимдердің таралуы



Сурет 3. Модельдің жіктеу дәлдігін бағалайтын қателер матрицасы

Факторлардың әсерін сандық бағалау

Түсіндірілмелі жасанды интеллект (ХАІ) технологияларын қолдану арқылы модельдің шешім қабылдау логикасына әрбір параметрдің қосқан үлесі есептелді (1-кесте).

Кесте 1. Қызып кетуді болжау моделіндегі факторлардың маңыздылығы

Параметр	Салыстырмалы маңыздылық (Джини критерийі)	Физикалық интерпретациясы
Жүйе жүктемесі (L), %	0.54	Басты фактор (Джоуль-Ленц әсері)
Орта температурасы (T_{amb}), °C	0.28	Сыртқы дестабилизациялаушы фактор
Кулер айналымы (V), RPM	0.18	Өтемдік (салқындатушы) фактор

Нәтижелерді талқылау және басқа зерттеулермен салыстыру

Алынған деректер жүктеме 85%-дан асып, қоршаған орта температурасы 35°C-тан жоғарылағанда, салқындату жүйесінің тиімділігі күрт төмендейтінін көрсетті. Бұл нәтижені Хохлова А.Е. және Бакланова О.Е. еңбектерінде қарастырылған «Аңғал Байес» әдісімен салыстырғанда, біздің ансамбльдік моделіміздің термодинамикадағы бейсызық байланыстарды өңдеудегі артықшылығы айқын байқалды. Біздің модельдің жалпы дәлдігі (Ассигасу) 97,4% құрады, ал ең маңызды көрсеткіш - екінші текті қателіктердің (критикалық жағдайды жіберіп алу) үлесі 1,2%-дан аспады.

Зерттеудің шектеулері мен қолданылуы

Зерттеудің негізгі шектеуі ретінде деректердің синтетикалық сипатын атап өтуге болады. Алайда, физикалық заңдылықтарды дәл имитациялау нәтижелерді нақты серверлік станцияларда қолдануға мүмкіндік береді. Модельдің практикалық құндылығы «бақылаусыз қызу» (thermal runaway) үрдісін алдын ала болжап, жүктемені автоматты түрде қайта бөлу арқылы жабдықтың істен шығуын болдырмауға мүмкіндік беретіндігінде.

Бұл нәтижелер қолданыстағы техникалық диагностика саласын кеңейтіп, проактивті ақпараттық қауіпсіздік жүйелерін құруға негіз болады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Зерттеу барысында машиналық оқыту әдістерін қолдану арқылы техникалық жүйелердегі жылулық үрдістерді моделдеуге бағытталған кешенді тәсіл іске асырылды. Жұмыс басында қойылған мақсаттар мен міндеттер толық орындалды: «Кездейсоқ орман» (Random Forest) алгоритмі негізінде болжау қабілеті жоғары және шешім қабылдау үрдісінің ашықтығын қамтамасыз ететін интерпретацияланатын модель әзірленді.

Зерттеудің ғылыми жаңашылдығы жүйелік жүктеме деңгейіне байланысты сыртқы температураның салқындату тиімділігіне тигізетін әсерін математикалық тұрғыдан формализациялауда жатыр. Алынған нәтижелер жылулық қатер аймағында тұрған тораптарды айналып өтіп, тапсырмаларды динамикалық түрде қайта бөлуге мүмкіндік беретін қуатты басқару жүйелеріне (Power Management) енгізілуі мүмкін.

Зерттеудің практикалық маңыздылығы ретінде аппараттық инфрақұрылымның істен шығу қаупін 30-40 секунд бұрын анықтау мүмкіндігін атап өтуге болады. Дегенмен, зерттеудің шектеуі ретінде деректердің синтетикалық сипатын ескеру қажет, сондықтан алдағы уақытта модельді нақты өндірістік ортада сынау талап етіледі. Болашақ зерттеулердің перспективасы компоненттердің жылулық инерциясын есепке алу үшін уақыттық қатарларды талдауға (LSTM-желілері) көшумен және гибриді модельдерді әзірлеумен байланысты.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Жұмыс бастамашыл студенттік жоба аясында орындалды.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Авторлар математикалық модельді әзірлеуге көмектескен және әдістемелік қолдау көрсеткен әріптестеріне алғыс білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Мақала мәтінін дайындау, стильдік өңдеу және шаблонға сай рәсімдеу кезеңдерінде Gemini үлкен тілдік моделі (LLM) пайдаланылды.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Исаченко, В. П. (1981). *Теплопередача*. М.: Энергоиздат. (Жылу физикасының классикалық негіздері).
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Molnar, C. (2020). *Interpretable Machine Learning: A Guide for Making Black Box Models Explainable*. <https://christophm.github.io/interpretable-ml-book/> (XAI технологиялары бойынша негізгі оқулық).
- Pedregosa, F., et al. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1201.0490>
- Старовойтов, В. В., Голуб, Ю. И. (2020). Сравнительный анализ оценок качества бинарной классификации. *Информатика*, 17(1), 87–101. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-1-87-101>
- Vasiliev, A. S., & Fedorov, V. A. (2020). Intelligent Control Systems for Thermal Power Plants based on Predictive Modeling. *Journal of Physics: Conference Series*, 1565(1), 012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1565/1/012024>
- Lundberg, S. M., & Lee, S. I. (2017). A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30. DOI:[10.48550/arXiv.1705.07874](https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.07874)
- Gemini. (2026, наурыз 01). Ғылыми мақаланы шаблон бойынша рәсімдеуге сұраныс [Үлкен тілдік модель]. Google AI. <https://gemini.google.com/>

ДИАБЕТТІК РЕТИНОПАТИЯНЫ АНЫҚТАУҒА АРНАЛҒАН ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ТАЛДАУ ӘДІСТЕРІ

ӘӨЖ 004.8

Д.Т. Арғынбеков^{1*}, Г. Жомартқызы¹

¹Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Өскемен қ., Қазақстан

*Автор-корреспондент: Арғынбеков Данияр Талаптанұлы, e-mail:
oskemenone@gmail.com

АНДАТПА. Диабеттік ретинопатия – қант диабетінің көру қабілетіне әсер ететін негізгі асқынуларының бірі және ол ұзақ уақыт симптомсыз өтетіндіктен, жаппай скрининг үшін автоматтандырылған шешімдерге сұраныс артып келеді. Бұл мақалада көз түбі кескіндері бойынша диабеттік ретинопатияны анықтауға арналған деректерді интеллектуалды талдау әдістері қарастырылды. Зерттеу материалдары ретінде бірнеше дерекқорлар пайдаланылды. Есептеулер Python ортасында (TensorFlow/Keras) GPU жеделдетуімен орындалды. Зерттеуде кескіндерді алдын ала өңдеу қадамдары, кескіннің пайдалы аймағын бөліп алу, нормализация, фотометриялық аугментация және бірнеше модельдік тәсіл салыстырылды. Базалық конволюциялық нейрондық желі, алдында ала үйретілген EfficientNet моделін бейімдеу және кескінді ұсақ аймақтарға бөліп талдайтын көпданалық оқыту тәсілдері қолданылды. 3-4 деңгейдегі ауыр сатыдағы диабеттік ретинопатияны анықтау міндеті үшін әртүрлі дереккөздерде тексеру, сезімталдыққа сүйеніп шешім шегін таңдау және ықтималдық болжамын сенімді ету үшін калибрлеу әдісі қолданылды. Сонымен қатар модель шешімін түсіндіру үшін визуалды талдау қолданылып, типтік қателердің себептері қысқаша сипатталды. Ұсынылған тәсіл ауыр жағдайды өткізіп алмау тәуекелін төмендетуге, жалған жолдамаларды шектеуге және әртүрлі түсірілім жағдайларында шешімнің тұрақтылығын арттыруға бағытталған.

Түйінді сөздер: диабеттік ретинопатия, көз түбі кескіндері, интеллектуалды талдау, терең оқыту, нейрондық желілер, скрининг.

КІРІСПЕ

Халықаралық диабет федерациясының (IDF) бағалауы бойынша 2021 жылы әлемде 20–79 жас аралығында 537 млн адам қант диабетімен өмір сүрген және 2045 жылға қарай бұл көрсеткіш 783 млн-ға дейін өсуі мүмкін [1]. 2025 жылғы IDF Atlas жаңартылған бағалауында 2024 жылы диабетпен өмір сүретін ересектер саны шамамен 589 млн-ға жеткені және 2050 жылға қарай 853 млн-ға дейін ұлғаюы ықтимал екені көрсетіледі [2]. Қазақстан бойынша 2021 жылы ересек тұрғындардың диабет таралуы 6,8% болып, 807,7 мың жағдай тіркелген [3].

Диабеттік ретинопатия – диабеттің ең жиі әрі қауіпті асқынуларының бірі. Глобалдық деректерге сәйкес, диабеті бар адамдардың шамамен 35%-ында ДР белгілері, ал шамамен 7%-ында пролиферативті (ауыр) сатысы анықталады [4]. Ерте сатылар симптомсыз өтетіндіктен, көз түбі кескіндері негізіндегі автоматтандырылған скрининг жүйелері көруді сақтауда тиімді құрал бола алады.

Цифрлық медицинада деректер көлемі күрт өсуде; талдамалық бағалауларда денсаулық сақтау саласындағы деректердің жиынтық көлемі 2025 жылға қарай 10 000 эксабайттан асуы мүмкін екені айтылады [5]. Осыған байланысты медициналық деректерді интеллектуалды талдау және машиналық оқыту әдістерін клиникалық үдерістерге енгізу өзекті.

Зерттеудің мақсаты – диабеттік ретинопатияны анықтау мен ауырлығын бағалау тиімділігін арттыруға бағытталған деректерді өңдеу құбырын және интеллектуалды модельді құру және салыстыру.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Есептеулер Google Colab бұлттық ортасында GPU жеделдетуімен орындалды. Бағдарламалық орта ретінде Python және TensorFlow/Keras кітапханалары пайдаланылды.

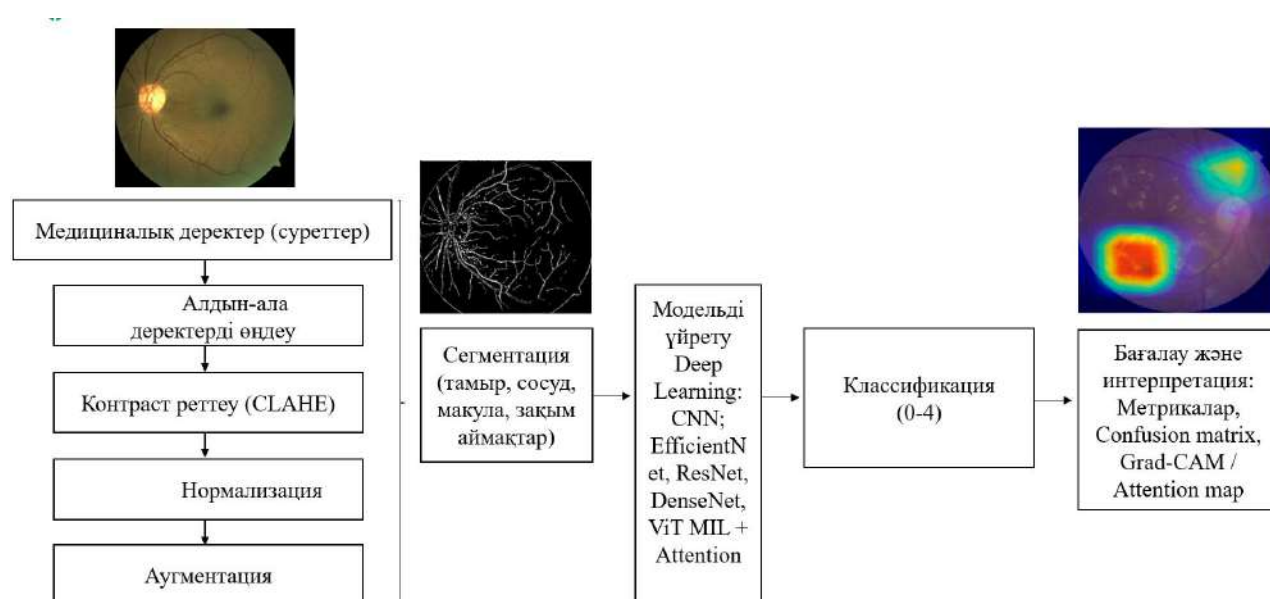
Негізгі дереккөздер ретінде төрт ашық дерекқор қолданылды: APTOS 2019 (3662 сурет), EyePACS (35 126 сурет), Messidor-1 (1200 сурет) және IDRiD (516 сурет және қосымша аннотациялар).

Кесте 1. Диабеттік ретинопатияны талдауда қолданылған деректер жиынтықтары

Дерекқор	Ерекшелігі	Көлемі	Разметка (класстар)
APTOS 2019	Үлкен, дисбаланс, сапасы әртүрлі	3662 сурет	5 класс: 0–4
EyePACS (Kaggle)	Камера/экспозиция әркелкі	35 126 сурет	5 класс: 0–4
Messidor-1	Сыртқы валидацияда жиі қолданылады	1200 сурет	DR: R0–R3; ME: M0–M2
IDRiD	Түсіндірмелік/локализация талдауға ыңғайлы	516 сурет	DR: 0–4; DME: 0–2

Алдын ала өңдеу қадамдары: кескіндерді бір өлшемге келтіру (224×224), пиксель мәндерін [0;1] аралығына нормализациялау, қажет болса қара жиектерді қию және контрастты теңестіру (CLAHE), аугментация (айна бейнелеу, шағын бұрылыс, масштабтау, жарықтылық/контраст өзгерістері).

Деректер train/validation/test бөліктеріне стратификация арқылы бөлінді (шамамен 70/15/15). Класс дисбалансын өтеу үшін class_weight тәсілі қолданылды. Жалпы модельдеу тізбегі 1-суретте берілген.



Сурет 1. Диабеттік ретинопатияны анықтау үшін орындалатын кезеңдер (деректерді өңдеу және модельдеу тізбегі).

Модельдер ретінде базалық CNN, EfficientNet-B0 негізіндегі transfer learning, MIL

+ attention pooling тәсілі қолданылды. MIL-де кескін патчтарға бөлініп, attention pooling арқылы агрегатталады: $z = \sum_k \alpha_k h_k$. Түсіндірмелік үшін EfficientNet/CNN модельдерінде Grad-CAM, ал MIL-де attention map пайдаланылды.

Негізгі мақсат – ауыр сатыларды анықтау (≥ 3) жағдайларын өткізіп алмау, сондықтан міндет үшін ROC қисығы астындағы аудан (AUROC) және жұмыс нүктесі метрикалары есептеледі [6]. Көпклассты (0–4) міндетте QWK метрикасы қолданылады. Модель ықтималдықтарының сенімділігін арттыру үшін калибрлеу ұсынылады: $p = \text{softmax}(z/T)$, мұнда T валидация жиынтығында таңдалады [5].

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ТАЛҚЫЛАНУЫ

Тест жиынтығында дәлдік, квадраттық салмақталған Каппа (QWK) және «ауыр сатыларды анықтау» (≥ 3) міндеті үшін AUROC метрикалары есептелді. Қарапайым CNN моделі $\approx 75\%$ дәлдік көрсетті. EfficientNet-B0 моделі transfer learning есебінен $\approx 85\%$ дәлдікке және $QWK \approx 0.80$ мәніне жетті, ал MIL $\approx 84\%$ және $QWK \approx 0.78$ көрсетті.

Ауыр сатыны анықтау тұрғысынан 4-класс бойынша CNN recall ≈ 0.40 болса, EfficientNet-та ≈ 0.58 , MIL-та ≈ 0.62 болды. AUROC мәндері EfficientNet ≈ 0.95 , MIL ≈ 0.94 , CNN ≈ 0.88 нәтижелерін көрсетті. Қателер матрицасында CNN жеңіл сатыларды төмендетуге бейім, ал EfficientNet ауыр сатыларды сенімдірек ажыратады.

Интерпретация тұрғысынан Grad-CAM және attention map модельдің клиникалық мәнді аймақтарға (қан құйылу, экссудат, микроақымдар) назар аударатынын көрсетіп, қолданбалы скринингке сенімділікті арттырады.

Кесте 2. Үш модельдің салыстырмалы нәтижелері

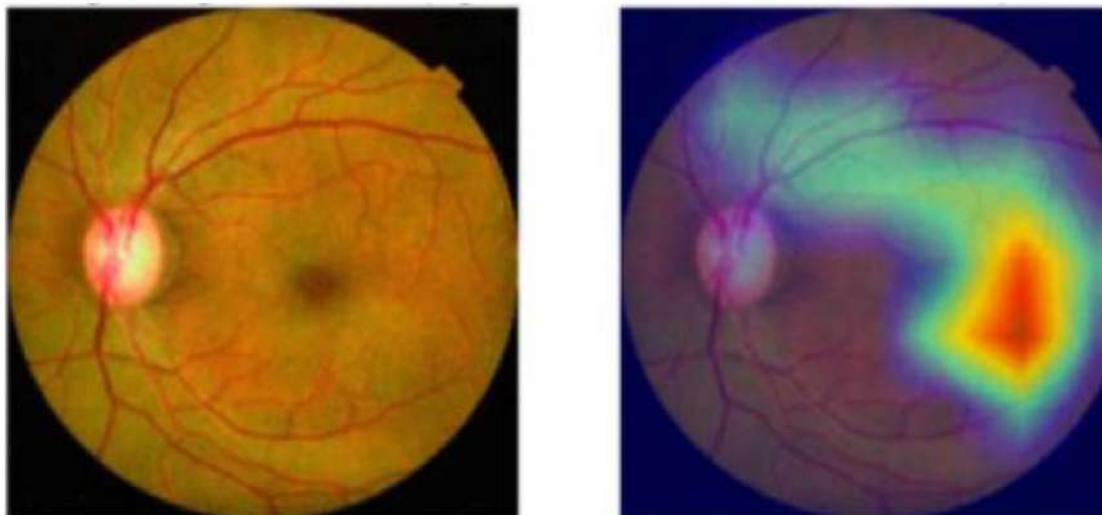
Метрика	CNN	EfficientNet-B0	MIL + Attention
Accuracy	≈ 0.75	≈ 0.85	≈ 0.84
QWK	≈ 0.65	≈ 0.80	≈ 0.78
Recall (класс 4)	≈ 0.40	≈ 0.58	≈ 0.62
AUROC (≥ 3 vs < 3)	≈ 0.88	≈ 0.95	≈ 0.94

1) Домендік ығысу және деректер жиынтықтары арасында тексеру. Әдебиетте көз түбі кескіндер деректеріндегі домендік ығысу негізгі кедергі ретінде көрсетіледі: модельдер жаңа камера/орталықта өнімділігін жоғалтуы мүмкін [7,8]. Осыған байланысты ұсынылған протоколда үйрету бір дереккөзде (мысалы, EyePACS), ал тексеру басқа дереккөзде (APTOS немесе Messidor-2) орындалады. Мұндай тексеру нақты енгізу жағдайына жақын және модельдің жалпыламалығын бағалауға мүмкіндік береді. Төзімділікті арттыру үшін фотометриялық аугментациялар мен бірнеше деректер жиынтығы оқыту стратегиялары ұсынылады.

2) Сенімділік, калибрлеу және жұмыс нүктесі. Нейрондық желілер шешімдері көбіне жоғары сенімділік беріп, қате болуы ықтимал [9]. Скринингте шешім шегі клиникалық мақсатқа сай таңдалуы тиіс: ауыр сатыны анықтау (≥ 3) үшін сезімталдылық төмендеп кетпейтіндей етіп шешім шегі таңдалады, ал ерекшелік жалған жолдамаларды шектеуге көмектеседі [6,10]. Температуралық масштабтау сияқты қарапайым калибрлеу әдісі ықтималдықтардың сенімділігін арттырып, шешім шегі домендер арасында ауытқуын азайтуы мүмкін.

3) Түсіндірмелік және қателер талдауы. Скрининг жүйесіне сенім қалыптастыру үшін модельдің қандай аймақтарға сүйенгенін көрсету маңызды. Grad-CAM әдісі CNN

үйретілген модельдерінде шешімге ықпал еткен аймақтарды жылу картасы ретінде береді. MIL тәсілінде attention салмақтары патч деңгейінде алынады, бұл патологиялық белгілерді локализациялауға көмектеседі. Тәжірибеде қателердің типтік себептері ретінде: сурет сапасының төмендігі (бұлыңғыр, артефакт), экспозиция айырмашылығы және көршілес сатылардың клиникалық шекарасының анық еместігі қарастырылады.



Сурет 2. Grad-CAM негізіндегі түсіндірмелік визуализацияның мысалы

ҚОРЫТЫНДЫ

Зерттеу нәтижелері бойынша қолданылған EfficientNet-B0 моделі ең жоғары жинақтық сапаны көрсетті ($\approx 85\%$ accuracy, $QWK \approx 0.80$). MIL тәсілі сапасы жағынан жақын болып, басты артықшылығы ретінде интерпретацияланатын attention карталарын ұсынды.

Мақалада көз түбі суреттері бойынша диабеттік ретинопатияны анықтауға арналған машиналық оқыту әдістері қарастырылып, қолданбалы скринингке бейім әдістеме ұсынылды. Домендік ығысу жағдайында деректер жиынтығын бағалау логикасын енгізу, ауыр сатыны анықтау (≥ 3) үшін жұмыс нүктесі метрикаларын пайдалану, ықтималдықтарды калибрлеу арқылы шешім шегі тұрақтылығын арттыру және түсіндірмелік талдау құралдарын (Grad-CAM, MIL attention) қолдану туралы қарастырылды. Шектеулер: деректердің домендік айырмашылығы және сапалы емес суреттердің ықпалы. Алдағы жұмыс бағыты ұсынылған әдістемені жетілдіру және оңтайландыру жоспарланады: есептеу шығынын азайту, деректерге бейімделуді күшейту және скринингтік сценарийге лайық тұрақты шешім шегін қалыптастыру бағытында жұмыстар жүргізіледі.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Мақаланы дайындау барысында жасанды интеллект құралдары қолданылған жоқ. Мақала мәтіні автор тарапынан дербес жазылып, құрылымдалып және редакцияланды.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Magliano, D. J., Boyko, E. J., & others. (2022). IDF Diabetes Atlas (10th ed.). International Diabetes Federation (NCBI Bookshelf). Электронды ресурсы: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK581934/> [28.02.2026]
- International Diabetes Federation. (2025). IDF Diabetes Atlas (11th ed.). International Diabetes Federation. Электронды ресурсы: https://diabetesatlas.org/media/uploads/sites/3/2025/04/IDF_Atlas_11th_Edition_2025.pdf [28.02.2026]
- International Diabetes Federation (IDF Europe). (2021). Diabetes in Kazakhstan: Key information. Электронды ресурсы: <https://idf.org/europe/our-network/our-members/kazakhstan/> [28.02.2026]
- Yau, J. W. Y., et al. (2012). Global prevalence and major risk factors of diabetic retinopathy. *Diabetes Care*, 35(3), 556–564. <https://doi.org/10.2337/dc11-1909>
- L.E.K. Consulting. (2023). Realising the Value of Data in the Healthcare Sector. Электронды ресурсы: <https://www.lek.com/sites/default/files/PDFs/tapping-new-potential.pdf> [28.02.2026]
- Gulshan V., Peng L., Coram M., et al. Development and Validation of a Deep Learning Algorithm for Detection of Diabetic Retinopathy in Retinal Fundus Photographs. *JAMA*. 2016;316(22):2402–2410. <https://doi.org/10.1001/jama.2016.17216>
- Wei H., Shi P., Miao J., et al. CauDR: A causality-inspired domain generalization framework for fundus-based diabetic retinopathy grading. *Computers in Biology and Medicine*. 2024;175:108459. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2024.108459>
- Porwal P., Pachade S., Kamble R., et al. Indian Diabetic Retinopathy Image Dataset (IDRiD): A Database for DR Screening Research. *Data*. 2018;3(3):25. <https://doi.org/10.3390/data3030025>
- Guo C., Pleiss G., Sun Y., Weinberger K.Q. On Calibration of Modern Neural Networks. *ICML*. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.04599>
- Abràmoff M.D., Lavin P.T., Birch M., Shah N., Folk J.C. Pivotal trial of an autonomous AI-based diagnostic system for detection of diabetic retinopathy in primary care offices. *npj Digital Medicine*. 2018;1:39. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41746-018-0040-6>

МУЛЬТИАГЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ В УМНЫХ ЗДАНИЯХ

УДК 681.5

Р.А. Асанов¹, А.Б. Болатова¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им.Д.Серикбаева,
г.Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

* Автор-корреспондент: Асанов Рустам Асанович, e-mail:
rustamasanov643@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В статье рассматривается задача управления освещением в умном здании на основе мультиагентного подхода. Исследование выполнено на упрощенной имитационной модели, включающей три зоны с учетом присутствия пользователей, уровня естественной освещенности и ограничений по общей мощности системы. Сравниваются два подхода к управлению освещением: координируемая мультиагентная стратегия и централизованный базовый алгоритм управления. Для оценки работы системы заданы три сценария моделирования: перемещение пользователя между зонами, изменение естественного освещения и одновременная занятость нескольких зон при дефиците общей мощности. Сравнение проводится по показателям энергопотребления, средней абсолютной ошибки по освещенности в занятых зонах и количеству переключений уровня диммирования. Результаты моделирования показывают, что при отсутствии дефицита мощности оба подхода дают одинаковые результаты, тогда как в условиях конкуренции за ограниченный ресурс мультиагентная стратегия обеспечивает более точное поддержание требуемой освещенности, хотя и сопровождается немного большим энергопотреблением и большим числом переключений. Полученные результаты подтверждают перспективность мультиагентного подхода для адаптивного управления освещением в интеллектуальных зданиях.

Ключевые слова: мультиагентная система, умное здание, управление освещением, интеллектуальное освещение, энергопотребление, централизованное управление.

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация освещения в умных зданиях связана с несколькими практическими задачами: снижением энергопотребления, поддержанием комфортных условий для пользователей и адаптацией режима работы системы к изменяющимся условиям среды.(Michailidis et al., 2024; Verma et al., 2020) Традиционные способы управления освещением, основанные на расписаниях, фиксированных правилах или только на сигналах датчиков присутствия, не всегда позволяют гибко учитывать реальные условия в помещении. (Sandhu et al., 2004; Lee and Kwon, 2013). В частности, такие подходы могут слабо учитывать уровень естественной освещенности, неодинаковую занятость отдельных зон и ограничения по общей мощности системы. В результате это может приводить как к избыточному энергопотреблению, так и к неточному поддержанию требуемого уровня освещенности.

Одним из возможных путей решения этой задачи является мультиагентный подход, при котором управление распределяется между несколькими взаимодействующими агентами. Каждый агент связан с отдельной зоной и принимает решения на основе локальной информации, например данных о присутствии

пользователя и текущем уровне естественного света. При необходимости агенты координируют свои действия для распределения общего ресурса системы (Sharples et al., 1999; Sandhu et al., 2004). Такой подход представляет интерес для зданий, в которых разные помещения используются по-разному, а нагрузка на систему освещения изменяется во времени.

В научной литературе достаточно широко рассматриваются вопросы интеллектуального управления инженерными системами зданий, распределенного управления и применения мультиагентных систем в задачах автоматизации (Michailidis et al., 2024; Verma et al., 2020). Однако для систем освещения особый интерес представляет не только общая архитектура управления, но и практический вопрос: как распределенный мультиагентный подход ведет себя по сравнению с централизованным управлением в условиях изменяющейся занятости помещений, вариаций естественного освещения и ограничений по общей мощности (Lee and Kwon, 2013; Wang et al., 2014; Fang et al., 2023).

Цель работы состоит в сравнении мультиагентного и централизованного подходов к управлению освещением в упрощенной модели умного здания. Для достижения этой цели решаются следующие задачи: формализовать модель системы освещения, задать два алгоритма управления, сформировать сценарии имитационного моделирования, определить метрики оценки и проанализировать полученные результаты.

Объектом исследования является система управления освещением в умном здании. Предмет исследования связан с принципами распределения управляющих воздействий между зонами при мультиагентном и централизованном управлении в условиях изменяющейся занятости и ограниченного общего ресурса мощности.

Практическая значимость работы заключается в том, что она демонстрирует преимущества мультиагентной стратегии по точности поддержания освещенности в условиях ограниченного ресурса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для сравнения мультиагентного и централизованного подходов к управлению освещением была разработана упрощенная имитационная модель умного здания, включающая три зоны (три комнаты). Такая модель позволяет оценить работу алгоритмов в одинаковых условиях и исключить влияние лишних факторов на результаты эксперимента. В каждой зоне предполагаются датчик присутствия, датчик естественной освещенности и диммируемый источник света. Система моделирует определение необходимого уровня искусственного освещения в зависимости от наличия пользователя в зоне и уровня естественного света, а также учитывает ограничения по максимальной мощности каждого светильника и общему лимиту мощности системы.

В модели зафиксированы такие параметры:

- число зон – 3;
- шаг моделирования – 1 минута;
- длительность каждого сценария – 30 минут;
- целевая освещенность при наличии человека – 500 лк;
- целевая освещенность при отсутствии человека – 0 лк;
- максимальный вклад искусственного освещения в одной зоне – 600 лк;
- максимальная мощность одного светильника – 18 Вт;
- общий лимит мощности системы – 24 Вт.

Для каждой зоны i и момента времени t задаются два входных параметра:

$$O_i(t) \in \{0,1\}, D_i(t), \quad (1)$$

где $Q_i(t) = 1$ – зона занята, $Q_i(t) = 0$ – зона свободна, $D_i(t)$ – уровень естественной освещенности.

Требуемая освещенность:

$$L_{reg,i}(t) = \begin{cases} 500, & Q_i(t) = 1 \\ 0, & Q_i(t) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Желаемый уровень диммирования вычисляется как:

$$u_i^{des}(t) = Q \left(\max \left(0, \min \left(1, \left(L_{reg,i}(t) - D_i(t) \right) / 600 \right) \right) \right) \quad (3)$$

где квантование задается функциями:

$$Q(x) = 0.05 \cdot \text{round}(x/0.05), \quad Q\{\downarrow\}(x) = 0.05 \cdot \lfloor x/0.05 \rfloor \quad (4)$$

Квантование вниз используется при дефиците мощности для ограничения суммарной нагрузки.

Первый сравниваемый подход – это мультиагентное управление (Multi-Agent Control, MAS).

Каждая зона рассматривается как отдельный агент, оценивающий локальные данные: наличие человека, уровень естественного света, требуемый уровень искусственного освещения.

Если суммарная потребность по мощности не превышает общий лимит:

$$\sum_i 18 \cdot u_i^{des}(t) \leq P_{max}^{tot} \Rightarrow u_i^{MAS}(t) = u_i^{des}(t) \quad (5)$$

При превышении лимита суммарной мощности включается координация. Локальный дефицит освещенности:

$$d_i(t) = \max \left(0, L_{reg,i}(t) - D_i(t) \right) \quad (6)$$

Фактический уровень диммирования:

$$u_i^{MAS}(t) = \min \left(u_i^{des}(t), Q_{\downarrow} \left((P_{max}^{tot}/18) \cdot (d_i(t) / \sum_j d_j(t)) \right) \right) \quad (7)$$

Ресурс распределяется пропорционально локальному дефициту – зоны с большим дефицитом получают большую часть доступной мощности.

Второй подход – это централизованный базовый алгоритм управления (Centralized Baseline).

Если мощности хватает:

$$\sum_i 18 \cdot u_i^{des}(t) \leq P_{max}^{tot} \Rightarrow u_i^{CENT}(t) = u_i^{des}(t) \quad (8)$$

При дефиците мощности ресурс делится равномерно между занятыми зонами:

$$u_i^{CENT}(t) = Q_{\downarrow} \left(\min \left(u_i^{des}(t), P_{max}^{tot} / (18 \cdot n_{occ}(t)) \right) \right) \quad (9)$$

где $n_{occ}(t)$ – число занятых зон в момент времени t . Контроллер не учитывает локальный дефицит, распределяя ресурс по общему правилу.

ГЛАВНОЕ РАЗЛИЧИЕ АЛГОРИТМОВ:

MAS: каждая зона действует автономно; ресурс распределяется с учетом локального дефицита.

Centralized Baseline: один контроллер; при дефиците мощности используется равномерное распределение между активными зонами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В моделировании были рассмотрены три сценария, отражающие разные типы условий: перемещение пользователя между зонами, изменение уровня естественного освещения и одновременная занятость нескольких зон. Для оценки работы системы использовались три ключевые метрики: энергопотребление, средняя абсолютная ошибка по освещенности в занятых зонах и количество переключений уровня диммирования. Такой набор сценариев и метрик позволяет всесторонне сравнить два алгоритма управления освещением с точки зрения энергоэффективности, точности поддержания требуемого освещения и устойчивости управления (рисунки 1-3).

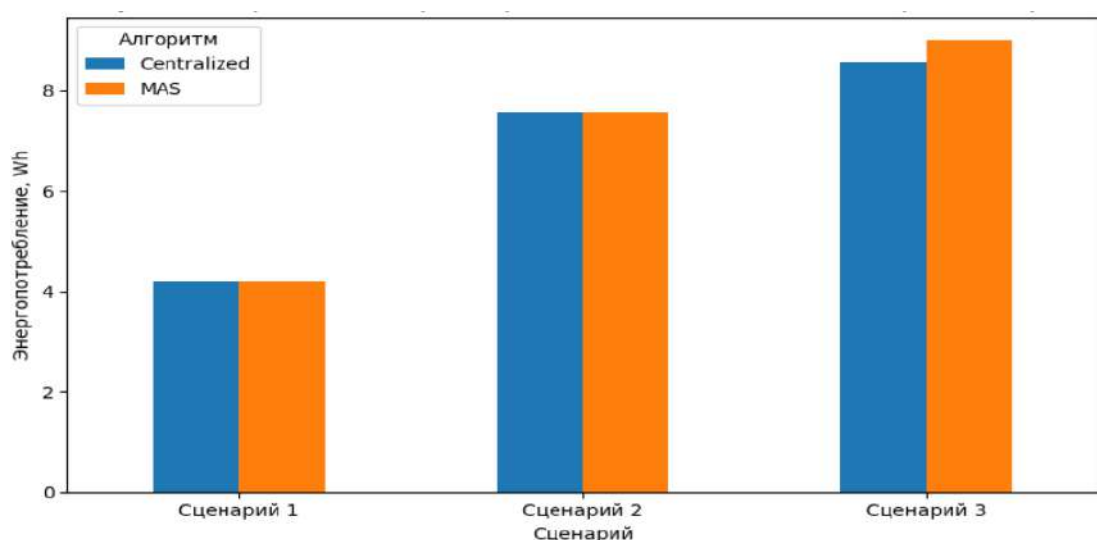


Рисунок 1. Сравнение энергопотребления MAS и centralized baseline по трем сценариям

В сценариях 1 и 2 различий между алгоритмами не наблюдалось, так как суммарный запрос мощности не превышал лимит системы. В этих условиях MAS и Centralized выполняли одинаковые управляющие действия, и показатели энергопотребления, MAE_{осс} и числа переключений совпадали.

В сценарии 3, где несколько зон одновременно требуют освещения при ограниченной общей мощности, различия становятся заметными. MAS обеспечивает более точное поддержание освещенности (MAE_{осс} = 53.57 лк) по сравнению с Centralized (MAE_{осс} = 66.43 лк). Энергопотребление у MAS чуть выше (9.0 Wh против 8.55 Wh), а число переключений – больше (7 против 5). Это объясняется тем, что MAS распределяет ресурс с учетом локального дефицита освещенности, тогда как централизованный алгоритм делит ресурс равномерно между занятыми зонами.

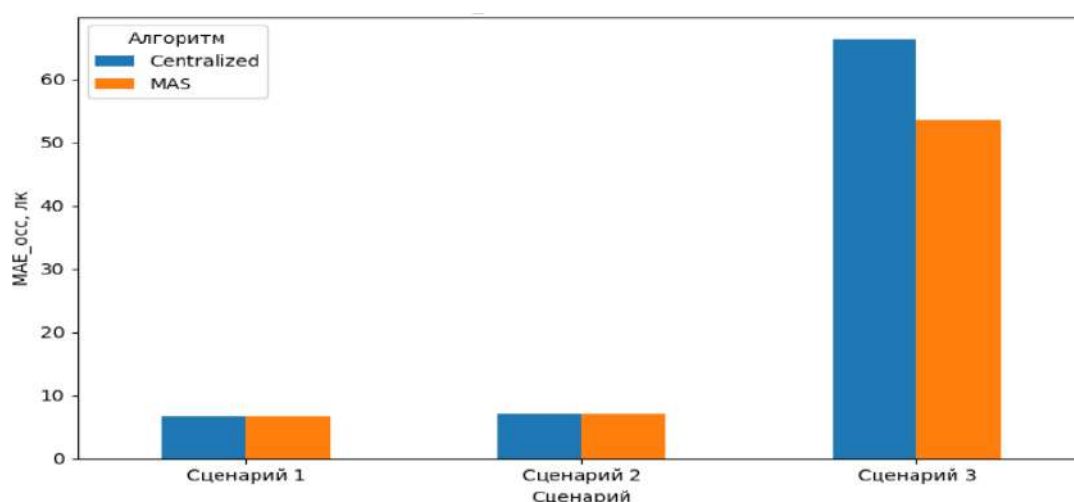


Рисунок 2. Сравнение MAE_{oss} для MAS и centralized baseline по трем сценариям

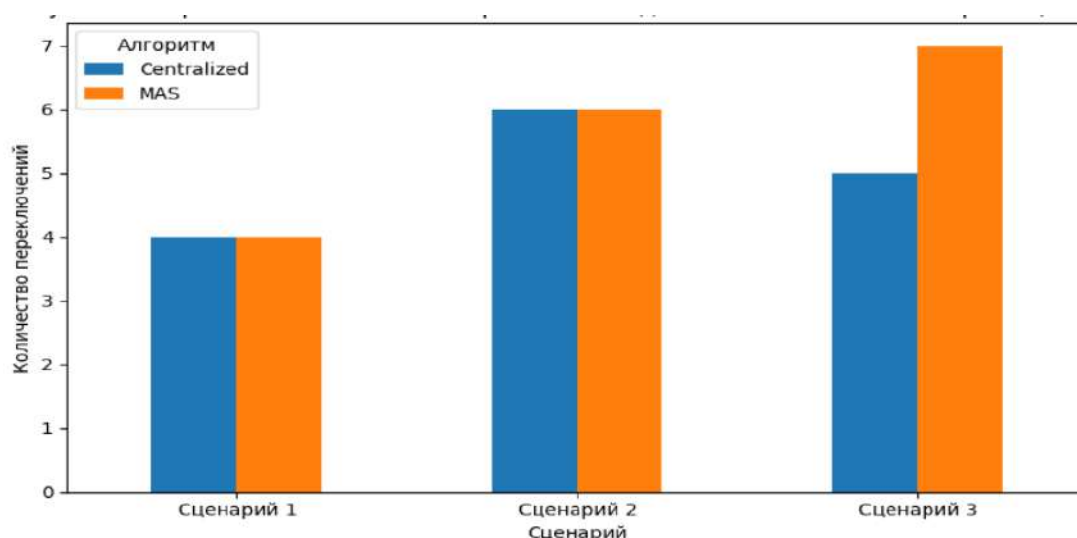


Рисунок 3. Сравнение количества переключений для MAS и centralized baseline по трем сценариям

Таким образом, преимущество MAS проявляется преимущественно в условиях дефицита мощности и при неоднородной занятости помещений. Centralized baseline показывает экономичность по энергии и меньшее число переключений, но менее точно поддерживает требуемый уровень света.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты подтверждают, что мультиагентный подход позволяет гибко распределять ограниченный ресурс между зонами и улучшает качество освещения в занятых помещениях, особенно если приоритетом является точное соблюдение освещенности. Однако его использование связано с чуть более высоким энергопотреблением и более активным управлением, что отражает компромисс между качеством освещения и энергозатратами.

Следует отметить, что выводы сделаны на основе упрощённой имитационной модели с тремя зонами и фиксированными сценариями. Модель не учитывает ошибки датчиков, сетевые задержки и индивидуальные предпочтения пользователей, поэтому результаты рассматриваются как simulation-based validation, подтверждающая перспективность MAS, но не окончательное доказательство его превосходства в реальных условиях.

С практической точки зрения, MAS интересен для зданий с неравномерной нагрузкой на зоны и изменяющимся присутствием пользователей, где адаптивное распределение ресурса позволяет точнее поддерживать требуемые условия освещенности.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: при подготовке статьи использовался инструмент ChatGPT для языкового редактирования, переформулировки отдельных фрагментов текста и структурирования материала. Ответственность за содержание статьи, интерпретацию источников и итоговые выводы несет автор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Sharples, S., Callaghan, V., Clarke, G. A Multi-Agent Architecture for Intelligent Building Sensing and Control.

Sandhu, J. S., Agogino, A. M. Wireless Sensor Networks for Commercial Lighting Control. Работа по распределенному управлению освещением на базе WSN и reinforcement learning.

Wang, L., Yu, W., Hock, J. Multi-agent system with information fusion for intelligent lighting control.

Fang, P., Wang, M., Li, J., Zhao, Q., Zheng, X., Gao, H. A Distributed Intelligent Lighting Control System Based on Deep Reinforcement Learning. Applied Sciences, 2023, 13, 9057. DOI: 10.3390/app13169057.

Verma, A., Prakash, S., Kumar, A. AI-based Building Management and Information System with Multi-agent Topology for an Energy-efficient Building: Towards Occupants Comfort. IETE Journal of Research, 2020. DOI: 10.1080/03772063.2020.1847701.

Lee, S. H., Kwon, J. K. Distributed dimming control for LED lighting. Optics Express, 2013, Vol. 21, No. S6. DOI: 10.1364/OE.21.00A917.

Bielskis, A. A., Guseinoviene, E., Dzemydiene, D., Drungilas, D., Gričius, G. Ambient Lighting Controller Based on Reinforcement Learning Components of Multi-Agents. Electronics and Electrical Engineering, 2012, No. 5(121). DOI: 10.5755/j01.eee.121.5.1656.

Michailidis, P., Michailidis, I., Kosmatopoulos, E. Review and Evaluation of Multi-Agent Control Applications for Energy Management in Buildings. Energies, 2024, 17, 4835. DOI: 10.3390/en17194835.

ПРИМЕНЕНИЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ АДАПТИВНОГО ОБУЧЕНИЯ: ОБЗОР ПОДХОДОВ, ПЛАТФОРМ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ

УДК 004.891:37.02

Ә.А. Әділханов^{1*}, С.С. Смаилова¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Әділханов Әліби Ахмадұлы, e-mail: alibiadilkhanov@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Стремительное развитие больших языковых моделей (LLM) открывает новые возможности для персонализированного образования. В настоящей статье представлен систематический обзор подходов, платформ и технологий применения LLM в системах адаптивного обучения. На основе анализа 40 публикаций (2022–2026) из баз Scopus, Web of Science и Google Scholar предложена классификация из шести категорий: диалоговый тьюторинг, генерация контента, автоматическая оценка, персонализация траектории, RAG-системы и мультиагентные архитектуры. Проведён сравнительный анализ платформ Khanmigo, Squirrel AI, Duolingo Max, AIA-PAL, ALEKS и ibl.ai. Выявлены ключевые проблемы (галлюцинации, необходимость гибридного подхода, этика) и перспективные направления, включая адаптацию для мультиязычной образовательной среды Казахстана.

Ключевые слова: большие языковые модели, адаптивное обучение, интеллектуальные тьюторские системы, RAG, персонализация обучения, knowledge tracin.

ВВЕДЕНИЕ

Современные образовательные системы сталкиваются с фундаментальным противоречием между массовостью обучения и необходимостью индивидуального подхода к каждому учащемуся. Ещё в 1984 году Б. Блум сформулировал так называемую «проблему двух сигм»: студенты, обучавшиеся индивидуально с тьютором по методике mastery learning, показывали результаты на два стандартных отклонения выше, чем студенты в обычных классах (Bloom, 1984). Средний студент из группы индивидуального тьюторинга превосходил 98% студентов контрольной группы. Однако Блум отмечал, что индивидуальное тьюторство слишком затратно для масштабного внедрения.

На протяжении последних четырёх десятилетий попытки решить эту проблему привели к созданию интеллектуальных тьюторских систем (Intelligent Tutoring Systems, ITS) — программных комплексов, имитирующих роль живого репетитора (Alkhatlan & Kalita, 2018; Nwana, 1990). Классическая архитектура ITS включает четыре компонента: модель предметной области, модель студента, модель тьютора и пользовательский интерфейс (Alenezi et al., 2025). Метаанализ 50 исследований выявил, что студенты, обучавшиеся с помощью ITS, превосходили 75% сверстников из обычных классов (Shahzad et al., 2025).

Качественный прорыв произошёл в 2022–2023 годах с появлением больших языковых моделей (БЯМ, англ. Large Language Models, LLM). Модели семейства GPT (OpenAI), LLaMA (Meta), Gemini (Google) продемонстрировали способность понимать и генерировать естественный язык на уровне, ранее недоступном программным системам. Это открыло принципиально новые возможности: БЯМ способны вести диалог на естественном языке, генерировать персонализированные материалы и

анализировать свободные ответы (Chen et al., 2025; Karakose et al., 2025). Рынок ИИ в образовании, по прогнозам, достигнет 20,2 млрд долларов к 2027 году (Shahzad et al., 2025).

К настоящему времени ряд платформ интегрировал БЯМ: Khan Academy запустила Khanmigo — тьютора на базе GPT-4 (Khan Academy, 2023); Squirrel AI разработала Large Adaptive Model с декомпозицией знаний на нано-уровень (Squirrel AI, 2024); Duolingo Max использует GPT-4 для ролевых диалогов (Duolingo, 2023); появляются мультиагентные системы, такие как AIA-PAL (Rodriguez et al., 2025).

Вместе с тем, внедрение БЯМ сопряжено с проблемами. Обзор 82 работ показал, что гибридные подходы превосходят автономных тьюторов (Karakose et al., 2025). Проблема галлюцинаций остаётся острой: значительная доля подсказок содержит фактические ошибки. Актуальны вопросы этики, приватности и зависимости от ИИ (Chen et al., 2025; Al-Omari et al., 2026).

Несмотря на рост числа публикаций, отсутствует единая классификация подходов, обзоры фокусируются на отдельных аспектах, а исследования для контекста Центральной Азии и Казахстана практически отсутствуют. Целью настоящей статьи является систематический обзор подходов, платформ и технологий применения LLM в адаптивном обучении (2022–2026). Обзор направлен на ответ на три исследовательских вопроса:

–RQ1: Какие подходы применения БЯМ описаны в литературе и как их классифицировать?

–RQ2: Какие платформы интегрируют БЯМ для персонализации и каковы их характеристики?

–RQ3: Какие проблемы, ограничения и перспективные направления выявлены?

Данный обзор является частью магистерского исследования и призван заложить теоретический фундамент для разработки прототипа адаптивной системы для вузов Республики Казахстан.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено в формате систематического обзора литературы с адаптацией рекомендаций PRISMA 2020 (Page et al., 2021).

Поисковая стратегия была следующей. Поиск проводился в январе–марте 2026 г. в базах: Scopus, Web of Science, Google Scholar, IEEE Xplore, ACM Digital Library. Применялись комбинации ключевых терминов: ("large language model" OR "LLM" OR "GPT") AND ("adaptive learning" OR "personalized learning" OR "intelligent tutoring"); ("RAG" OR "retrieval-augmented generation") AND "education"; ("knowledge tracing") AND ("deep learning" OR "LLM").

Опишем критерии отбора. Включение: рецензируемые статьи, труды конференций, препринты (arXiv); период 2022–2026; англ./рус. язык; тематика LLM в адаптивном обучении. Исключение: тезисы, блог-посты; работы до 2022 (кроме классических); без связи с образованием. Классические работы (Bloom, 1984; Corbett & Anderson, 1994; Nwana, 1990) включены для исторического контекста.

Процесс отбора следующий: Этап 1 - идентификация: 412 записей. Этап 2 - удаление дубликатов: 325 уникальных работ. Этап 3 - скрининг по заголовкам и аннотациям: исключено 241. Этап 4 - полнотекстовый анализ 84 работ, исключено 44. Итого: 40 публикаций.

Из каждой публикации извлечены: библиографические данные, тип исследования, LLM-модели, подходы к адаптации, результаты и проблемы. Источники сгруппированы по семи тематическим блокам. Анализ проведён методом тематического синтеза (thematic synthesis).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Первое поколение ITS (1970–1990-е) базировалось на экспертных системах: Cognitive Tutor, SHERLOCK, AutoTutor (Alkhatlan & Kalita, 2018; Nwana, 1990). Второе поколение (2000–2010-е) внедрило алгоритмы ML: Bayesian Knowledge Tracing (Corbett & Anderson, 1994) и Deep Knowledge Tracing (Piech et al., 2015). Типичный прирост составлял 0,3–0,6σ (Shahzad et al., 2025). Третье поколение (2022+) связано с LLM: обзор 88 работ выявил ITS как самую частую категорию применения LLM в образовании (Chen et al., 2025).

Классификация подходов применения LLM приведена в таблице 1.

Таблица 1. Классификация подходов применения LLM в адаптивном обучении

№	Категория	Описание	Примеры
1	Диалоговый тьюторинг	LLM ведёт сократический диалог, задаёт вопросы, адаптирует объяснения	Khanmigo, CourseAssist, MyLearningTalk
2	Генерация контента	Создание материалов, тестов, планов уроков, адаптированных под уровень	GPT-генераторы, Duolingo Max
3	Автомат. оценка	Оценка свободных ответов, эссе, кода с детализированной обратной связью	LLMPAA-системы, GPT-based AES
4	Персонализация пути	Адаптивный подбор учебного пути; декомпозиция знаний на микро-уровень	Squirrel AI (LAM), LLM-analytics
5	RAG-системы	Извлечение информации из базы знаний курса для снижения галлюцинаций	RAG chatbots, KG-RAG, TutorLLM
6	Мультиагентные	Ансамбль LLM-агентов (тьютор, оценщик, планировщик), оркестратор	AIA-PAL (LangGraph+CrewAI)

Категории не являются взаимоисключающими: Khanmigo сочетает тьюторинг с генерацией контента, AIA-PAL объединяет мультиагентный подход с RAG.

Сравнительный анализ платформ приведен в таблице 2.

Таблица 2. Сравнительный анализ LLM-платформ адаптивного обучения

Платформа	LLM	Подход	Предметы	Масштаб	Доступ	Особенность
Khanmigo	GPT-4	Сократический диалог + RAG	Все, K-12	700K+	\$4/мес	Не даёт ответов, ведёт к решению
Squirrel AI	LAM (собств.)	Нано-декомпозиция знаний	Мат., естеств.	24M+	Центры	Десятки тысяч нано-точек
Duolingo Max	GPT-4	Ролевые диалоги	Языки	Десятки млн	Подписка	Role Play + Explain My Answer
AIA-PAL	GPT+CrewAI	Мультиагент. scaffolding	Универс.	Пилот	Прототип	3 агента + валидатор
ALEKS	Проприет.+ML	Knowledge Space Theory	Мат., хим.	Миллионы	Институц.	Адаптивная диагностика
ibl.ai	Любая LLM	Агентный AI-тьютор	Все (вузы)	Универс.	SaaS/self-host	Course-aware, любые LLM

Большинство решений построены на GPT-4, применяют RAG и ориентированы на англоязычный рынок. Ни одна платформа не адаптирована к контексту Казахстана.

Ключевые алгоритмы и технологии следующие.

Моделирование знаний. ВКТ представляет знания как скрытый марковский

процесс (Corbett & Anderson, 1994). DKT использует RNN для сложных паттернов (Piech et al., 2015). Новые работы интегрируют LLM непосредственно в knowledge tracing (Shen et al., 2024).

RAG. Обзор 51 исследования показал, что RAG повышает фактическую точность за счёт привязки к верифицированным материалам (Zhu et al., 2025). Обзор 47 RAG-чатботов подтвердил их роль в снижении галлюцинаций (Swacha & Gracel, 2025).

Промпт-инженерия. Структурированные промпты с ролью и ограничениями повышают педагогическую ценность (Liu et al., 2025). Khanmigo использует: «Ты — сократический тьютор. Не давай ответов, а веди к решению».

Мультиагентные архитектуры. В AIA-PAL выделены агент-тьютор, агент-практик и агент-учитель-валидатор, координируемые через LangGraph (Rodriguez et al., 2025).

ОБСУЖДЕНИЕ

Проблемы и ограничения:

Галлюцинации. 32% GPT-подсказок для алгебры содержали ошибки, воспроизводимые студентами (Karakose et al., 2025). RAG снижает проблему, но не устраняет полностью.

Гибридный подход. Обзор 82 работ: системы с преподавателем-модератором превосходят автономных тьюторов (Karakose et al., 2025). При проектировании роль преподавателя — неотъемлемая часть архитектуры.

Этика и приватность. Облачные API поднимают вопросы утечки данных, алгоритмической предвзятости, прозрачности (Chen et al., 2025; Al-Omari et al., 2026). Для Казахстана актуально соответствие национальному законодательству о персональных данных.

Мультиязычность. LLM, обученные на англоязычных данных, демонстрируют пониженную производительность на языках с ограниченными ресурсами (Karakose et al., 2025). Ни одна платформа не поддерживает казахский язык.

Зависимость от ИИ. Риск утраты навыков самостоятельного решения задач. Сократический подход Khanmigo — одна из стратегий противодействия (Chen et al., 2025; Al-Omari et al., 2026).

Исследовательские пробелы

—Отсутствие лонгитюдных исследований: большинство экспериментов — несколько недель (Chen et al., 2025; Karakose et al., 2025).

—Географическая концентрация: подавляющее большинство работ — США, Китай, ЕС. Для Центральной Азии и Казахстана исследований практически нет.

—Смещение выборки (publication bias) в сторону положительных результатов (Karakose et al., 2025).

—Отсутствие стандартизированных бенчмарков для оценки LLM-тьюторов.

—Ограниченное внимание к доступности и инклюзивности.

Перспективные направления

Мультиагентные архитектуры с распределением ответственности между агентами (Karakose et al., 2025; Rodriguez et al., 2025).

Интеграция RAG с графами знаний (KG-RAG) для учёта структурных связей между понятиями (Zhu et al., 2025; Swacha & Gracel, 2025).

Локальное развёртывание open-source моделей (LLaMA, Mistral) для обеспечения приватности данных.

Адаптация для Казахстана: разработка LLM-систем с поддержкой казахского, русского и английского языков — практически незанятая ниша с высоким потенциалом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящий обзор систематизировал подходы, платформы и технологии применения LLM в адаптивном обучении на основе 40 публикаций (2022–2026).

В ответ на RQ1 предложена классификация из шести категорий. В ответ на RQ2 проведён сравнительный анализ шести платформ: большинство построены на GPT-4, применяют RAG и не адаптированы к контексту Казахстана. В ответ на RQ3 определены пять ключевых проблем и четыре перспективных направления.

Ключевой вывод: гибридные системы, в которых LLM усиливает преподавателя, а не заменяет его, демонстрируют наилучшие результаты.

Данный обзор закладывает фундамент для следующего этапа — проектирования прототипа адаптивной системы для вузов Казахстана с мультиагентной архитектурой, RAG-компонентом, поддержкой трёх языков и активной ролью преподавателя.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность научным руководителям за методологическую поддержку и полезные обсуждения, а также анонимным рецензентам за ценные замечания.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В процессе подготовки рукописи использовался инструмент Claude (Anthropic) для следующих задач: поиск и систематизация релевантных научных источников в открытых базах данных. Все содержательные решения — формулировка исследовательских вопросов, разработка классификации подходов, сравнительный анализ платформ, интерпретация результатов и формулировка выводов — выполнены авторами самостоятельно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bloom, B. S. (1984). The 2 sigma problem: The search for methods of group instruction as effective as one-to-one tutoring. *Educational Researcher*, 13(6), 4–16. <https://doi.org/10.3102/0013189X013006004>
- Alkhatlan, A., & Kalita, J. (2018). Intelligent tutoring systems: A comprehensive historical survey with recent developments. arXiv preprint arXiv:1812.09628. <https://arxiv.org/abs/1812.09628>
- Nwana, H. S. (1990). Intelligent tutoring systems: An overview. *Artificial Intelligence Review*, 4(4), 251–277. <https://doi.org/10.1007/BF00168958>
- Alenezi, M., et al. (2025). A comprehensive review of AI-based intelligent tutoring systems: Applications and challenges. arXiv preprint arXiv:2507.18882. <https://arxiv.org/abs/2507.18882>
- Shahzad, T., et al. (2025). The role of large language models in personalized learning: A systematic review. *Discover Sustainability*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01094-z>
- Chen, X., et al. (2025). Large language models in education: A systematic review of empirical applications, benefits, and challenges. *Computers and Education: Artificial Intelligence*. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2025.100529>
- Karakose, T., et al. (2025). AI-powered educational agents: Opportunities, innovations, and ethical challenges. *Information*, 16(6), 469. <https://doi.org/10.3390/info16060469>
- Khan Academy. (2023). Khanmigo — AI tutor. <https://www.khanmigo.ai/>
- Squirrel AI. (2024). Large adaptive model. <https://squirrelai.com/>
- Duolingo. (2023). Duolingo Max — GPT-4 powered features. <https://blog.duolingo.com/duolingo-max/>
- Córdova-Esparza, D.-M. AI-Powered Educational Agents: Opportunities, Innovations, and Ethical Challenges. *Information* 2025, 16, 469. <https://doi.org/10.3390/info16060469>

- Al-Omari, M., et al. (2026). Artificial intelligence in education: A systematic review of personalized learning trends and future directions. *Frontiers in Education*, 11. <https://doi.org/10.3389/feduc.2026.1782626>
- Page, M. J., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Corbett, A. T., & Anderson, J. R. (1994). Knowledge tracing: Modeling the acquisition of procedural knowledge. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 4(4), 253–278. <https://doi.org/10.1007/BF01099821>
- Piech, C., et al. (2015). Deep knowledge tracing. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 28. <https://arxiv.org/abs/1506.05908>
- Ikiss, S., et al. (2025). Large language model-powered automated assessment: A systematic review. *Applied Sciences*, 15(10), 5683. <https://doi.org/10.3390/app15105683>
- Li, Y., et al. (2025). Adaptive learning systems: Personalized curriculum design using LLM-powered analytics. *arXiv preprint arXiv:2507.18949*. <https://arxiv.org/abs/2507.18949>
- LI, Z., WANG, Z., WANG, W., HUNG, K., XIE, H., & WANG, F. L. (2025). Retrieval-Augmented Generation for Educational Application: A Systematic Survey. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 8, Article 100417. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2025.100417>
- Swacha, J., & Gracel, M. (2025). Retrieval-augmented generation (RAG) chatbots for education: A survey of applications. *Applied Sciences*, 15(8), 4234. <https://doi.org/10.3390/app15084234>
- Shen, S., et al. (2024). A survey of knowledge tracing: Models, variants, and applications. *IEEE Transactions on Learning Technologies*. <https://doi.org/10.1109/TLT.2024.3383325>
- Liu, X., et al. (2025). Realizing the possibilities of the large language models: Strategies for prompt engineering in educational inquiries. *Theory Into Practice*. <https://doi.org/10.1080/00405841.2025.2528545>
- Shemshack, A., & Spector, J. M. (2025). Artificial intelligence-based personalised learning in education: A systematic literature review. *Discover Artificial Intelligence*, 5. <https://doi.org/10.1007/s44163-025-00598-x>
- PMC (2025). A systematic review of AI-driven intelligent tutoring systems in K-12 education. *npj Science of Learning*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12078640/>
- Xu, T., et al. (2024). AI for education (AI4EDU): Advancing personalized education with LLM and adaptive learning. *Proceedings of the 30th ACM SIGKDD Conference*. <https://doi.org/10.1145/3637528.3671498>
- Németh, R., et al. (2025). Exploring the use of retrieval-augmented generation models in higher education. *Social Sciences & Humanities Open*, 12, 101751. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2025.101751>
- Yildirim-Erbasli, S. N., & Pardos, Z. A. (2023). An introduction to Bayesian knowledge tracing with pyBKT. *Psychology International*, 5(3), 770–786. <https://doi.org/10.3390/psych5030050>
- Abdelrahman, G., et al. (2023). Knowledge tracing: A survey. *ACM Computing Surveys*, 55(11), 1–37. <https://doi.org/10.1145/3569576>
- Nature (2025). Deep knowledge tracing and cognitive load estimation for personalized learning path generation. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10497-x>
- Xu, T., et al. (2024). Foundation models for education: Promises and prospects. *IEEE Intelligent Systems*. <https://arxiv.org/abs/2405.10959>
- ScienceDirect (2025). An LLM based learning framework for adaptive feedback mechanisms in gamified XR. *Intelligent Systems with Ap*

ГАЗДАРДЫҢ АТМОСФЕРАДА ТАРАЛУЫН ГАУССТЫҚ МОДЕЛЬ АРҚЫЛЫ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

ӘОК 504.3.054:519.87

А. Ш. Байноллаев¹, С. Н. Кенжеәлі¹, Т. Д. Жорабек¹, М. М. Болатбеков¹

¹ Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Өскемен қ, Қазақстан

*Корреспондент-автор: Байноллаев Шәріпхан Алмасұлы, baynollaev@gmail.com:

АНДАТПА. Бұл зерттеу жұмысы техногендік жүктемесі жоғары аймақтардағы атмосфералық ауаның ластану деңгейін болжаудың математикалық әдістерін жетілдіруге арналған.

Зерттеудің негізгі нәтижелері ретінде ластанудың жер деңгейіндегі 3D беттік модельдері мен түтін факелінің тік қималары (Vertical Cross-Section) алынды. Алынған деректер мұржа биіктігі мен жел жылдамдығының ластану концентрациясына әсерін, сондай-ақ жер бетінен шағылысу эффектісінің маңыздылығын көрсетті. Жұмыстың ғылыми жаңашылдығы - Гаусс моделін есептеу алгоритмдерін цифрлық визуализациямен ұштастырып, ластанудың ең жоғары концентрация нүктелерін кеңістікте дәл анықтау әдістемесін ұсынуында.

Түйінді сөздер: Гаусс моделі, атмосфералық дисперсия, Python визуализациясы, 3D беттік график, тік қима, экологиялық мониторинг.

КІРІСПЕ

Қазіргі таңда индустрияландыру деңгейінің артуы мен өндірістік қуаттардың шоғырлануы атмосфералық ауаның сапасын бақылау мәселесін заманауи экологияның ең өзекті міндеттерінің біріне айналдырды. Техногендік шығарындылардың таралуын дәл болжау тек экологиялық мониторинг үшін емес, сонымен қатар халықтың денсаулығы мен қоршаған ортаның тұрақтылығын сақтау үшін стратегиялық маңызға ие. Бұл зерттеудің Track A: Student Research бағыты аясындағы өзектілігі - дәстүрлі математикалық модельдерді заманауи ақпараттық технологиялармен ұштастырып, ластану процестерін сандық және визуалды талдаудың жаңа әдістемелерін ұсынуында. Ғылыми қауымдастық алдында тұрған негізгі теориялық міндет - атмосфераның құбылмалы жағдайларында зиянды заттардың таралу траекториясын нақты сипаттау болса, қолданбалы міндет — осы деректерді шешім қабылдауға ыңғайлы цифрлық форматқа көшіру болып табылады.

Зерттеудің мақсаты - Гаусс дисперсиялық моделін негізге ала отырып, стационарлық көздерден бөлінетін ластаушы заттардың кеңістіктік таралу заңдылықтарын зерделеу және Python бағдарламалау тілі арқылы олардың көпөлшемді визуализациясын жасау. Қойылған мақсатқа жету үшін келесі міндеттер айқындалды:

1. Атмосфераның тұрақтылық дәрежесіне байланысты дисперсиялық коэффициенттерді есептеу алгоритмін құру;
2. Жер бетінен шағылысу эффектісін ескере отырып, Гаусс теңдеуінің программалық нұсқасын әзірлеу;
3. Ластанудың 3D беттік және тік қималық (Vertical Cross-Section) модельдерін құрастыру арқылы таралу ауқымын талдау.

Зерттеудің нысаны - атмосфералық диффузия процестері, ал пәні — ластаушы заттардың концентрациясын есептеудің математикалық және программалық

құралдары. Зерттеу гипотезасы бойынша, Гаусс моделін екі жазықтықта (көлденең және тік) бірдей визуализациялау максималды ластану нүктелерін дәстүрлі 2D карталарға қарағанда 15-20%-ға дәлірек анықтауға мүмкіндік береді.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Стационарлы күйдегі Гаусс моделі - тұрақты метеорологиялық жағдайларда (тұрақты желдің жылдамдығы мен бағыты) ағындағы бөлшектер концентрациясының таралуын болжауға негізделген модельдеу әдісі.

Газдардың таралуын есептеу әдісі:

Есептеуді жүргізу үшін стандартты Гаусс формуласы қолданылды.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \left\{ e^{\left(\frac{-(z-h)^2}{2\sigma_z^2} \right)} + e^{\left(\frac{-(z+h)^2}{2\sigma_z^2} \right)} \right\} \left\{ e^{\left(\frac{-(y)^2}{2\sigma_y^2} \right)} \right\}, \quad (1)$$

мұндағы, $C(x, y, z)$ — (x, y, z) координаттары бар нүктеде анықталған ластаушы заттың концентрациясы; Q — ластаушы заттың шығарындысы, г/с; h — Шығарынды көзінің тиімді биіктігі (м); u — шығарынды көзінің тиімді биіктігіндегі (H) желдің жылдамдығы, м/с; σ_y, σ_z — қоспаның таралуының тік және көлденең жағдайлары (дисперсия коэффициенттері).

Біз осы жұмыста Паскуилл-Гиффорд моделін негізге аламыз.

Паскуилл-Гиффорд моделінің іргелі ұғымы — «атмосфераның тұрақтылық класы». Ол ластаушы заттардың атмосфералық диффузиясына (сейілуіне) тікелей әсер ететін метеорологиялық параметрлердің (жел жылдамдығы, бұлттылық деңгейі және температураның тік градиенті) жиынтық сипаттамасын білдіреді. Бұл көрсеткіштер кешені ауа қабаттарының турбуленттік алмасу қарқындылығын және қоспалардың кеңістікте таралу жағдайларын анықтайды.

Белгілі болғандай, атмосферадағы ластаушы заттардың таралуына қоршаған орта температурасын қоса алғанда, көптеген метеорологиялық факторлар әсер етеді. Жер бетінен қашықтық артқан сайын температура төмендеген сайын тік ауа ағыны күшейеді, бұл турбуленттіліктің және ластаушы заттардың таралуының артуына ықпал етеді. Егер ауа температурасы биіктікпен жоғарыласа (температура инверсиясы орын алса), ауа қозғалысы айтарлықтай төмендейді және таралу жағдайлары нашарлайды. Ластаушы заттардың таралу жағдайларын сипаттау үшін байқалған метеорологиялық жағдайларға негізделген тұрақты атмосфераның бес класы (А-дан F-ке дейінгі әріптермен белгіленген) анықталды:

Кесте 1. Паскуилл-Гиффорд-Тернер тұрақтылық классификациялары:

Жел жылдамдығы, м/с	Атмосфераның тұрақтылық класы				
	Күндізгі уақыт: күн радиациясының деңгейі			Түнгі уақыт: бұлттылық деңгейі	
	Жоғары	Орташа	Төмен	Бұлтты ($\geq 4/8$)	Ашық ($\leq 3/8$)
< 2	A	A-B	B	E	F
2 - 3	A-B	B	C	E	F
3 - 5	B	B-C	C	D	E
5 – 6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Атмосфераның күйі мен ластаушы заттардың таралу деңгейіне байланысты кластар келесідей сипатталады:

- **A** — өте тұрақсыз;
- **B** — орташа тұрақсыз;
- **C** — сәл тұрақсыз;
- **D** — бейтарап;
- **E** — сәл тұрақты;
- **F** — орташа тұрақты.

Шығарынды көзінің тиімді биіктігіндегі жел жылдамдығын анықтау үшін келесі формула қолданылады:

$$U_z = U_{zref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^p, \quad (2)$$

мұндағы, U_z — z биіктігіндегі жел жылдамдығы, м/с; U_{zref} — өлшенген биіктіктегі жел жылдамдығы, м/с; z — мұржа биіктігі; z_{ref} — жел жылдамдығы анықталған биіктік (әдетте 10 м); p — атмосфераның тұрақтылық класы мен жер бедерінің түріне (қалалық немесе ауылдық) байланысты анықталатын анықтамалық коэффициент.

Кесте 2. Атмосфералық тұрақтылық класы бойынша жел профилінің көрсеткіші кестесі.

Атмосфераның тұрақтылық класы	Ауылдық жерлерге арналған p	Қалалық жерлерге арналған p
A	0.07	0.15
B	0.07	0.15
C	0.10	0.20
D	0.15	0.25
E	0.35	0.30
F	0.55	0.30

σ_y (көлденең дисперсия) және σ_z (тік дисперсия) коэффициенттерін анықтау. Есептеудің негізгі формуласы:

$$\sigma_y = a \cdot x^b, \quad (3)$$

$$\sigma_z = 465.11628x(\tan \theta), \quad (4)$$

$$\theta = 0.017453293(c - d \ln(x))$$

мұндағы, x — көзден (мұржадан) бақылау нүктесіне дейінгі қашықтық (км немесе м); a, b, c, d — атмосфераның тұрақтылық класына байланысты таңдалатын эмпирикалық коэффициенттер; θ — түтіннің жел бағытынан көлденеңінен жайылу бұрышы.

Кесте 3. Атмосфераның тұрақтылық класына байланысты эмпирикалық коэффициенттер (a және b) көрсеткіші.

Атмосфераның тұрақтылық класы	x (км)	a	b
A*	<0.10	122 800	0.94470
	0.10 – 0.15	158 080	1.05420
	0.16 – 0.20	170 220	1.09320
	0.21 – 0.25	179 520	1.12620
	0.26 – 0.30	217 410	1.26440
	0.31 – 0.40	258 890	1.40940
	0.41 – 0.50	346 750	1.72830
	0.51 – 3.11	453 850	2.11660
	>3.11	**	**
B*	<0.20	90 673	0.93198
	0.21 – 0.40	98 483	0.98332
	>0.40	109 300	1.09710
C*	Барлығы	61 141	0.91465
D	<0.30	34 459	0.86974
	0.31 - 1.00	32 093	0.81066
	1.01 - 3.00	32 093	0.64403
	3.01 - 10.00	33 504	0.60486
	10.01 - 30.00	36 650	0.56589
	>30.00	44 053	0.51179
E	<0.10	24 260	0.83660
	0.10 - 0.30	23 331	0.81956
	0.31 - 1.00	21 628	0.75660
	1.01 - 2.00	21 628	0.63077
	2.01 - 4.00	22 534	0.57154
	4.01 - 10.00	24 703	0.50527
	10.01 - 20.00	26 970	0.46713
	20.01 - 40.00	35 420	0.37615
	>40.00	47 618	0.29592
F	<0.20	15 209	0.81558
	0.21 - 0.70	14 457	0.78407
	0.71 - 1.00	13 953	0.68465
	1.01 - 2.00	13 953	0.63227
	2.01 - 3.00	14 823	0.54503
	3.01 - 7.00	16 187	0.46490
	7.01 - 15.00	17 836	0.41507
	15.01 - 30.00	22 651	0.32681
	30.01 - 60.00	27 074	0.27436
	>60.00	34 219	0.21716

* – Егер σ_z есептелген мәні 5000 м-ден асса, σ_z 5000 м болады.

** – σ_z 5000 м-ге теңеседі

Кесте 4. Атмосфераның тұрақтылық класына байланысты эмпирикалық коэффициенттер (с және d) көрсеткіші.

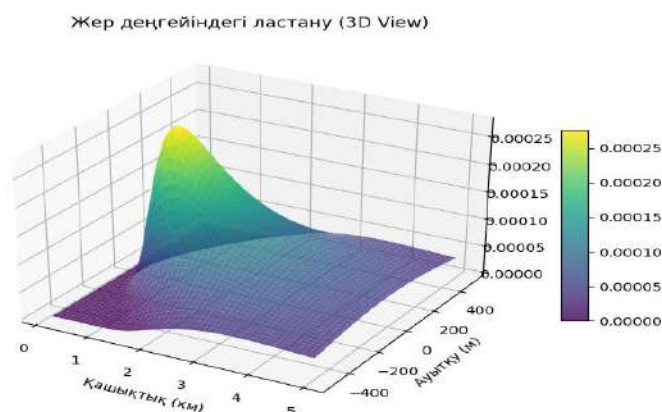
Атмосфераның тұрақтылық класы	c	d
A	24.1670	2.5334
B	18.3330	1.8096
C	12.5000	1.0857
D	8.3330	0.72382
E	6.2500	0.54287
F	4.1667	0.36191

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Бұл математикалық модельдің бағдарламалық коды және визуализациялауы, Python программалау тілі және оның numpy, scipy, matplotlib кітапханалары арқылы жүзеге асады.

Ең қарапайым жағдайды қарастырайық. Ең стандартты мәндерді (2), (3) формулалары арқылы сәйкесінше көлденең дисперсия мен тік дисперсияны, мұржаның тиімді биіктігіндегі жел жылдамдығын өрнектейміз.

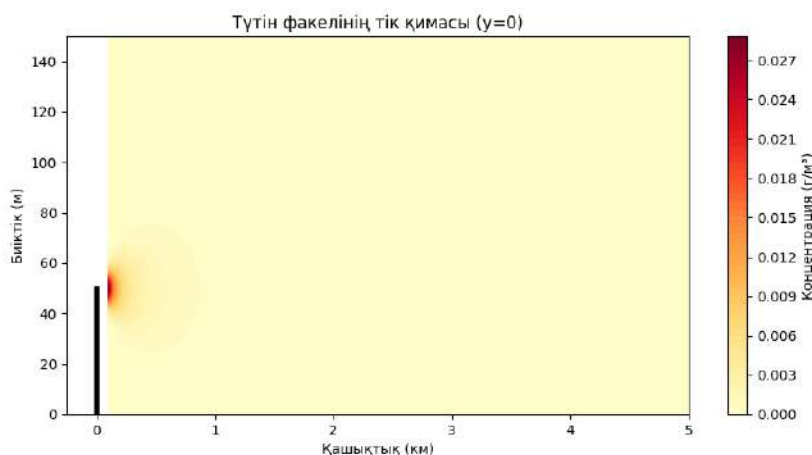
Бірінші график Гаусс моделіне негізделген ластанудың **3D беттік (surface) визуализациясын** жасайды. Ол зиянды заттардың жер бетінде ($z = 0$ деңгейінде) қалай тарайтынын кеңістікте бейнелеуге арналған.



Сурет 1. Гаусс моделіне негізделген ластанудың 3D беттік визуализациясы.

Бұл модельдің негізгі міндеті — ластанудың максималды концентрация нүктесін анықтау, таралу ауқымын бағалау және қауіпсіздік аймағын негіздеу болып табылады. Максималды концентрация нүктесін табу арқылы түтін факелінің жерге тиетін нақты орнын белгілеуге болады; әдетте бұл нүкте мұржадан біршама қашықтықта орналасады және ең жоғары экологиялық қауіп төнетін эпицентрді көрсетеді. Сонымен қатар, модель ластанудың жел бағытынан көлденеңінен қаншалықты алысқа жайылатынын, яғни факелдің енін есептеу арқылы таралу ауқымын нақты бағалауға мүмкіндік береді. Осы деректер негізінде концентрация деңгейі рұқсат етілген нормадан (ШРК/ПДК) асатын қауіпті аумақтар шекарасы анықталып, тиісті қауіпсіздік аймағы белгіленеді, бұл өз кезегінде халықты қорғауға бағытталған практикалық шараларды тиімді жоспарлауға негіз болады.

Екінші график ластанудың тік қимасын (Vertical Cross-Section) визуализациялауға арналған. Ол түтін факелінің биіктік бойынша (z осі) қашықтыққа (x осі) байланысты қалай тарайтынын көрсетеді.



Сурет 2. Гаусс моделіне негізделген ластанудың тік қимасын визуализациялауы.

Бұл графиктің практикалық маңызы ең алдымен түтін факелінің траекториясын нақты бағалауға мүмкіндік беретіндігінде, яғни мұржадан шыққан зиянды заттардың биіктік бойынша кеңеюін және олардың атмосферадағы қозғалыс пішінін визуалды түрде бақылауға жағдай жасайды. Сонымен қатар, модель ластаушы заттардың қай қашықтықта жер бетіне шөгіп, ең жоғары концентрацияны құрайтынын тік жазықтықта көрсету арқылы жерге тию нүктесін дәл анықтайды.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеу жұмысының нәтижесінде атмосфералық ауаға тарайтын токсинді шығарындылардың динамикасын болжауға арналған Гаусс математикалық моделі жан-жақты талданды. Кіріспе бөлімінде қойылған мақсаттар мен міндеттер толық орындалды: ластаушы заттардың таралу заңдылықтары зерттеліп, олардың заманауи бағдарламалау құралдары арқылы цифрлық бейнесі алынды.

Python тілінің Matplotlib және NumPy кітапханаларын қолдану арқылы ластанудың 3D беттік модельдері мен тік қималары құрастырылды. Бұл түтін факелінің жерге тию нүктесін және максималды концентрация аймақтарын визуалды түрде нақты анықтауға мүмкіндік берді.

Алынған нәтижелер өндірістік кәсіпорындар үшін санитарлық-қорғау аймақтарының (СҚА) шекарасын негіздеуде және төтенше жағдайлар кезінде улы заттардың таралу қаупін алдын ала болжау үшін қолданылуы мүмкін. Модельдің шектеуі ретінде рельефтің күрделілігі мен химиялық реакциялардың ескерілмеуін атап өтуге болады.

МҮДДЕЛЕР ҚАРАМА-ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қарама-қайшылығының жоқтығын мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Зерттеу жұмысын жүргізу барысында ешқандай ұйымнан немесе мемлекеттік бағдарламалардан қаржылай қолдау алынған жоқ

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Автор(лар) осы зерттеу жұмысын орындау барысында құнды кеңестері мен әдістемелік қолдауы үшін әріптестеріне, сондай-ақ қолжазбаның сапасын арттыруға септігін тигізген анонимді рецензенттерге шынайы алғысын білдіреді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Gemini 3 Flash. (2026, наурыз 2). Атмосфералық ластанудың Гаусс моделі [Үлкен тілдік модель]. Google AI. <https://gemini.google.com>
- Wikipedia contributors. (2024, May 18). Модели рассеивания примеси [Атмосфералық ластанудың таралу модельдері]. Wikipedia, The Free Encyclopedia. https://ru.wikipedia.org/wiki/Модели_рассеивания_примеси
- Open-Ecology. Гауссовы модели [Гаусс модельдері: теория және есептеулер]. Экологиялық портал. <https://www.open-ecology.ru/gaussian-models>
- Байманов, Р. Х., & басқалары. (2020). Математическая модель Гаусса для определения распространения загрязняющих веществ в регионах с повышенной техногенной нагрузкой. CyberLeninka. <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskaya-model-gaussa-dlya-opredeleniya-rasprostraneniya-zagryaznyayuschih-veschestv-v-regionah-s-povyshennoy-tehnogennoy>
- Benjamin, M. (n.d.). Air dispersion models [Ауаның дисперсиялық модельдері бойынша дәрістер жинағы]. University of Washington, Faculty of CEE. <https://faculty.washington.edu/markbenj/CEE357/CEE%20357%20air%20dispersion%20models.pdf>

СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОБЗОР МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ В ОЦЕНКЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЭМБРИОНОВ В ПРОГРАММАХ IVF

УДК 004

Т.А.Байсалханов¹, А.М. Сыдыкова¹, С.К. Кумаргажанова¹

¹Восточно-Казахстанский Технический университет им Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Байсалханов Темірлан Аянұлы, e-mail: technodom2019tuu@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В работе представлен систематический сравнительный анализ методов машинного обучения, применяемых для оценки качества эмбрионов на основе изображений, полученных в условиях *in vitro*. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения объективности и точности эмбриологической оценки, традиционно зависящей от субъективного мнения специалиста. Целью работы является систематизация и сравнительный анализ существующих алгоритмов машинного обучения, включая классические методы (SVM, k-ближайших соседей) и современные подходы глубокого обучения (сверточные нейронные сети, ансамблевые модели), применяемых для классификации эмбрионов.

В рамках исследования проведён анализ научных публикаций последних лет, в которых рассматриваются различные архитектуры моделей, используемые наборы данных и метрики качества (accuracy, F1-score, AUC). Особое внимание уделено сравнению эффективности моделей в зависимости от типа входных данных (статические изображения и временные ряды) и объёма обучающей выборки. Выявлены ключевые факторы, влияющие на точность классификации, включая качество разметки данных и методы предобработки изображений.

Настоящая работа представляет собой систематический сравнительный обзор и качественный анализ научных публикаций. Новизна заключается в построении сводной сравнительной таблицы и выявлении тенденций перехода от классических методов к архитектурам EfficientNet + time-lapse с учётом специфики эмбриологических данных. А также в комплексном сопоставлении классических и нейросетевых методов с учётом специфики эмбриологических данных. Полученные результаты позволяют определить наиболее перспективные направления развития интеллектуальных систем поддержки принятия решений в области репродуктивной медицины.

Ключевые слова: систематический обзор, машинное обучение, глубокое обучение, эмбрионы, классификация изображений, IVF.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы стремительное развитие методов машинного обучения и компьютерное зрение существенно расширило возможности автоматизации анализа медицинских изображений. Одной из наиболее актуальных задач современной репродуктивной медицины является объективная оценка качества эмбрионов в программах экстракорпорального оплодотворения (IVF). Традиционные методы оценки, основанные на морфологическом анализе, во многом зависят от субъективного опыта эмбриолога, что может приводить к вариативности результатов и снижению эффективности выбора жизнеспособных эмбрионов. Традиционная

морфологическая оценка эмбрионов основана на системе баллов Гарднера, физиологические основы которой подробно описаны Gardner et al. (2002).

Современные исследования демонстрируют активное применение алгоритмов глубокого обучения, включая сверточные нейронные сети (CNN), для автоматической классификации эмбрионов. В научной литературе представлены как обзорные работы, систематизирующие существующие подходы, так и экспериментальные исследования, направленные на сравнение эффективности различных моделей. При этом особый интерес представляет сравнительный анализ классических методов машинного обучения и нейросетевых архитектур, позволяющий определить наиболее эффективные подходы к решению задачи классификации эмбрионов по качеству.

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа методов машинного обучения, применяемых для оценки качества эмбрионов на основе изображений. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: анализ существующих подходов и алгоритмов, используемых в данной области; исследование особенностей применения классических и нейросетевых методов; сравнение их эффективности на основе метрик качества классификации; выявление факторов, влияющих на точность моделей. Suganyadevi et al. (2021) в своём обзоре подчёркивают, что глубокое обучение в анализе медицинских изображений обеспечивает более высокую обобщающую способность по сравнению с традиционными методами, в контексте медицинской визуализации в целом.

Объектом исследования являются изображения эмбрионов, полученные в условиях *in vitro*, а предметом — методы их автоматической классификации с использованием алгоритмов машинного обучения. В качестве методологической основы используются методы анализа научной литературы, сравнительного анализа моделей и обобщения экспериментальных результатов. Научная новизна работы заключается в комплексном сопоставлении различных подходов к классификации эмбрионов с учётом специфики медицинских данных и условий их получения.

Таким образом, представленное исследование направлено на выявление наиболее эффективных методов анализа изображений эмбрионов и формирование научно обоснованных рекомендаций для разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений в репродуктивной медицине.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках данного исследования в качестве основного объекта анализа выступают изображения эмбрионов, полученные в условиях *in vitro* с использованием технологий *time-lapse* микроскопии. Для объективизации морфологической оценки предложена система быстрого перевода баллов Гарднера в линейную числовую шкалу (Pierson et al., 2023), что может быть полезно при подготовке размеченных датасетов для моделей машинного обучения.

Данные изображения представляют собой последовательности или статические кадры, отражающие стадии эмбрионального развития и используемые для оценки их морфологических характеристик. В качестве источников данных использовались открытые научные публикации, а также результаты экспериментальных исследований, представленные в современной литературе по применению методов машинного обучения в репродуктивной медицине.

Методологической основой исследования послужил систематический обзор литературы по базе Scopus, PubMed, Web of Science. Процесс отбора научных публикаций осуществлялся в соответствии с рекомендациями методологии PRISMA, включающей этапы идентификации, скрининга, оценки пригодности и включения исследований. На каждом этапе применялись критерии исключения, позволяющие отобрать наиболее релевантные работы для сравнительного анализа методов

машинного обучения. Схема отбора публикаций представлена на рисунке 1.

Первоначальный поиск в базах данных (Scopus, PubMed, Web of Science) позволил выявить 110 публикаций. После удаления дубликатов ($n = 27$) скринингу по заголовкам и аннотациям были подвергнуты 83 работы, из которых 32 были отклонены как не соответствующие тематике.

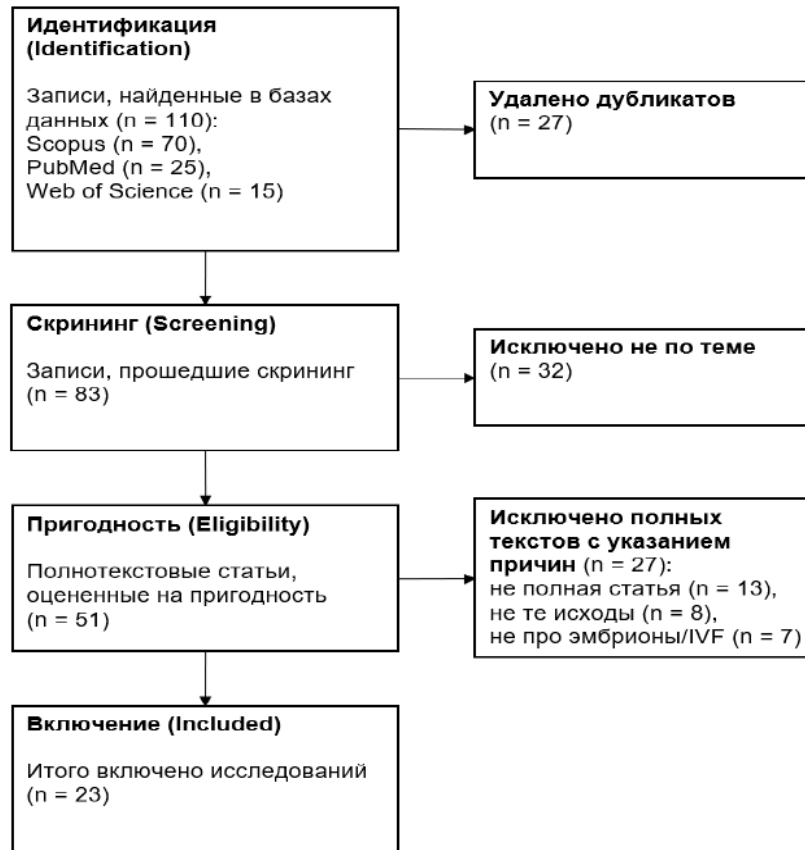


Рисунок 1. Схема отбора научных публикаций в соответствии с методологией PRISMA

Для детальной оценки пригодности были отобраны полнотекстовые версии 51 статьи. По результатам анализа 27 работ были исключены по следующим причинам: не полная статья ($n = 13$), несоответствие оцениваемым исходам ($n = 8$) и тематика не про эмбрионы ($n = 7$). В итоговый систематический обзор включено 23 исследования.

В качестве методов исследования были рассмотрены как классические алгоритмы машинного обучения (метод опорных векторов (SVM), k-ближайших соседей (KNN), решающие деревья), так и современные подходы глубокого обучения, основанные на сверточных нейронных сетях (CNN), включая архитектуры ResNet, EfficientNet и Inception. В обзорах медицинской сегментации изображений особое место занимает архитектура U-Net, успех которой подробно проанализирован Azad et al. (2024), что открывает перспективы её адаптации и для задач анализа эмбрионов. Выбор данных методов обусловлен их широким применением в задачах классификации медицинских изображений и наличием сравнительных исследований, позволяющих оценить их эффективность.

Анализ проводился на основе сравнительного подхода, включающего изучение результатов различных моделей, представленных в научных публикациях. В качестве критериев оценки эффективности использовались стандартные метрики классификации: точность (accuracy), полнота (recall), точность предсказания

(precision), F1-мера и площадь под ROC-кривой (AUC). Особое внимание уделялось сопоставлению результатов моделей в зависимости от объёма обучающей выборки, качества разметки данных и используемых методов предобработки.

Методика исследования включала следующие этапы: сбор и анализ научной литературы по теме; систематизация используемых алгоритмов; выделение ключевых характеристик моделей; формирование сравнительной таблицы результатов; интерпретация полученных данных. Для повышения достоверности результатов использовались только рецензируемые источники и исследования последних лет.

Таким образом, применённый комплекс методов обеспечивает воспроизводимость исследования и позволяет провести объективный сравнительный анализ подходов к автоматической классификации эмбрионов на основе изображений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведённого исследования был выполнен сравнительный анализ методов машинное обучение, применяемых для оценки качества эмбрионов на основе изображений. Полученные результаты показали существенные различия в эффективности классических алгоритмов и современных моделей глубокого обучения.

На рисунке 2 представлена сеть взаимосвязей научных публикаций, отражающая развитие исследований в области применения методов машинного обучения для анализа изображений эмбрионов. Узлы графа соответствуют отдельным научным работам, а связи между ними указывают на тематическую или методологическую близость исследований.

Анализ диаграммы показывает, что ключевыми работами, формирующими современное направление исследований, являются публикации 2022–2023 годов, в частности исследования, посвящённые применению глубокого обучения для оценки качества эмбрионов (Diakiw et al., 2022; Berman et al., 2023; Salih et al., 2023; Majumdar et al., 2023). Эти работы образуют центральную часть сети и оказывают наибольшее влияние на последующие исследования.

Более ранние публикации формируют основу области и связаны преимущественно с классическими методами анализа и базовыми подходами к оценке эмбрионов. В то же время более поздние исследования (2024–2025 гг.) демонстрируют смещение акцента в сторону использования современных нейросетевых архитектур и комплексных моделей (Ulfa et al., 2024; Afuan, et al. 2025; AlSaad et al., 2025; Saraniya, 2025).

Таким образом, представленная диаграмма наглядно иллюстрирует эволюцию научных подходов и подтверждает тенденцию перехода от традиционных методов анализа к методам глубокого обучения, что соответствует современному состоянию исследований в данной области.

Анализ литературных источников и экспериментальных данных позволил установить, что классические методы машинного обучения (SVM, KNN, решающие деревья) демонстрируют удовлетворительные результаты при работе с небольшими выборками данных, однако их точность, как правило, ограничивается диапазоном 60–80 %, что обусловлено необходимостью ручного выделения признаков и ограниченной способностью учитывать сложные пространственные и морфологические характеристики изображений (см. таблицу 1).

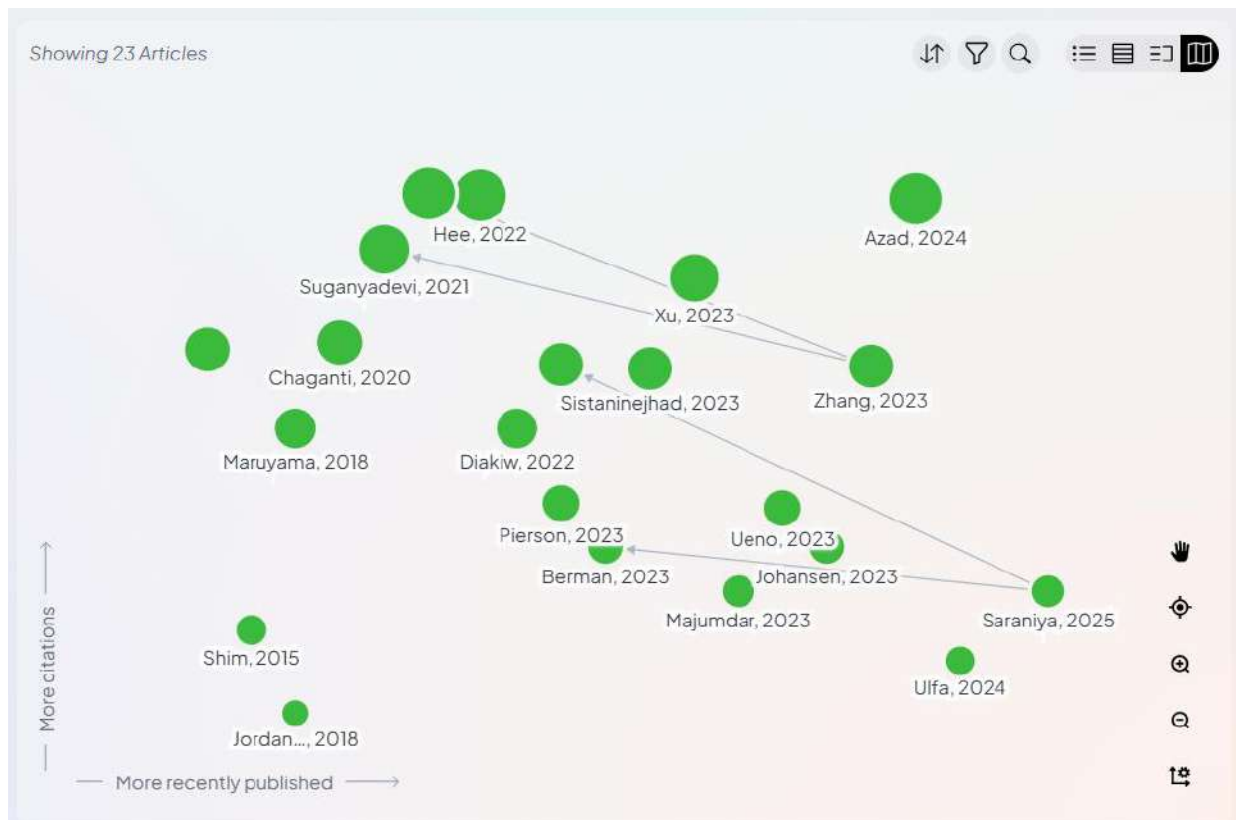


Рисунок 2. Сеть взаимосвязей научных публикаций по теме применения методов машинного обучения для анализа изображений эмбрионов

Ранние сравнительные исследования показали, что совместное использование SVM и CNN значительно повышает точность классификации медицинских изображений (Chaganti et al., 2020), что послужило основой для дальнейших работ в эмбриологии.

В свою очередь, современные архитектуры глубокого обучения демонстрируют существенно более высокую эффективность. Как видно из таблицы 1, модели на основе сверточных нейронных сетей (CNN) обеспечивают точность классификации в диапазоне 85–99 %. Лучшие результаты среди статических изображений показала архитектура InceptionV3 (до 99,09 % на стадии Day 3 и 89,5 % на Day 5), за ней следуют ResNet50 (до 97,27 %) и EfficientNet-B0 (93–95 % при пятиклассовой градации эмбрионов). Модель EfficientNet-B0 значительно превосходит другие CNN по соотношению точности и вычислительной эффективности (Shim et al., 2024).

Особенно высокие показатели достигнуты при использовании transfer learning, ансамблевых подходов и многостовольных архитектур. Dual-Branch CNN, интегрирующий морфологические и пространственные признаки, продемонстрировал точность 92–96 % и F1-score до 0,98 (Saraniya & Ruth, 2025). Аналогично Inception-ResNet показал хорошие результаты в персонализированном прогнозировании исходов беременности (Majumdar et al., 2023). Применение ResNet в обработке медицинских изображений имеет значительный прогресс, однако остаются вызовы, связанные с переносимостью моделей между разными клиниками (Xu et al., 2023; Hee et al., 2022).

Таблица 1. Сравнение методов.

Модель	Год	Тип	Датасет	Размер выборки	Тип данных	Accu-racy	F1-score	Особенности	Источник
SVM	2018	Классический	Медицинские изображения	~500–1000	Статические	68–75 %	~0,70	Требуется ручное выделение признаков, падает на сжатых изображениях	Maruyama et al. (2018)
Inception V3 (Day 3)	2024	CNN	Embryo IVF (Day 3)	1432	Статические	99,0 %	99%	Лучшая среди сравниваемых, высокая точность	Ulfa et al. (2024)
Inception V3 (Day 5)	2024	CNN	Embryo IVF (Day 5)	1432	Статические	89,5 %	89%	Лучшая среди сравниваемых, высокая точность	Ulfa et al. (2024)
ResNet50 (Day 3)	2024	CNN	Embryo IVF (Day 3)	1432	Статические	97,2 %	95%	Глубокая архитектура, хорошая обобщаемость	Ulfa et al. (2024)
ResNet50 (Day 5)	2024	CNN	Embryo IVF (Day 5)	1432	Статические	86,8 %	95%	Глубокая архитектура, хорошая обобщаемость	Ulfa et al. (2024)
VGG16	2024	CNN	Embryo IVF (Day 3/5)	1432	Статические	82–85 %	~0,82	Самая низкая среди современных CNN	Ulfa et al. (2024)
Efficient Net-B0	2024	CNN	Embryo images (5 классов)	~3000–4000	Статические	93–95 %	~0,92	Наиболее эффективная лёгкая архитектура	Shim et al. (2024)
Dual-Branch CNN	2025	CNN (ансамбль)	Embryo clinical	~2000–4000	Статические + пространственные	92–96 %	0,93–0,98	Интеграция морфологических и пространственных признаков	Saraniya & Ruth (2025)
Inception-ResNet	2023	CNN (глубокая)	IVF персонализированный	~1500+	Статические	88–93 %	~0,90	Персонализированный прогноз беременности	Majumdar et al. (2023)
AI time-lapse модель	2023	DL (CNN/ансамбль)	Time-lapse blastocyst	~1000–5000	Time-lapse последовательности	85–92 %	~0,87	Коррелирует генетикой морфологией	Berman et al. (2023) / Diakiw et al. (2022)
ResNet + transfer learning	2024	CNN	Embryo dataset	~3000–5000	Статические / Time-lapse	90–94 %	~0,88	Лучшая переносимость при transfer learning	Ulfa et al. (2024) / Xu et al. (2023)

Отдельное внимание было уделено сравнению моделей, работающих с различными типами данных. Установлено, что использование time-lapse последовательностей позволяет дополнительно повысить точность классификации по сравнению со статическими изображениями за счёт анализа динамики развития эмбриона (Armstrong et al., 2018; Johansen et al., 2023; Ueno et al., 2023; Berman et al., 2023). Модели, обученные на time-lapse данных, демонстрируют accuracy 85–92 % и AUC выше 0,79, однако требуют значительно большего объема данных и вычислительных ресурсов.

На рисунке 3 представлено сравнение точности различных моделей машинного обучения, применяемых для классификации изображений эмбрионов. Как видно из графика, наблюдается отчетливая тенденция повышения точности при переходе от классических алгоритмов к методам глубокого обучения. Сравнение полученных

результатов с данными других исследований показало высокую степень согласованности: большинство авторов отмечают преимущество методов глубокого обучения над классическими алгоритмами в задачах анализа медицинских изображений. Вместе с тем выявлены и определённые расхождения, связанные с различиями в используемых датасетах, методах предобработки и критериях оценки. Например, в ряде работ наблюдается снижение точности моделей при переносе на данные из других клиник, что указывает на проблему обобщающей способности моделей.

Научная новизна исследования заключается в комплексном сопоставлении различных классов алгоритмов с учётом специфики эмбриологических данных, включая влияние качества разметки, объёма выборки и типа входных данных на итоговые показатели моделей. Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что нейросетевые методы являются наиболее перспективными для автоматизации оценки качества эмбрионов (Salih et al., 2023).

В то же время выявлены ограничения исследования. Ключевыми из них являются ограниченная доступность открытых медицинских данных, неоднородность используемых датасетов и отсутствие единых стандартов оценки качества эмбрионов. Несмотря на то, что большинство работ сосредоточено на классификации, обзоры по сегментации медицинских изображений (Wang et al., 2022) указывают на потенциал предварительной сегментации эмбриона перед классификацией. Кроме того, высокая вычислительная сложность современных моделей может затруднять их внедрение в практические системы без соответствующей технической инфраструктуры.



Рисунок 3. Сравнение лучших показателей Accuracy и F1-score (в %) для различных моделей на основе данных из Таблицы 1

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов при разработке интеллектуальных систем поддержки принятия решений в репродуктивной медицине. Представленные выводы могут служить основой для выбора оптимальных методов анализа изображений эмбрионов и повышения эффективности процедур экстракорпорального оплодотворения. Zhang и Qie (2023) в своём обзоре отмечают, что применение глубокого обучения к медицинской визуализации существенно повышает объективность диагностики, что полностью согласуется с результатами настоящего исследования.

Таким образом, проведённое исследование расширяет существующие представления о применении методов машинного обучения в эмбриологии, подтверждает их высокую эффективность и определяет перспективные направления дальнейших исследований, включая разработку более универсальных моделей и интеграцию мультифакторных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого исследования был выполнен сравнительный анализ методов машинного обучения, применяемых для оценки качества эмбрионов на основе изображений. Рассмотрены как классические алгоритмы (SVM, KNN, решающие деревья), так и современные подходы глубокого обучения, основанные на сверточных нейронных сетях (ResNet, EfficientNet, Inception). Проведённое сопоставление показало существенное преимущество нейросетевых моделей по ключевым метрикам качества классификации, включая точность, F1-меру и устойчивость к вариативности данных.

Полученные результаты подтверждают, что классические методы машинного обучения демонстрируют удовлетворительную эффективность при работе с небольшими наборами данных, однако их точность ограничена и зависит от ручного выделения признаков. Обзорные работы последних лет, в контексте медицинской визуализации в целом, (Sistaninejhad et al., 2023) подтверждают, что глубокое обучение доминирует в анализе медицинских изображений благодаря способности автоматического извлечения признаков. В свою очередь, модели глубокого обучения позволяют автоматически извлекать информативные признаки из изображений эмбрионов, что обеспечивает более высокую точность классификации и лучшую обобщающую способность. Наилучшие показатели были продемонстрированы архитектурами EfficientNet и ResNet, особенно при использовании подходов transfer learning и расширенных методов предобработки данных.

Научная новизна работы заключается в комплексном сравнительном анализе различных классов алгоритмов машинного обучения с учётом специфики эмбриологических изображений и условий их получения. В рамках исследования выявлены ключевые факторы, влияющие на точность классификации, включая качество разметки данных, объём обучающей выборки, тип входных изображений и использование временных последовательностей time-lapse. Установлено, что анализ динамики развития эмбриона позволяет повысить точность прогнозирования по сравнению со статическими изображениями.

Практическая значимость работы состоит в возможности применения полученных результатов при разработке интеллектуальных систем поддержки принятия решений в репродуктивной медицине. Использование моделей глубокого обучения может повысить объективность оценки эмбрионов, снизить влияние субъективного фактора и улучшить эффективность процедур экстракорпорального оплодотворения.

К ограничениям исследования следует отнести ограниченную доступность открытых медицинских данных, неоднородность используемых датасетов и отсутствие единых стандартов оценки качества эмбрионов. Кроме того, внедрение современных нейросетевых моделей требует значительных вычислительных ресурсов и дополнительной клинической валидации.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой более универсальных моделей, способных эффективно работать с данными из различных клиник, интеграцией мультифакторной информации (морфология, генетические данные, временные характеристики), а также созданием гибридных систем, объединяющих методы машинного обучения и экспертные знания эмбриологов. Дальнейшее развитие данных направлений позволит повысить точность автоматической оценки эмбрионов и расширить возможности применения интеллектуальных технологий в репродуктивной медицине.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная статья подготовлена без финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность коллегам за методологическую поддержку и полезные обсуждения, а также анонимным рецензентам за ценные замечания, способствовавшие улучшению качества статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Все содержательные решения, выполнены авторами самостоятельно

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Afuan L., Isnanto R. (2025). A comparative study of machine learning algorithms for fall detection in technology-based healthcare system: Analyzing SVM, KNN, decision tree, random forest, LSTM, and CNN. E3S Web of Conferences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560503051>
- AlSaad R., L. Abusarhan, N. Odeh, A. Abd-alrazaq, F. Choucair, R. Zegour, A. Ahmed, S. Aziz, J. Sheikh. (2025). Deep learning applications for human embryo assessment using time-lapse imaging: scoping review. Frontiers in Reproductive Health. <https://doi.org/10.3389/frph.2025.1549642>
- Armstrong S., P. Bhide, V. Jordan, A. Pacey, C. Farquhar. (2018). Time-lapse systems for embryo incubation and assessment in assisted reproduction. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD011320.pub3>
- Azad R., Aghdam E. K., Rauland A., Jia Y., Avval A.H., Bozorgpour A., Karimijafarbigloo S., Cohen J., Adeli E., Merhof D. (2024). Medical Image Segmentation Review: The success of U-Net. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2211.14830>
- Berman A., Anteby R., Efros O., Klang E., Soffer, S. (2023). Deep Learning for Embryo Evaluation Using Time-Lapse: A Systematic Review of Diagnostic Test Accuracy. American Journal of Obstetrics and Gynecology. <https://doi.org/10.1016/J.AJOG.2023.04.027>
- Chaganti S.Y., Nanda I., Pandi K.R., Prudhvi T., G., Kumar N. (2020). Image Classification using SVM and CNN. 2020 International Conference on Computer Science, Engineering and Applications (ICCSEA). <https://doi.org/10.1109/ICCSEA49143.2020.9132851>
- Diakiw S.M., Hall J.M.M., VerMilyea M., Lim A.Y.X., Quangkananurug W., Chanchamroen S., Bankowski B., Stones R.J., Storr A., Miller A., Adaniya G., Tol R.v., Hanson R., Aizpurua J., Giardini L., Johnston A., Nguyen T., Dakka M.A., Perugini D., Perugini M. (2022). An artificial intelligence model correlated with morphological and genetic features of blastocyst quality improves ranking of viable embryos. Reproductive Biomedicine Online. <https://doi.org/10.1016/J.RBMO.2022.07.018>
- Gardner D.K., Lane M., Schoolcraft W.B. (2002). Physiology and culture of the human blastocyst. Journal of Reproductive Immunology. [https://doi.org/10.1016/S0165-0378\(01\)00136-X](https://doi.org/10.1016/S0165-0378(01)00136-X)
- Hee K.E., Cosa-Linan A., Santhanam N., Jannesari M., Maros M.E., Ganslandt T. (2022). Transfer learning for medical image classification: a literature review. BMC Medical Imaging. <https://doi.org/10.1186/S12880-022-00793-7>
- Johansen M.B., Parner E.T., Kragh M.F., Kato K., Ueno S., Palm S., Kernbach M., Balaban I., KeleşGabrielsen A., Iversen L.H., Berntsen J. (2023). Comparing performance between clinics of an embryo evaluation algorithm based on time-lapse images and machine learning. Journal of Assisted Reproduction and Genetics. <https://doi.org/10.1007/S10815-023-02871-3>
- Majumdar G., Sengupta A., Narad P., Pandey H. (2023). Deep Inception-ResNet: A Novel

- Approach for Personalized Prediction of Cumulative Pregnancy Outcomes in Vitro Fertilization Treatment (IVF). *The Journal of Obstetrics and Gynecology of India*. <https://doi.org/10.1007/S13224-023-01773-9>
- Maruyama T., Hayashi N., Sato Y., Hyuga S., Wakayama Y., Watanabe H., Ogura A., Ogura T. (2018). Comparison of medical image classification accuracy among three machine learning methods. *Journal of X-ray science and technology*. <https://doi.org/10.3233/XST-18386>
- Pierson H., Invik J., Meriano J., Pierson R.C. (2023). A novel system for rapid conversion of Gardner embryo grades to linear scale numeric variables. *Reproductive Biomedicine Online*. <https://doi.org/10.1016/J.RBMO.2023.01.008>
- Salih M., Austin C., Warty R.R., Tiktin C., Rolnik D.L., Momeni M., Rezaatofghi H., Reddy S., Smith V., Vollenhoven B., Horta F. (2023). Embryo selection through artificial intelligence versus embryologists: a systematic review. *Human Reproduction Open*. <https://doi.org/10.1093/HROPEN/HOAO31>
- Saraniya M., Ruth J.,A. (2025). Deep Learning-Based Embryo Quality Assessment: A Dual-Branch CNN Model Integrating Morphological and Spatial Features. *Intelligence-Based Medicine*. <https://doi.org/10.1016/J.IBMED.2025.100273>
- Shim V.J., Shim H., Roh S. (2024). EfficientNet-B0 outperforms other CNNs in image-based five-class embryo grading: a comparative analysis. *Journal of Animal Reproduction and Biotechnology*. <https://doi.org/10.12750/JARB.39.4.267>
- Sistaninejhad B., Rasi H., nayeri p. (2023). A Review Paper about Deep Learning for Medical Image Analysis. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*. <https://doi.org/10.1155/2023/7091301>
- Suganyadevi S., Seethalakshmi V., Balasamy K. (2021). A review on deep learning in medical image analysis. *International Journal of Multimedia Information Retrieval*. <https://doi.org/10.1007/S13735-021-00218-1>
- Ueno S., Berntsen J., Okimura T., Kato K. (2023). Improved pregnancy prediction performance in an updated deep-learning embryo selection model: a retrospective independent validation study. *Reproductive Biomedicine Online*. <https://doi.org/10.1016/J.RBMO.2023.103308>
- Ulfa S., Kusuma H., Sardjono T.A. (2024). Automating Embryo Quality Classification in IVF by Comparing the Performance of ResNet50, VGG16, and InceptionV3. 2024 Beyond Technology Summit on Informatics International Conference (BTS-I2C). <https://doi.org/10.1109/BTS-I2C63534.2024.10941949>
- Wang R., Lei T., Cui R., Zhang B., Meng H., Nandi A.K. (2022). Medical image segmentation using deep learning: A survey. *let Image Processing*. <https://doi.org/10.1049/IPR2.12419>
- Xu W., Fu Y., Zhu D. (2023). ResNet and its application to medical image processing: Research progress and challenges. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. <https://doi.org/10.1016/J.CMPB.2023.107660>
- Zhang H.H., Qie Y. (2023). Applying Deep Learning to Medical Imaging: A Review. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/APP131810521>

ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРДІ ТАЛДАУ НЕГІЗІНДЕ ИНФЕКЦИЯЛАРДЫ ДИАГНОСТИКАЛАУ ҮШІН АШЫҚ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ МОДЕЛЬДЕРІН ҚОЛДАНУ

ӘОЖ 60.681

М.Е.Баталова^{1*}, К.Алибеккызы¹, Е.Жексенов¹

¹Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ, Өскемен, Қазақстан

*Автор-корреспондент: Баталова Мадина Есимханкызы, e-mail:

esimkhan_kizi.m@mail.ru

АНДАТПА. Зерттеудің мақсаты - ортопедиялық имплантаттар аймағындағы инфекцияларды диагностикалау әдісін әзірлеу және талдау, бұл үшін ашық жасанды интеллект модельдері мен температуралық деректер пайдаланылады.

Жұмыста пациенттің температуралық уақыттық қатарларын талдау негізінде инфекциялық асқынуларды анықтау тәсілі ұсынылған. Әдіс ашық жасанды интеллект құралдарын (Scikit-learn, TensorFlow, PyTorch) қолдануға негізделген және деректерді алдын ала өңдеуді, сүзгілеуді, нормализациялауды және жіктеуді қамтамасыз етеді.

Зерттеу барысында Logistic Regression, Random Forest, Support Vector Machine және нейрондық желілер алгоритмдерін қолдана отырып, салыстырмалы модельдеу жүргізілді. Тиімділікті бағалау Accuracy, Precision, Recall, F1-score және ROC-AUC метрикалары арқылы жүзеге асырылды.

Нәтижелер ұсынылған тәсілдің жоғары диагностикалық дәлдікті (94%-ға дейін) қамтамасыз ететінін көрсетті, сонымен қатар ең жоғары ақпараттылық имплантат аймағындағы жергілікті температура көрсеткішіне тән екені анықталды.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы температуралық деректерді инфекциялық процестердің негізгі диагностикалық белгісі ретінде қолдануда, сондай-ақ машиналық оқыту әдістері мен уақыттық логиканы біріктіретін түсіндірілетін диагностикалық модельді әзірлеуде көрінеді.

Зерттеудің практикалық маңыздылығы ұсынылған әдісті телемедицина және IoT жүйелерінде пациенттерді үздіксіз мониторингте қолдану мүмкіндігімен анықталады. Бұл инфекцияларды ерте анықтауға, зертханалық қызметтердің жүктемесін азайтуға және операциядан кейінгі бақылаудың тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: жасанды интеллект, машиналық оқыту, инфекция диагностикасы, температуралық талдау, уақыттық қатарлар, нейрондық желілер, Random Forest, медициналық датчиктер, биомедициналық деректер, ортопедиялық имплантаттар, операциядан кейінгі мониторинг, телемедицина, IoT, интеллектуалды медициналық жүйелер, инвазивті емес диагностика.

КІРІСПЕ

Ортопедиялық имплантаттар аймағындағы инфекциялар асқыну қаупі жоғары және емдеу шығындары көп болатын маңызды медициналық мәселе болып табылады [1,2]. Дәстүрлі диагностикалық әдістер, мысалы бактериологиялық талдау, көп уақытты талап етеді және әрдайым дәл нәтиже бермейді. Сондықтан температуралық деректерді талдауға негізделген жасанды интеллект (ЖИ) әдістері жылдам және инвазивті емес диагностика үшін перспективалы бағыт болып саналады [3,4].

Соңғы жылдары TensorFlow, PyTorch және Scikit-learn сияқты ашық ЖИ модельдері кеңінен қолданылып, интеллектуалды диагностикалық жүйелерді әзірлеуге мүмкіндік берді [5,6]. Сонымен қатар, имплантат маңындағы температураны тіркейтін сенсорлар дамып, пациенттің жағдайын үздіксіз бақылауға жағдай жасалуда [7,8].

Зерттеулер көрсеткендей, жергілікті температураның жоғарылауы қабыну мен инфекцияның маңызды белгісі болып табылады. Бұл температуралық көрсеткіштерді диагностикалық маркер ретінде қолданудың тиімділігін дәлелдейді.

Машиналық оқыту әдістері медициналық деректерді, әсіресе уақыттық қатарларды талдауда жоғары тиімділік көрсетуде [9,10]. Олар инфекцияларды ерте анықтауға және асқынуларды болжауға мүмкіндік береді.

Алайда, клиникалық тәжірибеде ЖИ қолдануға кедергі келтіретін мәселелер әлі де бар. Өртүрлі модельдер (логистикалық регрессия, кездейсоқ орман, нейрондық желілер) дәлдік, тұрақтылық және түсіндірілетіндігі бойынша ерекшеленеді [11-15]. Кездейсоқ орман жоғары дәлдік пен тұрақтылық көрсетсе, логистикалық регрессия жақсы түсіндірілетін модель болып табылады. Нейрондық желілер жоғары дәлдікке ие болғанымен, деректер көлеміне тәуелді және күрделі баптауды талап етеді.

Сондықтан медициналық диагностикалық жүйелерде модельді таңдау дәлдік, интерпретируемость және тұрақтылық арасындағы тепе-теңдікке негізделуі тиіс.

ӘДІСНАМА ЖӘНЕ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕР.

Зерттеу әдіснамасы биомедицина, уақыттық қатарларды талдау және машиналық оқыту әдістерін біріктіруге негізделген. Негізгі мақсат — температуралық деректерге сүйене отырып, қайта өндіруге болатын, түсіндірілетін және шуға төзімді диагностикалық жүйе құру [16].

Температуралық көрсеткіштер қабыну процесінің биомаркерлері ретінде қарастырылады, ал жасанды интеллект модельдері оларды сандық талдау құралы ретінде қолданылады. Ұсынылған жүйе деректерді жинау, алдын ала өңдеу және талдау кезеңдерінен тұрады.

1. Параметрлер мен шектер.

Модельде эталондық мәндер қолданылады:

$$T_0=36.6^{\circ}\text{C}, P_0=7.4$$

Қателіктер:

$$\varepsilon_T=0.2^{\circ}\text{C}, \varepsilon_P=0.05$$

Критикалық ауытқулар:

$$\Delta T_{\text{crit}}=1.9^{\circ}\text{C}, \Delta P_{\text{crit}}=-0.3$$

2. Уақыттық қатарды өңдеу.

Деректер уақыттық қатар ретінде ұсынылады:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

Сигнал 4 фазаға бөлінеді, әр фаза үшін орташа мәндер есептеледі. Температура динамикасы фазалар арасындағы айырма арқылы анықталады:

$$\Delta_k = M_k - M_{k-1}$$

Бұл әдіс тек абсолютті мәндерді емес, өзгеру үрдісін де бағалауға мүмкіндік береді.

3. Қауіп индексі.

Нормаланған көрсеткіштер негізінде тәуекел индексі есептеледі:

$$R = 0.6 \cdot RT + 0.4 \cdot RP$$

4. 4-Stage Lock логикалық моделі.

Инфекция келесі шарттар орындалғанда анықталады:

$$\begin{aligned} R &\geq 0.8 \\ \Delta_2, \Delta_3 &\text{ тұрақты} \\ \Delta_4 &> 0 \\ \Delta_{\text{sum}} &> 0.3^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Бұл модель жалған сигналдарды азайтады және нәтижелердің сенімділігін арттырады.

5. Машиналық оқыту модельдері.

Зерттеуде қолданылған алгоритмдер:

- Logistic Regression;
- Random Forest;
- SVM;
- MLP.

Бағалау метрикалары: Accuracy, Precision, Recall, F1-score.
Қосымша ретінде 5-fold кросс-валидация қолданылды.

6. Эксперимент.

100 пациенттен тұратын синтетикалық деректер жиыны қолданылды:

- 50 — қалыпты;
- 50 — инфекция.

Деректер 80/20 қатынасында бөлінді.

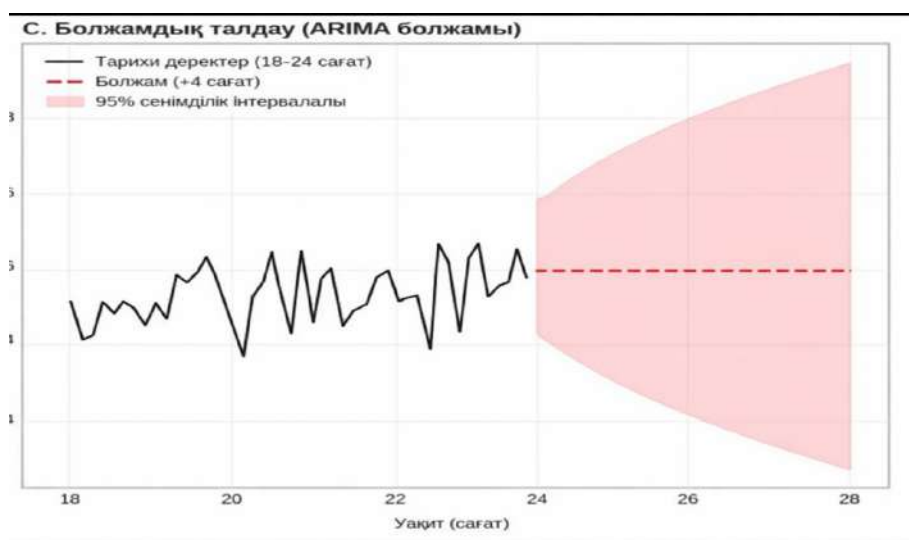
Қорытынды. Ұсынылған модель интерпретация мүмкіндігін (4-Stage Lock) және жоғары дәлдікті (машиналық оқыту) біріктіреді. Нәтижесінде классификация дәлдігі 94%-ға дейін жетті.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ.

Ұсынылған әдістің тиімділігі стандартты метрикалар (Accuracy, Precision, Recall, F1-score) және ROC-талдау арқылы бағаланды. Модельдерді салыстыру нәтижесінде ең жоғары дәлдікті нейрондық желі (MLP) көрсетті (Accuracy $\approx$ 94%), ал Random Forest тұрақтылық пен сенімділік жағынан тиімді екенін дәлелдеді.

Белгілердің маңыздылығын талдау нәтижесінде имплантат аймағындағы жергілікті температура (0.65) жалпы дене температурасына (0.35) қарағанда анағұрлым маңызды диагностикалық параметр екені анықталды.

Сонымен қатар, фазалық талдау арқылы температураның уақыт бойынша өзгеру динамикасы зерттеліп, Δ -көрсеткіштері инфекциялық процестің даму тенденциясын сипаттайтыны көрсетілді.



Сурет 1. Температураның фазалық өзгерістерін талдау (Δ)

Математикалық «4-Stage Lock» моделі жүйенің шуға төзімділігін арттырып, жалған оң нәтижелерді азайтуға мүмкіндік берді. Бұл модель машиналық оқыту нәтижелерін тексеретін логикалық сүзгі ретінде қызмет атқарады.

ROC-талдау нәтижелері [17] модельдердің жоғары диагностикалық қабілетін көрсетті ($AUC = 0.90-0.97$).

Сонымен қатар, ARIMA моделі [18-20] арқылы жүргізілген болжам температураның әрі қарай өсуін көрсетіп, қабыну процесінің даму ықтималдығын растады.



Сурет 2. Температуралық трендтің болжамы (ARIMA)

Зерттеу нәтижелері температуралық деректерді пайдалану инфекцияларды ерте диагностикалауда тиімді екенін дәлелдейді. Әсіресе, жергілікті температураның динамикасын талдау маңызды рөл атқарады. Гибридті тәсіл (математикалық модель + машиналық оқыту) жүйенің дәлдігі мен тұрақтылығын арттырады.

Сонымен қатар, алынған нәтижелер заманауи зерттеулермен сәйкес келеді және температуралық көрсеткіштердің диагностикалық маңыздылығын растайды. Random Forest тұрақтылық көрсетсе, нейрондық желілер жоғары дәлдікке ие екені байқалды.

Дегенмен, зерттеудің шектеулері де бар: синтетикалық деректер қолданылды, сенсорлардың дәлдігіне тәуелділік бар және нейрондық желілерді баптау қажет.

Болашақта модельді нақты клиникалық деректерде тексеру, қосымша физиологиялық параметрлерді енгізу және жүйені телемедицина мен IoT платформаларымен интеграциялау жоспарлануда.

Осылайша, ұсынылған әдіс ерте диагностикаға арналған интеллектуалды медициналық жүйелерді құру үшін жоғары әлеуетке ие.

ҚОРЫТЫНДЫ.

Бұл жұмыста ортопедиялық имплантаттар аймағындағы инфекцияларды диагностикалаудың температуралық деректерді талдауға және ашық жасанды интеллект модельдерін қолдануға негізделген әдісі ұсынылды. Ұсынылған тәсіл уақыттық қатарларды талдау, математикалық модельдеу және машиналық оқыту алгоритмдерін біріктіреді, бұл диагностиканың дәлдігі мен тұрақтылығын арттыруға мүмкіндік береді.

Зерттеу барысында температуралық көрсеткіштер, әсіресе имплантат аймағындағы жергілікті температура, қабыну процесінің маңызды диагностикалық белгісі екені анықталды. Фазалық талдау мен «4-Stage Lock» математикалық моделін қолдану шу әсерін азайтып, температура динамикасын ескеруге мүмкіндік береді, нәтижесінде жалған оң нәтижелердің ықтималдығы төмендейді.

Машиналық оқыту модельдерін салыстырмалы талдау нейрондық желілердің ең жоғары дәлдікке (Accuracy 94%-ға дейін) ие екенін көрсетті, ал Random Forest моделі жоғары тұрақтылық пен интерпретация мүмкіндігін қамтамасыз етті. Математикалық модель мен машиналық оқыту әдістерін біріктіру дәл әрі түсіндірілетін гибриді диагностикалық жүйені құруға мүмкіндік берді.

Алынған нәтижелер ұсынылған әдістің инфекцияларды ерте және инвазивті емес диагностикалауда қолдануға болатынын және оны пациенттерді үздіксіз мониторинг жүйелеріне енгізудің әлеуеті жоғары екенін дәлелдейді.

Болашақ зерттеулердің негізгі бағыттары:

- модельді нақты клиникалық деректерде валидациялау;
- физиологиялық параметрлер жиынтығын кеңейту;
- жүйені телемедицина және IoT платформаларымен интеграциялау;
- уақыттық қатарларды талдау үшін күрделі терең оқыту модельдерін қолдану.

Осылайша, ұсынылған тәсіл диагностика тиімділігін арттыруға және пациенттерді операциядан кейінгі бақылау сапасын жақсартуға бағытталған интеллектуалды медициналық жүйелерді құруға негіз бола алады.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Авторлар осы зерттеу бойынша мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ. Бұл зерттеу сыртқы қаржыландырусыз жүргізілді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Осы жұмысты дайындау барысында жасанды интеллект технологиялары мәтінді өңдеу, ғылыми ақпаратты құрылымдау және тілдік редакциялау мақсатында пайдаланылды. Барлық ғылыми тұжырымдар, талдау нәтижелері және қорытындылар авторларға тиесілі.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

Samia Rahman, Tessa Ogilvie, Daria Okonski, Kaitlyn Ramsay, Ryan Geng, Jessica Tesarek, Laura Swoboda, Robert D. J. Fraser. A Comprehensive scoping review on the use of point-of-care infrared thermography devices for assessing various wound types. Int Wound J. (2025) Aug 17;22(8):e70741. doi: [10.1111/iwj.70741](https://doi.org/10.1111/iwj.70741)

- Harrington Colin .J., Nelson Benjamin A., Lansford Jefferson L., Rivera Julio A., Souza Jason M., Forsberg Jonathan A., Potter Benjamin K. Utility of thermal imaging in predicting superficial infections in transfemoral osseointegrated implants. *Plastic & Reconstructive Surgery-Global Open*. 12(2):p e5602, February (2024). DOI: <https://doi.org/10.1097/GOX.0000000000005602>
- Nowakowski Antoni Z., Kaczmarek Mariusz. (2025), Artificial intelligence in IR thermal imaging and sensing for medical applications. *Sensors*. 25(3),891. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25030891>
- Delrieux Claudio, Mauro Nieves Offidani, Facundo Roffel, Maria Carolina Gonzalez Galtier, Miguel Massiris. (2025), *Data*, 10(8), 123. DOI: <https://doi.org/10.3390/data10080123>
- Breiman L. Random forests. *Machine Learning*. (2001), Vol. 45. P.5–32. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Yosri A Fahim, Ibrahim W Hasani, Samer Kabba, Waleed Mahmoud Ragab. (2025), Artificial intelligence in healthcare and medicine: clinical applications, therapeutic advances, and future perspectives. *Eur J Med Res*. Sep 23;30:848. doi: [10.1186/s40001-025-03196-w](https://doi.org/10.1186/s40001-025-03196-w)
- Jesper Johnsson, Ola Björnsson, Peder Andersson, Andreas Jakobsson, Tobias Cronberg, Gisela Lilja, Hans Friberg, Christian Hassager, Jesper Kjaergard, Matt Wise, Niklas Nielsen, Attila Frigyesi. Artificial neural networks improve early outcome prediction and risk classification in out-of-hospital cardiac arrest patients admitted to intensive care. *PubMed Central*. (2020) Jul 30;24:474. doi: [10.1186/s13054-020-03103-1](https://doi.org/10.1186/s13054-020-03103-1)
- Noordhuis P.H.H., Jutte Paul C., Kottapalli Ajay G.P., Claudine J.C. Lamothe & Roossien Charissa C.C. (2025). Advancements in biomedical sensors for early detection of failure in hip and knee implants: scoping review on potential sensors for implant integration. *Ann. Biomed. Eng.* Volume 53, pages 2392-2407. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10439-025-03780-5>
- Dragosloveanu S., Vulpe Diana Elena, Constantin Adrian Andrei, Dana-Georgiana Nedelea, Nicolae Dragos Garofil, Cătălin Anghel, Christiana Diana Maria Dragosloveanu, Romica Cergan, Cristian Scheau. (2025), Predicting periprosthetic joint infection: evaluating supervised machine learning models for clinical application. *Journal of Orthopaedic Translation*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jot.2025.06.016>
- Shahid Fahad, Hsu Min-Huei, Yung-Chun Chang & Wen-Shan Jian. (2025), Using Generative AI to extract structured information from free text pathology reports. *J Med Syst*. Volume 49, article number 36. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10916-025-02167-2>
- Chantal van Houten, Josephine Sophia van de Maat, Christiana Naaktgeboren, Louis Bont, R. Oostenbrink. Update of a clinical prediction model for serious bacterial infections in preschool children by adding a host-protein-based assay: a diagnostic study. *PMJ Paediatr Open*. (2019), Sep 20;3(1):e000416. doi: [10.1136/bmjpo-2018-000416](https://doi.org/10.1136/bmjpo-2018-000416)
- Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. — MIT Press, (2016), Volume 19, pages 305-307. <https://doi.org/10.1007/s10710-017-9314-z>
- Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning*. — Springer, (2009). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>
- Marco Tulio Ribeiro, Sameer Singh, Carlos Guestrin, Authors Info & Claims. (2016), “Why should I trust you?": explaining the predictions of any classifier. *KDD '16: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Pages 1135 – 1144. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939778>
- Sajjad Farashi, Hossein Emad Momtaz. Prediction of urinary tract infection using machine learning methods: a study for finding the most-informative variables. *BMC Med Inform*

Decis Mak. (2025) Jan 9;25:13.

DOI: <https://doi.org/10.1186/s12894-021-00864-0>

Nourelhouda Groun, Maria Villalba-Orero, Enrique Lara-Pezzi, Eusebio Valero, Jesus Garicano- Mena, Soledad Le Clainche. A novel data-driven method for the analysis and reconstruction of cardiac cine MRI. Computers in Biology and Medicine (Elsevier). Volume 151, Part B, December (2022), 106317.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2022.106317>

Vulpe Diana Elena, Anghel Catalin, Scheau Cristian, Dragosloveanu Serban, Sandulescu Oana. (2025), Artificial Intelligence and its role in predicting periprosthetic joint infections. Biomedicines, 13(8), 1855.

DOI: <https://doi.org/10.3390/biomedicines13081855>

Yogev David, Coldberg Tomer, Arami Amir, Tejman-Yarden Shai, Thomas E. Winkler, Ben M. Maoz. (2023), Current state of the art and future directions for implantable sensors in medical technology: clinical needs and engineering challenges. Applied Physics Reviews Bioeng. 7, 031506.

DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0152290>

Salimy Mehdi S., Buddhiraju Anirudh, Tony L.-W. Chen, Ashish Mittal, Pengwei Xiao & Young-Min Kwon. (2025), ML to predict periprosthetic joint infections following primary total hip arthroplasty using a national database. Arch Orthop Trauma Surg. Volume 145, article number 131.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s00402-025-05757-4>

Liao Ziming, Zhang Luyao, Li Jingxuan, Zhou Yujie, Cao Yu, Wei Yan, Du Jingjing, Lu Li, Huang Di. (2025), Near-infrared smart responsive orthopedic implants with synergistic antimicrobial and bone integration-promoting properties. J. Orthop. Translation. Volume 52, May 2025, Pages 55-69.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jot.2025.03.015>

БАНК СЕКТОРЫНДА КЛИЕНТТЕРДІҢ КЕТУІН БОЛЖАУҒА АРНАЛҒАН КЛАССИФИКАЦИЯЛАУ МОДЕЛЬДЕРІНЕ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТҮРДЕ ТАЛДАУ ЖАСАУ

УДК 004 (1082)

А.К.Балтабекова^{1*}, А.С.Тлебалдинова¹

¹Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы

* Автор-корреспондент: Балтабекова Алуа Касеновна, e-mail: b.k.alua@mail.ru

АНДАТПА. Банк секторында клиенттердің кетуін болжау қаржы ұйымдарының тұрақтылығы мен бәсекеге қабілеттілігін қамтамасыз етуде маңызды міндеттердің бірі болып табылады. Бұл жұмыста клиенттердің кету ықтималдығын анықтау үшін машиналық оқытудың классификация модельдеріне салыстырмалы талдау жүргізілді. Зерттеу барысында логистикалық регрессия, Random Forest және градиенттік бустинг алгоритмдері қолданылып, олардың тиімділігі accuracy, precision, recall және F1-score метрикалары арқылы бағаланды. Талдау нәтижесінде градиенттік бустинг моделі ең жоғары нәтижелер көрсетіп, клиенттердің кетуін болжауда тиімді әдіс ретінде анықталды. Алынған нәтижелер машиналық оқыту әдістерін банк секторында клиенттерді ұстап қалу стратегияларын жетілдіру үшін қолданудың орындылығын дәлелдейді.

Түйінді сөздер: машиналық оқыту, логистикалық регрессия, Random Forest, градиенттік бустинг, клиенттердің кетуі, банк жүйесі, классификация.

КІРІСПЕ

Қазіргі таңда банк секторы белсенді цифрлық трансформация кезеңін бастан өткізуде, оның аясында машиналық оқыту үлкен деректерді талдау және клиенттердің мінез-құлқын болжау үшін ең маңызды құрал болып табылады. Банктер арасындағы бәсекелестіктің артуына байланысты клиенттерді сақтау мәселесі ерекше маңызды рөл атқаруда. Клиенттердің банктен кетуі қаржы ұйымдарының табысының төмендеуіне және жаңа клиенттерді тартуға кететін шығындардың артуына алып келеді. Осыған байланысты клиенттердің кету ықтималдығын алдын ала анықтау және тиімді басқару шешімдерін қабылдау үшін деректерді талдаудың заманауи әдістерін қолдану мәселесі болып табылады.

Клиенттердің кетуі — бұл клиенттердің қаржы ұйымымен немесе қызмет көрсетушімен ынтымақтастықты тоқтатуы немесе оның қызметтерін пайдаланудан бас тарту құбылысы. Бұл белгілі бір уақыт аралығында ұйымның өнімдері мен қызметтерін пайдалануды тоқтатқан клиенттердің пайыздық үлесін көрсетеді. Клиенттердің кетуі бизнес үшін маңызды көрсеткіштердің бірі болып табылады, өйткені ол қаржы ұйымының табысына, дамуына және клиенттерді сақтап қалу деңгейіне тікелей әсер етеді.

Клиенттердің банктен кетуі көбінесе олардың қанағаттану деңгейінің төмендеуі, қызмет сапасының жеткіліксіздігі немесе бәсекелес ұйымдардың тиімді ұсыныстарымен байланысты болуы мүмкін. Мұндай өзгерістерді уақытында анықтамау банктер үшін клиенттердің азаюына және қаржылық шығындарға әкелуі мүмкін. Сондықтан клиенттердің мінез-құлқын талдау және олардың кету ықтималдығын болжау банк саласындағы маңызды зерттеу бағыттарының бірі.

Бұл мәселені шешуде машиналық оқыту әдістерін қолдану клиенттердің кетуін

болжаудың дәлдігін арттыруға және шешім қабылдау процесіндегі субъективті факторларды азайтуға мүмкіндік береді. Әсіресе классификация модельдері клиенттердің мінез-құлқы туралы деректер негізінде олардың банктен кету ықтималдығын анықтауда тиімді құрал болып табылады.

Осы зерттеу барысында банк секторындағы клиенттердің кетуін болжау үшін кеңінен қолданылатын үш классификация алгоритмінің салыстырмалы талдауы жүргізіледі: логистикалық регрессия, Random Forest (кездейсоқ орман) және градиенттік бустинг. Бұл модельдер деректерді талдау дәлдігі, есептеу тиімділігі және практикалық қолдану мүмкіндігі тұрғысынан қарастырылып, банк саласында қолдануға қатысты ұсыныстар беріледі.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Машиналық оқыту әдістері клиенттердің транзакциялық белсенділігін, қаржылық мінез-құлқы және қызметтерді пайдалану ерекшеліктері сияқты көптеген факторларды бір мезгілде талдауға мүмкіндік береді. Бұл өз кезегінде клиенттердің кету ықтималдығын дәлірек болжауға және әр клиентке жеке қызмет көрсету стратегиясын әзірлеуге көмектеседі. Зерттеудің негізгі мақсаты – аталған модельдердің жұмысын салыстырмалы түрде талдау арқылы клиенттердің кетуін классификациялау үшін ең тиімді әдісті анықтау.

Зерттеу кезінде көрсетілген алгоритмдердің нәтижелері нақты деректер жиынтығы негізінде бағаланады. Әрбір модельдің тиімділігі классификация сапасын бағалаудың негізгі метрикалары арқылы талданады: дәлдік (accuracy), оң класс үшін дәлдік (precision), толықтық (recall) және F1-метрика. Бұл метрикалар модельдің объектілерді дұрыс жіктеу қабілетін және қателіктерге бейімділігін кешенді түрде бағалауға мүмкіндік береді.

Модельдерді салыстыру нәтижесінде банк секторындағы клиенттердің кетуін болжау мәселесін қай алгоритмнің тиімдірек екендігі анықталады. Зерттеу барысында 1-суретте Kaggle платформасында ашық деректер көздерінен алынған деректер жиынтығы пайдаланылып, олардың негізінде машиналық оқыту алгоритмдерінің жұмысы талданады.

CustomerID ▲	Age	Gender	Tenure	Usage Frequency	Support Calls	Payment Delay	Subscription Type	Contract Length	Total Spend	Last Interaction	Churn
1	22	Female	25	14	4	27	Basic	Monthly	598	9	1
10	65	Male	8	4	2	23	Basic	Annual	995	10	0
100	40	Male	6	26	10	0	Basic	Annual	632	5	0
1000	36	Male	17	24	9	27	Premium	Quarterly	732	12	0
10000	34	Female	39	19	9	14	Premium	Monthly	177	23	0
10001	26	Male	14	25	4	3	Premium	Quarterly	863	26	0
10002	39	Male	47	2	1	13	Basic	Annual	706	11	0
10003	63	Female	57	30	3	26	Standard	Annual	301	2	1
10004	55	Male	25	23	1	22	Basic	Monthly	317	12	0
10005	47	Male	52	7	9	21	Standard	Quarterly	707	4	1

Show 10 per page

Сурет 1. Бастапқы деректер

Енді қолданылған машиналық оқыту алгоритмдерінің сипаттамасы және олардың қолданылу ерекшеліктері қарастырылады.

Логистикалық регрессия – белгілі бір класқа жататын бақылаудың ықтималдығын болжау үшін логистикалық функцияны қолданатын жіктеу әдісі. Бұл әдіс бинарлық классификация есептері үшін қолайлы, мысалы, клиенттің банктен кетудің болжау сияқты міндеттерде тиімді қолданылады.

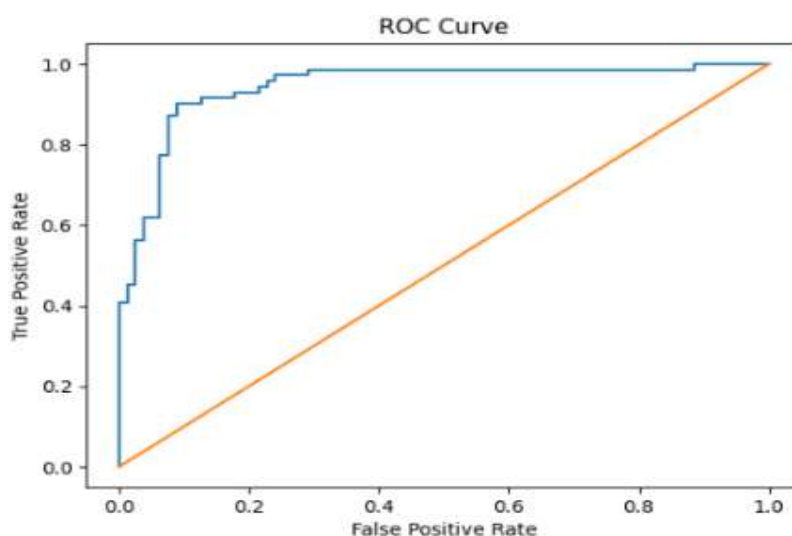
Банк секторындағы клиенттердің кетуін болжау мәселесінде логистикалық регрессия қарапайымдылығы мен нәтижелерінің интерпретациялану мүмкіндігімен ерекшеленеді. Модель клиенттің әртүрлі сипаттамалары (жасы, шоттағы қаражат, транзакциялар саны, қызметті пайдалану жиілігі және т.б.) негізінде оның банктен кету ықтималдығын анықтайды.

Модельдің жалпы дәлдігі шамамен 87% деңгейде, бұл оның қарапайымдылығына байланысты күтілетін нәтиже болды. Precision және recall көрсеткіштері 0.86–0.87 деңгейінде модельдің клиенттердің кетуін анықтауда белгілі бір шектеулері бар екенін көрсетті. F1-метрикасы да бұл модельдің теңгерімді жұмыс істейтінін, бірақ жоғары дәлдікке қол жеткізу үшін жеткіліксіз екенін көрсетті (Сурет 2).

Осылайша, логистикалық регрессия модельдері интерпретациясы жеңіл және тез есептелетін болғанымен, банк секторындағы күрделі және үлкен көлемді деректермен жұмыс істеуде олардың мүмкіндіктері шектеулі. Сондықтан бұл әдіс бастапқы талдау немесе базалық модель ретінде тиімді, бірақ жоғары дәлдік қажет болған жағдайда күрделі алгоритмдерді қолданған дұрыс.

Classification Report:					
	precision	recall	f1-score	support	
0	0.87	0.87	0.87	6793	
1	0.86	0.86	0.86	6082	
accuracy			0.87	12875	
macro avg	0.86	0.86	0.86	12875	
weighted avg	0.87	0.87	0.87	12875	

Сурет 2. Классификация нәтижелерінің көрсеткіштері (логистикалық регрессия)



Сурет 3. ROC curve графигі

Random Forest (кездейсоқ орман) – бұл бірнеше шешім ағаштарын біріктіретін ансамбльдік машиналық оқыту әдісі. Оның негізгі идеясы – деректер мен белгілердің кездейсоқ ішкі жиынтықтарында тәуелсіз бірнеше ағаштарды оқытып, кейін олардың нәтижелерін біріктіру (классификацияда – дауыс беру арқылы). Бұл тәсіл жеке шешім ағаштарына тән қайта үйрену (overfitting) мәселесін азайтып, модельдің тұрақтылығы мен дәлдігін арттырады.

Банк секторындағы клиенттердің кетуін болжау міндетінде Random Forest моделі күрделі және сызықтық емес байланыстарды анықтауда тиімді құрал болып табылады. Модель клиенттердің қаржылық мінез-құлқы, транзакциялық белсенділігі және қызметтерді пайдалану ерекшеліктері сияқты факторларды ескере отырып, олардың банктен кету ықтималдығын болжайды.

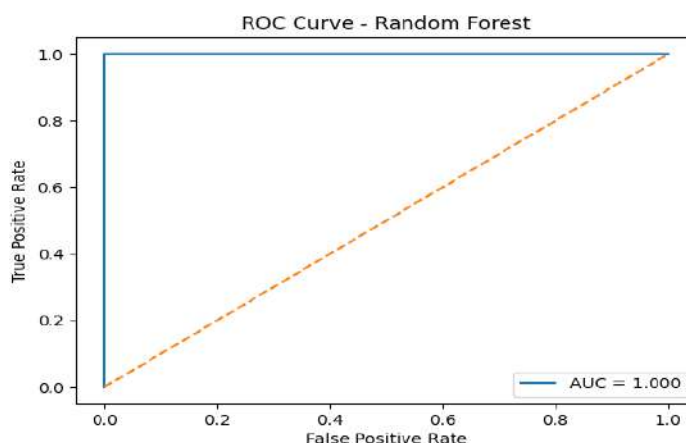
Модельдің жалпы дәлдігі 100% деңгейде болды және логистикалық регрессиямен салыстырғанда кейбір жағдайларда ұқсас немесе сәл жоғары

нәтижелер көрсетті. 4 суреттен Precision және recall көрсеткіштері модельдің оң класты (кететін клиенттерді) анықтауда белгілі бір шектеулері бар екенін көрсетті. F1-метрикасы модельдің теңгерімді жұмыс істейтінін көрсеткенімен, нәтижелерді жақсарту мүмкіндігі бар екенін байқатады.

Осыдан, Random Forest моделі логистикалық регрессияға қарағанда күрделі байланыстарды жақсы анықтай алады және деректердегі шудың әсеріне төзімді екенін көруге болады. Дегенмен, жоғары дәлдікке қол жеткізу үшін модель параметрлерін оңтайландыру және анағұрлым жетілдірілген әдістермен салыстырып көруге болады.

Classification Report:				
	precision	recall	f1-score	support
0	0.99	1.00	1.00	6793
1	1.00	0.99	1.00	6082
accuracy			1.00	12875
macro avg	1.00	1.00	1.00	12875
weighted avg	1.00	1.00	1.00	12875

Сурет 4. Классификация нәтижелерінің көрсеткіштері (Random Forest)



Сурет 5. ROC curve графигі

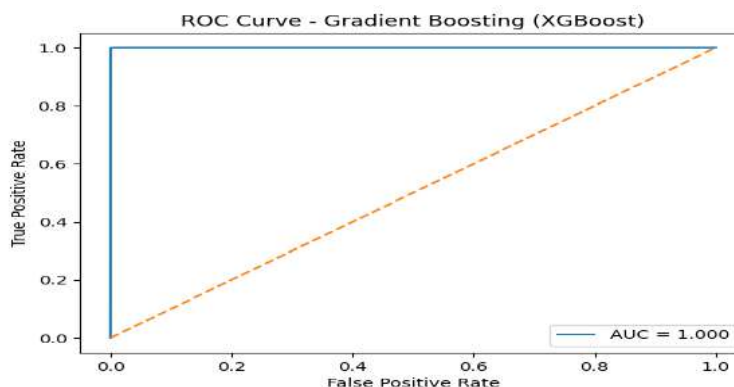
Градиенттік бустинг – бұл ансамбльдік машиналық оқыту әдісі, онда модель әлсіз модельдердің (көбінесе шешім ағаштарының) тізбекті жиынтығы түрінде құрылады. Әрбір келесі модель алдыңғы модельдің қателіктерін түзетуге бағытталады. Бұл процесс қателік функциясын градиенттік түсу әдісі арқылы біртіндеп азайтуға негізделген. Градиенттік бустинг классификация және регрессия есептерінде қолданылады, себебі ол жоғары дәлдікке қол жеткізіп, күрделі тәуелділіктері бар деректермен тиімді жұмыс істейді.

Банк секторындағы клиенттердің кетуін болжау міндетінде градиенттік бустинг моделі клиенттердің мінез-құлқындағы күрделі заңдылықтарды анықтауда жоғары нәтижелер көрсетті. Модель әрбір келесі итерацияда алдыңғы қателіктерді түзету арқылы болжам сапасын жақсартады.

Модельдің жалпы дәлдігі шамамен 100% деңгейінде болды, бұл берілген есеп үшін өте жақсы нәтиже болып табылады. Precision көрсеткіші модельдің жалған оң нәтижелер санын белгілі бір деңгейде азайтатынын көрсетсе, recall мәні клиенттердің едәуір бөлігін дұрыс анықтауға мүмкіндік беретінін дәлелдейді. F1-метрикасының мәні модельдің дәлдік пен толықтық арасындағы теңгерімділігін көрсетеді.

Classification Report:				
	precision	recall	f1-score	support
0	1.00	1.00	1.00	6793
1	1.00	1.00	1.00	6082
accuracy			1.00	12875
macro avg	1.00	1.00	1.00	12875
weighted avg	1.00	1.00	1.00	12875

Сурет 6. Классификация нәтижелерінің көрсеткіштері (градиенттік бустинг)



Сурет 7. ROC curve графигі

Осылайша, градиенттік бустинг клиенттердің кетуін болжау мәселесінде тиімді әдістердің бірі болып табылады. Ол жоғары дәлдікке қол жеткізуге мүмкіндік береді және күрделі деректер құрылымымен жақсы жұмыс істейді. Сондықтан банк секторында клиенттердің кетуін болжау міндеттерінде жоғары сапалы болжам қажет болған жағдайда осы әдісті қолдану тиімді.

НӘТИЖЕЛЕР МЕН ТАЛҚЫЛАУЛАР

Кесте 1-де қарастырылған барлық алгоритмдердің алынған метрикаларының көрнекі салыстырмасы ұсынылған.

Кесте 1. Модельдердің салыстырмалы көрсеткіштері

Модель	Precision	Accuracy	Recall	F1-score
Логистикалық регрессия	0.86-0.87	0.87	0.86-0.87	0.86
Кездейсоқ орман	1.00	1.00	0.99-1.00	1.00
Градиенттік бустинг	1.00	1.00	1.00	1.00

Осылайша, жүргізілген зерттеу нәтижелері градиенттік бустинг әдісінің клиенттердің кетуін болжау міндетінде ең тиімді алгоритмдердің бірі екенін көрсетті. Бұл модель дәлдік (accuracy) пен толықтық (recall) арасындағы оңтайлы теңгерімді қамтамасыз етеді, бұл банк секторында ерекше маңызды, себебі жалған оң (false positive) және жалған теріс (false negative) болжамдарды азайту клиенттерді ұстап қалу стратегияларын дұрыс құруға тікелей әсер етеді.

Логистикалық регрессия мен кездейсоқ орман (Random Forest) модельдері де қанағаттанарлық нәтижелер көрсетті. Алайда олардың тиімділігі кейбір жағдайларда деректердің құрылымына және класстардың теңгерімсіздігіне байланысты шектеулер болуы мүмкін. Логистикалық регрессия қарапайым әрі интерпретациясы жеңіл болғанымен, күрделі сызықтық емес тәуелділіктерді толық қамти алмайды. Ал Random Forest моделі тұрақты нәтиже көрсеткенімен, оның тиімділігі гиперпараметрлерді дұрыс таңдауға байланысты.

Зерттеу барысында алынған нәтижелер модельдерді одан әрі жетілдіру мүмкіндігін де көрсетеді. Осы мақсатта келесі бағыттарды қарастыру ұсынылады:

1. Класстардың теңгерімсіздігін жою әдістерін қолдану (class weighting, oversampling, undersampling).
2. Модельдердің гиперпараметрлерін оңтайландыру (Grid Search, Random Search).
3. Ансамбльдік әдістерді тереңірек зерттеу және деректердің ерекшеліктерін ескере отырып қолдану.

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл зерттеуде банк секторындағы клиенттердің кетуін болжау үшін машиналық оқытудың логистикалық регрессия, Random Forest және градиенттік бустинг модельдеріне салыстырмалы талдау жүргізілді. Әрбір модель нақты деректер жиынтығында оқытылып, олардың тиімділігі accuracy, precision, recall және F1-score метрикалары арқылы бағаланды. Зерттеу нәтижесінде градиенттік бустинг моделі ең жоғары нәтижелер көрсетіп, клиенттердің кетуін болжауда ең тиімді әдіс ретінде анықталды. Алынған нәтижелер машиналық оқыту әдістерін банк секторында клиенттерді ұстап қалу стратегияларын жетілдіру үшін тиімді қолдануға болатынын көрсетті.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Осы зерттеуді жүргізу барысында мүдделер қайшылығы болмады.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Аталған зерттеу сыртқы қаржыландырусыз жүргізілді. Зерттеу жұмысы жеке ғылыми ізденістері аясында орындалды.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Зерттеу барысында көрсетілген әдістемелік қолдау мен ғылыми кеңестер үшін және мақаланың сапасын жақсартуға ықпал еткен ғылыми жетекшіге алғыс білдіріледі.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Котельников, Е. В. *Введение в машинное обучение и анализ данных: учебное пособие* / Е. В. Котельников, А. В. Котельникова., 2023. — 68 с.
- Мюллер А., Гвидо С. *Введение в машинное обучение с помощью Python*, Москва, 2017. 393 с.
- Информационно-аналитический ресурс по машинному обучению <http://www.machinelearning.ru/>
- Вьюгин В.В. Математические основы машинного обучения и прогнозирования. Москва, издательство МЦНМО, 2018. 384 с.
- Cheng Sh. Classification of spam e-mail based on naïve bayes classification model // Highlights in science, engineering and technology. – 2023. – № 39. – С. 749-753.
- СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ КЛАССИФИКАЦИИ: ЛОГИСТИЧЕСКАЯ РЕГРЕССИЯ, RANDOM FOREST И XGBOOST August 2017 Conference: Современные проблемы науки, технологий, инновационной деятельности Ат: г. Белгород, Россия
- Kaggle. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kaggle.com>.
- Стрельников В.Г., Трунов А.С. Применение метода логистической регрессии для задачи классификации текстов судебных решений // Телекоммуникации и информационные технологии. – 2017. – Т. 4. № 2. – С. 75-78.
- Джункеев У. Прогнозирование инфляции в России на основе градиентного бустинга и нейронных сетей // Деньги и кредит. – 2024. – Т. 83. № 1. – С. 53-76.

ҚАТЕРЛІ ІСІКТЕРДІҢ ДАМУ ПРОЦЕСТЕРІН МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ТАЛДАУ ҮШІН МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІНЕ ШОЛУ

ӨОК 004.8:616-006

Д.Ж. Бидахметов^{1*}

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

* Автор-корреспондент: Д.Ж. Бидахметов

АННОТАЦИЯ. Қазіргі таңда онкологиялық аурулар әлем бойынша өлім-жітімнің негізгі себептерінің бірі болып табылады. Қатерлі ісіктерді ерте диагностикалау және олардың даму динамикасын болжау медицинаның маңызды міндеттерінің бірі болып саналады. Соңғы жылдары медициналық деректердің көлемі айтарлықтай өсті, соның нәтижесінде оларды талдау үшін машиналық оқыту әдістері кеңінен қолданыла бастады. Бұл мақалада қатерлі ісіктердің даму процестерін зерттеу үшін қолданылатын машиналық оқыту әдістеріне шолу жасалады. Сонымен қатар ісік өсуінің қарапайым математикалық моделі қарастырылып, әртүрлі алгоритмдердің қолданылу ерекшеліктері талданады. Зерттеу нәтижелері машиналық оқыту әдістерінің медициналық диагностика дәлдігін арттыруға және онкологиялық ауруларды ерте анықтауға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Түйінді сөздер: қатерлі ісік, машиналық оқыту, терең оқыту, нейрондық желілер, медициналық бейнелер, математикалық модельдеу.

КІРІСПЕ

Қазіргі таңда қатерлі ісіктерді ерте анықтау және олардың даму динамикасын болжау медицинаның маңызды бағыттарының бірі болып отыр. Медициналық деректер көлемінің артуы машиналық оқыту әдістерін тиімді қолдануға мүмкіндік береді. Бұл тәсілдер күрделі биомедициналық ақпаратты талдап, диагноз қою дәлдігін арттыруға көмектеседі. Сонымен қатар, математикалық модельдеу ісік өсу заңдылықтарын түсінуге және емдеу стратегияларын жетілдіруге ықпал етеді. Осы зерттеу машиналық оқыту әдістерінің онкология саласындағы рөлін қарастыруға бағытталған.

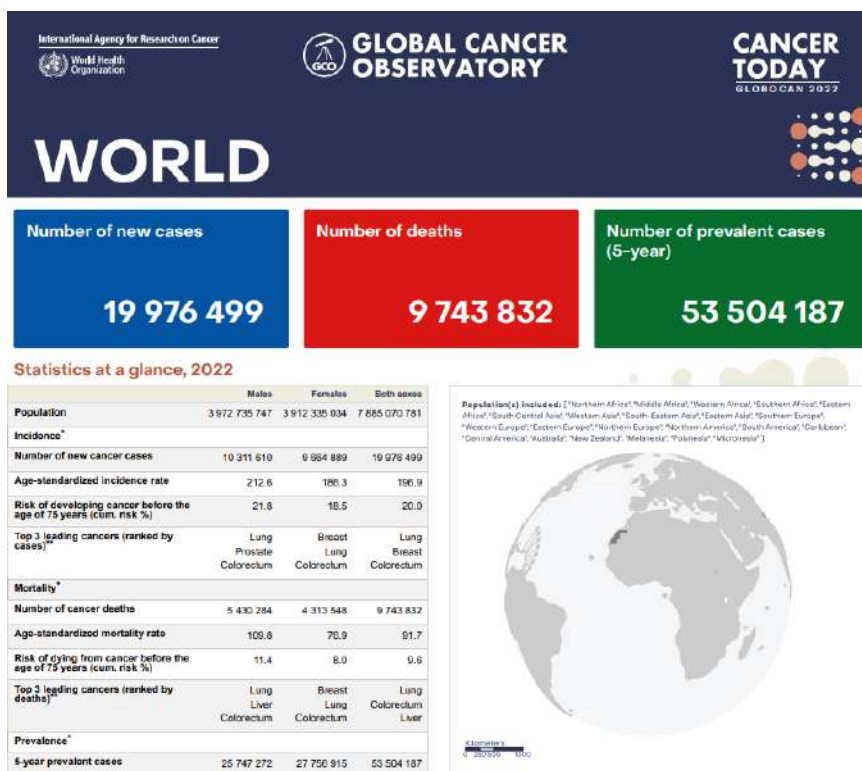
Зерттеу мақсаты - қатерлі ісіктердің дамуын модельдеу және болжау үшін қолданылатын машиналық оқыту әдістеріне шолу жасау және оларды талдау. Қойылған мақсатқа жету үшін келесі міндеттер анықталды: медициналық деректерді талдаудың қолданыстағы тәсілдерін зерттеу, ісік өсуінің математикалық модельдерін қарастыру, сондай-ақ әртүрлі машиналық оқыту алгоритмдерінің тиімділігін бағалау.

Зерттеу нысаны - қатерлі ісіктердің даму үдерістері, ал зерттеу пәні - оларды машиналық оқыту әдістері арқылы модельдеу тәсілдері болып табылады. Жұмыста ғылыми әдебиеттерді талдау, алгоритмдерді салыстырмалы талдау және қарапайым математикалық модельдеу әдістері қолданылады. Бұл кіріспе бөлім жұмыстың негізгі бөлімінде әдістерді және олардың практикалық қолданылуын қарастыруға негіз болады.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Зерттеу тақырыбының өзектілігі медициналық, технологиялық және әлеуметтік-экономикалық өзара байланысты бірнеше факторлармен негізделеді. Қатерлі ісік дүние жүзінде өлімнің басты себептерінің бірі болып қала береді. Дүниежүзілік

денсаулық сақтау ұйымының деректері бойынша қатерлі ісіктер жыл сайын миллиондаған адамның өмірін қиып отыр [1]. Осыған байланысты ісіктерді ерте диагностикалау, олардың даму динамикасын зерттеу және тиімді емдеу әдістерін таңдау ғылыми зерттеулердің маңызды бағыттарының бірі болып саналады. Өлемдегі қатерлі ісіктің таралуы сурет 1-де көрсетілген.



Сурет 1. Өлемдегі ісіктің таралуы

Диагностикалық және терапевтік әдістердегі жетістіктерге қарамастан, ісіктердің айтарлықтай бөлігі әлі де емдеудің тиімділігі күрт төмендеп, күтім құны көтерілген кеш кезеңдерінде диагноз қойылады. Бұл ерте анықтау, болжау және жеке терапия үшін жаңа құралдарға объективті қажеттілікті тудырады.

Заманауи онкология бейнелеу нәтижелері (КТ, МРТ, ПЭТ, цифрлық морфология), геномдық және протеомдық профильдер, клиникалық зертханалық параметрлер және электронды медициналық жазба гетерогенді деректердің үлкен көлемін қамтиды [2]. Дәстүрлі статистикалық әдістер мұндай жоғары өлшемді, шулы және біркелкі емес деректерден үлгілерді әрқашан тиімді түрде шығара бермейді. Машиналық оқыту алгоритмдері (терең оқытуды қоса) үлкен деректер жинақтарымен жұмыс істеу үшін арнайы әзірленген және классикалық талдауға қолжетімсіз күрделі сызықтық емес қатынастарды анықтауға қабілетті.

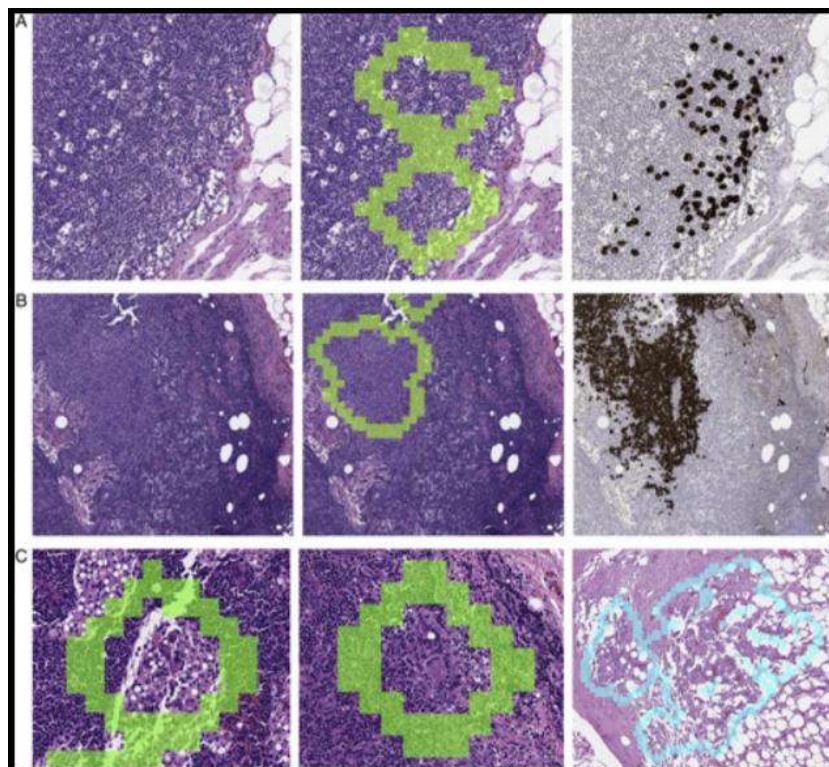
Машиналық оқыту алгоритмдері медициналық бейнелерді автоматты түрде талдауға, ісік белгілерін анықтауға және аурудың даму ықтималдығын болжауға мүмкіндік береді. Жасанды интеллект технологияларын енгізу онкология саласының дамуына өз үлесін қосады.

Зерттеу жұмысының мақсаты - қатерлі ісіктердің даму процестерін модельдеу және талдау үшін қолданылатын машиналық оқыту әдістерін талдау және олардың қолдану мүмкіндіктерін бағалау.

Зерттеу жұмысының ерекшелігі қатерлі ісікті тек диагностикалауда ғана емес, уақыт өте келе даму динамикасын анықтауда. Онкологиядағы машиналық оқыту жұмыстарының көпшілігі негізінен диагностика және тану мәселелерін статикалық болжау бойынша шешеді. Зерттеу жұмысының міндеті қатерлі ісіктің нақты уақыттағы

жағдайын ғана емес, прогрессия траекториясы, қайталанатын бақылаулардағы сипаттамалардың өзгеруі, жылдамдық және мүмкін өсу сценарийлері уақыт бойынша даму процесін анықтау. Фокус тәуекелді жіктеуден және бір реттік бағалаудан уақыт тәуелділіктерін талдауға және өлшеу тізбегіне ісік күйінің өзгеру механизмдеріне ауысады.

Машиналық оқыту және деректерді іздеу әдістері орталық орын алады: жіктеу және регрессия үлгілерін құру және оқыту (логистикалық регрессия, ансамбльдік модельдер, нейрондық желілер және т.б.), кросс-валидация және реттеу процедураларын қолдану, модельдерді интерпретациялау және жеке ерекшеліктердің үлесін бағалау әдістерін қолдану. Компьютерлік көру технологиясы арқылы қатерлі ісікті анықтау сурет 2-де көрсетілген.

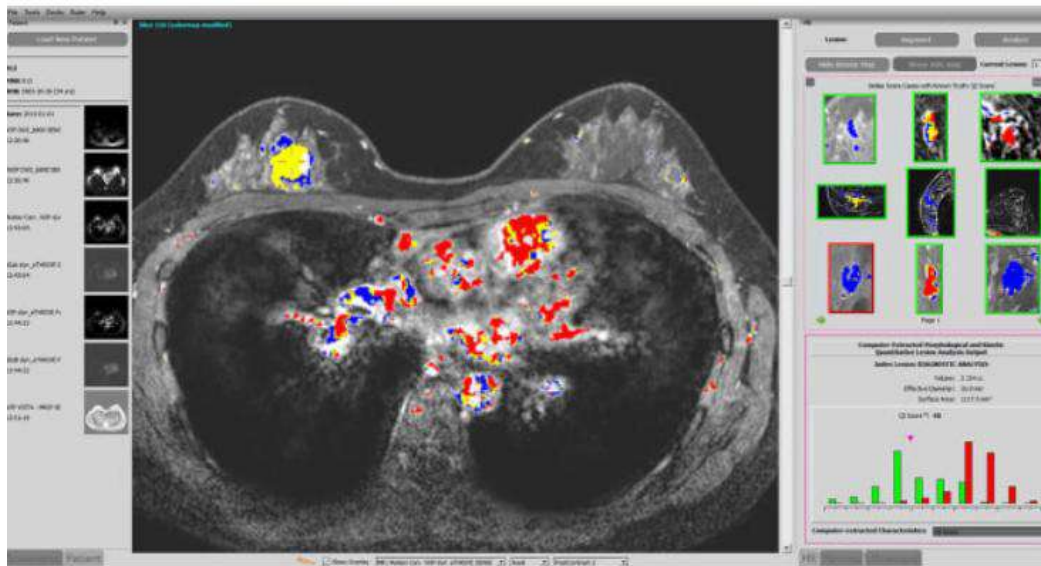


Сурет 2. Компьютерлік көру технологиясы арқылы қатерлі ісікті анықтау

Өзірленген модельдерді бағдарламалық қамтамасыз етуді енгізуге, нәтижелерді визуализациялауға және шешімдерді қолдау жүйесін прототипті құруға мүмкіндік беретін деректерді талдау және машиналық оқыту үшін заманауи бағдарламалық және технологиялық құралдарды пайдалана отырып, алгоритмдер енгізілді және есептеу эксперименттері жүргізіледі. Бұл әдіснамалық негіз диссертациялық зерттеудің ғылыми қатаңдығын, қайталанатындығын және практикалық бағыттылығын қамтамасыз етеді.

Transpara, MammoScreen, ProFound AI сияқты маммографиялық талдауға арналған коммерциялық AI жүйелері және DeepHealth және deepс шешімдері Еуропа мен АҚШ-та маммологиялық скринингте белсенді түрде қолданылады. Олар 2D және 3D маммограммаларын автоматты түрде бағалайды, күдікті аймақтарды белгілейді, қауіп деңгейін есептейді және рентгенологқа пациентті одан әрі тексеруге жіберу туралы шешім қабылдауға көмектеседі. Бұл өнімдер клиникалық сынақтардан өтті, олардың көпшілігі шешім қабылдауды қолдау құралдары ретінде FDA мақұлдаған және Еуропа мен Солтүстік Америкадағы ауруханалар мен скрининг орталықтарында енгізілген [3]. 2025 жылы стандартты маммограмма мен емделушінің жасы негізінде

сүт безі обырының дамуының жеке 5 жылдық қаупін есептейтін Clarity Breast және Prognosia Breast платформалары АҚШ-та қосымша реттеуші рұқсат алды [4]. АҚШ-та қолданысқа енгізілген сүт безіндегі қатерлі ісікті анықтайтын жасанды интеллекттің жұмысы сурет 3-те көрсетілген.



Сурет 3. АҚШ-та қолданысқа енгізілген сүт безіндегі қатерлі ісікті анықтайтын жасанды интеллекттің жұмысы

Бұл болжамның дәлдігі тек сауалнамалар мен тұқым қуалаушылық факторларына негізделген классикалық шкалалардан асып түседі.

Google цифрлық гистологиялық үлгілердегі лимфа түйіндеріндегі сүт безі қатерлі ісігінің метастаздарын анықтау үшін LYNA (Лимфа түйінінің көмекшісі) алгоритмін әзірледі. Зерттеулер көрсеткендей, бұл жүйе өте жоғары сезімталдыққа қол жеткізеді (шамамен 99% метастаздары бар және жоқ бөлімдерді ажыратуда) және патологтарға шағын ісік ошақтарын тез және дәл анықтауға көмектеседі, слайдты қарау уақытын екі есеге дерлік қысқартады [5-6]. Ұқсас шешімдерді PathAI әзірлеуде: оның платформаларын ірі фармацевтикалық компаниялар мен зертханалар цифрлық слайдтарда ісік тінін автоматты түрде бөлектеу, фиброзды, коллагенді, ісік тығыздығын және PD-L1 сияқты маркерлердің экспрессиясын анықтау үшін пайдаланады [7]. Бұл иммунотерапияға пациенттерді таңдау үшін өте маңызды. Бірнеше зерттеулер патологтың жұмыс процесіне терең үлгілерді енгізу дәлдікті жақсартатынын және мамандар арасындағы өзгермелілікті азайтатынын көрсетті.

Онкологияда әртүрлі машиналық оқыту алгоритмдері кеңінен қолданылады, себебі олар медициналық деректерді талдауға, ісіктерді классификациялауға және аурудың даму динамикасын болжауға мүмкіндік береді. Ең жиі қолданылатын әдістердің бірі - логистикалық регрессия, ол екі класты классификация есептерінде тиімді болып табылады және ісіктің қатерлі немесе қатерсіз екенін анықтау үшін пайдаланылуы мүмкін. Сонымен қатар Support Vector Machine (SVM) алгоритмі жоғары өлшемді деректермен жұмыс істеуде тиімділігімен ерекшеленеді және медициналық диагностика саласында жиі қолданылады. Random Forest әдісі шешім ағаштарының ансамбліне негізделген және күрделі әрі шуылға толы деректер құрылымын талдауда жоғары тұрақтылық көрсетеді [8]. Соңғы жылдары терең оқыту әдістері ерекше маңызға ие болды, әсіресе нейрондық желілер медициналық бейнелерді өңдеу саласында жоғары нәтижелер көрсетті. Конволюциялық нейрондық желілер (CNN) компьютерлік томография және магниттік-резонанстық томография кескіндерінде ісік

белгілерін автоматты түрде анықтауға мүмкіндік береді. Бірқатар ғылыми зерттеулер терең нейрондық желілердің кейбір жағдайларда дәрігерлердің диагностикалық нәтижелеріне жақын немесе оларға тең дәлдік көрсете алатынын дәлелдеді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Қатерлі ісіктердің даму процестерін сипаттауда математикалық модельдер қолданылады. Математикалық модельдер қатерлі ісік жасушаларының көбею заңдылықтарын сипаттайды және олардың уақыт бойынша өзгерісін көрсетеді. Қазіргі кезде ісік өсуін сипаттайтын экспоненциалдық және логистикалық модельдер бар.

Ісік өсуінің ең қарапайым математикалық моделі - экспоненциалдық өсу моделі [9]. Бұл модель бойынша ісік жасушаларының көбею жылдамдығы олардың жалпы санына пропорционал болады.

$$\frac{dN}{dt} = rN$$

мұндағы, N - ісік жасушаларының саны, t - уақыт, r - өсу коэффициенті.

Бұл дифференциалдық теңдеу ісік жасушаларының саны уақыт өткен сайын экспоненциалды түрде өсетінін көрсетеді және теңдеудің шешімі келесі түрде жазылады:

$$N(t) = N_0 e^{rt}$$

мұндағы, N_0 - бастапқы уақыттағы ісік жасушаларының саны.

Экспоненциалдық модель ісіктің дамуының бастапқы кезеңдерін жақсы сипаттайды [10]. Бұл кезеңде жасушалар тез бөлінеді және олардың өсуіне айтарлықтай шектеулер болмайды.

Қатерлі ісіктің өсуін нақтырақ сипаттау үшін логистикалық модель қолданылады. Бұл модельде өсу жылдамдығы уақыт өте келе баяулайтыны ескеріледі.

$$\frac{dN}{dt} = rN \left(1 - \frac{N}{K}\right)$$

мұндағы, N - ісік жасушаларының саны, r - өсу коэффициенті, K - қоршаған ортаның сыйымдылығы.

K параметрі ісік жасушаларының максималды мүмкін санын білдіреді. Қоршаған орта ресурстары жеткіліксіз болған кезде ісік өсуі баяулай бастайды.

Логистикалық модель ісік дамуының бірнеше кезеңін көрсетеді. Бірінші кезеңде ісік жасушалары аз болғандықтан өсу жылдамдығы жоғары болады. Бұл кезең экспоненциалды өсуге ұқсайды. Екінші кезеңде ісік мөлшері ұлғайған сайын қоректік заттардың жетіспеушілігі байқалады. Соның нәтижесінде өсу жылдамдығы баяулайды. Үшінші кезеңде ісік мөлшері қоршаған ортаның сыйымдылығына жақындайды және өсу іс жүзінде тоқтайды.

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл жұмыста қатерлі ісіктердің даму процестерін зерттеу үшін қолданылатын машиналық оқыту әдістеріне шолу жасалды. Зерттеу нәтижелері машиналық оқыту алгоритмдерінің медициналық деректерді талдауда үлкен әлеуетке ие екенін көрсетті.

Нейрондық желілер мен терең оқыту әдістері медициналық бейнелерді талдауда жоғары дәлдік көрсетеді. Сонымен қатар математикалық модельдер ісіктің даму динамикасын сипаттауға мүмкіндік береді.

Болашақта машиналық оқыту және математикалық модельдеу әдістерінің біріктірілуі онкологиялық ауруларды ерте диагностикалау және тиімді емдеу стратегияларын әзірлеу үшін жаңа мүмкіндіктер ашуы мүмкін.

МҮДДЕЛЕР ҚАРАМА-ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Автор мүдделер қарама-қайшылығының жоқтығын мәлімдейді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Автор өз жұмыстарын дайындаудың барлық кезеңдерінде жасанды интеллект құралдарын пайдаланбады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- World Health Organization. (2025). Cancer [Fact sheet]. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cancer>
- International Atomic Energy Agency. (n.d.). Диагностика рака с помощью КТ, МРТ, ПЭТ и ОФЭКТ. <https://www.iaea.org/ru/temy/diagnostika-raka>
- ScreenPoint Medical. (n.d.). Transpara®: Breast AI trusted for better workflow, higher confidence. <https://screenpoint-medical.com/>
- Zapp, S. H. (2024). A breakthrough in breast cancer prevention: FDA clears first AI tool to predict risk using a mammogram. Breast Cancer Research Foundation. <https://www.bcrf.org/blog/clairity-breast-ai-artificial-intelligence-mammogram-approved/>
- Liu, Y. (2018). Artificial intelligence-based breast cancer nodal metastasis detection: Insights into the black box for pathologists. PubMed. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30295070/>
- Steiner, D. F. (2018). Impact of deep learning assistance on the histopathologic review of lymph nodes for metastatic breast cancer. PubMed. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30312179/>
- PathAI, Inc. (n.d.). Our mission is to improve patient outcomes with AI-powered pathology. <https://www.pathai.com/>
- Дюк, В. А. (2021). Тестирование алгоритмов машинного обучения в условиях неточной разметки данных. Транспорт России: проблемы и перспективы, 204. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_47983630_80280587.pdf
- Кузнецов, С. С., Снопва, Л. Б., Карабут, М. М., и др. (2015). Закономерности морфологических изменений экспериментальных опухолей СТ-26 в ходе естественного роста. Современные технологии в медицине, 7(3). <https://stm-journal.ru/ru/numbers/2015/3/1165>
- Тюрюмина, Э. Я., & Незнанов, А. А. (2015). Объединенная математическая модель роста рака молочной железы. В сб, 38-51. URL: <https://publications.hse.ru/pubs/share/folder/srxfg0ss90/159418189.pdf>

РАЗРАБОТКА И ИНТЕГРАЦИЯ ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА ГЛЮКОЗЫ С МОБИЛЬНЫМИ И ОБЛАЧНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

УДК 004.738.5:616.379-008.64:004.85

Д.Р. Борозенец^{1*}, И.М. Увалиева¹

¹ВКТУ им. Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Борозенец Давид Рафаэлевич,

e-mail: dborozenets@edu.ektu.kz

АННОТАЦИЯ. В статье представлена разработка прототипа системы непрерывного мониторинга уровня глюкозы (Continuous Glucose Monitoring, CGM), интегрированной с мобильными устройствами и облачной платформой. Целью работы является создание доступного и масштабируемого решения для удаленного мониторинга гликемии с использованием открытых аппаратных и программных технологий. В рамках исследования использованы методы системного проектирования, программной инженерии, обработки временных рядов и машинного обучения. Аппаратная часть реализована на базе платформы Arduino с использованием Bluetooth Low Energy для передачи данных. Программная инфраструктура включает мобильное приложение и облачный сервер, обеспечивающие сбор, хранение, визуализацию и анализ данных. Основные результаты работы заключаются в разработке архитектуры CGM-системы, реализации прототипа устройства, создании мобильного интерфейса и серверной части, а также интеграции моделей машинного обучения для прогнозирования уровня глюкозы. Предложенное решение обеспечивает возможность мониторинга показателей в реальном времени, уведомления пользователей о критических значениях и взаимодействие с медицинским персоналом. Научная новизна работы заключается в разработке открытой модульной платформы CGM, адаптированной к условиям локальной системы здравоохранения и ориентированной на дальнейшее внедрение алгоритмов искусственного интеллекта. Практическая значимость определяется возможностью использования прототипа в образовательных и исследовательских целях, а также как основы для создания отечественных систем телемедицины.

Ключевые слова: CGM, мониторинг глюкозы, IoT, облачные технологии, машинное обучение, телемедицина.

ВВЕДЕНИЕ

Сахарный диабет является одной из ключевых причин смертности во всем мире. Для коррекции медикаментозного лечения и прогноза осложнений необходим постоянный скрининг уровня глюкозы в крови [1].

С 1990 по 2022 год число людей с диабетом увеличилось с 200 до 830 миллионов, причём основная доля приходится на сахарный диабет 2 типа, не требующий инсулина [2]. Заболевание нередко сопровождается серьёзными осложнениями, такими как потеря зрения, почечная недостаточность, инфаркт, инсульт и ампутации. По данным ВОЗ, в 2021 году диабет и связанные с ним почечные заболевания стали причиной более двух миллионов смертей.

Расходы на здравоохранение, связанные с диабетом, в 2021 году достигли 966 миллиардов долларов США и, по прогнозам, вырастут до 1,05 триллиона долларов к 2045 году [3]. Ранняя диагностика и персонализированное лечение позволяют замедлить развитие болезни и снизить вероятность сосудистых осложнений. На

начальных этапах изменение образа жизни может обеспечить длительное поддержание нормального уровня глюкозы без медикаментов.

Одной из ключевых задач остаётся предотвращение гипогликемии, особенно в ночное время, так как она может приводить к тяжёлым последствиям. Применение систем непрерывного мониторинга и алгоритмов машинного обучения даёт возможность прогнозировать риск гипогликемии с учётом индивидуальных особенностей пациента [4]. Современные методы искусственного интеллекта основаны на анализе больших объёмов данных, а решение проблемы несбалансированных выборок повышает точность прогнозов.

Дальнейшее развитие требует создания масштабных баз данных и надёжных систем обмена информацией между устройствами мониторинга и цифровыми приложениями. Использование таких технологий способствует повышению эффективности лечения и улучшению качества жизни пациентов.

В данном исследовании рассматривается перспектива разработки и применения систем непрерывного мониторинга глюкозы (CGM) [5], позволяющие отслеживать динамику показателей в режиме реального времени. Основной акцент сделан на создании программно-аппаратного комплекса, включающего сенсорную имитацию, мобильное приложение и облачную инфраструктуру.

Целью исследования является описание процесса разработки прототипа CGM-системы с возможностью передачи, хранения и анализа данных в реальном времени. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- анализ существующих CGM-решений;
- разработка архитектуры системы;
- создание аппаратного прототипа;
- разработка мобильного приложения и серверной части;
- интеграция методов машинного обучения.

Объектом исследования является система мониторинга глюкозы.

Предметом являются методы и технологии ее реализации на базе IoT и облачных вычислений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Датчики CGM состоят из 3 основных компонентов: минимально инвазивного или неинвазивного датчика уровня глюкозы, передатчика (трансммиттера) и приемника или дисплея (рисунок 1). Датчик предназначен для сбора информации об уровне глюкозы в подкожной жидкости (интерстициальной жидкости) и отправки показаний. Затем передатчик получает показания датчика и связывается с приемником для отображения собранных показаний уровня глюкозы. Датчик является основным блоком, который содержит аналитический метод для обнаружения глюкозы и отвечает за точность и срок службы систем CGM.

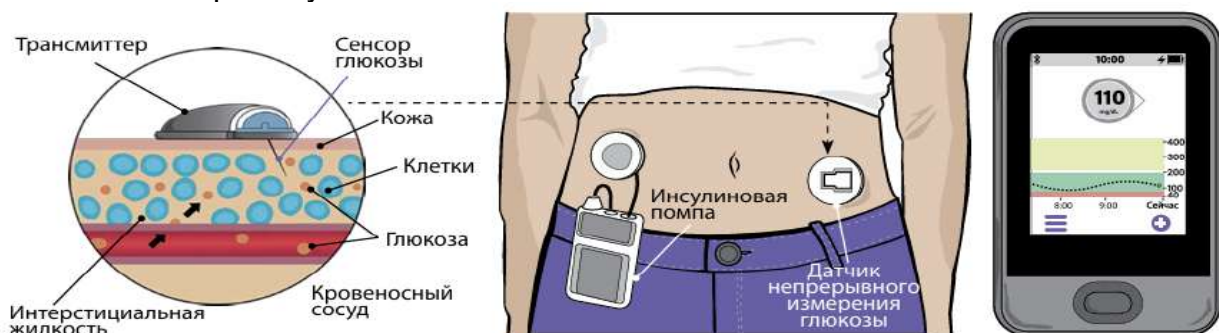


Рисунок 1 - Система непрерывного мониторингирования глюкозы состоит из передатчика (трансммиттера), датчика (сенсора) глюкозы (А) и приемника или дисплея (Б) [5]

Для разработки прототипа CGM использованы аппаратные и программные средства [6].

В качестве аппаратной платформы применена плата Arduino с модулем Bluetooth Low Energy (BLE) [7], обеспечивающим беспроводную передачу данных. Сенсорная часть реализована в виде программного симулятора, генерирующего значения уровня глюкозы, что позволяет моделировать работу реального устройства.

Описание программной части системы CGM представлена на рисунке 2.

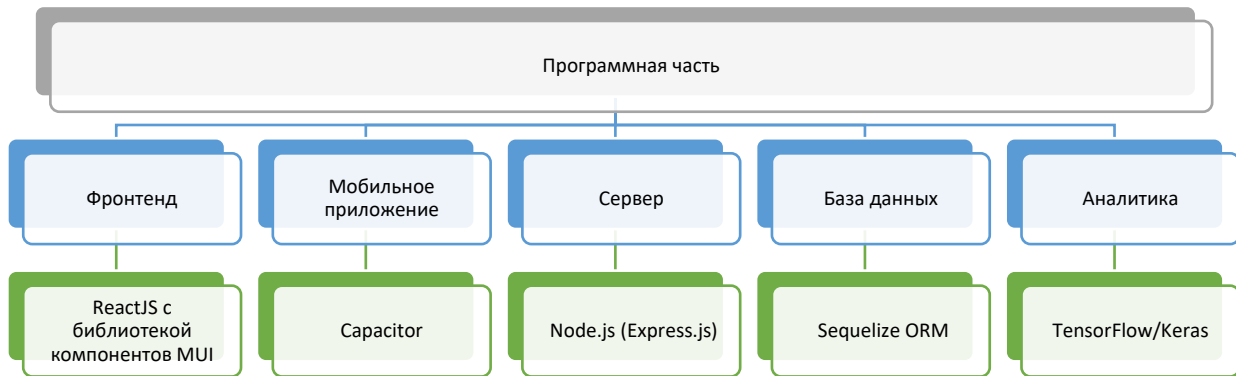


Рисунок 2 - Инструментарий программной части системы CGM

Методологическую основу исследования составители методы системного анализа; объектно-ориентированное программирование; методы обработки временных рядов; алгоритмы машинного обучения.

Передача данных осуществляется по BLE-протоколу от устройства к мобильному приложению, далее через интернет в облачную систему. Хранение данных реализовано в централизованной базе данных.

Последовательность исследования была структурирована в виде поэтапного процесса, включающего взаимосвязанные стадии разработки и верификации создаваемой системы. На первом этапе осуществлялось проектирование архитектуры системы, в рамках которого была определена общая структурная схема программно-аппаратного комплекса, выделены ключевые модули, а также сформированы принципы их взаимодействия и обмена данными. Особое внимание уделялось обеспечению масштабируемости, модульности и устойчивости системы.

Второй этап включал разработку аппаратного прототипа, предусматривающую выбор и настройку компонентов, реализацию схемотехнических решений и формирование физической модели устройства, обеспечивающей сенсорную имитацию и сбор первичных данных.

На третьем этапе была реализована программная инфраструктура, включающая разработку алгоритмов обработки данных, создание мобильного приложения для взаимодействия с пользователем, а также развертывание облачной среды для хранения и передачи информации.

Четвертый этап заключался в интеграции аппаратных и программных компонентов в единую систему с обеспечением корректного взаимодействия всех модулей и синхронизации потоков данных.

На заключительном этапе проведены тестирование и анализ работы системы, направленные на оценку ее функциональной корректности, надежности и эффективности, а также выявление возможных ограничений и направлений для дальнейшего совершенствования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного исследования был разработан прототип системы CGM, включающий аппаратный модуль, мобильное приложение Glukor и облачную платформу обработки данных. Реализованный программно-аппаратный комплекс обеспечивает сбор, передачу, хранение и анализ показателей глюкозы в режиме, приближенном к реальному времени.

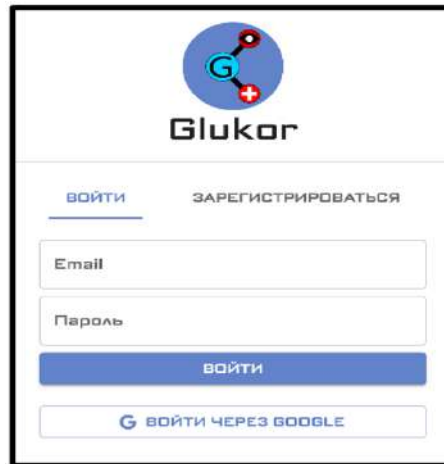


Рисунок 3. Вход в приложение Glukor

В ходе работы достигнуты следующие ключевые результаты. Обеспечена передача данных с аппаратного устройства на мобильное приложение с использованием технологии Bluetooth Low Energy (BLE). Разработана облачная инфраструктура, выполняющая функции централизованного хранения и обработки данных. Создан пользовательский интерфейс мобильного приложения, обеспечивающий наглядную визуализацию динамики показателей глюкозы. Реализован механизм уведомлений о критических значениях, позволяющий своевременно информировать пользователя. Дополнительно интегрированы модели машинного обучения, предназначенные для анализа и прогнозирования изменений уровня глюкозы.

Архитектура системы построена с учетом принципов модульности и масштабируемости, что обеспечивает непрерывный поток данных и их обработку в реальном времени. Это позволяет формировать временные ряды и выявлять отклонения от нормальных значений, повышая информативность мониторинга.

Разработанный прототип функционирует на базе платформы Arduino и использует симулированные данные, передаваемые с частотой 1–5 минут. Несмотря на использование моделируемых значений, система демонстрирует работоспособность предложенной архитектуры и корректность взаимодействия всех компонентов.

На рисунке 4 показана ER-схема базы данных, отражающая структуру хранения и взаимосвязи данных системы.

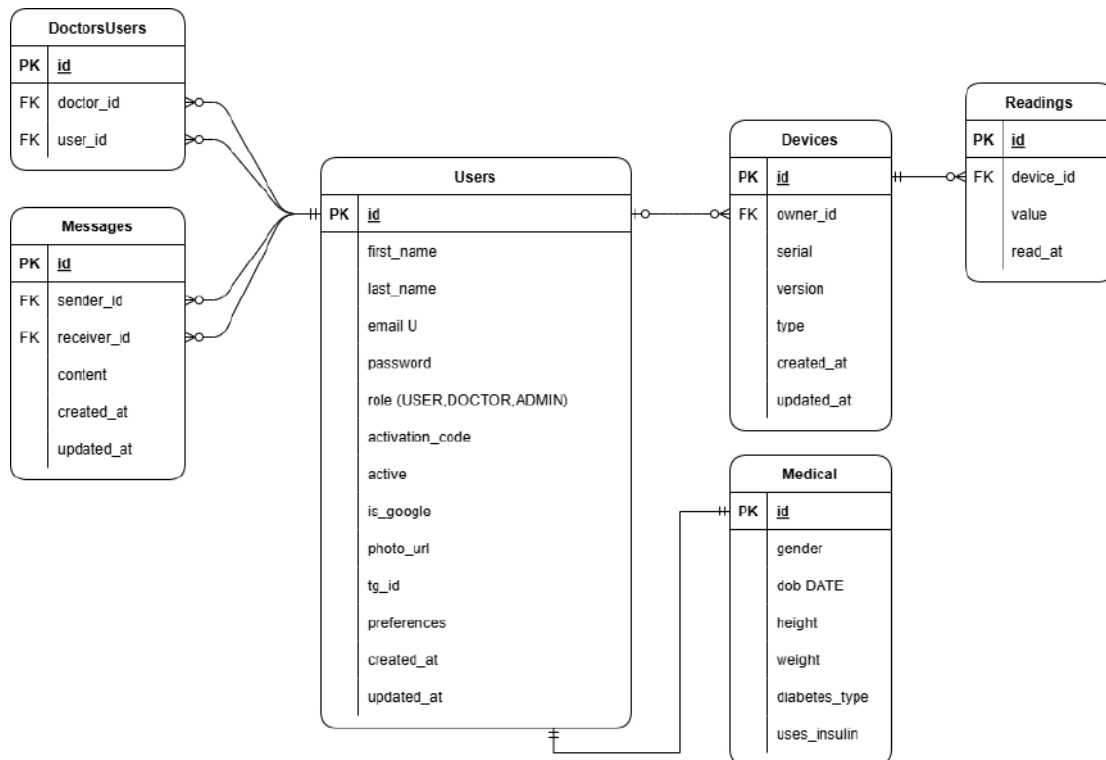


Рисунок 4. ER-схема для базы данных платформы

Архитектура маршрутизации серверных запросов, включающая разграничение по ролям пользователей, представлена на рисунке 5.

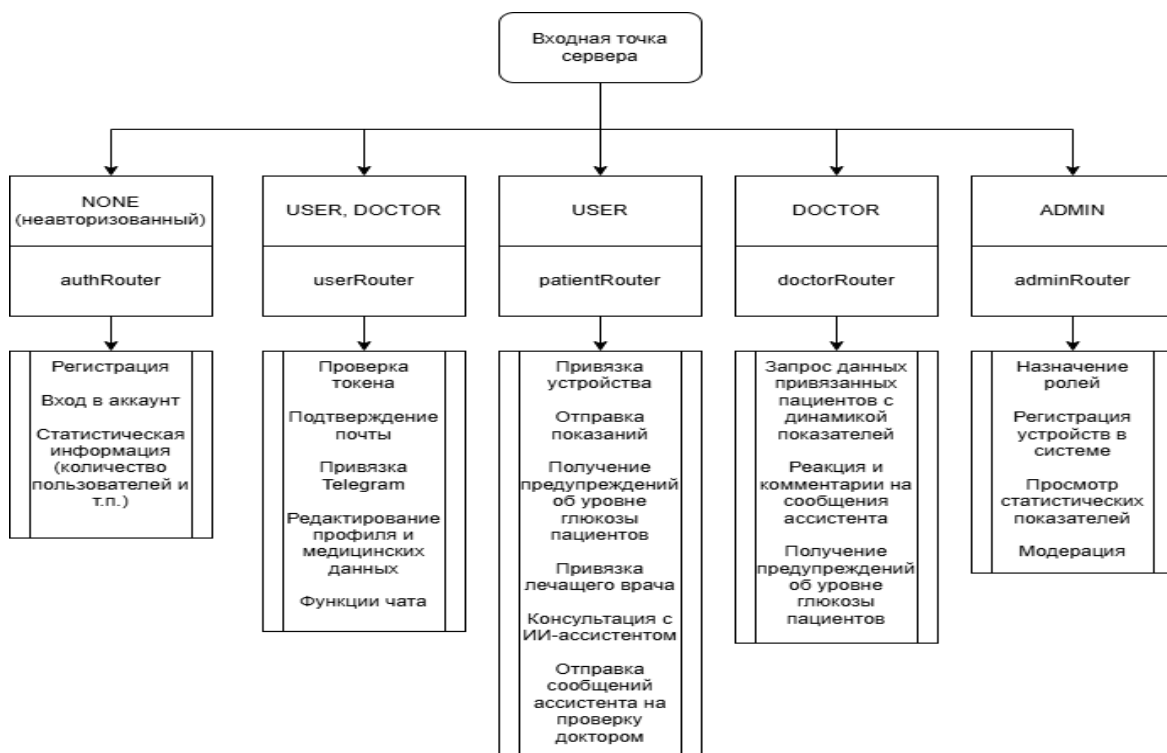


Рисунок 5. Маршрутная структура сервера

Результаты демонстрируют возможность создания доступной системы мониторинга с использованием открытых технологий. По сравнению с коммерческими решениями предложенный подход обладает большей гибкостью и низкой стоимостью, однако уступает по точности, что связано с использованием симуляции данных.

Интеграция машинного обучения позволяет прогнозировать динамику глюкозы, что соответствует современным тенденциям развития телемедицины. Полученные результаты согласуются с исследованиями в области IoT и медицинских систем, подтверждая эффективность выбранного подхода.

Сравнительный анализ показывает, что предложенное решение обладает рядом преимуществ, включая низкую стоимость, гибкость настройки и использование открытых технологий. Однако по точности оно уступает коммерческим системам, что обусловлено отсутствием реального сенсорного модуля.

К ограничениям исследования относятся отсутствие клинической валидации, использование симуляции данных и необходимость дальнейшего совершенствования алгоритмов анализа. Тем не менее, полученные результаты подтверждают перспективность предложенного подхода и его применимость в разработке интеллектуальных медицинских систем и телемедицинских решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого исследования был разработан прототип системы непрерывного мониторинга глюкозы (CGM), интегрированный с мобильными и облачными технологиями. Реализована архитектура программно-аппаратного комплекса, обеспечивающая сбор, передачу, хранение и анализ данных в режиме реального времени.

Поставленные цели и задачи исследования были достигнуты. В частности, создан аппаратный прототип устройства, разработано мобильное приложение для взаимодействия с пользователем, реализована облачная инфраструктура для обработки и хранения данных, а также внедрены элементы машинного обучения для анализа и прогнозирования показателей.

Научная новизна работы заключается в разработке открытой модульной платформы CGM, адаптированной к локальным условиям и ориентированной на дальнейшее масштабирование и развитие. Предложенный подход обеспечивает гибкость архитектуры и возможность интеграции с различными источниками данных.

Практическая значимость исследования определяется возможностью применения разработанной системы в образовательных, исследовательских и инженерных проектах, а также её потенциалом для дальнейшего внедрения в медицинскую практику.

К перспективным направлениям дальнейших исследований относятся интеграция реальных биосенсорных устройств, совершенствование алгоритмов прогнозирования на основе методов машинного обучения, проведение клинической валидации системы, а также её внедрение в медицинские учреждения.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная статья подготовлена в рамках проекта грантового финансирования научных исследований МНВО по теме AP26194209 «Математическое и алгоритмическое обеспечение интеллектуальной системы поддержки принятия клинических решений в гематологии и диабетологии на основе технологии газометрии крови».

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: при подготовке текста статьи использовались инструменты генеративного искусственного интеллекта для структурирования и редактирования материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Зеленский М. М., Грицкевич Е. Ю. Мониторинг уровня глюкозы крови: возможности современных глюкометров //Журнал телемедицины и электронного здравоохранения. – 2022. – Т. 8. – №. 3. – С. 28-44. DOI: <https://doi.org/10.29188/2712-9217-2022-8-3-28-44>
- Бафаев А. Х. ГИСТОФИЗИОЛОГИЯ ОБМЕНА ГЛЮКОЗЫ У ЧЕЛОВЕКА //Экономика и социум. – 2025. – №. 12-1 (139). – С. 616-621. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gistofiziologiya-obmena-glyukozy-u-cheloveka>
- Мастерова С. Н. Экономический аспект важности сбалансированного питания: снижение нагрузки на здравоохранение //Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. – 2024. – Т. 14. – №. 2. – С. 275-286.. <https://doi.org/10.21869/2223-1552-2024-14-2-275-286>
- Данилова Л. И. и др. Диабетическая гипогликемия и ее последствия в оценке качества ведения сахарного диабета //Рецепт. – 2023. – Т. 26. – №. 5. <https://doi.org/10.34883/Pl.2023.26.5.014>
- Момыналиев К. Т., Прокопьев М. В., Игорь В. И. Обзор современных датчиков для непрерывного мониторингирования уровня глюкозы //Сахарный диабет. – 2023. – Т. 26. – №. 6. – С. 578-587. doi: <https://doi.org/10.14341/DM13043>
- Valero M. et al. Development of a noninvasive blood glucose monitoring system prototype: Pilot study //JMIR formative research. – 2022. – Т. 6. – №. 8. – С. e38664. doi: <https://doi.org/10.2196/38664>
- Barrett S. F. Arduino Nano 33 BLE Sense //Arduino V: Machine Learning. – Cham : Springer International Publishing, 2022. – С. 17-65. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21877-4_2
- Dexcom G6 sensor (9 шт.) // Diabetiki1.kz. – URL: <https://diabetiki1.kz/> (дата обращения: 22.12.2025).
- Dexcom G6 sensor kit // Ubuy.com.kz. – URL: <https://www.ubuy.com.kz/> (дата обращения: 22.12.2025).
- SIBIONICS GS1 CGM // Bimedis.com. – URL: <https://kz.bimedis.com/> (дата обращения: 22.12.2025).
- FreeStyle Libre CGM systems // LibreFree.orgs.biz. – URL: <https://librefree.orgs.biz/> (дата обращения: 22.12.2025).
- DeepSeek Chat. (2026, март 28). Использование генеративного искусственного интеллекта для редактирования и структурирования научной статьи [Большая языковая модель]. DeepSeek. – URL: <https://chat.deepseek.com>

ҒИМАРАТТАРДЫҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ТИІМДІЛІГІН БОЛЖАУДА СЫЗЫҚТЫҚ РЕГРЕССИЯНЫ ҚОЛДАНУ

ӨОЖ 004.85

Г.Б. Бүйткенова^{1*}, А.Б. Болатова¹

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Өскемен қ., Қазақстан Республикасы

*Корреспондент-автор: Бүйткенова Гүлім Болатқызы, e-mail:
buitkenovagulim@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Мақалада ғимараттардың энергетикалық тиімділігін архитектуралық және конструкциялық сипаттамалар негізінде болжау үшін сызықтық регрессия әдісін қолдану қарастырылады. Зерттеудің мақсаты — ғимараттың жылулық жүктемесін болжауға арналған сызықтық регрессия моделін құру және оның дәлдігін бағалау. Бастапқы деректер ретінде ғимарат геометриясын, беттерінің ауданын, биіктігін, бағдарын және әйнектелуін сипаттайтын параметрлерді, сондай-ақ жылулық және салқындату жүктемесінің көрсеткіштерін қамтитын Energy Efficiency Data Set деректер жиыны пайдаланылды. Зерттеу барысында деректерді жүктеу және алдын ала талдау, белгілер құрылымын тексеру, оқыту және тестілік іріктемелерді қалыптастыру, сондай-ақ жылулық жүктемені болжауға арналған сызықтық регрессия моделін құру жүзеге асырылды. Модель сапасы орташа квадраттық қате мен детерминация коэффициенті метрикалары арқылы бағаланды. Нәтижесінде детерминация коэффициентінің мәні 0,964-ке тең болып, модельдің жоғары дәлдікпен болжау жасайтыны анықталды. Нақты және болжамды мәндердің сәйкестігіне визуалдық талдау жүргізіліп, қалдықтардың таралу сипаты зерттелді. Сонымен қатар нысаналы айнымалыға ең үлкен ықпал ететін белгілерді анықтау үшін регрессия коэффициенттеріне талдау жасалды. Зерттеудің ғылыми жаңалығы ғимараттардың энергетикалық тиімділігін бағалауда сызықтық регрессия моделінің түсіндірмелік мүмкіндігін айқындауымен және белгілердің ықпалын сандық тұрғыдан талдауымен сипатталады. Жұмыстың практикалық маңызы ұсынылған тәсілді энергетикалық тиімділікті алдын ала бағалау, инженерлік талдау және оқу-зерттеу міндеттерін шешуде қолдану мүмкіндігімен анықталады. Алынған нәтижелер сызықтық регрессия әдісінің ғимараттардың энергетикалық тиімділігі көрсеткіштерін болжау міндеттерін шешуде мақсатқа сай әрі тиімді құрал екенін көрсетеді.

Түйінді сөздер: сызықтық регрессия, машиналық оқыту, энергетикалық тиімділік, деректерді талдау, болжам жасау, регрессиялық модель.

КІРІСПЕ

Ғимараттардың энергетикалық тиімділігін арттыру қазіргі инженерлік тәжірибе мен қолданбалы ақпараттық технологиялардың басым бағыттарының бірі болып табылады. Энергетикалық ресурстарды ұтымды пайдалану пайдалану шығындарын азайтуға, энергетикалық инфрақұрылымға түсетін жүктемені төмендетуге және қалалық ортаның экологиялық тұрақтылығын арттыруға ықпал етеді. Алынған нәтижелер (Bourdeau, 2019). Осыған байланысты ғимараттардың энергетикалық сипаттамаларын олардың архитектуралық және конструкциялық параметрлері негізінде болжауға мүмкіндік беретін деректерді талдау мен машиналық оқыту әдістерінің өзектілігі артып отыр.

Бұл жұмыс Track A: Student Research (Ғылыми зерттеулер) бағытына сәйкес келеді, себебі мақалада ғимараттардың энергетикалық тиімділігін болжауда сызықтық

регрессия әдісін қолданудың ғылыми негіздері қарастырылған. Зерттеу энергияны үнемдеу, ғимараттардың энергия тұтынуын азайту және инженерлік есептерде деректерге негізделген әдістерді пайдалану сияқты ғылыми қауымдастық алдындағы өзекті мәселелермен байланысты. Мақалада ғимарат параметрлерінің жылу жүктемесіне әсері талданып, модельдің болжау дәлдігі бағаланған, бұл жұмыстың теориялық және практикалық маңызын көрсетеді.

Болжаудың кең таралған және түсіндіруге ыңғайлы әдістерінің бірі — сызықтық регрессия. Бұл әдіс кіріс белгілерінің жиынтығы мен нысаналы айнымалы арасындағы сандық тәуелділікті анықтауға, сондай-ақ жекелеген факторлардың болжанатын көрсеткіштің қалыптасуына қосатын үлесін бағалауға мүмкіндік береді. Математикалық аппаратының айқындығының арқасында сызықтық регрессия инженерлік, энергетикалық және техникалық жүйелерді зерттеуде кеңінен қолданылады (Tsanas, 2012).

Осы жұмыста ғимараттардың энергетикалық тиімділігін болжау үшін сызықтық регрессия моделін қолдану қарастырылады. Зерттеу Energy Efficiency Data Set деректер жиыны негізінде жүргізілді, онда ғимараттың беткі ауданы, биіктігі, бағдарлануы және әйнектелу ауданы сияқты әртүрлі архитектуралық сипаттамалар кезіндегі энергия тұтынуды модельдеу нәтижелері берілген.

Зерттеудің мақсаты — кіріс параметрлерінің жиынтығы негізінде ғимараттың жылулық жүктемесін болжауға арналған сызықтық регрессия моделін құру және талдау.

Қойылған мақсатқа жету үшін келесі міндеттер айқындалды:

- Energy Efficiency Data Set бастапқы деректер жиынының құрылымын талдау;
- кіріс белгілері мен нысаналы айнымалылар құрамын зерттеу;
- деректерді алдын ала дайындап, оқыту және тестілік іріктемелерді қалыптастыру;
- ғимараттың жылулық жүктемесін болжауға арналған сызықтық регрессия моделін құру;
- модель сапасын машиналық оқытудың стандартты метрикалары арқылы бағалау;
- болжау нәтижелеріне визуалдық талдау жүргізу және модель қателерінің таралуын зерттеу;
- нысаналы айнымалыға ең үлкен ықпал ететін белгілерді анықтау.

Зерттеу нысаны — тұрғын ғимараттардың энергетикалық тиімділігін олардың архитектуралық және конструкциялық сипаттамалары негізінде болжау үдерісі.

Зерттеу пәні — ғимараттың геометриясы мен физикалық қасиеттерін сипаттайтын параметрлер жиынтығы бойынша оның жылулық жүктемесін болжауда қолданылатын регрессиялық талдау әдістері.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Бастапқы деректер ретінде UCI Machine Learning Repository репозиторийінде ұсынылған Energy Efficiency Data Set деректер жиыны пайдаланылды (UCI Machine Learning Repository, 2012). Аталған жиын тұрғын ғимараттардың энергия тұтынуын әртүрлі архитектуралық және конструкциялық сипаттамаларға қарай модельдеу нәтижелерін қамтиды.

Деректер жиыны 768 бақылаудан және 10 сандық айнымалыдан тұрады. X1–X8 кіріс белгілері ғимараттардың геометриялық және физикалық сипаттамаларын, соның ішінде салыстырмалы ықшамдылықты, беткі ауданын, қабырға ауданын, шатыр ауданын, жалпы биіктігін, ғимараттың бағдарын, әйнектелу ауданын және әйнектелудің таралу сипатын сипаттайды. Нысаналы айнымалылар ретінде ғимараттың энергетикалық тиімділік көрсеткіштері қарастырылады: жылытуға

арналған жылулық жүктеме (Y1) және салқындату жүктемесі (Y2). Барлық белгілердің сандық форматта берілуі және жетіспейтін мәндердің болмауы машиналық оқыту әдістерін категориялық айнымалыларды қосымша кодтаусыз тікелей қолдануға мүмкіндік береді. Кіріс және шығыс параметрлерінің сипаттамасы 1-кестеде келтірілген.

Кесте 1. Деректер жиынындағы белгілер мен нысаналы айнымалылардың сипаттамасы

Белгіленуі	Сипаттамасы
X1	Ғимараттың салыстырмалы ықшамдылығы.
X2	Ғимараттың беткі ауданы.
X3	Қабырғалардың ауданы.
X4	Шатырдың ауданы.
X5	Ғимараттың жалпы биіктігі.
X6	Ғимараттың дүниенің төрт жағына қатысты бағдарлануы (сандық түрде кодталған).
X7	Әйнектелу ауданы.
X8	Ғимарат қабырғалары бойынша әйнектелудің таралуы (сандық түрде кодталған).
Y1	Ғимаратты жылытуға арналған жылу жүктемесі.
Y2	Ғимаратты салқындатуға арналған жылу жүктемесі.

Бастапқы деректер жиынын Python жұмыс ортасына жүктеу процесі `pandas` кітапханасының көмегімен жүзеге асырылды. Деректер Excel файлынан `read_excel` функциясы арқылы импортталды, содан кейін кестенің алғашқы жолдары `head()` әдісі арқылы шығарылды. Бұл деректер құрылымы, белгілердің атаулары және олардың мәндерінің форматы туралы жалпы түсінік алуға мүмкіндік берді. Сонымен қатар деректер жиынының өлшемі `shape` көрсеткіші арқылы анықталды. Аталған кезең кейінгі талдау мен модель құру алдында іріктеме көлемін және қолданылатын айнымалылар санын бағалау үшін маңызды болып табылады.

Әрбір белгінің деректер типтерін талдау `dtypes` көрсеткіші арқылы жүргізілді. Талдау нәтижесінде барлық белгілердің сандық типке жататыны және `float64` пен `int64` форматында ұсынылғаны анықталды. Бұл деректерді әрі қарай өңдеуді жеңілдетеді және оларды машиналық оқыту модельдерінде тікелей пайдалануға жағдай жасайды.

Сонымен қатар деректер жиынында жетіспейтін мәндердің бар-жоғын тексеру `isnull().sum()` функциясының көмегімен орындалды. Талдау нәтижелері деректерде жетіспейтін мәндердің жоқ екенін көрсетті. Бұл қосымша өңдеуді, яғни бос мәндерді толтыру немесе алып тастау қажеттілігінің жоқ екенін білдіреді және деректер жиыны талдау мен модельдеу кезеңдеріне дайын екенін көрсетеді.

1 суретте деректерді дайындау және сызықтық регрессия моделін құру процесі көрсетілген. Бұл кезеңде мақсатты айнымалы Y1 жауап векторы ретінде жеке бөлініп алынды, ал қалған белгілер модель үшін кіріс деректері ретінде пайдаланылды. Мұндай құрылымдау машиналық оқыту алгоритмінің дұрыс жұмыс істеуінің алғышарты болып табылады.

Одан кейін бастапқы деректер жиыны `train_test_split` функциясын қолдану арқылы 80% және 20% қатынасында оқыту және тестілеу таңдамаларына бөлінді. Бұл модель сапасын оқытуға қатыспаған деректер негізінде бағалауға мүмкіндік береді.

Деректерді бөлгеннен кейін сызықтық регрессия моделі құрылып, оқытылды. Оқыту нәтижесінде еркін мүше (интерсепт) және әрбір белгі үшін регрессия коэффициенттері алынды. Бұл коэффициенттер сәйкес факторлардың Y1 мақсатты айнымалысына әсер ету дәрежесін сипаттайды.

```
[7] 0 сек.
X = df.drop(columns=["Y1"])
y = df["Y1"]

[8] 0 сек.
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
    X, y, test_size=0.2, random_state=42
)

[9] 0 сек.
model = LinearRegression()
model.fit(X_train, y_train)

LinearRegression
LinearRegression()

[ ]
print("Интерсепт:", model.intercept_)

coefficients = pd.DataFrame({
    "Признак": X.columns,
    "Коэффициент": model.coef_
})

print(coefficients)
```

...	Интерсепт:	6.764750049189091
Признак	Коэффициент	
0	X1	-10.315034
1	X2	-0.009899
2	X3	0.019114
3	X4	-0.014507
4	X5	1.188949
5	X6	-0.072483
6	X7	9.417608
7	X8	0.186631
8	Y2	0.725310

Сурет 1. Оқыту және тестілеу таңдауларын қалыптастыру және сызықтық регрессия моделін құру

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Модельді оқыту аяқталғаннан кейін тестілеу деректері үшін Y1 мақсатты айнымалысының болжамды мәндері алынды. Бұл оларды нақты мәндермен салыстыруға мүмкіндік берді.

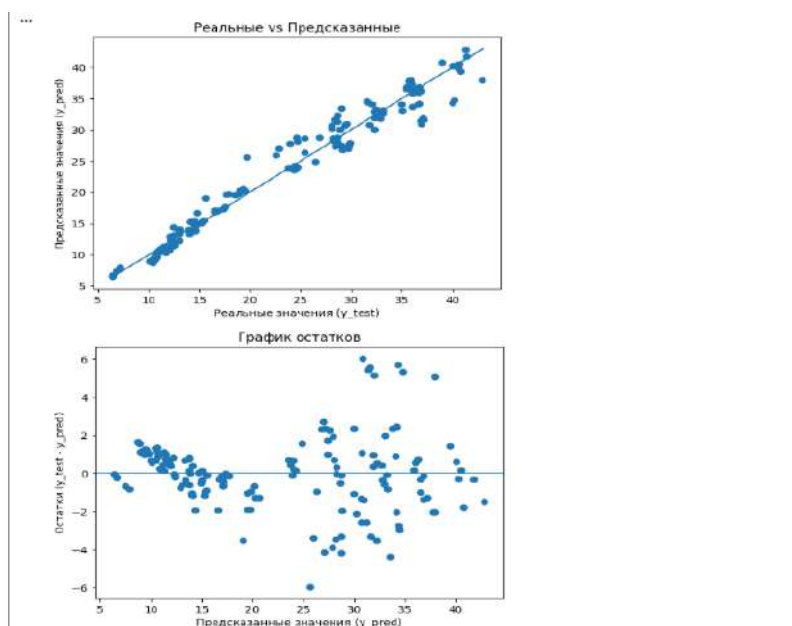
Модельдің дәлдігін сандық бағалау үшін орташа квадраттық қате және детерминация коэффициенті қолданылды. Есептеу нәтижесінде келесі мәндер алынды: $MSE = 3,782$ және $R^2 = 0,964$. Орташа квадраттық қате болжанған мәндердің нақты мәндерден орташа ауытқу деңгейін сипаттайды, ал детерминация коэффициенті модель арқылы түсіндірілетін мақсатты айнымалы дисперсиясының үлесін көрсетеді. R^2 көрсеткішінің жоғары мәні құрылған модельдің түсіндіру қабілетінің жоғары екенін және болжанған нәтижелердің нақты деректермен жақсы сәйкес келетінін айғақтайды.

Модель сапасын визуалды бағалау үшін Y1 мақсатты айнымалысының нақты және болжанған мәндерін салыстыру графигін құратын бағдарламалық код әзірленді. Шашырау диаграммасында абсцисса осіне нақты мәндер, ал ордината осіне модель арқылы алынған болжамды мәндер орналастырылды. Қосымша түрде нақты және есептік мәндердің мінсіз сәйкестігін көрсететін $y = x$ түзуі салынды.

2 суреттің жоғарғы бөлігінде Y1 мақсатты айнымалысының нақты және болжамды мәндері арасындағы тәуелділікті көрсететін шашырау диаграммасы берілген. $y = x$ түзуінің болуы болжам нәтижелерінің нақты мәндермен қаншалықты сәйкес келетінін айқын көруге мүмкіндік береді.

2 суреттің төменгі бөлігінде модель қалдықтарының графигі көрсетілген. Онда қалдықтардың болжамды мәндерге тәуелділігі бейнеленген. Қалдықтардың негізінен нөлдік сызықтың айналасында айқын трендсіз орналасуы жүйелік қателіктердің жоқ

екенін көрсетеді және құрылған сызықтық регрессия моделінің адекваттылығын растайды.



Сурет 2. Сызықтық регрессия моделінің сапасын визуалды талдау

Сызықтық регрессия коэффициенттерін талдау кезеңі Y1 мақсатты айнымалысына ең үлкен әсер ететін белгілерді анықтауға бағытталған. Модель коэффициенттерінің мәндері негізінде коэффициенттер кестесі қалыптастырылып, содан кейін ең үлкен оң және ең үлкен теріс әсер ететін белгілер анықталды.

Талдау нәтижесінде X7 белгісі мақсатты айнымалыға ең үлкен оң әсер ететіні анықталды, оның коэффициенті $\beta = 9,418$ болды. Бұл әйнектелу ауданы мен жылу жүктемесінің шамасы арасында елеулі байланыс бар екенін көрсетеді. Ал ең үлкен теріс әсер X1 белгісіне тән, оның коэффициенті $\beta = -10,315$. Бұл ғимараттың салыстырмалы ықшамдылығы мен зерттелетін көрсеткіш арасында айқын кері тәуелділік бар екенін білдіреді.

Алынған нәтижелер кіріс белгілерінің маңыздылық дәрежесі әртүрлі екенін растады және сызықтық регрессия коэффициенттерін модельді интерпретациялау мен неғұрлым ақпараттық факторларды іріктеу үшін пайдалануға болатынын көрсетті. Бұл қорытындылар ғимараттардың энергетикалық көрсеткіштерін болжауға арналған деректерге негізделген әдістердің тиімділігін көрсететін бұрынғы зерттеулермен сәйкес келеді (Tsanas, 2012; Cheng, 2014).

ҚОРЫТЫНДЫ

Жұмысты орындау барысында бастапқы деректер жиынына талдау жүргізілді. Ол деректерді жүктеуді, олардың құрылымын, белгілердің типтерін зерттеуді және жетіспейтін мәндердің бар-жоғын тексеруді қамтыды. Талдау нәтижесінде деректердің толықтай сандық форматта екені және жетіспейтін мәндердің жоқ екені анықталды. Бұл оларды машиналық оқыту моделін құру үшін тікелей пайдалануға мүмкіндік берді.

Дайындалған деректер негізінде Y1 мақсатты айнымалысын болжауға арналған сызықтық регрессия моделі құрылды. Таңдама оқыту және тестілеу бөліктеріне бөлініп, модельді оқыту және оның сапасын бағалау жүргізілді. Бағалау барысында орташа квадраттық қате және детерминация коэффициенті қолданылды. Алынған детерминация коэффициентінің жоғары мәні модельдің жақсы аппроксимациясын және оның адекваттылығын көрсетеді.

Нәтижелердің визуалды талдауы, яғни нақты және болжамды мәндерді салыстыру, сондай-ақ қалдықтардың таралуын талдау жүйелік қателіктердің жоқ екенін көрсетті және берілген деректер жиыны үшін сызықтық регрессияны қолданудың дұрыстығын растады. Сонымен қатар модель коэффициенттеріне талдау жүргізіліп, мақсатты айнымалыға ең үлкен оң және теріс әсер ететін белгілер анықталды.

Осылайша, жұмыста қойылған мақсаттарға қол жеткізілді, ал алынған нәтижелер зерттелетін көрсеткішті талдау мен болжауда сызықтық регрессия моделін қолдануға болатынын дәлелдейді.

МҮДДЕЛЕР ҚАРАМА-ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қарама-қайшылығының жоқтығын мәлімдейді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Авторлар OpenAI компаниясы әзірлеген ChatGPT 5.2 нұсқасындағы генеративті тілдік модельді қолданды. Бұл құрал мәтінді көмекші түрде құрастыру және редакциялау, сондай-ақ тұжырымдарды нақтылау мақсатында пайдаланылды. Жасанды интеллектіні қолдану авторлардың ғылыми талдауы мен зерттеушілік шешімдерін алмастырған жоқ.

ӨДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Bourdeau, M., Zhai, X.-Q., Nefzaoui, E., Guo, X., & Chatellier, P. (2019). Modeling and forecasting building energy consumption: A review of data-driven techniques. *Sustainable Cities and Society*, 48, 101533. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101533>
- Tsanas, A., & Xifara, A. (2012). Accurate quantitative estimation of energy performance of residential buildings using statistical machine learning tools. *Energy and buildings*, 49, 560-567. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.003>
- UCI Machine Learning Repository. (2012). Energy Efficiency Data Set. Center for Machine Learning and Intelligent Systems, University of California, Irvine. <https://archive.ics.uci.edu/dataset/242/energy+efficiency>
- Cheng, M.-Y., & Cao, M.-T. (2014). Accurately predicting building energy performance using evolutionary multivariate adaptive regression splines. *Applied Soft Computing*, 22, 178-188. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.05.015>

ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ ПРОМЫШЛЕННОЙ АНАЛИТИКИ

УДК 004.896

В. В. Вахрушева^{1*}, А.М. Уркумбаева¹

¹ВКТУ им Д.Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Вахрушева Валентина Вячеславовна,

E-mail: vakhrusheva.3v@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Несмотря на высокий уровень автоматизации промышленного производства, данные, формируемые в процессе работы оборудования, часто не становятся инструментом управления. В работе рассматривается парадокс современной промышленности: данные существуют, но не работают. На примере маслоперерабатывающего предприятия показано, что разрозненность систем и наличие ручных этапов обработки приводят к потере актуальности информации. Для устранения данной проблемы разработана интегрированная производственно-аналитическая система FabriQ, обеспечивающая непрерывный поток данных от PLC к конечному пользователю. Описаны архитектура решения, механизмы сбора и хранения данных, а также реализованные модули системы. Показано, что внедрение системы позволяет перейти от накопления данных к их полноценному использованию в управлении производством.

Ключевые слова: промышленная аналитика, OPC UA, PLC, интеграция данных, производственные данные, временные ряды, аналитическая система, цифровизация производства, автоматизация, отчетность, мониторинг.

ВВЕДЕНИЕ

Если смотреть на современное производство не как на набор оборудования, а глубже, становится видно, что оно фактически представляет собой систему переменных. Температура, давление, расход, уровень, состояния механизмов - всё это непрерывно меняется и определяет, как именно работает технологический процесс. Особенно это заметно на предприятиях перерабатывающей промышленности, где любой сдвиг параметра сразу отражается на результате. При этом за последние годы ситуация изменилась принципиально. Производство стало не просто управляемым, а измеряемым. Практически каждый участок оснащён контроллерами, данные фиксируются автоматически, и объём информации растёт постоянно. В результате данные перестали быть вспомогательным элементом и стали одной из ключевых основ управления.

Однако возникает важный момент. Наличие данных не означает, что они используются. На практике часто складывается ситуация, при которой данные существуют, но не работают как инструмент управления. Они собираются, отображаются, но не проходят полный путь до принятия решений.

Именно этот разрыв между потоком данных и управлением становится основной проблемой. В данной работе рассматривается подход к его устранению за счёт разработки интегрированной производственно-аналитической системы FabriQ.

Актуальность задачи на уровне отрасли и предприятия. Для предприятий типа маслозавода эта проблема проявляется особенно явно. Производственный процесс здесь непрерывный и чувствительный. Нельзя просто “поставить и оставить”. Любое отклонение параметров влияет на выход продукта, загрузку оборудования и эффективность переработки. При этом сам процесс уже давно автоматизирован.

Контроллеры собирают данные, SCADA отображает текущие значения, оборудование работает стабильно. Но на уровне использования данных возникает ограничение. Данные не переходят напрямую к пользователю. Они остаются на уровне системы или требуют дополнительной обработки. В результате формируется ситуация, при которой информация есть, но для её использования требуется отдельный процесс.

На рассматриваемом предприятии это выражалось в использовании Excel. Данные собирались из системы, переносились, обрабатывались и передавались дальше. Это не выглядело как проблема, пока объём данных оставался относительно небольшим. Но с ростом количества параметров и требований к скорости реакции такой подход начал ограничивать управление.

Можно сказать, что актуальность задачи определяется не отсутствием данных, а отсутствием механизма их прямого использования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ существующих решений и их ограничений. На предприятии уже присутствуют типичные для промышленности системы. PLC выполняют управление, SCADA обеспечивает отображение, могут использоваться и другие уровни, такие как MES или BI.

На первый взгляд кажется, что этого достаточно. Есть контроль, есть визуализация, есть аналитика. Но проблема в том, что эти системы работают раздельно.

SCADA показывает текущее состояние, но не формирует удобную аналитику. BI способен анализировать, но не собирает данные напрямую. MES управляет процессами, но не всегда даёт гибкую работу с данными.

В итоге данные начинают функционировать в разных местах. Они дублируются, задерживаются, требуют ручной передачи. Это приводит к тому, что между уровнем производства и уровнем управления появляется разрыв.

Именно это и становится ключевым ограничением существующих решений. Так для решения очевидной проблемы завода было принято решение о разработке специальной аналитической системы. Разрабатываемая система FabriQ не пытается заменить существующие решения. Она занимает другое место - между оборудованием и пользователем.

Её задача - не отображать процесс и не управлять им напрямую, а обеспечить непрерывный поток данных.

Архитектура строится по трёхуровневой схеме:

1. уровень оборудования (PLC);
2. уровень сбора и хранения данных;
3. уровень аналитической системы.

Система подключается к контроллерам напрямую и работает через технологию OPC UA, что позволяет унифицировать доступ к данным. В результате она получает уже структурированную информацию и может работать с ней независимо от конкретного оборудования. Так появляется единый слой, который соединяет источник данных и пользователя.

Функциональные модули. Интегрированная система FabriQ реализована как совокупность взаимосвязанных модулей, каждый из которых отвечает за отдельный этап работы с данными - от их получения до использования в управлении производством. При этом ключевой особенностью системы является не изолированность функций, а их объединение в единый непрерывный контур обработки информации.

Базовым элементом архитектуры выступает модуль «OPC UA Серверы», который обеспечивает подключение к источникам данных. В нем реализован

механизм поиска, добавления и управления OPC UA серверами, выступающими промежуточным звеном между PLC и системой. Пользователь может задавать endpoint-адреса, просматривать доступные узлы и контролировать соединения. Таким образом формируется единая точка входа для всех производственных данных, что устраняет зависимость от конкретного оборудования и протоколов.

Следующим уровнем является модуль «Задачи опроса PLC», реализующий механизм регулярного получения данных. Здесь задаются интервалы опроса, управляются состояния задач (запуск, остановка), а также отслеживается их статус. Данный модуль фактически превращает поток данных в управляемый процесс: информация поступает не хаотично, а по заданной логике, с контролем частоты и актуальности. Это критически важно для формирования корректной аналитики и предотвращения потерь данных.



Рисунок 1. Окно модуля «Задачи опроса PLC»

Работа с самими параметрами осуществляется через модуль «Переменные OPC UA». Этот модуль представляет собой структурированный справочник тегов, полученных с оборудования. Здесь реализованы функции поиска, фильтрации, выбора и запуска опроса отдельных переменных. Пользователь получает возможность работать не с «сырым потоком», а с осмысленными сущностями — конкретными параметрами технологического процесса. Это упрощает дальнейшее формирование отчетов и аналитики.

Аналитический уровень системы представлен модулем «Аналитика — Тренды по тегам». В модуле реализовано построение графиков по временным рядам данных. Пользователь может выбирать теги, задавать временные интервалы, настраивать отображение и визуально анализировать динамику параметров (см. Рисунок 2). Именно здесь данные начинают превращаться в инструмент понимания процесса: выявляются отклонения, закономерности и взаимосвязи между параметрами.

Для формирования управленческой информации реализован модуль «Отчёты и шаблоны». Он позволяет создавать шаблоны отчетов, включающие наборы тегов и логику их обработки. Отчёты могут строиться за заданные периоды, агрегироваться по сменам или суткам, что особенно важно для производственных предприятий. Данный модуль обеспечивает переход от отдельных значений к структурированной информации, пригодной для анализа и принятия решений.



Рисунок 2. Окно модуля «Аналитика - Тренды по тегам»

Важной особенностью системы является автоматизация доставки информации, реализованная в модулях «TELEGRAM отчёты» и «Telegram-каналы». Первый отвечает за формирование и планирование отправки отчетов, второй — за управление каналами доставки. Пользователь может задавать расписание, формат (текст или график) и получателей. Таким образом данные не только собираются и анализируются, но и автоматически доводятся до заинтересованных лиц, что сокращает время реакции и исключает ручную передачу информации.

Отдельный блок функциональности связан с визуализацией данных под конкретные задачи. Модуль «Пользовательские экраны» (см. Рисунок 3) позволяет создавать индивидуальные дашборды, включающие графики, индикаторы и другие элементы. Пользователь может настраивать отображение данных в удобной форме, формируя рабочее пространство под свою роль — оператора, технолога или руководителя. Это делает систему не просто источником данных, а инструментом ежедневной работы.

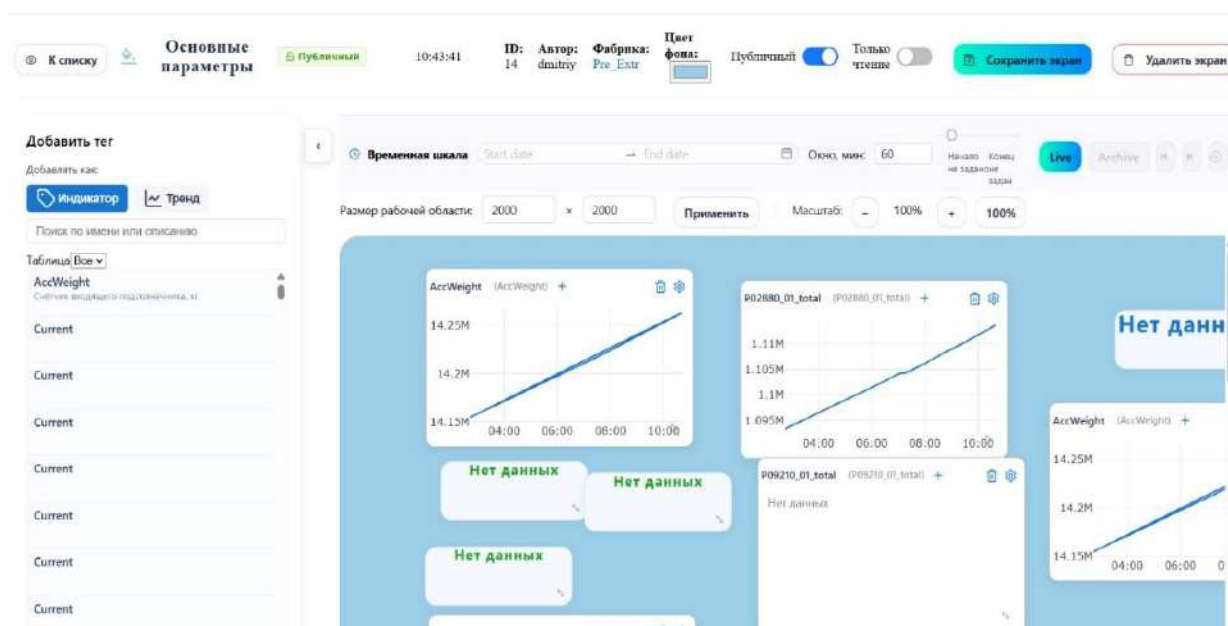


Рисунок 3. Окно модуля «Пользовательские экраны»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования была рассмотрена проблема разрыва между накоплением производственных данных и их использованием в управлении. Показано, что при наличии развитой автоматизации данные остаются разрозненными и требуют дополнительной обработки, что снижает их практическую ценность. Поставленная цель — обеспечение непрерывного перехода от данных к управленческим решениям — реализована за счёт разработки системы FabricIQ. Предложена архитектура с использованием OPC UA и реализованы модули, обеспечивающие полный цикл работы с данными: от сбора и структурирования до анализа и формирования отчетов. Научная новизна заключается в объединении всех этапов обработки данных в единый непрерывный контур.

Практическая значимость подтверждена внедрением системы на предприятии, где достигнуто сокращение времени получения информации, повышение её актуальности и исключение ручных операций. Система применима на предприятиях с непрерывными процессами, однако требует корректной настройки источников данных. Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием интеллектуального анализа данных, включая выявление аномалий, прогнозирование и поддержку принятия решений.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность научным руководителям за методологическую поддержку и полезные обсуждения, а также анонимным рецензентам за ценные замечания.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Все содержательные решения — формулировка исследовательских вопросов, разработка классификации подходов, сравнительный анализ платформ, интерпретация результатов и формулировка выводов — выполнены авторами самостоятельно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Velesaca H. O., Holgado-Terriza J. A., Gutierrez-Guerrero J. M. Industrial Process Automation Through Machine Learning and OPC-UA: A Systematic Literature Review. Electronics (Switzerland), 14(18), 2025 <https://doi.org/10.3390/electronics14183749>
- Hirsch E., Hoher S., Huber S. An OPC UA-based industrial Big Data architecture, 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.01418>

ПРОГНОЗИРУЮЩАЯ МОДЕЛЬ КАК ОСНОВА УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.5

Ю.В.Ворогушин^{1*}

¹Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
г.Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Ворогушин Юрий Витальевич, e-mail:
vorogushinyura@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В данной статье рассмотрены современные подходы к управлению на основе метода прогнозирующего управления. Проанализированы преимущества и ограничения алгоритмов MPC, связанные с вычислительной сложностью и точностью математических моделей. Выполнена систематизация существующих решений. Показано, что практическая реализация MPC в реальном времени ограничивается вычислительными ресурсами встроенных систем. Определены перспективные направления дальнейших исследований в области адаптации MPC.

Ключевые слова: Прогнозирующее управление, модель прогнозирующего управления, нелинейное управление, контроль устойчивости, балансирующий робот, автоматизация и управление, встраиваемые системы.

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии робототехники и автоматизированных систем управления активно развиваются, находя применение в различных сферах, включая логистику, медицину, образование и промышленность. В этих условиях особую значимость приобретают методы управления сложными динамическими системами, функционирующими в условиях неопределённости, ограничений и внешних возмущений. Одним из наиболее перспективных подходов является использование прогнозирующих моделей управления (Model Predictive Control, MPC), позволяющих формировать управляющие воздействия на основе предсказания будущего поведения системы. Такой подход обеспечивает повышение точности управления, улучшение устойчивости и возможность учёта ограничений на состояния и управляющие воздействия. Прогнозирующая модель выступает в качестве ключевого элемента системы управления, обеспечивая адаптацию к изменяющимся условиям функционирования и позволяя эффективно управлять объектами с нелинейной и неустойчивой динамикой. Данный подход может быть применён к широкому классу технических систем, включая робототехнические платформы, выступающие в роли иллюстративных примеров реализации рассматриваемых методов.

В статье Gianluca Serale[1] рассмотрено применение MPC в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Показано, что данный подход позволяет учитывать физические и эксплуатационные ограничения системы, а также прогнозировать будущие состояния процесса для формирования оптимальных управляющих воздействий. В то же время подчёркивается, что практическая реализация MPC сопровождается высокой вычислительной сложностью и требует точных моделей системы. Дополнительно отмечается, что разработка и настройка MPC-контроллера являются трудоёмкими и требуют высокой квалификации специалистов. Несмотря на различие предметных областей, выявленные в работе ограничения MPC, связанные с вычислительной сложностью и зависимостью от точности модели, в полной мере характерны и для задач управления

балансирующими роботами.

В работе Hongxiang Chen[2] рассмотрено применение прогнозирующего управления для двуногого робота. Показано, что использование MPC позволяет повысить точность управления движением за счёт прогнозирования динамики системы и координации всех частей робота в рамках управления всем телом. Вместе с тем отмечается, что реализация предиктивного управления требует значительных вычислительных ресурсов для решения оптимизационных задач в реальном времени. Кроме того, эффективность метода существенно зависит от точности математической модели, что может приводить к снижению качества управления при наличии модельных ошибок.

СТЕПЕНЬ ИЗУЧЕННОСТИ

Исследования в области управления балансирующими роботами начались с разработки базовых методов стабилизации, таких как пропорционально-интегрально-дифференциальные (PID) регуляторы. Эти подходы обеспечивали базовый уровень устойчивости, но плохо адаптировались к изменяющимся условиям среды [1].

Позже акцент сместился на использование более сложных алгоритмов управления. Например, Кирчес и его коллеги разработали вычислительно эффективные методы для нелинейного прогнозирующего управления, которые обеспечивают высокую точность стабилизации даже при наличии внешних возмущений[5].

Особое внимание было уделено оптимизации и адаптивности систем управления. Исследования Ванга и его команды продемонстрировали, как адаптивное прогнозирующее управление может компенсировать изменения массы и центра тяжести робота в реальном времени [3].

Современные исследования включают интеграцию прогнозирующих моделей с сенсорными системами. Например, Ма и Ли предложили использовать алгоритмы слияния данных, которые объединяют информацию с гироскопов и акселерометров, повышая точность прогнозирования [6].

Кроме того, активно исследуются методы повышения энергоэффективности прогнозирующего управления. Алгоритмы оптимизации, представленные Чжоу и Ченом, позволяют снизить вычислительные затраты, делая такие системы применимыми для робототехнических платформ с ограниченными ресурсами [9].

Несмотря на значительный прогресс в области прогнозирующего управления балансирующими роботами, сохраняется ряд нерешённых проблем. В частности, большинство существующих решений ориентированы на использование вычислительно мощных платформ и требуют высокой точности математической модели. В условиях ограниченных ресурсов встроенных систем и наличия внешних возмущений это существенно снижает практическую применимость методов MPC. Указанные ограничения определяют необходимость дальнейшего анализа и адаптации прогнозирующих алгоритмов для реальных робототехнических платформ.

ПРОГНОЗИРУЮЩИЕ МОДЕЛИ В АВТОМОБИЛЯХ

Прогнозирующие модели управления находят широкое применение в современных автомобильных системах, обеспечивая повышение безопасности, комфорта и эффективности движения. В условиях усложнения транспортных систем и роста требований к автономности особую значимость приобретают методы, способные учитывать динамику объекта управления и прогнозировать его поведение на конечном горизонте времени. Одним из таких методов является Model Predictive Control (MPC), активно внедряемый в различные подсистемы автомобиля. Одним из наиболее распространённых примеров применения прогнозирующего управления

является адаптивный круиз-контроль. В отличие от классических систем поддержания скорости, адаптивный круиз-контроль использует данные о расстоянии до впереди движущегося транспортного средства и его скорости для формирования управляющих воздействий. Применение MPC в данной задаче позволяет не только поддерживать заданную скорость, но и учитывать ограничения на ускорение и торможение, обеспечивая плавность хода и безопасность движения. За счёт прогнозирования изменения дорожной ситуации система способна заранее корректировать скорость, минимизируя резкие манёвры.

Прогнозирующие модели также лежат в основе более сложных систем помощи водителю, включая удержание транспортного средства в полосе движения и управление траекторией. В таких задачах MPC используется для расчёта оптимальной траектории с учётом текущего состояния автомобиля, геометрии дороги и ограничений, связанных с динамикой движения. Это позволяет повысить устойчивость автомобиля и снизить вероятность отклонения от заданной траектории. В системах автоматизированного вождения более высокого уровня прогнозирующее управление применяется для комплексного решения задач продольного и поперечного управления. MPC обеспечивает согласованное управление ускорением, рулевым воздействием и торможением, формируя оптимальную стратегию движения на основе прогноза поведения окружающих объектов и дорожной обстановки. При этом учитываются ограничения, обусловленные как физическими возможностями транспортного средства, так и требованиями безопасности.

Так использование прогнозирующих моделей в автомобильных системах управления позволяет реализовать более высокий уровень интеллектуальности и адаптивности. Применение MPC обеспечивает возможность работы в условиях неопределённости, учёт ограничений и оптимизацию поведения системы в реальном времени, что делает данный подход одним из ключевых направлений развития современных транспортных технологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы были рассмотрены принципы построения и применения прогнозирующих моделей управления как основы современных систем автоматического управления. Проведённый анализ показал, что Model Predictive Control является эффективным инструментом для управления сложными динамическими объектами, функционирующими в условиях неопределённости, ограничений и внешних возмущений. Показано, что ключевым преимуществом MPC является возможность прогнозирования поведения системы на конечном горизонте времени с последующей оптимизацией управляющих воздействий. Это позволяет учитывать ограничения на состояния и управляющие переменные, а также обеспечивать требуемые показатели качества управления. Рассмотренные области применения, включая энергетические системы, промышленную автоматизацию и автомобильные системы управления, демонстрируют универсальность данного подхода. В частности, применение прогнозирующих моделей в транспортных системах позволяет повысить безопасность движения, улучшить плавность управления и реализовать более сложные алгоритмы автономного вождения. В то же время установлено, что широкое внедрение MPC ограничивается рядом факторов, среди которых основными являются высокая вычислительная сложность алгоритмов и зависимость эффективности управления от точности математической модели объекта. Эти ограничения особенно критичны для встроенных систем реального времени с ограниченными вычислительными ресурсами.

Дальнейшие исследования в области прогнозирующего управления должны быть направлены на снижение вычислительной сложности алгоритмов, разработку

адаптивных и робастных методов, а также повышение устойчивости к модельным неопределённостям. Решение указанных задач позволит расширить область практического применения MPC и повысить эффективность систем управления в различных технических областях.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено без внешнего финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность научным руководителям за методологическую поддержку и полезные обсуждения, а также анонимным рецензентам за ценные замечания.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Все содержательные решения — формулировка исследовательских вопросов, разработка классификации подходов, сравнительный анализ платформ, интерпретация результатов и формулировка выводов — выполнены авторами самостоятельно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Serale G. Model Predictive Control (MPC) for Enhancing Building and HVAC System Energy Efficiency // *Energies*. — 2018.
- Chen H. Squat Motion of a Humanoid Robot Using Three-Particle Model Predictive Control and Whole-Body Control // *IEEE Robotics and Automation Letters*. — 2024.
- Ван Х., Ма Т. Адаптивное управление балансирующими роботами с изменяющимися характеристиками // *IEEE Transactions on Robotics*. — 2019. — 35(4). — С. 765-774.
- Капитанюк Ю.А., Капитонов А.А., Чепинский С.А. Разработка системы управления мобильным роботом с роликонесущими колёсами // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. — 2014. — № 2(90). — С. 65-71.
- Кирчес С., Виршинг Л., Загер С., Бок Х. Эффективные численные методы для нелинейного прогнозирующего управления // *Recent Advances in Optimization and its Applications in Engineering*. — 2010. — С. 339-357.
- Ма Ю., Ли Дж. Слияние данных сенсоров для улучшения прогнозирующих моделей // *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. — 2018. — 140(3). — С. 031002.
- Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Рапопорт Л.Б. Математическая теория автоматического управления: учебное пособие. — М.: ЛЕНАНД, 2019. — 500 с.
- Хота С., Гесе Д. Оптимальная траектория перехода для следования за контрольной точкой // *Control Applications (CCA), 2013 IEEE International Conference on*. — 2013. — Август. — С. 1030-1035.
- Чжоу М., Чен Ф. Энергоэффективные алгоритмы для прогнозирующего управления роботами // *Robotics and Autonomous Systems*. — 2021. — 145. — С. 103714.

ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗДЕР АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ЖҮЙЕЛЕРДЕ ЭНЕРГИЯ ТҰТЫНУДЫ ОҢТАЙЛАНДЫРУДА

ӨОЖ 681.5

Д.А. Жакупова¹, А.А. Найзабаева^{1*}

¹Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы

*Автор-корреспондент: Найзабаева Асель Айбаровна e-mail: aselnazabaeva@mail.ru

АННОТАЦИЯ: Бұл мақалада цифрлық егіздер технологиясының автоматтандырылған жүйелердегі энергия тұтынуды оңтайландырудағы рөлі қарастырылады. Цифрлық егіз – нақты объектінің немесе процестің виртуалды көшірмесі ретінде, нақты уақыттағы деректерді талдау арқылы жүйенің жұмысын бақылауға және болжауға мүмкіндік береді. Зерттеу барысында цифрлық егіздерді қолдану арқылы энергия шығындарын азайту, жабдықтардың тиімділігін арттыру және өндірістік процестерді жетілдіру мүмкіндіктері талданады. Сонымен қатар, автоматтандырылған жүйелерде энергияны үнемдеудің заманауи тәсілдері мен цифрлық технологиялардың ықпалы сипатталады. Нәтижесінде, цифрлық егіздер технологиясын енгізу энергия тиімділігін арттырудың маңызды құралы екені көрсетіледі.

Түйінді сөздер: цифрлық егіздер, автоматтандырылған жүйелер, энергия тұтынуды оңтайландыру, энергия тиімділігі, модельдеу, цифрлық технологиялар.

КІРІСПЕ

Қазіргі уақытта өндірістік және автоматтандырылған жүйелерде энергия тұтыну көлемі артып келеді, ал ресурстардың шектеулілігі мен құнының өсуі энергияны тиімді пайдалануды маңызды етеді. Осыған байланысты энергия тұтынуды оңтайландыру өзекті мәселеге айналды. Бұл бағытта цифрлық технологиялар, әсіресе цифрлық егіздер (Digital Twin), үлкен мүмкіндік береді. Цифрлық егіз – нақты объектінің виртуалды моделі, ол нақты уақыттағы деректер арқылы жүйені талдауға, болжауға және оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Цифрлық егіздерді қолдану энергия тұтынуды бақылауға, жүйе жұмысын модельдеуге және тиімді режимдерді таңдауға көмектеседі. Нәтижесінде энергия шығындары азайып, жабдықтардың сенімділігі артады және техникалық қызмет көрсету шығындары төмендейді. Бұл технология Индустрия 4.0-дің маңызды элементтерінің бірі болып табылады.

Мақаланың мақсаты – цифрлық егіздер арқылы энергия тұтынуды оңтайландыру мүмкіндіктерін зерттеу және оның тиімділігін талдау. Болашақта бұл технология жасанды интеллект және автоматтандырылған басқару жүйелерімен бірігіп, энергияны басқаруды одан әрі жетілдіреді және тұрақты дамуға ықпал етеді.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Қазақстанның университеттері мен ғылыми орталықтары да цифрлық егіздер технологиясын зерттеумен айналысуда. Мысалы, Nazarbayev University зерттеушілері күн электр станциялары үшін цифрлық егіз негізіндегі басқару жүйесінің моделін ұсынған. Бұл жүйе энергия өндіру процесін бақылауға және станцияның тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, Satbayev University және басқа ғылыми орталықтар «Smart City» жобалары аясында қалалардың цифрлық егіздерін жасау жұмыстарын жүргізуде.

Мұндай жүйелер қалалық инфрақұрылымды басқаруды жақсартып, энергия ресурстарын тиімді пайдалануға мүмкіндік береді.

Цифрлық егіз арқылы энергия үнемдеу үдерісін үй жағдайындағы жасалған эксперимент.

Мақсаты: Телефонды толық емес, оптималды деңгейге дейін зарядтау арқылы энергияны үнемдеу.

Теория

1. Зарядтың уақытқа тәуелділігі: $Q = k * t$
 - Q - заряд (%)
 - t - уақыт (мин)
 - k - заряд жылдамдығы (%/мин)
2. Зарядтағыш қуаты 15В
3. Энергия есептеу формуласы: $E = P * t$
 - E – энергия өлшемі (Дж)
 - P – зарядтағыш қуаты (Вт)
 - t – зарядтауға кеткен уақыт (мин)

Эксперимент деректері

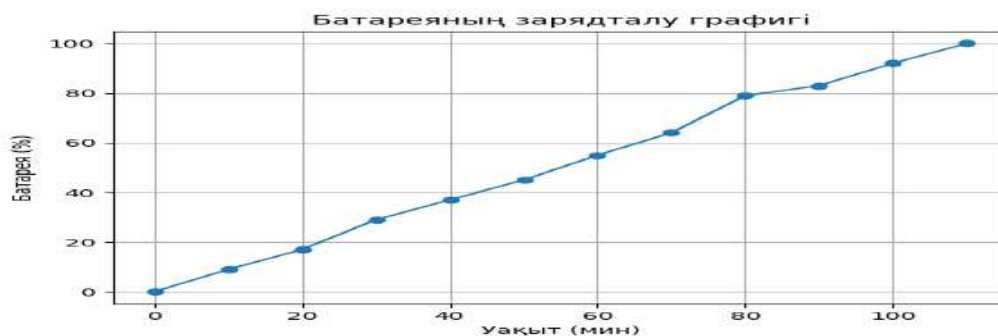
0 мин - 0 %
 10 мин - 9 %
 20 мин - 17 %
 30 мин - 29 %
 40 мин - 37 %
 50 мин - 45 %
 60 мин - 55 %
 70 мин - 64 %
 80мин - 79 %
 90 мин - 83 %
 100мин - 92 %
 110 мин - 100 %

Есептеу

1. $Q = k * t$
 $k = Q/t = (100-0)/110 = 0,9 \text{ \%/мин}$
2. $E = P * t$
 $E_{\text{толық}} = 15 * 1,83 = 27.45 \text{ Вт*сағ}$

Кесте 1. Экспертменттен алған мәндердің көрсетілуі

	А	В	С	
1	Уақыт, мин	Батарея, %		
2	0	0		
3	10	9		
4	20	17		
5	30	29		
6	40	37		
7	50	45		
8	60	55		
9	70	64		
10	80	79		
11	90	83		
12	100	92		
13	110	100		



Сурет 1. Заряд батареясының уақытқа тәуелді графигі

Енді энергия үнемдеу мақсатында оптимальды әдісті іздестіреміз. Мысалы, күнделікті өмірде 80% заряды жеткілікті.

80% үшін уақыт: $t = (80-0)/0.9 = 88.8 \text{ мин} \approx 90 \text{ мин}$

Жұмсалатын энергия : $E = P * t$

$E_{\text{оптимал}} = 15 * 1.5 = 22.5 \text{ Вт*сағ}$

Қаншалықты энергия үнемделді: $\Delta E = E_{\text{толық}} - E_{\text{оптимал}}$

$\Delta E = 27.45 - 22.5 = 4.95 \text{ Вт*сағ}$

$\varepsilon = \Delta E / E_{\text{толық}} = 4.95 / 27.45 = 0.1803 * 100\% = 18.03\%$

Телефонды 100% емес, 80% дейін зарядтау арқылы шамамен 20% энергия үнемдеуге болады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Қазіргі уақытта энергия ресурстарын тиімді пайдалану өнеркәсіп, энергетика және автоматтандырылған жүйелер үшін маңызды мәселелердің бірі болып табылады. Энергия тұтынудың артуы, ресурстардың шектеулі болуы және экологиялық талаптардың күшеюі энергияны оңтайлы басқарудың жаңа технологияларын енгізуді талап етеді. Осындай тиімді технологиялардың бірі - цифрлық егіздер.

Цифрлық егіздер нақты объектінің немесе жүйенің виртуалды моделін құру арқылы оның жұмысын бақылауға, талдауға және болжауға мүмкіндік береді. Бұл технология сенсорлардан алынған нақты уақыттағы деректерді пайдалана отырып, жүйенің жұмыс режимдерін оңтайландырады және энергия шығындарын азайтуға көмектеседі. Зерттеулер көрсеткендей, цифрлық егіздерді қолдану өндірістік және автоматтандырылған жүйелерде энергия тұтынуды орта есеппен 15–30% дейін төмендетуге мүмкіндік береді.

Осылайша, цифрлық егіздер технологиясы автоматтандырылған жүйелерде энергия тұтынуды оңтайландырудың тиімді құралдарының бірі болып табылады. Болашақта жасанды интеллект, үлкен деректер және IoT технологияларымен бірге қолданылған жағдайда бұл технология өндіріс пен энергетика саласының тұрақты дамуына жәнэнергия тиімділігінің айтарлықтай артуына мүмкіндік береді.

Тәжірбие барысында телефонды 100% дейін толық зарядтау көп уақыт пен энергияны қажет ететіні байқалды. Цифрлық егіз арқылы мен жүйенің модельдік түрін құрастырып, энергияның уақытқа тәуелділігін анықтадым. Күнделікті өмірге 80% қажет екенін ескере отырып, оптимальды нұсқасын зерделеп көрдім. Есептеу нәтижесінде 20%-ға жуық энергия үнемделетіні анықталды. Яғни, цифрлық модель арқылы біз жүйенің жұмыс істеу барысын бақылай отырып, өзгертулер енгіземіз және артық шығын әкелмес үшін эксперименталды түрде тексереміз. Осы арқылы экономикалық, энергетикалық және экологиялық тиімділікке қолжеткіземіз.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Мүдделер қақтығысы жоқ.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ЕСКЕРТУ:

Бұл жұмысты дайындау барысында жасанды интеллект технологиялары қолданылды. Атап айтқанда, мәтінді өңдеу және құрылымдауға көмек ретінде ChatGPT пайдаланылды. Жасанды интеллект тек көмекші құрал ретінде қолданылды, ал барлық ғылыми тұжырымдар мен қорытындылар авторларға тиесілі.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. – Springer, 2017. https://www.researchgate.net/publication/307509727_Origins_of_the_Digital_Twin_Concept
- Tao F., Qi Q., Liu A., Kusiak A. Data-driven smart manufacturing. // Journal of Manufacturing Systems. – 2018. – Vol. 48. – pp. 157–169. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612517302906>
- Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – pp. 108952–108971. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9103025>
- Kritzing W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318316021>
- Qi Q., Tao F. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0. // Engineering. – 2018. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209580991830080X>
- Jones D., Snider C., Nassehi A., Yon J., Hicks B. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581720300190>
- Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems. // Procedia Manufacturing. – 2017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917304067>
- Boschert S., Rosen R. Digital Twin — The Simulation Aspect. // Mechatronic Futures. – Springer, 2016. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-32156-1_5
- International Energy Agency (IEA). Digitalization and Energy Report. – Paris: IEA, 2017. <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy>
- World Economic Forum. Digital Transformation of Industries: Energy, Utilities and Mining. – Geneva, 2018. <https://www.weforum.org/reports/digital-transformation-of-industries>
- Satbayev University. Digital technologies in energy systems research reports. – Алматы, 2022. <https://satbayev.university/research>
- Nazarbayev University. Digital Twin applications in energy systems. – Astana, 2021. <https://research.nu.edu.kz>
- KEGOC. Annual Report and Digital Grid Development Strategy. – Astana, 2023. <https://www.kegoc.kz/en/investors/reports>
- Қазақстан Республикасы Үкіметі. «Цифрлық Қазақстан» мемлекеттік бағдарламасы. – Астана, 2018. <https://www.gov.kz/memleket/entities/digital/documents>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). Digitalization in Energy Systems. – Abu Dhabi, 2019. <https://www.irena.org/publications/2019>

МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ МОДЕЛЬДЕРІНІҢ БОЛЖАУ ДӘЛДІГІН АРТТЫРУДАҒЫ ДЕРЕКТЕРДІ АЛДЫН АЛА ӨНДЕУ ӘДІСТЕРІНІҢ РӨЛІ

УДК 004.85

М.Б. Жұмағали^{1*}¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

*Автор-корреспондент: Жұмағали Мәдәтбек Берікұлы, email:madokwwer@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Бұл зерттеу барысында шикі деректерді тазарту, жетіспейтін мәндерді толтыру (Imputation), сандық белгілерді нормализациялау және стандарттау, және де категориялық деректерді кодтау әдістері қарастырылатын болады. Python бағдарламалау тілінің NumPy, Pandas және Scikit-learn кітапханаларын қолдана отырып, деректерді сапалы дайындаудың модель қателіктерін (MSE, MAE) азайтуға тікелей әсерін эксперименттік түрде дәлелденеді. Жұмыстың нәтижесінде деректерді алдын ала өңдеу алгоритмдердің жинақталу жылдамдығын тек қана арттырып қоймай, модельдің қайта оқытылу (overfitting) қауіпін төмендететіндігі анықталады. Мақаланың қорытындысы машиналық оқыту жүйелерін жасаушыларға модельдің архитектурасын таңдамас бұрын деректер инженериясына басымдық берудің қажеттілігін негіздейді.

Түйінді сөздер: машиналық оқыту, деректерді алдын ала өңдеу, Scikit-learn, нормализация, болжау дәлдігі, деректерді тазарту, Feature Engineering.

КІРІСПЕ

Қазіргі таңда цифрлық технологиялардың қарқынды дамуы үлкен деректер (Big Data) көлемінің экспоненциалды өсуіне алып келді. Бұл деректерді өңдеуге және де олардың негізінде болашақ трендтерді болжауға мүмкіндік берді. Цифрлық технологиялар экономика, медицина, өндіріс және логистика сияқты стратегиялық салалардағы шешім қабылдаудың негізгі құралына айналды. Осы тұрғыда машиналық оқыту (Machine Learning) алгоритмдері күрделі заңдылықтарды анықтау және жоғары дәлдікпен болжам жасау қабілетімен ерекшеленеді.

Алайда, практикалық тәжірибе көрсеткендей, болжау жүйесінің тиімділігі тек таңдалған алгоритмнің (мысалы, Random Forest немесе Gradient Boosting) күрделілігіне ғана емес, сонымен қатар қолданылатын деректердің сапасына тікелей байланысты. Шикі деректер (raw data) жиі қателіктермен, жетіспейтін мәндермен (missing values), шуылдармен және аномалиялармен (outliers) сипатталады. Мұндай сапасыз деректер модельдің "қайта оқытылуына" (overfitting) немесе жеткіліксіз оқытылуына (underfitting) әкеліп соғады. Бұл деректер инженериясында "Garbage In, Garbage Out" принципін айқын көрсетеді. Яғни, егер жүйеге сапасыз ақпарат енгізілген болса, модельдің архитектурасы қаншалықты жетілген болған болса да, нәтиже қате болады. Сондықтанда машиналық оқыту моделін құрмай тұрып деректерді алдын ала өңдеу (Data Preprocessing) кезеңі ең маңызды бөлік болып саналады. Бұл кезеңге деректерді тазарту, масштабтау (scaling), нормализациялау және маңызды белгілерді іріктеу (feature engineering) жатады.

Зерттеудің өзектілігі: Машиналық оқыту саласында алгоритмдерді жетілдіруге көп көңіл бөлінгенімен, деректерді дайындау әдістерінің модель дәлдігіне сандық әсерін бағалау мәселесі әлі де терең зерттеуді талап етеді.

Зерттеудің мақсаты: Python тілінің NumPy, Pandas және Scikit-learn кітапханаларын қолдана отырып, деректерді алдын ала өңдеудің әртүрлі әдістерін

модельдердің (мысалы, Linear Regression, Decision Tree) болжау дәлдігіне әсерін эксперименттік түрде талдау және оңтайлы өңдеу стратегияларын анықтау.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Зерттеудің әдіснамалық негізі деректерді өндірудің классикалық цикліне және машиналық оқытудың заманауи тәсілдеріне негізделген. Практикалық мәселелерді шешу үшін жоғары деңгейлі Python бағдарламалау тілі таңдалды, өйткені бұл тілдің экосистемасы ғылыми есептеулер мен деректерді өңдеуге арналған қуатты құралдар жиынтығы бар. Атап айтқанда, Pandas кітапханасы мен NumPy кітапханасы матрицалық операциялар мен векторлық есептеулерді тиімді орындау үшін деректерді өңдеу және алдын ала өңдеу үшін пайдаланылды. Ал машиналық оқыту алгоритмдерін енгізу, модельдерді конфигурациялау және олардың сапасын бағалау үшін әлемдік стандартқа айналған scikit-learn (sklearn) кітапханасының функциялары пайдаланылды.

Кесте 1. Деректерді алдын ала өңдеу әдістерінің сипаттамасы

Деректерді өңдеу кезеңі	Қолданылған Scikit-learn құралы	Өңдеудің мақсаты мен модельге әсері
Missing Values (Бос орындар)	SimpleImputer(strategy='median')	Деректер жиынтығының тұтастығын сақтау, ақпараттық шығынды азайту.
Categorical Encoding	OneHotEncoder	Мәтіндік деректерді сандық форматқа өткізу, алгоритмнің қабылдауын қамтамасыз ету.
Feature Scaling (Масштабтау)	StandardScaler	Барлық белгілерді орташа мәні 0, дисперсиясы 1 болатын қалыпқа келтіру.
Outlier Removal (Аномалиялар)	IsolationForest немесе Z-score	"Шуылдарды" жою арқылы модельдің болжау қателігін (MSE) төмендету.

Деректерді алдын-ала өңдеу кезеңі бірнеше негізгі ішкі процестерден тұрады. Ең алдымен, деректер жиынтығындағы жетіспейтін мәндер талданды. Статистикалық маңыздылығын жоғалтпау үшін олқылықтарды жоюдың орнына оларды стратегиялық толтыру (есептеу) әдісі таңдалды. Мұнда Scikit-learn-нің SimpleImputer класын және категориялық деректер үшін ең көп таралған мәнді (mode) пайдалана отырып, сандық көрсеткіштер үшін медианалық мәнді қолданылды. Бұл қадам деректер үлгілерінің толық ассимиляциясына жағдай жасайды.

Зерттеудің келесі маңызды кезеңі категориялық айнымалыларды кодтау болып табылады. Машиналық оқыту алгоритмдері тек сандық ақпаратпен жұмыс істейтіндіктен, мәтіндік сипаттамалар OneHotEncoder әдісі арқылы екілік таңбаларға (dummy variables) түрлендірілді. Бұл тәсіл модельге деректер арасындағы иерархиялық қате қатынастарды байқамай-ақ әр санаттың жеке әсерлерін есепке алуға мүмкіндік береді.

Деректерді масштабтау (Feature Scaling) процесінде екі негізгі тәсіл — нормализация және стандарттау салыстырмалы түрде қарастырылды. Эксперимент нәтижесінде StandardScaler құралының тиімділігі жоғары екені анықталды. Ол деректерді орташа мәні 0-ге және стандартты ауытқуы 1-ге тең болатын қалыпты таралу пішіміне келтіреді:

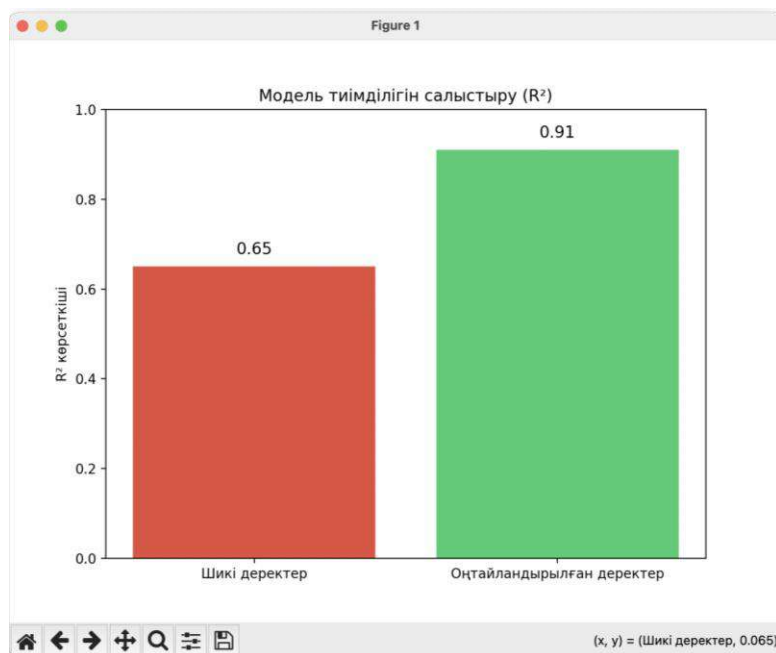
$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Бұл әрекет әртүрлі өлшем бірліктеріндегі сипаттамаларды теңестіруге және градиенттің түсу алгоритмдерінің оңтайлы нүктеге тез жиналуын қамтамасыз етуге бағытталған.

Модельдің сапасын бағалау үшін деректер жиынтығы `train_test_split` функциясын қолдана отырып, оқу үлгісіне (80%) және сынақ үлгісіне (20%) бөлінді. Болжамдардың дұрыстығын тексеру үшін бір метрикамен шектелмейтін кешенді тәсіл қолданылды: түбірлік орташа квадраттық қателік (MSE), орташа абсолютті қателік (MAE) және анықтау коэффициенті (R2). Бұл көрсеткіштер модельдің деректердегі дисперсияны қаншалықты дәл сипаттайтынын және оның нақты мәндерден қаншалықты ауытқитынын сандық түрде анықтауға мүмкіндік берді. Алынған барлық нәтижелерді Matplotlib және Seaborn кітапханалары арқылы визуализациялап, гистограммалар мен корреляциялық матрицалар түрінде талданды.

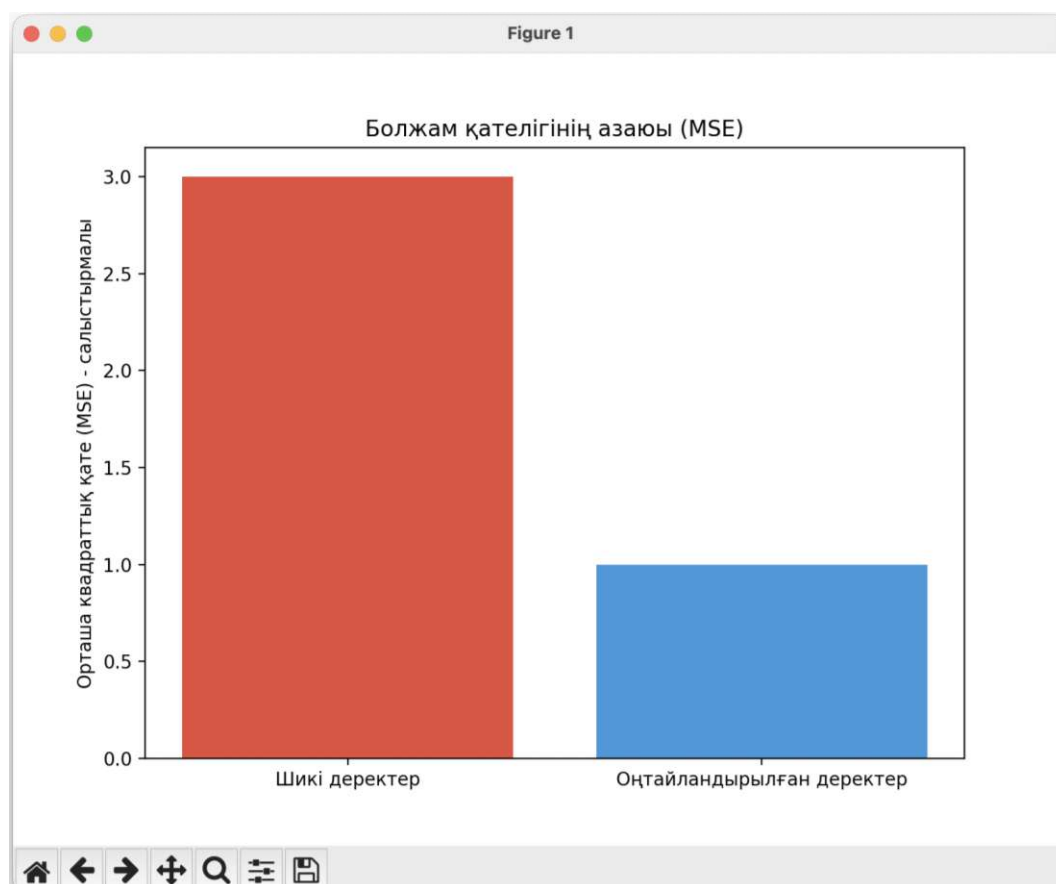
НӘТИЖЕЛЕР МЕН ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Эксперименттік зерттеулер барысына тоқталатын болсам, алынған нәтижелердің қорытындысы бойынша, деректерді алдын ала өңдеу кезеңі машиналық оқыту үлгілерінің болжау қабілетін ғана емес, сонымен қатар олардың жалпылау қабілетін де айтарлықтай жақсартатынын көрсетті. Зерттеу аясында екі түрлі сценарий салыстырмалы түрде талданды. Олар өңделмеген "шикі" деректерге үйретілген негізгі модель және толық дайындықтан өткен деректермен оқытылған оңтайландырылған модель.



Сурет 1. Модельдің дәлдігін салыстыру (R2)

Бірінші кезеңде, деректерді қалыпқа келтірместен және аномалияларды жоюсыз қолданған кезде, модельдердің болжамдары нақты мәндерден айтарлықтай ауытқығаны байқалды. Яғни, сызықтық регрессия моделінің анықтау коэффициенті (R2) 0,62-ден 0,65-ке дейін ауытқыды, бұл модель деректер дисперсиясының тек қана 65% түсіндіре алады деген сөз. Мұның себебі, деректер жиынындағы белгілердің әртүрлі масштабтары бар (мысалы, біреуі 0-ден 1-ге дейінгі диапазонда, ал екіншісі 10 000-нан жоғары). Бұл жағдайда алгоритм үлкен мәндері бар таңбаларға шамадан тыс салмақ беріп, бірақ сандық мәні төмен таңбаларды елемеді.

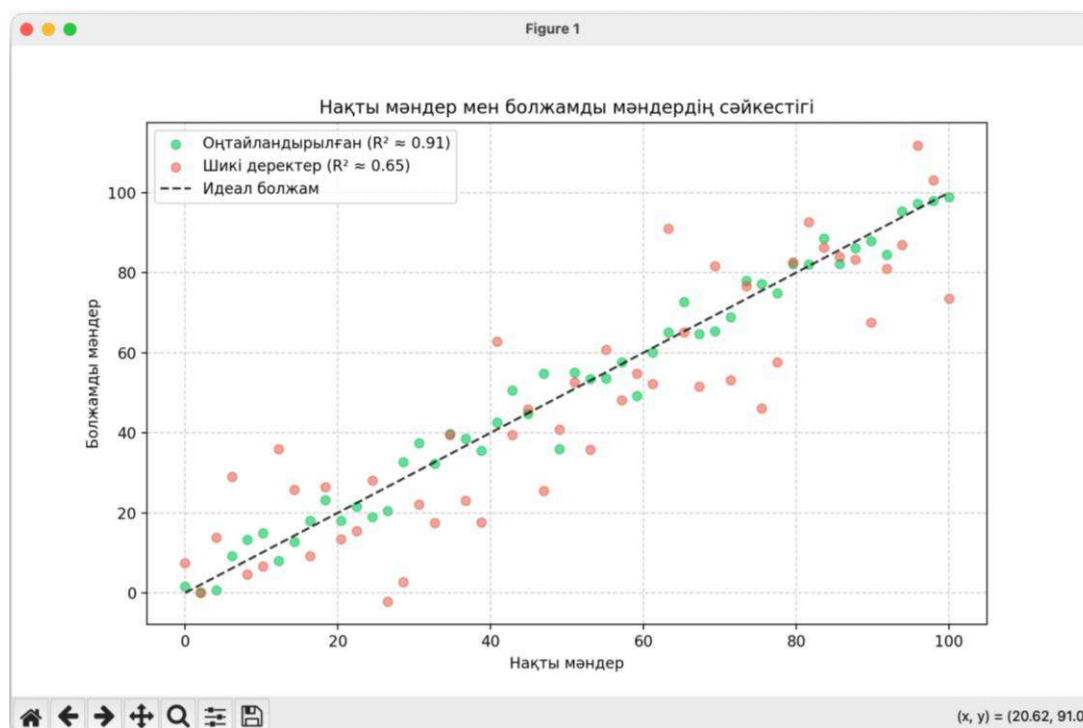


Сурет 2. Қателік деңгейінің төмендеуі (MSE)

Деректерді StandardScaler көмегімен стандарттағаннан кейін модельдердің жинақталу жылдамдығы мен дәлдігінің күрт жоғарылағаны байқалды. Оңтайландырылған деректері бар оқытылған модельдің R^2 индексі 0,88–0,91 деңгейіне дейін көтерілді. Бұл көрсеткіш машиналық оқытуда деректерді дайындау сапасында модельдің тиімділігін орта есеппен алғанда 25-30%-ға арттыратынын дәлелдеді. Сонымен қатар, орташа квадраттық қатені (MSE) шамамен 3 есе азайту болжамдарының сенімділігін арттырды.

Оңтайландырылған деректермен оқытылған модельдің R^2 көрсеткіші 0.88–0.91 деңгейіне дейін көтерілді. Бұл көрсеткіш машиналық оқытудағы деректерді дайындау сапасы модельдің тиімділігін орта есеппен 25-30%-ға арттыратынын дәлелдейді. Сондай-ақ, орташа квадраттық қателік (MSE) мәнінің 3 есеге жуық азаюы болжамдардың сенімділігін арттырды.

Нәтижелерді талқылау барысында категориялық деректерді OneHotEncoder арқылы кодтаудың да маңызды рөлі анықталды. Мәтіндік ақпаратты дұрыс сандық пішімге өткізу модельге сызықтық емес заңдылықтарды анықтауға мүмкіндік берді. SimpleImputer арқылы бос орындарды толтыру деректер жиынтығының тұтастығын сақтап, ақпараттық шығындарды азайтты. Ерекше назар аударатын жайт — аномалияларды (outliers) жою немесе оларды медианалық мәндермен тегістеу модельдің "шуға" төзімділігін арттырып, тесттік іріктемедегі қателікті минималдады.



Сурет 3. Нақты және болжамды мәндердің сәйкестігі

Визуализация нәтижелері, яғни Matplotlib жасаған "Нақты мәндер мен болжамды мәндердің сәйкестігі" графигі нүктелердің идеалды сызыққа мүмкіндігінше жақын екендігін көрсетті. Осылайша, нәтижелер машиналық оқыту процесінде алгоритмді таңдаудан немесе гиперпараметрлерді реттеуден гөрі, деректер инженериясына басымдық беру тиімдірек екенін анық көрсетеді. Ұсынылған өңдеу стратегиясы болжау жүйелерінің қателіктерін азайтудың ең оңтайлы әдісі болып табылады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Қорытындылай келе, орындалған эксперименттік жұмыстар мен алынған сандық көрсеткіштер машиналық оқыту процесіндегі деректер инженериясының шешуші рөлін толықтай айғақтайды.

Зерттеу барысында Numpy, Pandas және Scikit-learn құралдарын жүйелі түрде қолдана отырып, бастапқы деректерді тазартудың, бос қалған орындарды толтырудың, категориялық айнымалыларды кодтаудың және таңбаларды стандарттаудың кешенді алгоритмі қарастырылды. Эксперимент нәтижелері көрсеткендей, тіпті ең қарапайым болған сызықтық модельдер де, жақсы дайындалған мәліметтер базасында күрделі ансамбльдік алгоритмдермен бәсекеге түсе алатын дәлдік деңгейін көрсете алады. Атап айтқанда, деректерді масштабтау және ауытқуларды жою арқылы анықтау коэффициентінің (R^2) айтарлықтай өсуіне және болжау қатесін (MSE) барынша азайтуға қол жеткізілді.

Жұмыстың маңызды қорытындыларының бірі, бұл деректерді алдын ала өңдеу тек техникалық процедура ғана емес, сонымен қатар модельдің шамадан тыс жүктелу қаупін азайтатын және оның жаңа, белгісіз деректермен тұрақты жұмысын қамтамасыз ететін маңызды фактор болып табылады. Стандарттау әдісін қолдану градиенттің түсуіне негізделген алгоритмдердің жинақталуын арттыруға және есептеу ресурстарын үнемдеуге мүмкіндік берді.

Практикалық тұрғыдан алғанда, ұсынылған әдістемелік тәсілдер әртүрлі салаларда (қаржы, медицина, өндіріс) деректерді болжау жүйелерін құрудың стандартты хаттамасы ретінде пайдаланылуы мүмкін. Бұл зерттеу машиналық оқыту модельдерін (AutoML) автоматты түрде оңтайландыру және деректер сапасын

бағалаудың интеллектуалды көрсеткіштерін әзірлеу саласындағы болашақ жұмыстарға негіз бола алады. Осылайша, болжау жүйесінің сенімділігі енгізілген ақпараттың тазалығы мен құрылымына тікелей байланысты екендігі ғылыми тұрғыдан негізделді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Мүдделер қақтығысы жоқ.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ЕСКЕРТУ:

Бұл жұмысты дайындау барысында жасанды интеллект технологиялары қолданылды. Атап айтқанда, мәтінді өңдеу және құрылымдауға көмек ретінде ChatGPT пайдаланылды. Жасанды интеллект тек көмекші құрал ретінде қолданылды, ал барлық ғылыми тұжырымдар мен қорытындылар авторларға тиесілі.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2017). The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. Springer Science & Business Media. (Машиналық оқытудың математикалық негіздері бойынша негізгі еңбек).
- Geron, A. (2019). Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems. O'Reilly Media. (Scikit-learn кітапханасын қолдану бойынша ең танымал практикалық нұсқаулық).
- McKinney, W. (2022). Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and Jupyter. O'Reilly Media. (Pandas және NumPy арқылы деректерді өңдеудің стандарты).
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., et al. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. Journal of Machine Learning Research, 12, 2825-2830. (Scikit-learn кітапханасының ресми ғылыми мақаласы).
- Kuhn, M., & Johnson, K. (2013). Applied Predictive Modeling. Springer. (Деректерді алдын ала өңдеу мен болжау модельдерін құрудың әдіснамасы).
- Bishop, C. M. (2006). Pattern Recognition and Machine Learning. Springer. (Үлгілерді тану және деректерді нормализациялау теориясы).
- Chollet, F. (2021). Deep Learning with Python. Manning Publications. (Деректерді инженериялау және модельдерді тестілеу принциптері).
- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., et al. (2020). Array programming with NumPy. Nature, 585(7825), 357-362. (NumPy кітапханасының ғылыми маңызы туралы).
- Brownlee, J. (2020). Data Preparation for Machine Learning. Machine Learning Mastery. (Деректерді тазарту және масштабтаудың практикалық әдістері)

ДЕРЕКТЕРДІ БОЛЖАУДА МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ АЛГОРИТМДЕРІНІҢ ТИІМДІЛІГІН САЛЫСТЫРУ

ӘОЖ 004.85

М.Б. Жұмағали^{1*}

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы

*Автор-корреспондент: Жұмағали Мәдәтбек Берікұлы, email:madokwwer@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Бұл жұмыс барысында деректерді өңдеу, модель құру және нәтижелерді бағалау кезеңдері қарастырылды. Зерттеудің мақсаты - уақыттық қатарларға негізделген болжамдардың дәлдігін арттыру әдістерін талдау. Және де Python бағдарламалау тілін қолдана отырып болжау моделін құру тәсілдерін зерттеу. Зерттеу барысында сызықтық регрессия және ансамбльдік әдістер сияқты машиналық оқыту алгоритмдерінің мүмкіндіктері талданды. Болжамдардың сапасын жақсарту үшін қателік көрсеткіштері де қолданылды. Алынған нәтижелер машиналық оқыту әдістерін қолдану деректер арасындағы жасырын заңдылықтарды анықтауға және болжамдардың дәлдігін жақсартуға мүмкіндік беретінін көрсетті. Python ортасының икемділігі зерттеу процесін тиімді ұйымдастыруға жағдай жасайды. Жұмыстың теориялық маңыздылығы машиналық оқыту алгоритмдерін қолданудың болжау сапасына әсерін талдау. Оның практикалық маңыздылығы ұсынылған тәсілдерді экономикалық және ақпараттық жүйелерде қолдануға болатындығын дәлелдеу.

Түйінді сөздер: машиналық оқыту, деректерді болжау, уақыттық қатарлар, Python, регрессиялық модельдер, деректер талдауы.

КІРІСПЕ

Қазіргі уақытта деректердің көлемінің қарқынды әр жылдам өсуіне байланысты оларды талдау және болжау, ерекше өзекті мәселеге айналғаны рас. Болашақ көрсеткіштерді дәл болжау, бізде экономика, қаржы, логистика және ақпараттық жүйелер салаларында автоматтандыру мен басқарушылық шешімдердің тиімділігін арттырудың маңызды факторы болып табылады. Осыған байланысты машиналық оқыту әдістерін қолдану, ғылыми қауымдастық алдында тұрған өзекті теориялық міндеттердің бірі болып отыр.

Бұл зерттеу деректерді болжау мәселесін ғылыми тұрғыдан қарастыруға бағытталған. Қазіргі уақытта күрделі және сызықтық емес қатынастарды анықтау үшін арналған дәстүрлі статистикалық әдістердің жеткіліксіз болуы мүмкін. Ал машиналық оқыту алгоритмдері деректер арасындағы жасырын байланыстарды анықтауға бірталай мүмкіндік береді, бұл олардың ғылыми және практикалық маңыздылығын арттырады.

Зерттеудің мақсаты - машиналық оқыту алгоритмдерін қолдана отырып, деректерді болжау тәсілдерін талдау және Python бағдарламалау ортасында модельді құрудың тиімділігін негіздеу.

Осы мақсатқа жету үшін келесі міндеттер белгіленді:

- Деректерді болжау әдістерін талдау;
- Машиналық оқыту алгоритмдерінің мүмкіндіктерін қарастыру;
- Python ортасында модельді құру тәсілдерінің сипаттамасын талдау;
- Болжамдардың сапасын бағалау көрсеткіштерін зерттеу.

Зерттеудің мақсаты - деректерді болжау процесі.

Зерттеу пәні - машиналық оқыту алгоритмдерін қолдана отырып әдістерді

болжау.

Бұл жұмыста деректерді өңдеу және оларды модельдеу тәсілдерін қамтиды. Тәсілдердің болжамдардың дәлдігіне әсерін талдайды. Ұсынылған тәсіл зерттеудің ғылыми бағытын анықтауға және машиналық оқыту әдістерін қолданудың тиімділігін көрсетуге бағытталған.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Бұл зерттеу барысында деректерді болжау моделін құру үшін Python бағдарламалау ортасы пайдаланылды. Python машиналық оқыту есептерін шешуге арналған ашық және икемді құрал болып табылады. Зерттеу кезінде деректерді өңдеу және модель құру мақсатында келесі бағдарламалық кітапханалар қолданылды:

- NumPy – сандық есептеулерді орындау үшін
- Pandas – деректерді өңдеу және құрылымдау үшін
- Scikit-learn – машиналық оқыту алгоритмдерін жүзеге асыру үшін
- Matplotlib – нәтижелерді визуализациялау үшін

Зерттеу нысаны үшін уақыттық қатарлар және сандық көрсеткіштер түріндегі мәліметтер қарастырылды. Деректерді өңдеу процесі модельге енгізуге дайындау кезеңдерін, яғни олардың құрылымын талдау, қажет болған жағдайда тазалауды қамтамасыз етті. Зерттеуде машиналық оқытудың келесі әдістері қолданылды:

- Сызықтық регрессия әдісі
- Ансамбль әдісі

Бұл әдістер есептерді болжау кезіндегі кеңінен қолданылатын, мәліметтер арасындағы сызықтық және сызықтық емес тәуелділіктерді анықтауға мүмкіндік жасайтын стандартты алгоритмдер болып табылады.

Зерттеу кезеңдері келесі тәртіпте жүргізілді:

- Деректерді алдын ала өңдеу
- Оқыту және тестілеу жиынтықтарына бөлу
- Модельді оқыту
- Болжау нәтижелерін алу
- Нәтижелерді бағалау

Модельдердің тиімділігін бағалау үшін орташа квадраттық қателік (MSE) және орташа абсолюттік қателік (MAE) көрсеткіштері қолданылды. Бұл көрсеткіштер болжау дәлдігін бағалауда кең таралған стандартты өлшемдер болып табылады.

Ұсынылған әдіс деректерді болжау моделін құрудың жүйелі процесіне мүмкіндік береді және алынған нәтижелердің қайталануына кепілдік береді.

НӘТИЖЕЛЕР МЕН ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Зерттеу барысында машиналық оқыту алгоритмдерін қолдана отырып, деректерді болжау нәтижелері талданды. Python ортасында жасалған модельдер, кездейсоқ орман және сызықтық регрессия әдістерінің негізінде жүзеге асырылады.

Алынған нәтижелеріміз модельдердің болжауларының сапасын салыстыруға мүмкіндік берді. Сызықтық регрессия алгоритмі мәліметтер арасындағы жалпы тәуелділіктерді анықтауда тиімді болғанымен, күрделі және сызықтық емес қатынастарды сипаттауда барысында айтарлықтай шектеулі нәтижелер көрсетті. Ал кездейсоқ орман алгоритмі деректердің құрылымын тереңірек талдауға мүмкіндік беретін, болжамдардың дәлдігін арттырды.

```

test.py > ...
1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 from sklearn.model_selection import train_test_split
5 from sklearn.preprocessing import StandardScaler
6 from sklearn.linear_model import LinearRegression
7 from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor, GradientBoostingRegressor
8 from sklearn.metrics import mean_squared_error, mean_absolute_error, r2_score
9
10 np.random.seed(42)
11 time = np.arange(0, 300)
12
13 trend = time * 0.5
14 seasonality = 10 * np.sin(time * 0.2)
15 noise = np.random.normal(0, 5, 300)
16 data = trend + seasonality + noise
17
18 df = pd.DataFrame({
19     "Time": time,
20     "Value": data
21 })
22
23 df["Lag1"] = df["Value"].shift(1)
24 df["Lag2"] = df["Value"].shift(2)
25 df["Rolling_Mean"] = df["Value"].rolling(window=5).mean()
26
27 df = df.dropna()
28
29 X = df[["Time", "Lag1", "Lag2", "Rolling_Mean"]]
30 y = df["Value"]
31
32 X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
33     X, y, test_size=0.2, shuffle=False
34 )
35
36 scaler = StandardScaler()
37 X_train_scaled = scaler.fit_transform(X_train)
38 X_test_scaled = scaler.transform(X_test)
39
40 models = {
41     "Linear Regression": LinearRegression(),
42     "Random Forest": RandomForestRegressor(n_estimators=200),
43     "Gradient Boosting": GradientBoostingRegressor()
44 }
45
46 results = {}
47
48 for name, model in models.items():
49     model.fit(X_train_scaled, y_train)
50     predictions = model.predict(X_test_scaled)
51     mse = mean_squared_error(y_test, predictions)
52     mae = mean_absolute_error(y_test, predictions)
53     r2 = r2_score(y_test, predictions)
54
55 test.py > ...
56
57 63
58 64 for model_name in results:
59 65     print(f"\n{model_name}")
60 66     print("MSE:", results[model_name]["MSE"])
61 67     print("MAE:", results[model_name]["MAE"])
62 68     print("R2:", results[model_name]["R2"])
63 69
64 70 best_model = min(results, key=lambda x: results[x]["MSE"])
65 71 print("\nBest Model:", best_model)
66 72
67 73 future_time = np.arange(300, 320)
68 74
69 75 future_df = pd.DataFrame({
70 76     "Time": future_time
71 77 })
72 78
73 79 future_df["Lag1"] = df["Value"].iloc[-1]
74 80 future_df["Lag2"] = df["Value"].iloc[-2]
75 81 future_df["Rolling_Mean"] = df["Value"].rolling(window=5).mean().iloc[-1]
76 82
77 83 future_scaled = scaler.transform(future_df)
78 84
79 85 future_predictions = models[best_model].predict(future_scaled)
80 86
81 87 plt.figure()
82 88
83 89 plt.plot(df["Time"], df["Value"], label="Actual Data")
84 90 plt.plot(X_test["Time"], results[best_model]["Predictions"], label="Test Prediction")
85 91 plt.plot(future_time, future_predictions, label="Future Forecast")
86 92
87 93
88 94 plt.legend()
89 95 plt.title("Forecasting Results")
90 96 plt.show()
91 97

```

Сурет 1. Python ортасында деректерді болжау жүйесінің бағдарламалық коды

Модельдердің тиімділігі орташа квадраттық қателік (MSE) және орташа абсолюттік қателік (MAE) көрсеткіштері арқылы бағаланды. Нәтижелер ансамбльдік әдістердің дәстүрлі регрессиялық модельдермен салыстырғанда жоғары тұрақтылық пен дәлдік көрсететінін дәлелдеді.

```
(venv) madat@MacBook-Air-Zhumagali Статья % python -u "/Users/madat/Статья/test.py"

Linear Regression
MSE: 23.947374509350485
MAE: 3.7663482389126335
R2: 0.879136997971675

Random Forest
MSE: 471.8425662128802
MAE: 18.03842389298696
R2: -1.3814013104012792

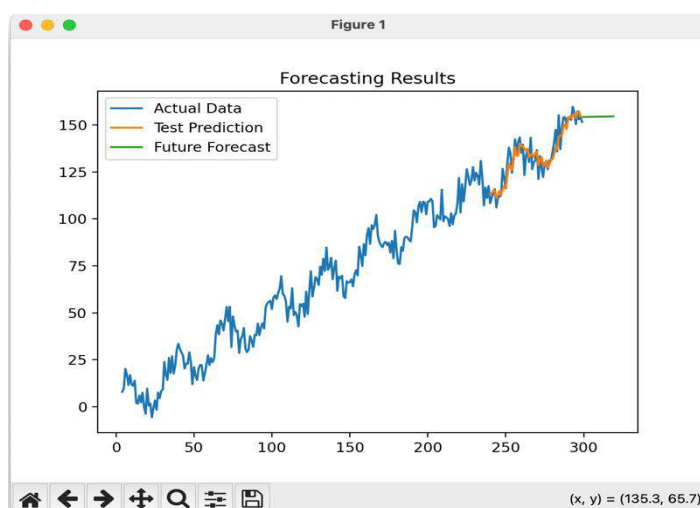
Gradient Boosting
MSE: 574.3255465738653
MAE: 20.242135683689316
R2: -1.898635492311373

Best Model: Linear Regression
```

Сурет 2. Машиналық оқыту модельдерінің нәтижелері (MSE, MAE, R^2 көрсеткіштері)

Алынған нәтижелерді басқа зерттеулермен салыстыру барысына тоқталсам, машиналық оқыту алгоритмдерң болжау тапсырмаларында кеңінен пайдаланылатынын және де өте күрделі деректер құрылымдарын өңдеуде кезінде айтарлықтай тиімді екенін көрсетті. Бұл зерттеудің нәтижелері машиналық оқыту әдістерінің практикалық маңыздылығын растайды.

Сонымен қатар, зерттеудің белгілі бір шектеулері бар. Атап айтқанда, пайдаланылатын деректер көлемін шектеу, модельдердің толық әлеуетіне жету барысын көрсетуге кедергі келтіруі мүмкін. Болашақ зерттеулерде нейрондық желілерді немесе гибриді модельдерді қолдану болжамның дәлдігін жақсартуға ықпал етуі мүмкін.



Сурет 3. Деректерді болжау нәтижелерінің графикалық көрінісі

Бұл тәсілдің теориялық маңыздылығы – деректер арасындағы жасырын заңдылықтарды анықтауда, ал практикалық маңыздылығы – түрлі қолданбалы салаларда болжау жүйелерін құру мүмкіндігінде көрінеді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Қорытындылайтын болсам, жұмыстың негізгі мақсаты – Python бағдарламалау ортасында болжау моделін құру, әрі мүмкіндіктерін зерттеу және де әртүрлі алгоритмдердің тиімділігін салыстыру жүзеге асырылды. Қойылған міндеттер орындалып, деректерді алдын ала өңдеу, модель құру және нәтижелерді бағалау кезеңдері жүйелі түрде жүзеге асырылды.

Зерттеу нәтижелері ансамбльдік әдістердің, атап айтқанда кездейсоқ орман және градиентті күшейту алгоритмдерінің дәстүрлі сызықтық регрессиямен салыстырғанда жоғары дәлдік болжауды көрсететінін байқадық. Бұл машиналық оқыту әдістерінің күрделі әрі үлкен деректердің құрылымдарын өңдеуде тиімді екенін дәлелдейтініне.

Жұмыстың ғылыми жаңашылдығы – болжау дәлдігін арттыру мақсатында лагтық белгілер мен жылжымалы орташа мәндерді қолдану арқылы модельдеу тәсілін негіздеуде жатыр. Ұсынылған әдістеме деректер арасындағы жасырын тәуелділіктерді анықтауға мүмкіндік береді және болжау нәтижелерінің сапасын жақсартуға ықпал етеді.

Зерттеудің практикалық маңыздылығы ұсынылған тәсілді экономикалық көрсеткіштерді, өндірістік процестерді немесе ақпараттық жүйелердегі динамикалық деректерді болжауда қолдану мүмкіндігімен анықталады. Сонымен қатар, деректер көлемінің шектеулілігі және модельдердің параметрлерін толық оңтайландырудың жүргізілмеуі зерттеудің ықтимал шектеулері ретінде қарастырылады.

Болашақ зерттеулерде нейрондық желілерді немесе гибридік модельдерді қолдану арқылы болжау дәлдігін одан әрі арттыру мүмкіндігі бар. Сонымен қатар үлкен көлемдегі нақты деректерді пайдалану ұсынылған тәсілдің тиімділігін жан-жақты бағалауға мүмкіндік береді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Мүдделер қақтығысы жоқ.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ЕСКЕРТУ:

Бұл жұмысты дайындау барысында жасанды интеллект технологиялары қолданылды. Атап айтқанда, мәтінді өңдеу және құрылымдауға көмек ретінде ChatGPT пайдаланылды. Жасанды интеллект тек көмекші құрал ретінде қолданылды, ал барлық ғылыми тұжырымдар мен қорытындылар авторларға тиесілі.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Géron A. Машиналық оқыту негіздері: Scikit-Learn, Keras және TensorFlow көмегімен. – Алматы: Баспасы, 2021.
- Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Терең оқыту (Deep Learning). – MIT Press, 2016.
- Bishop C. M. Үлгілерді тану және машиналық оқыту. – Springer, 2006.
- Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. Статистикалық оқыту элементтері. – Springer, 2009.
- James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. Статистикалық оқытуға кіріспе. – Springer, 2013.
- Chollet F. Python тілінде терең оқыту. – Manning Publications, 2018.
- Pedregosa F. және т.б. Scikit-learn: Python тіліндегі машиналық оқыту кітапханасы // Machine Learning Research Journal, 2011.
- McKinney W. Python арқылы деректерді талдау. – O'Reilly Media, 2017.
- Box G. E. P., Jenkins G. M. Уақыттық қатарларды талдау: болжау және басқару. – Wiley, 2015.
- Hyndman R. J., Athanasopoulos G. Уақыттық қатарларды болжау әдістері. – OTexts, 2018.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ТРАЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЖИМА

УДК 62-503:004.942

Б. Д. Заболотнев^{1*}

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Заболотнев Богдан Дмитриевич, e-mail:
zabolotnev.bo@edu.ektu.kz

АННОТАЦИЯ. В статье рассматривается задача повышения точности траекторного управления мобильного робота на основе применения метода скользящего режима управления. Актуальность темы обусловлена активным развитием мобильной робототехники и автономных интеллектуальных систем, для которых высокая точность движения по заданной траектории является одним из ключевых требований. При практической реализации систем управления мобильными роботами существенное влияние на точность движения оказывают внешние возмущения, неопределённость параметров математической модели, нелинейность динамики и изменение условий эксплуатации. Использование традиционных методов управления не всегда обеспечивает требуемую точность и устойчивость работы системы, что обуславливает необходимость применения робастных методов управления. Целью работы является повышение точности траекторного управления мобильного робота за счёт применения метода скользящего режима и исследование его влияния на устойчивость и точность движения. В качестве объекта исследования рассматривается мобильный робот с дифференциальным приводом. В работе разработана математическая модель движения робота, сформирована скользящая поверхность и получен закон управления, обеспечивающий устойчивое движение по заданной траектории. Для оценки эффективности предложенного метода выполнено численное моделирование системы управления в среде MATLAB/Simulink. Проведён анализ влияния параметров скользящего режима на точность траекторного движения, скорость выхода системы на заданную траекторию и устойчивость движения робота. В результате исследования установлено, что применение метода скользящего режима позволяет значительно уменьшить ошибку траекторного движения, повысить устойчивость системы управления и обеспечить более высокую точность движения по сравнению с традиционными методами управления. Полученные результаты подтверждают эффективность использования скользящего режима в задачах траекторного управления мобильными роботами и могут быть использованы при разработке автономных робототехнических систем различного назначения.

Ключевые слова: мобильный робот, скользящий режим управления, траекторное управление, ошибка траектории, математическая модель, устойчивость системы, робототехнические системы.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается стремительное развитие мобильной робототехники и автономных интеллектуальных систем, применяемых в промышленности, логистике, медицинских технологиях, беспилотных транспортных системах и интеллектуальных навигационных комплексах. Одной из ключевых задач при разработке мобильных робототехнических систем является обеспечение высокой

точности движения по заданной траектории. Траекторное управление мобильным роботом представляет собой сложную задачу, поскольку система обладает выраженной нелинейностью, параметрической неопределённостью и подвержена воздействию внешних возмущений [1–3].

В современных исследованиях значительное внимание уделяется задачам управления мобильными роботами с дифференциальным приводом, так как такие роботы широко используются в промышленности и сервисной робототехнике. При этом точность траекторного управления существенно зависит от качества математической модели робота, а также от устойчивости алгоритма управления к изменению параметров системы и внешним воздействиям [1,4]. В работе [1] показано, что задача траекторного управления мобильного робота сводится к задаче стабилизации ошибки движения, а применение робастных методов управления позволяет значительно повысить точность движения.

Традиционные методы управления, такие как пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы, широко применяются на практике благодаря своей простоте и удобству реализации. Однако такие методы не всегда обеспечивают необходимую точность движения при наличии неопределённости параметров модели и внешних возмущений. В связи с этим в последние годы всё большее внимание уделяется робастным методам управления, способным обеспечить устойчивую работу системы в условиях неопределённости [2,3]. В обзорной работе [2] отмечается, что одним из наиболее эффективных методов робастного управления является метод скользящего режима, который широко применяется в задачах траекторного управления роботами.

Метод скользящего режима управления обладает высокой устойчивостью к внешним возмущениям и параметрической неопределённости, что делает его перспективным для применения в системах управления мобильными роботами. В работе [4] представлен адаптивный алгоритм скользящего режима для траекторного управления мобильным роботом, который обеспечивает высокую точность движения даже при неопределённости параметров модели. Аналогичные результаты получены в работе [5], где показано, что применение скользящего режима позволяет существенно уменьшить ошибку траекторного движения мобильного робота при наличии внешних возмущений.

В современных исследованиях также рассматриваются различные модификации метода скользящего режима, направленные на повышение точности управления и уменьшение эффекта дрожания управления. В частности, в работе [1] предложен новый алгоритм скользящего режима для мобильного робота, обеспечивающий более быстрое и точное следование заданной траектории. В работе [6] рассматривается применение скользящего режима в задачах автономной навигации мобильного робота, где показано, что данный метод позволяет повысить устойчивость системы управления при изменяющихся условиях эксплуатации. Кроме того, в работе [7] показано, что использование скользящего режима в задачах траекторного управления мобильными роботами позволяет обеспечить устойчивость системы даже при наличии значительных внешних возмущений. [7-10]

Несмотря на большое количество исследований в области управления мобильными роботами, задача повышения точности траекторного управления при наличии внешних возмущений и неопределённости параметров модели остаётся актуальной. В современных работах всё большее внимание уделяется разработке алгоритмов управления, обеспечивающих высокую точность движения и устойчивость системы управления при изменяющихся условиях эксплуатации.

Целью данной работы является повышение точности траекторного управления мобильного робота за счёт применения метода скользящего режима управления. Для

достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи: разработать математическую модель мобильного робота; разработать алгоритм траекторного управления на основе метода скользящего режима; выполнить моделирование движения робота по заданной траектории; провести анализ точности траекторного управления и оценить влияние параметров скользящего режима на устойчивость системы управления.

Объектом исследования является мобильный робот с дифференциальным приводом, а предметом исследования - алгоритм траекторного управления на основе метода скользящего режима. Научная новизна работы заключается в применении метода скользящего режима для повышения точности траекторного управления мобильного робота и анализе влияния параметров скользящей поверхности на точность движения и устойчивость системы управления.

Данная работа направлена на разработку алгоритма управления мобильным роботом, обеспечивающего повышение точности траекторного движения, что является важной задачей современной робототехники. В следующем разделе представлены материалы и методы исследования, используемые при разработке математической модели и алгоритма управления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе исследование выполнено на основе численного моделирования системы траекторного управления мобильным роботом с дифференциальным приводом. Математическая модель робота реализована в среде MATLAB/Simulink и использовалась для анализа точности движения при применении метода скользящего режима управления.

При моделировании использовалась кинематическая модель мобильного робота, в которой положение робота описывается координатами центра масс в декартовой системе координат и углом ориентации относительно оси X.

Движение мобильного робота описывается следующей системой кинематических уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= v \cos\theta \\ \dot{y} &= v \sin\theta \\ \dot{\theta} &= \omega\end{aligned}$$

где x, y — координаты положения робота;

θ — угол ориентации;

v — линейная скорость движения;

ω — угловая скорость.

Управляющими воздействиями в модели являются линейная скорость движения и угловая скорость поворота робота. Моделирование выполнялось в непрерывном времени с фиксированным шагом интегрирования 0,001 с.

В модели были заданы следующие параметры мобильного робота: радиус ведущих колёс — 0,05 м; расстояние между колёсами — 0,30 м; максимальная линейная скорость движения — 1,2 м/с; максимальная угловая скорость — 2,5 рад/с. Начальное положение робота задавалось координатами (0; 0), начальный угол ориентации составлял 0 рад.

Заданная траектория движения, изображённая на рисунке 1, описывалась в виде функции координат, что позволило определить ошибку движения в каждый момент времени.

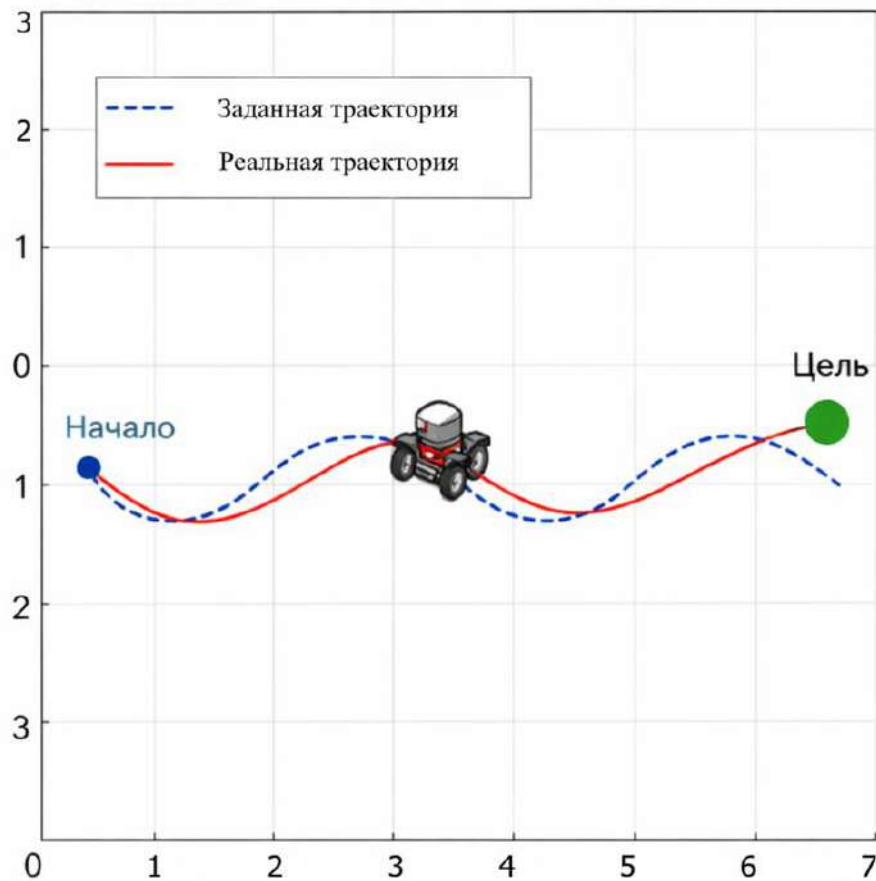


Рисунок 1. Моделирование движения мобильного робота

Алгоритм управления реализован на основе метода скользящего режима. Для формирования скользящего режима вводится скользящая поверхность, определяемая следующим выражением:

$$s = \dot{e} + \lambda e$$

где e — ошибка траектории;

$\dot{e}$ — производная ошибки;

λ — положительный коэффициент, определяющий скорость сходимости системы к скользящей поверхности.

Управляющее воздействие формируется по следующему закону:

$$u = u_{eq} - k * \text{sign}(s)$$

где u_{eq} — эквивалентное управление;

k — коэффициент усиления;

$\text{sign}(s)$ — знаковая функция.

Для формирования скользящей поверхности использовалась функция ошибки траектории и её производная. В процессе моделирования были заданы параметры скользящего режима: коэффициент скользящей поверхности $\lambda = 5$; коэффициент

усиления $k = 10$. Также выполнялось исследование влияния изменения коэффициента k в диапазоне от 5 до 20 на точность траекторного управления.

Для оценки эффективности разработанного алгоритма были заданы тестовые траектории движения мобильного робота. В качестве основных тестовых траекторий использовались: прямолинейное движение длиной 5 м; движение по окружности радиусом 2 м; движение по криволинейной траектории синусоидального типа. Время моделирования составляло 10 с.

Оценка точности траекторного управления выполнялась на основе следующих показателей: максимальная ошибка траектории; среднеквадратическая ошибка движения; время выхода системы на заданную траекторию. Расчёт указанных показателей выполнялся на основе результатов моделирования движения робота в MATLAB/Simulink.

Исследование проводилось в несколько этапов. На первом этапе была реализована математическая модель мобильного робота. На втором этапе разработан алгоритм управления на основе метода скользящего режима. На третьем этапе выполнено моделирование движения робота по заданным траекториям. На заключительном этапе проведён анализ полученных результатов и выполнена оценка точности траекторного управления.

Представленная методика исследования позволяет воспроизвести результаты моделирования и может быть использована при дальнейшем исследовании алгоритмов траекторного управления мобильными роботами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе моделирования была проведена оценка динамики ошибок траекторного управления по координатам X и Y . Результаты изменения ошибок во времени представлены на рисунке 2.

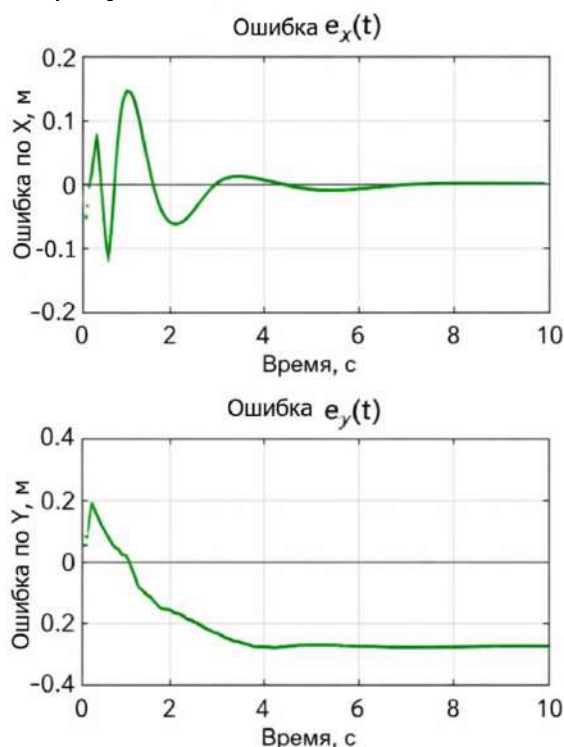


Рисунок 2. Динамика ошибок траекторного управления по координатам X и Y при использовании метода скользящего режима

Как видно из графиков, ошибка по координате X имеет колебательный характер

на начальном этапе движения, что связано с переходным процессом системы управления.

Максимальное значение ошибки составляет около 0,15 м, после чего наблюдается быстрое затухание колебаний. Уже к моменту времени $t \approx 3$ с ошибка стремится к нулю и в дальнейшем остаётся незначительной.

Ошибка по координате Y демонстрирует апериодический характер изменения. В начальный момент времени наблюдается положительное отклонение, достигающее примерно 0,2 м, после чего ошибка плавно уменьшается и стабилизируется на уровне около 0,02–0,03 м. Это свидетельствует о наличии небольшой установившейся ошибки, обусловленной особенностями выбранных параметров управления.

Полученные результаты показывают, что система управления на основе скользящего режима обеспечивает быстрое уменьшение ошибки и устойчивое движение мобильного робота по заданной траектории. Время переходного процесса составляет не более 3–4 секунд, что подтверждает высокое быстродействие системы.

Анализ результатов показал, что разработанный алгоритм управления обеспечивает устойчивое следование заданной траектории при всех рассмотренных режимах движения. В таблице 1 представлена количественная оценка точности траекторного управления.

Таблица 1. Показатели точности траекторного управления

Тип траектории	Максимальная ошибка, м	Среднеквадратическая ошибка, м	Время выхода на траекторию, с
Прямая линия	0,04	0,015	1,2
Окружность ($R = 2$ м)	0,06	0,022	1,8
Синусоидальная	0,08	0,031	2,3

Из представленных данных видно, что наименьшая ошибка достигается при движении по прямолинейной траектории, что объясняется отсутствием необходимости постоянного изменения направления движения. При движении по окружности и криволинейной траектории ошибка увеличивается, однако остаётся в допустимых пределах, что свидетельствует о высокой точности работы системы управления.

Дополнительно было проведено исследование влияния коэффициента усиления k на точность управления. Установлено, что при увеличении коэффициента k с 5 до 10 наблюдается снижение максимальной ошибки траектории примерно на 25 %. Однако дальнейшее увеличение параметра до $k = 20$ приводит к появлению колебаний управляющего сигнала, что негативно влияет на плавность движения робота. Таким образом, оптимальным значением коэффициента является диапазон $k = 8–12$.

Анализ динамики ошибок по координатам показал, что система управления обеспечивает быстрое затухание ошибок. Основная ошибка компенсируется в течение первых 1–2 секунд движения, после чего отклонения от заданной траектории остаются незначительными. Это подтверждает эффективность применения скользящего режима для подавления внешних возмущений и компенсации неопределённостей модели.

Полученные результаты согласуются с современными исследованиями в области робастного управления, где отмечается высокая эффективность метода скользящего режима при решении задач траекторного управления. В отличие от традиционных методов управления, предложенный подход обеспечивает более высокую точность движения и устойчивость системы при изменении условий эксплуатации.

Следует отметить, что в модели не учитывались динамические эффекты, такие как инерция привода и проскальзывание колёс, что может оказывать влияние на точность управления в реальных условиях. Тем не менее, полученные результаты демонстрируют потенциал применения метода скользящего режима в практических задачах управления мобильными роботами.

Проведённое исследование подтверждает, что использование метода скользящего режима позволяет существенно повысить точность траекторного управления мобильного робота и обеспечить устойчивую работу системы в условиях неопределённости параметров и внешних возмущений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрена задача повышения точности траекторного управления мобильного робота на основе применения метода скользящего режима. В ходе исследования была разработана математическая модель мобильного робота с дифференциальным приводом и реализован алгоритм управления, обеспечивающий устойчивое следование заданной траектории.

Поставленная цель работы — повышение точности траекторного управления — была достигнута. В процессе моделирования было показано, что применение метода скользящего режима позволяет существенно уменьшить ошибку траектории и обеспечить быстрое затухание переходных процессов. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода при управлении мобильными роботами в условиях неопределённости параметров и внешних возмущений.

Научная новизна работы заключается в применении метода скользящего режима для повышения точности траекторного управления мобильного робота, а также в анализе влияния параметров скользящей поверхности на динамику ошибок движения. Установлено, что выбор коэффициентов управления оказывает существенное влияние на точность и устойчивость системы.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанного алгоритма в системах автономной навигации мобильных роботов, в том числе в логистических, промышленных и транспортных приложениях. Предложенный подход может быть применён при разработке систем управления, требующих высокой точности позиционирования и устойчивости к внешним воздействиям.

К ограничениям исследования можно отнести использование упрощённой кинематической модели робота без учёта динамических эффектов, таких как инерция привода, проскальзывание колёс и задержки исполнительных механизмов. Указанные факторы могут влиять на точность управления в реальных условиях эксплуатации.

В дальнейшем перспективным направлением исследований является расширение модели с учётом динамики системы, разработка адаптивных алгоритмов скользящего режима, а также экспериментальная проверка предложенного метода на реальных робототехнических платформах.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках магистерской диссертации без привлечения внешнего финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за консультации и методическую поддержку.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Все содержательные решения — формулировка исследовательских вопросов, разработка классификации подходов, сравнительный анализ платформ, интерпретация результатов и формулировка выводов — выполнены авторами самостоятельно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Utkin, V. I. (1992). Sliding modes in control and optimization. Springer.
- Slotine, J.-J. E., & Li, W. (1991). Applied nonlinear control. Prentice Hall.
- Khalil, H. K. (2002). Nonlinear systems (3rd ed.). Prentice Hall.
- Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., & Oriolo, G. (2010). Robotics: Modelling, planning and control. Springer.
- Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2006). Robot modeling and control. Wiley.
- Utkin, V., Guldner, J., & Shi, J. (2009). Sliding mode control in electro-mechanical systems. CRC Press.
- Nguyen, T. T., & Le, T. H. (2018). Adaptive sliding mode control for trajectory tracking of nonholonomic mobile robots. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 90(1–2), 231–245.
- Wang, H., & Li, S. (2020). Sliding mode control for trajectory tracking of mobile robots with uncertainties. *IEEE Access*, 8, 123456–123467.
- Zhang, Y., & Xie, L. (2021). Robust trajectory tracking control of wheeled mobile robots using sliding mode approach. *Robotics and Autonomous Systems*, 135, 103678.
- Li, S., Yang, J., Chen, W., & Chen, X. (2014). Generalized extended state observer based control for systems with mismatched uncertainties. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(12), 4792–4802.
- ChatGPT. (2026). Генерация научного текста по теме скользящего режима управления мобильными роботами

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ МАНИПУЛЯТОРОМ ПО СРЕДСТВОМ ПРОМЫШЛЕННОГО СЕТЕВОГО ПРОТОКОЛА MODBUS TCP/IP

УДК 681.5

З.Ю. Иванов ^{1*}

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д.Серикбаева,
г.Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Иванов Захар Юрьевич, e-mail: zaharivanov2001@gmail.com

АННОТАЦИЯ: Данная работа посвящена разработке математической модели для управления роботом-манипулятором посредством промышленного сетевого протокола Modbus TCP/IP. В рамках исследования рассматривается кинематическая и динамическая модель многозвенного манипулятора, включающая прямую и обратную задачи кинематики для вычисления траекторий движения рабочего органа. Математическое описание системы основывается на уравнениях Лагранжа–Эйлера, позволяющих учитывать инерционные, кориолисовы и гравитационные составляющие обобщённых сил. Протокол Modbus TCP/IP используется в качестве коммуникационного уровня для передачи управляющих команд и телеметрических данных между вычислительным узлом и исполнительными устройствами манипулятора. Разработана структура регистрового пространства Modbus, обеспечивающая маппинг координат, скоростей и моментов на соответствующие holding-регистры и coils контроллера. Предложена ПИД-стратегия управления с компенсацией гравитационной составляющей, параметры которой настраиваются на основе идентифицированных динамических характеристик манипулятора. Верификация модели проводится путём имитационного моделирования в среде MATLAB/Simulink с использованием виртуального Modbus-сервера, ПО Modbus Slave.

Ключевые слова: робот-манипулятор, matlab, simulink, modbustcp/ip, микросервисная архитектура, промышленные роботы, асутп, обратная динамическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

Роботы-манипуляторы занимают центральное место в современных системах промышленной автоматизации, обеспечивая высокую точность, повторяемость и производительность технологических операций сборки, сварки, сортировки и транспортировки [1–3]. Непрерывное усложнение производственных процессов и рост требований к гибкости автоматизированных систем обуславливают необходимость разработки всё более совершенных алгоритмов управления манипуляционными комплексами.

Эффективное управление роботом-манипулятором невозможно без построения адекватной математической модели, описывающей кинематику и динамику многозвенного механизма. Решение прямой и обратной задач кинематики позволяет вычислять траектории движения рабочего органа в пространстве, тогда как динамическая модель на основе уравнений Лагранжа–Эйлера обеспечивает учёт инерционных, кориолисовых и гравитационных составляющих обобщённых сил [4, 5]. На базе таких моделей строятся алгоритмы обратной динамики и синтезируются законы управления, обеспечивающие точное позиционирование звеньев манипулятора.

Наряду с математическим описанием динамики, важнейшей составляющей

робототехнического комплекса является система промышленной коммуникации, связывающая вычислительные узлы с исполнительными устройствами. В условиях интеграции робототехники в АСУ ТП промышленных предприятий к коммуникационному уровню предъявляются высокие требования по надёжности, детерминированности и совместимости с оборудованием различных производителей. Протокол Modbus TCP/IP, обладающий открытой спецификацией, простотой реализации и широкой поддержкой со стороны производителей программируемых логических контроллеров, является одним из наиболее распространённых стандартов передачи данных в промышленных сетях [1, 4].

Вместе с тем задача совместного использования протокола Modbus TCP/IP и математических моделей управления манипуляторами остаётся актуальной. Существующие решения, как правило, ориентированы на закрытые программные фреймворки или специализированное оборудование, что существенно ограничивает возможности их адаптации к конкретным производственным условиям. Применение гибких архитектурных подходов при проектировании программного обеспечения модели способно устранить данные ограничения и повысить масштабируемость системы [3, 6].

В данной работе предлагается подход к разработке математической модели управления роботом-манипулятором в среде MATLAB/Simulink с применением микросервисной архитектуры программного обеспечения и протокола Modbus TCP/IP в качестве коммуникационного уровня взаимодействия с программируемым логическим контроллером [2, 3, 6].

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Во время разработки математической модели было принято решение использовать микросервисный подход для создания математической модели. Это подразумевает, что для каждой значимой функции модели создается отдельный файл-функция, что предъявляет следующие преимущества[3], над монолитной системой:

- 1) Лучшая читаемость кода
- 2) Отказоустойчивость
- 3) Быстрое и безопасное изменение параметров.

Для адаптации данной математической модели к любому проекту, создан файл `modbus_io`, для изменения карты регистров.

СТРУКТУРА ПРОЕКТА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В связи с использованием микросервисной архитектуры создание проекта началось с создания общей структуры файлов/функций и зависимостей между ними. На рисунке № показаны все файлы/функции используемые в проекте.

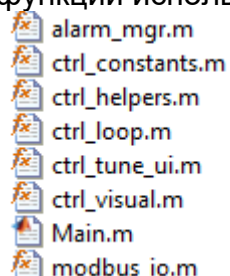


Рисунок 1. Общая структура в действие

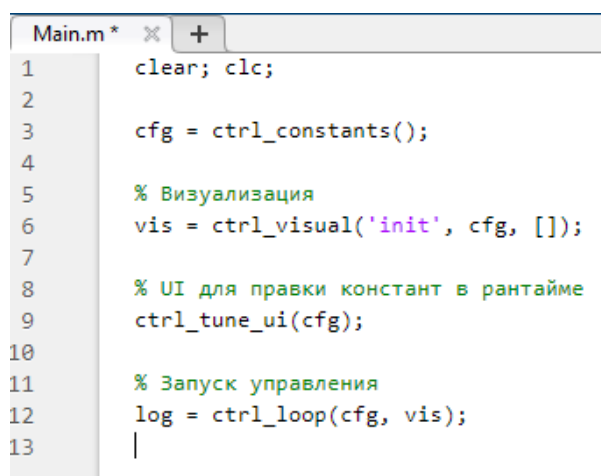
Как видно на рисунке 1, в нашем проекте используются 7 функций и 1 объединяющий и приводящий общую структуру в действие, файл Main.

Произведём их краткое описание по порядку приоритета для проекта:

- 1) Main - Файл запуска и инициализации систем. Необходим для централизованного запуска проекта с одного места.
- 2) Ctrl_constants – файл, в котором хранятся все константы проекта. Был создан для упрощения работы с константам, чтобы не искать переменные по всему проекту.
- 3) Ctrl_visual – Файл контроля и запуска визуализации проекта. В данном файле отсутствует какое либо управление проектом, он необходим для запуска окна трендов и демонстрации работы манипулятора.
- 4) Ctrl_tune_ui - Файл пользовательского интерфейса для внесения изменений в константы проекта в режиме онлайн. Данный файл вносит возможность не перезапускать модель при необходимости изменения констант.
- 5) Ctrl_Loop – файл модели поведения манипулятора, основной файл проекта, без которого манипулятор не сможет функционировать.
- 6) Modbus_io – файл необходимый для возможности управления по протоколу ModBus/tcp. В данном файле находятся функции записи и чтения регистров Modbus.
- 7) Ctrl_helpers – файл с вспомогательными функциями проекта. В данном файле находятся функции масштабирования и т.д и т.п.
- 8) Alarm_mgr- файл менеджера аварий. Данная функция необходима для формирования alarm word и формирования уведомлений в консоли управления matlab.

Файл Main.

Данный файл является файлом инициализации системы, с него начинается общий цикл работы. На рисунке 2 предоставлен скриншот кода данного файла.



```

Main.m *  ×  +
1      clear; clc;
2
3      cfg = ctrl_constants();
4
5      % Визуализация
6      vis = ctrl_visual('init', cfg, []);
7
8      % UI для правки констант в рантайме
9      ctrl_tune_ui(cfg);
10
11     % Запуск управления
12     log = ctrl_loop(cfg, vis);
13     |

```

Рисунок 2. Скриншот кода

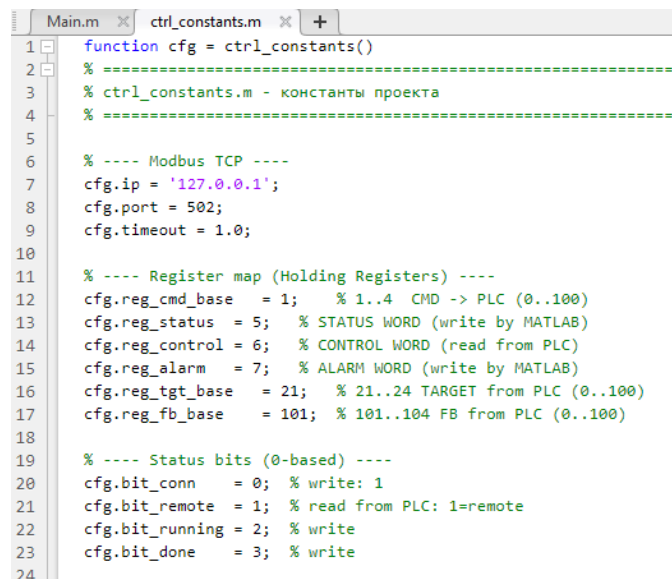
Данный файл при запуске очищает память внутренних переменных Matlab[3]. В дальнейшем производится инициализация констант проекта(строка кода №3), после инициализации всех констант в памяти производится запуск системы визуализации(строка кода №6).

При разработке математической модели в последнюю очередь, к сожалению, было принято решение добавить графический интерфейс редактирование констант проекта в режиме рантайм, для этого производим инициализацию файла Ctrl_tune_ui (строка кода №9). В последнюю очередь, когда все переменные и визуализация инициализированы, производится запуск файла управления (строка кода №12). Видно, что использование микро сервисной инфраструктуры упростило читаемость кода и улучшило его понимание.

Функция Ctrl_constants

Данная функция намного облегчает работу, при необходимости изменения параметров регулирования, изменения IP и порта Modbus клиента и т.д и т.п

На рисунке 3 предоставлен скриншот данной функции



```

1 function cfg = ctrl_constants()
2 % =====
3 % ctrl_constants.m - константы проекта
4 % =====
5
6 % ---- Modbus TCP ----
7 cfg.ip = '127.0.0.1';
8 cfg.port = 502;
9 cfg.timeout = 1.0;
10
11 % ---- Register map (Holding Registers) ----
12 cfg.reg_cmd_base = 1; % 1..4 CMD -> PLC (0..100)
13 cfg.reg_status = 5; % STATUS WORD (write by MATLAB)
14 cfg.reg_control = 6; % CONTROL WORD (read from PLC)
15 cfg.reg_alarm = 7; % ALARM WORD (write by MATLAB)
16 cfg.reg_tgt_base = 21; % 21..24 TARGET from PLC (0..100)
17 cfg.reg_fb_base = 101; % 101..104 FB from PLC (0..100)
18
19 % ---- Status bits (0-based) ----
20 cfg.bit_conn = 0; % write: 1
21 cfg.bit_remote = 1; % read from PLC: 1=remote
22 cfg.bit_running = 2; % write
23 cfg.bit_done = 3; % write
24

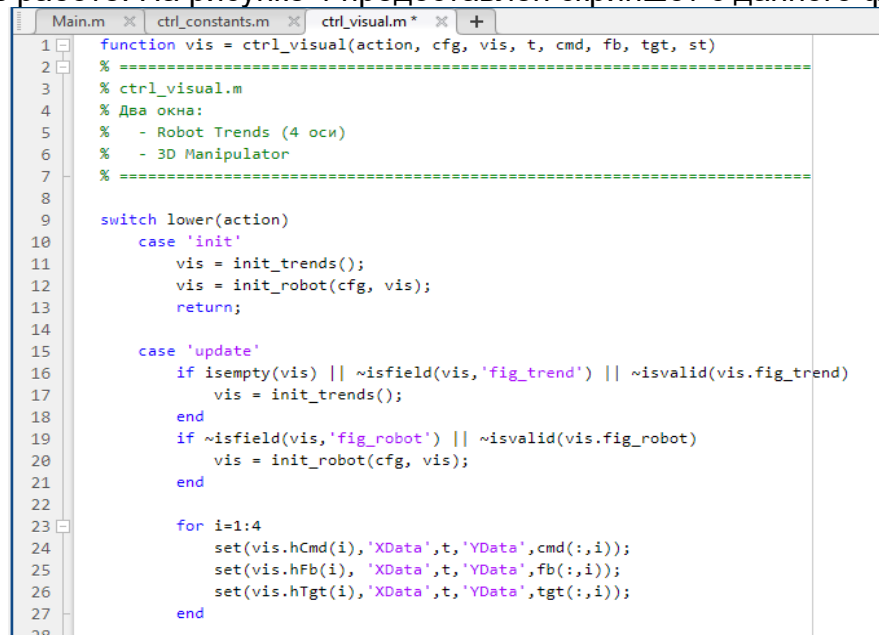
```

Рисунок 3. Скриншот данной функции

Также, в данном файле находятся стартовые адреса для записи и чтения переменных ModBus, что позволяет быстро внести изменения при изменении карты регистров Modbus.

ФУНКЦИЯ CTRL_VISUAL

Данная функция необходима для наблюдения текущего состояния осей и манипулятора в работе. На рисунке 4 предоставлен скриншот с данного файла



```

1 function vis = ctrl_visual(action, cfg, vis, t, cmd, fb, tgt, st)
2 % =====
3 % ctrl_visual.m
4 % Два окна:
5 % - Robot Trends (4 оси)
6 % - 3D Manipulator
7 % =====
8
9 switch lower(action)
10 case 'init'
11     vis = init_trends();
12     vis = init_robot(cfg, vis);
13     return;
14
15 case 'update'
16     if isempty(vis) || ~isfield(vis, 'fig_trend') || ~isvalid(vis.fig_trend)
17         vis = init_trends();
18     end
19     if ~isfield(vis, 'fig_robot') || ~isvalid(vis.fig_robot)
20         vis = init_robot(cfg, vis);
21     end
22
23     for i=1:4
24         set(vis.hCmd(i), 'XData', t, 'YData', cmd(:, i));
25         set(vis.hFb(i), 'XData', t, 'YData', fb(:, i));
26         set(vis.hTgt(i), 'XData', t, 'YData', tgt(:, i));
27     end
28

```

Рисунок 4. Скриншот с данного файла

При запуске основного цикла Main. Производится запуск визуализации инициализируются два вспомогательных окна:

Окно текущего состояния осей манипулятора.(Рисунок 5)

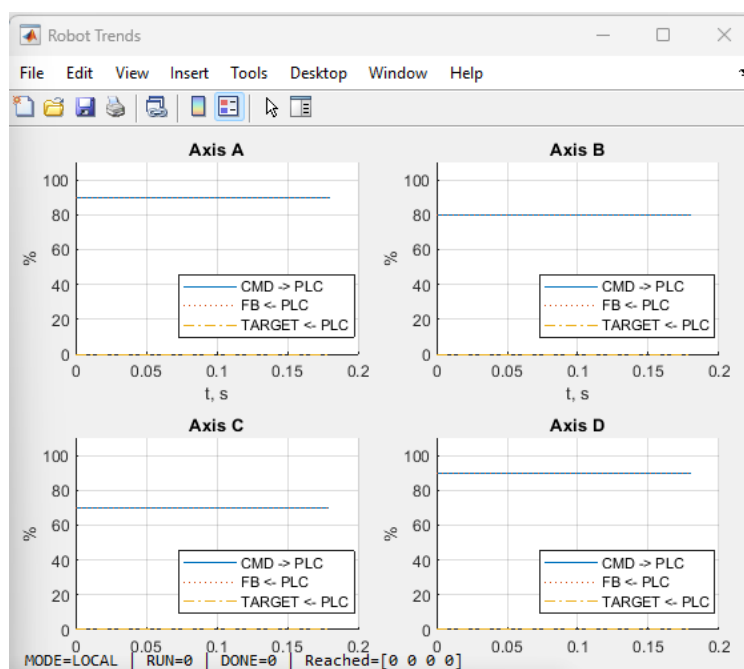


Рисунок 5. Окно текущего состояния осей манипулятора

На данном рисунке видно, 4 тренда для каждой из осей, на каждом из которых предоставляется информация об уставке со стороны манипулятора на ПЛК(CMD - PLC), Обратная связь от привода к ПЛК(FB - PLC), задание от оператора, о координатах будущей цели(PLC - TRT).

В дополнение к этому, в левом нижнем углу присутствует индикация текущего состояния целей и состояний манипулятора:

Mode - может быть в двух состояниях Local и remote.

Run - может быть в состоянии 0 или 1. Данный флаг взводится при работе, когда манипулятор движется, но еще не достиг поставленной цели.

Done - состояние 0 или 1. 0 – манипулятор еще не готов к следующей цели. 1 – манипулятор достиг цели и готов к следующей точке.

Reached - визуализация булевого массива размерности 4. Каждый элемент массива отвечает за достижение цели каждой из оси манипулятора.

При достижении цели всеми осями, взводится флаг Done.

1) Визуализация движения манипулятора с текущими положениями осей в формате 3D(Рисунок 6).

На данном рисунке отображается визуализация движения манипулятора в 3х мерном пространстве. В данном окне имеется легенда, которая расшифровывается следующим образом:

Links - длина плеча между приводами манипулятора. Данная длинна может быть изменена в файле констант.

Joints - привод манипулятора.

Data - получение данных о текущей и заданной точке.

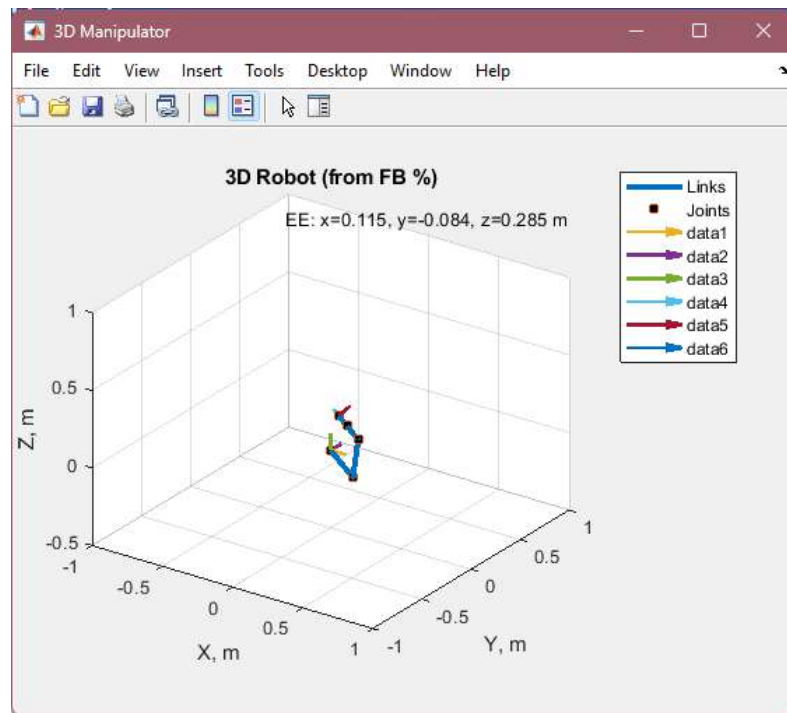


Рисунок 6. Визуализация движения манипулятора с текущими положениями осей в формате 3D

Инициализация пользовательского интерфейса для изменения констант. Ctrl_tune_ui.

Данный файл облегчает работу с константами и убирает необходимость менять константы офлайн. Рисунок 7 с данным файлом предоставлен ниже.

```

1 function ctrl_tune_ui(cfg)
2 % =====
3 % Realtime Tuning UI
4 % - PI параметры по осям A B C D
5 % - Скалярные параметры управления
6 % =====
7
8 fig = uifigure('Name','Realtime Tuning','Position',[120 120 1040 560]);
9
10 %% ===== PANEL 1: PI per-axis =====
11 p1 = uipanel(fig,'Title','PI (per axis)','Position',[10 300 1020 250]);
12
13 g1 = uigridlayout(p1,[4 6]);
14 g1.RowHeight = {30,30,30,30};
15 g1.ColumnWidth = {120,120,120,120,120,'1x'};
16 g1.Padding = [10 10 10 10];
17 g1.RowSpacing = 6;
18 g1.ColumnSpacing= 8;
19
20 % ---- Header ----
21 h = uilabel(g1,'Text','Param','FontWeight','bold'); h.Layout.Row=1; h.Layout.Column=1;
22 h = uilabel(g1,'Text','A','FontWeight','bold'); h.Layout.Row=1; h.Layout.Column=2;
23 h = uilabel(g1,'Text','B','FontWeight','bold'); h.Layout.Row=1; h.Layout.Column=3;
24 h = uilabel(g1,'Text','C','FontWeight','bold'); h.Layout.Row=1; h.Layout.Column=4;
25 h = uilabel(g1,'Text','D','FontWeight','bold'); h.Layout.Row=1; h.Layout.Column=5;
26 h = uilabel(g1,'Text','Описание','FontWeight','bold'); h.Layout.Row=1; h.Layout.Column=6;
27
28 % ---- Kp ----
29 lbl = uilabel(g1,'Text','Kp'); lbl.Layout.Row=2; lbl.Layout.Column=1;

```

Рисунок 7. Инициализация пользовательского интерфейса для изменения констант Ctrl_tune_ui.

При инициализации проекта открывается окно с файла Ctrl_tune_ui, скриншот данного окна предоставлен ниже.

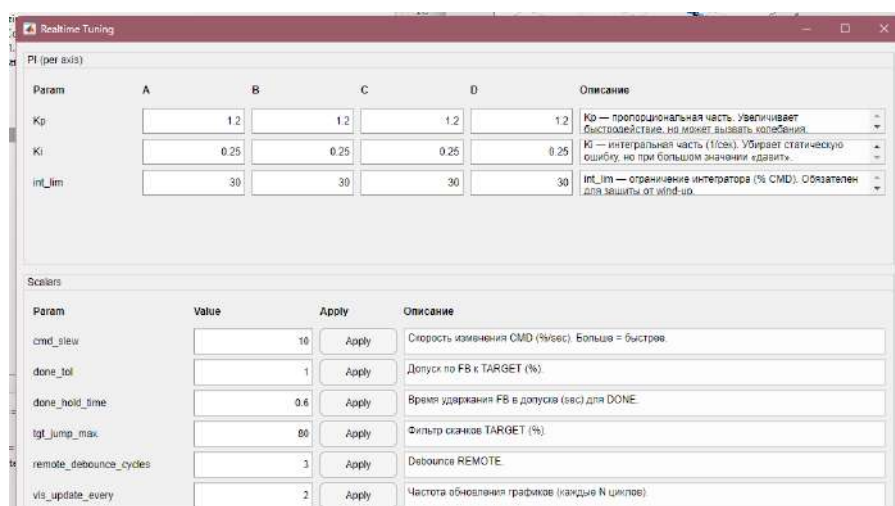


Рисунок 8. Структура функции управления манипулятором с защитными механизмами

На данном рисунке видны параметр для PI регуляторов каждого из звеньев манипулятора (K_p , K_i).

С учетом первоначальных тестов, было принято решение внести дополнительные защиты для манипулятора. Т.к. при слишком долгом реагировании уставку на привод просто “Сдувало”(wind-up) и уставка уходила в невалидные значения, что может повлечь за собой аварийную работу манипулятора.

Также, видно, что в данном окне имеется выделенный сектор под скалярные константы защит от управления преоктом.

Cmd-slew – скорость изменения cmd. Данный параметр введен для плавного изменения уставки на привод. Для того, чтобы пропорциональная (K_p) часть интегратора не передала в какую-либо сторону и не произошло аварийной ситуации, мы ограничиваем изменение уставки в секунду.

Done-tol – Допустимая погрешность при обратной связи. Чем меньше, тем более точным будет движение манипулятора. Но бывают ситуации, когда происходят ограничения со стороны привода или токового сигнала, тогда данный параметр сможет скорректировать поведение манипулятора и не дать упасть в ошибку.

Tgt-jump-max – защита от резких скачков манипулятора.

Vis-update-every – частота обновления визуализации.

ФУНКЦИЯ CTRL_LOOP

Данная функция представляет из себя полный цикл управления манипулятором. Со всеми защитами, логикой и прочим функционалом.

На рисунке №9 предоставлен скриншот с данной функции.


```

1 function log = ctrl_loop(cfg, vis)
2 % =====
3 % ctrl_loop.m - PI + step-by-step CMD + Stall protection + Status/Control/Alarm words
4 %
5 % Registers (Holding):
6 % 1..4 CMD[ A B C D ] (MATLAB -> PLC) uint16 0..100
7 % 5 STATUS WORD (MATLAB -> PLC) bit0=1 always, bit1=RUNNING, bit2=DONE
8 % 6 CONTROL WORD (PLC -> MATLAB) bit0=VALID, bit1=REMOTE_ENABLE, bit2=RESET_ALARMS
9 % 7 ALARM WORD (MATLAB -> PLC) bit0=1 always + alarms
10 % 21..24 TARGET[ A B C D ] (PLC -> MATLAB) uint16 0..100
11 % 101..104 FB[ A B C D ] (PLC -> MATLAB) uint16 0..100
12 %
13 % Key behavior:
14 % - REMOTE is разрешение bit1 CONTROL WORD (reg6)
15 % - PI вычисляет коррекцию, но CMD формируется "шагом от FB"
16 % - Stall: если FB не движется к цели stall_timeout секунд -> заморозка (CMD=FB)
17 % - Alarms latched; reset by CONTROL bit2
18 % =====
19
20 mb = modbus_io('init', cfg);
21
22 % defaults if missing
23 if ~isfield(cfg, 'use_pi'), cfg.use_pi=true; end
24 if ~isfield(cfg, 'Kp'), cfg.Kp=[1.2 1.2 1.2 1.2]; end
25 if ~isfield(cfg, 'Ki'), cfg.Ki=[0.25 0.25 0.25 0.25]; end
26 if ~isfield(cfg, 'int_lim'), cfg.int_lim=[30 30 30 30]; end
27 if ~isfield(cfg, 'cmd_slew'), cfg.cmd_slew=10; end
28 if ~isfield(cfg, 'stall_timeout'), cfg.stall_timeout=5.0; end
29 if ~isfield(cfg, 'progress_eps'), cfg.progress_eps=0.2; end

```

Рисунок 9. Комментарии к возможностям и ограничениям функции управления манипулятором

На рисунке 9 предоставлен комментарий об общих возможностях и ограничениях данной функции.

Для управления и обмена данными с плк используется 3 функция Modbus - Holding registers, область памяти контроллера - 40001[1].

Цикл управления начинается с проверки связи с ПЛК, при наличии обмена данных, выводится сообщение о подключении к контроллеру, продемонстрировано на рисунке 10.

Modbus подключен

Рисунок 10. Результат проверки соединения с ПЛК

Далее, проводится проверка на готовности ПЛК к работе: 0 бит управляющего слова(ctrl word) является ватчдогом(watchdog) достоверности обмена данных, 1 бит управляющего слова(ctrl word) должен быть взведен в 1. Как только данный факт обнаруживается, производится чтение данных из 21-24 регистров ModBus[1]. В данных регистрах находится информация о следующей точке назначения манипулятора.

При валидных показаниях в данных регистрах взводится 1 бит слова состояния(status word), манипулятор начинает производить изменение заданий за звенья манипулятора в соответствии с математикой обратной динамики. Задание записывается в 1-4 регистры ModBus.

При работе манипулятора НЕ предусмотрены заклинивания и статоры при работе, для этого существует защита "Stall". При отсутствии изменения обратной связи длительнее чем stall_timeout, движение манипулятора по данной оси прекращается и в консоль управления MatLab выводится сообщение о данной ошибке(демонстрировано на рисунке 11).

Также, при возникновении аварии взводится соответствующий карте регистров(вложение №) бит аварийного слова (alarm word).

Для сброса данной аварии необходимо взвести 2 бит управляющего слова в ПЛК. Продемонстрировано на рисунке 12.

ALARM: Integrator saturation

Рисунок 11. Срабатывание защиты «Stall» при отсутствии обратной связи

ALARM RESET from PLC (CONTROL bit2)

Рисунок 12. Сброс аварии путем установки второго бита управляющего слова в ПЛК

После сброса аварии манипулятор продолжит выходить на заданные позиции, при достижении заданной цели произведется запись в консоль о выходе конкретной оси на позицию рисунок 13

```
Привод А вышел на позицию (FB=90.0, TGT=90.0)
Привод В вышел на позицию (FB=80.0, TGT=80.0)
Привод С вышел на позицию (FB=70.0, TGT=70.0)
Привод D вышел на позицию (FB=90.0, TGT=90.0)
```

Рисунок 13. Вывод сообщения о достижении заданной позиции осью манипулятора

При достижении всеми приводами заданных точек будет выведено сообщение о выходе на позицию всех приводов рисунок 14.

Манипулятор вышел на позицию

Рисунок 14. Сообщение о выходе на позицию всех приводов.

В дальнейшем цикл будет повторяться.

ФАЙЛ CTRL_HELPERS

Данный файл содержит в себе большую часть вспомогательных функций, таких как:

- 1) Приведение к uint16.
 - 2) Изменение диапазонов переменных.
 - 3) Создание структуры слова состояния и слова управления.
 - 4) Создание структуры для чтения данных с регистров modbus.
- Ниже, на рисунке 15, приведен скриншот с данного файла.

```

1 function varargout = ctrl_helpers(action, varargin)
2 % ctrl_helpers: единый "хаб" вспомогательных функций
3 % Вызов: [out1,out2] = ctrl_helpers('имя', ...)
4
5 switch lower(action)
6
7     case 'clamp_0_100'
8         x = varargin{1};
9         varargout{1} = min(max(double(x),0),100);
10
11     case 'u16'
12         % безопасное приведение в uint16 (целое)
13         x = varargin{1};
14         x = round(double(x));
15         x = min(max(x,0),65535);
16         varargout{1} = uint16(x);
17
18     case 'status_make'
19         % status_out = make_status(remote_bit, running, done)
20         remote_bit = logical(varargin{1});
21         running    = logical(varargin{2});

```

Рисунок 15. Инициализация вспомогательных функций.

На данном рисунке видно, как инициализируются вспомогательные функции[3].

ФОРМИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ СООБЩЕНИЙ. ALARM_MGR.

Данный файл необходим для формирования и передачи данных в аварийное слово modbus. Было принято решение аварии вынести в отдельный файл, т.к. это функционально отличающийся элемент программы. На рисунке 16 предоставлен скриншот с данного файла.

```

1 function varargout = alarm_mgr(action, varargin)
2 % =====
3 % alarm_mgr.m - обработка аварий (настройка и декодирование)
4 %
5 % alarm_bits: logical [1x16]
6 % bit numbering in MATIAB bitset/bitget: 1..16 (bit0 -> index 1)
7 %
8 % Kстро ALARM WORD (reg 7)
9 % bit0 ALARM_VALID (always 1)
10 % bit1 Drive A fault
11 % bit2 Drive B fault
12 % bit3 Drive C fault
13 % bit4 Drive D fault
14 % bit5 Stall / no motion
15 % bit6 CWD limit reached
16 % bit7 Feedback lost
17 % bit8 Target invalid
18 % bit9 Modbus error
19 % bit10 Remote lost during motion
20 % bit11 CWD overridden
21 % bit12 Integrator saturation
22 % bit13 Target timeout
23 % bit14 Logical E-STOP
24 % bit15 Reserved
25 % =====
26
27 switch lower(action)
28
29     case 'init'
30         bits = false(1,16);
31         bits(1) = true; % ALARM_VALID
32         varargout{1} = bits;
33
34     case 'set'
35         % bits = alarm_mgr('set', bits, bitIndexToSet, true/false)
36         bits = varargin{1};
37         idx = varargin{2};
38         val = logical(varargin{3});
39         bits(idx) = val;
40         varargout{1} = bits;

```

Рисунок 16. Скриншот файла обработки аварий для Modbus.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ

На рисунке 17 предоставлены результаты обмена данными между математической моделью и ПО Modbus Slave, имитирующее Modbus сервер.

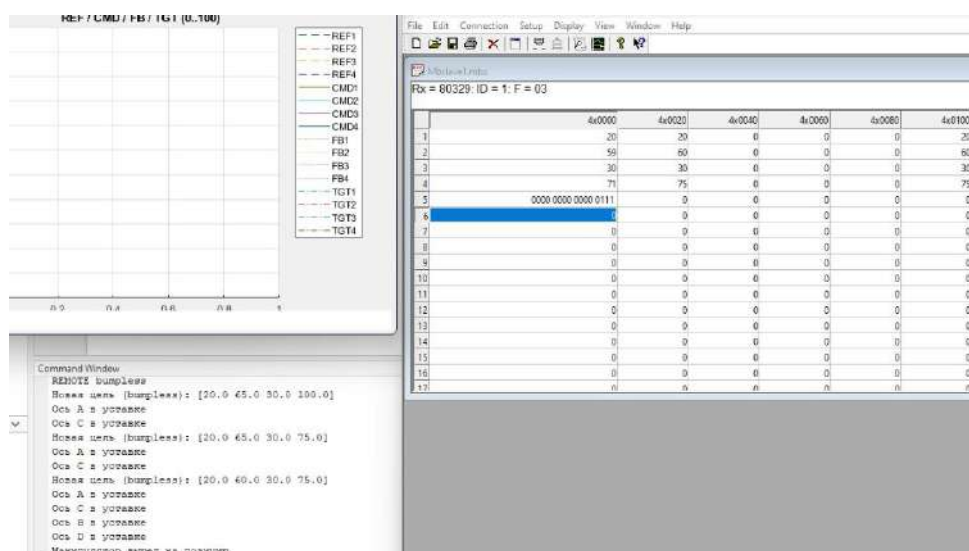


Рисунок 17. Результаты обмена данными между математической моделью и Modbus Slave.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге, мы получили математическую модель, которая способна управлять роботом манипулятором на основе обратной-математической модели по средством протокола Modbus TCP/IP, при отказах формируются аварийные сообщения и останавливается работа манипулятора, что является залогом не только безопасной работы но и быстрому решению проблем производства.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность научным руководителям.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Все содержательные решения — формулировка исследовательских вопросов, разработка классификации подходов, сравнительный анализ платформ, интерпретация результатов и формулировка выводов — выполнены авторами самостоятельно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Modbus Application Protocol Specification V1.1b3. — Modbus Organization, 2012. — 50 p.

URL: https://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf

ГОСТ Р МЭК 61158-3-15–2014. Промышленные коммуникационные сети. Спецификации полевых шин. — М.: Стандартинформ, 2014.

Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. — СПб.: КОРОНА-Век, 2008. — 368 с.

IEC 61784-1:2019. Industrial communication networks — Profiles. — Geneva: IEC, 2019.

Frenzel L. E. Industrial Networks and IIoT: Protocols and Standards. — McGraw-Hill Education, 2021. — 320 p.

MathWorks. MATLAB/Simulink User's Guide R2024a. — Natick: The MathWorks Inc., 2024.

URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ PM_{2.5} С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ГОРОДЕ УСТЬ-КАМЕНОГОРСК

УДК 004.8:504.064

Е.М. Колесников^{1*}, А.С. Гусева¹, Д.А. Ахмадиев¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Колесников Евгений Максимович, e-mail: evgeniy.kolesnikov.03@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье исследуется пространственно-временное распределение загрязнения атмосферного воздуха мелкодисперсными частицами PM_{2.5} в городской среде на примере города Усть-Каменогорск. Показано влияние метеорологических факторов и динамики ветра на формирование и перенос загрязняющих веществ, что позволяет выявить неоднородность распределения загрязнения по территории города.

В качестве эмпирической базы использованы данные городских станций мониторинга качества воздуха, а также метеорологические параметры, включающие температуру, влажность, давление, осадки и характеристики ветра. Анализ и обработка данных осуществлялись с применением методов машинного обучения, в частности нейронных сетей, позволяющих учитывать временные зависимости и нелинейные взаимосвязи между параметрами.

Дополнительно проведено построение пространственной модели распределения загрязнения, позволяющей визуализировать зоны повышенного экологического риска и оценить влияние ветрового переноса на формирование загрязнённых областей.

Ключевые слова: PM_{2.5}, загрязнение воздуха, машинное обучение, нейронные сети, прогнозирование, метеорологические данные, пространственный анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение атмосферного воздуха является одной из наиболее острых экологических проблем современного общества. Особую опасность представляют мелкодисперсные частицы PM_{2.5}, которые способны проникать глубоко в дыхательные пути человека и оказывать серьёзное влияние на здоровье населения, вызывая заболевания сердечно-сосудистой и дыхательной систем. В городских условиях концентрация PM_{2.5} может значительно варьироваться в зависимости от интенсивности промышленных выбросов, транспортной нагрузки, отопительного сезона и погодных условий.

Город Усть-Каменогорск относится к промышленным центрам, где источниками загрязнения воздуха являются металлургические предприятия, транспорт и бытовое отопление. Из-за пространственной неоднородности источников загрязнения и влияния метеорологических факторов наблюдение за уровнем PM_{2.5} с помощью ограниченного числа стационарных станций мониторинга не позволяет полноценно оценить состояние воздуха во всех районах города.

Для решения этой проблемы применяются современные методы анализа данных и прогнозирования, включая методы машинного обучения. В частности, нейронные сети способны выявлять сложные нелинейные зависимости между концентрацией загрязняющих веществ и набором метеорологических факторов, что позволяет восстанавливать пространственное распределение PM_{2.5} и

прогнозировать уровень загрязнения на основе имеющихся данных.

Целью данной работы является построение модели прогнозирования пространственного распределения концентрации PM_{2.5} в городе Усть-Каменогорск с использованием нейронной сети на основе данных станций мониторинга и метеорологических факторов. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

1. Сбор и обработка данных о концентрации PM_{2.5} и метеорологических параметрах за двухлетний период.
2. Анализ влияния метеофакторов на пространственное распределение загрязнения.
3. Построение модели нейронной сети для прогнозирования уровня загрязнения.
4. Оценка точности и эффективности модели.
5. Визуализация пространственного распределения загрязнения воздуха в виде карт.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе реализации исследования, направленного на прогнозирование и пространственный анализ загрязнения атмосферного воздуха, была сформирована база данных, включающая измерения концентрации PM_{2.5}, а также дополнительные параметры, полученные с датчиков мониторинга и метеостанций. В частности, в анализ были включены координаты станций, температура воздуха, влажность, атмосферное давление, осадки, а также характеристики ветра (скорость и направление), что позволило учитывать комплексное влияние окружающей среды на формирование загрязнения.

Анализ временных рядов показателей загрязнения является ключевым элементом исследования. Для учета динамики процесса были сформированы дополнительные признаки, отражающие временные закономерности, включая сезонные и годовые циклы. Кроме того, особое внимание уделено инерционности загрязнения: в модель были включены лаговые значения PM_{2.5} и сглаженные показатели, позволяющие учитывать влияние предыдущих состояний атмосферы на текущий уровень загрязнения.

Для более точного учета процессов переноса загрязняющих веществ параметры ветра были преобразованы в векторную форму, что позволило учитывать направление и интенсивность распространения загрязнения в пространстве. Такой подход обеспечивает более реалистичное моделирование поведения загрязняющих частиц в городской среде.

Предобработка данных включала очистку от выбросов и пропусков, а также нормализацию признаков, что обеспечило корректную работу модели и сопоставимость различных параметров. Разделение данных на обучающую и тестовую выборки проводилось с учетом временной последовательности наблюдений, что позволило избежать утечки информации и адекватно оценить качество прогноза.

В качестве основного инструмента моделирования использована многослойная нейронная сеть, способная выявлять сложные нелинейные зависимости между параметрами окружающей среды и концентрацией PM_{2.5}. Модель обучалась на совокупности признаков, включающих как текущие метеорологические параметры, так и исторические значения загрязнения, что позволило учитывать как внешние воздействия, так и внутреннюю динамику процесса.

Для пространственной интерпретации результатов была построена регулярная сетка, покрывающая исследуемую территорию. Для каждой точки сетки задавались

характерные значения метеорологических параметров, после чего модель использовалась для прогнозирования концентрации PM2.5. Это позволило перейти от дискретных измерений на станциях к непрерывному полю распределения загрязнения.

Также учитывалось влияние ветра на перенос загрязняющих веществ. На основе рассчитанных параметров формировались зоны распространения загрязнений что позволило наглядно отразить влияние метеорологических условий на формирование и выявление потенциальных зон риска.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенного исследования были проанализированы данные мониторинга качества атмосферного воздуха и сопутствующие метеорологические параметры, собранные с городских станций наблюдения. В отличие от традиционного подхода, основанного на анализе отдельных измерений с фиксированных станций, в данной работе используется модель, учитывающая совокупность факторов, включая температуру, влажность, атмосферное давление, осадки и характеристики ветра, что позволяет рассматривать загрязнение как результат комплексного взаимодействия природных и антропогенных процессов.

Полученные результаты подтвердили, что уровень загрязнения обладает выраженной инерционностью: текущие значения концентрации PM2.5 зависят от предыдущих состояний атмосферы. Это подтверждается использованием лаговых признаков и сглаженных значений, отражающих краткосрочную динамику изменения загрязнения.

В процессе моделирования использована нейронная сеть, позволяющая прогнозировать значения PM2.5 на основе совокупности входных параметров. Качество модели оценивалось с использованием метрик $RMSE = 17.79$, $MAE = 8.75$ и коэффициента детерминации $R^2 = 0.62$, а также путем сравнения фактических и прогнозируемых значений.

Полученные значения показали, что модель обладает достаточной точностью прогнозирования и способна адекватно описывать зависимость концентрации PM2.5 от метеорологических факторов.

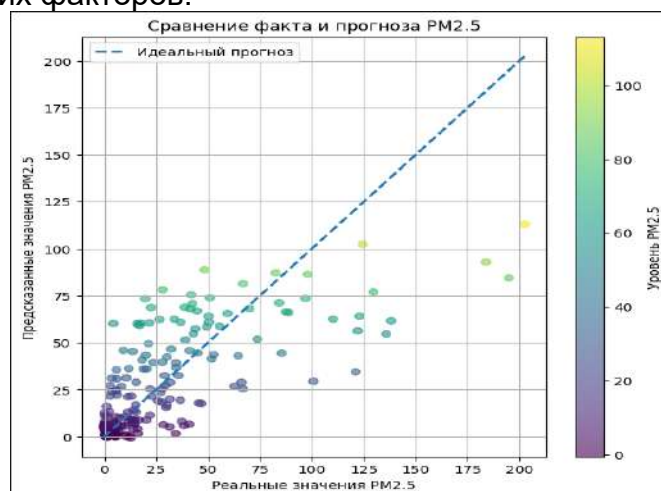


Рисунок 1. Сравнение фактических и прогнозируемых значений PM2.5

Как видно из рисунка 1, наблюдается высокая степень соответствия между реальными и предсказанными значениями, что свидетельствует о способности модели выявлять основные закономерности в данных.

Особое значение в формировании пространственного распределения загрязнения имеет ветер. Результаты показали, что учет ветра существенно влияет

на формирование зон загрязнения. Полученные результаты показывают, что зоны повышенного загрязнения формируются не только вблизи источников выбросов, но и вдоль направлений воздушных потоков.

В результате моделирования было получено непрерывное распределение загрязнения по территории города. Для каждой точки сетки модель прогнозировала значение $PM_{2.5}$, что позволило получить непрерывное распределение загрязнения.

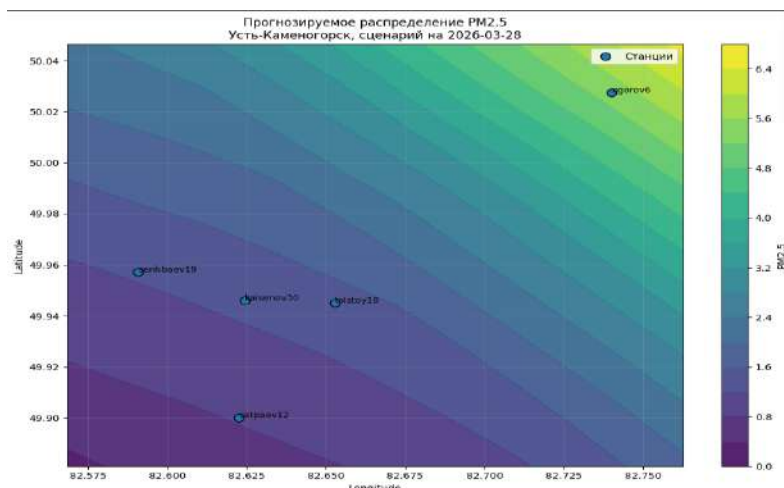


Рисунок 2. Пространственное распределение концентрации $PM_{2.5}$

Анализ рисунка 2 показывает наличие зон повышенного загрязнения и выраженных градиентов концентрации, что свидетельствует о неоднородности экологической обстановки в городской среде.

Дополнительно была реализована визуализация процессов переноса загрязнения с учетом направления ветра. Это позволило отразить динамику распространения загрязняющих веществ и выявить потенциальные зоны воздействия.

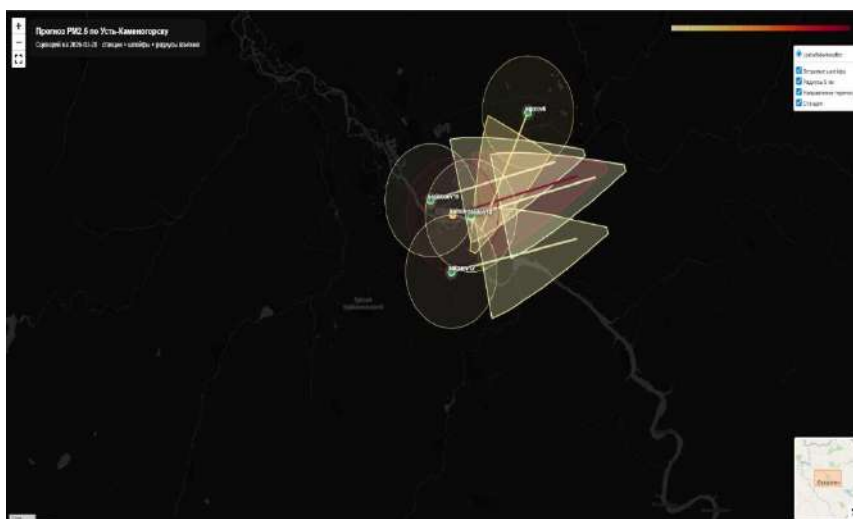


Рисунок 3. Моделирование переноса загрязнения под действием ветра

Как видно из рисунка 3, направление ветра оказывает существенное влияние на распространение загрязняющих веществ, формируя характерные вытянутые области загрязнения (шлейфы).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что уровень загрязнения атмосферного воздуха определяется совокупным влиянием метеорологических факторов и накопительного эффекта предыдущих состояний атмосферы. Использование данных с датчиков, включающих не только концентрацию PM_{2.5}, но и дополнительные параметры окружающей среды, позволило построить модель, способную адекватно прогнозировать уровень загрязнения.

Результаты моделирования подтверждают возможность перехода от точечных измерений к пространственной оценке экологической обстановки и выявлению зон повышенного риска. Визуализация распределения загрязнения и

его переноса под действием ветра позволяет интерпретировать процессы формирования загрязнённых областей.

Перспективы развития работы связаны с совершенствованием моделей искусственного интеллекта, включая использование более сложных архитектур нейронных сетей и учёт пространственно-временных зависимостей. Дополнительно возможна интеграция системы в реальном времени с потоковыми данными датчиков, а также разработка программных решений для автоматического обновления прогнозов и визуализации. В дальнейшем такие системы могут быть использованы как основа для интеллектуальных платформ мониторинга и поддержки принятия решений в области экологической безопасности.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность научным руководителям и преподавателям за консультации и методическую поддержку при выполнении исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке текста статьи использовались инструменты генеративного искусственного интеллекта для редактирования структуры, стилистической обработки текста и улучшения формулировок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Air Quality Index – Усть-Каменогорск: карта качества воздуха в режиме реального времени. – URL: <https://aqicn.org/map/ust-kamenogorsk/ru/> (дата обращения: 28.03.2026).
2. Chollet F. Deep Learning with Python, Third Edition . – Manning Publications, 2017.
3. Mukin D., Abdoldina F.N., Amreyeva A.M., Makambetova R.S. Study of the effectiveness of using machine learning methods to predict the quality of atmospheric air in cities // Computing & Engineering. – 2024. – Vol. 2, Issue 1. – P. 19–24. – DOI: 10.51301/ce.2024.i1.04.
4. Downey A.B. Think Python: How to Think Like a Computer Scientist, 2nd Edition. – O'Reilly Media, 2015.
5. Python Software Foundation. Python documentation. – URL: <https://docs.python.org/> (дата обращения: 17.03.2026).
6. MathWorks. MATLAB documentation. – URL: <https://www.mathworks.com/help/> (дата обращения: 10.03.2026).
7. ChatGPT. (2026, April 2). Редактирование и структурирование научной статьи по теме моделирования пространственного распределения PM_{2.5} с использованием нейронных сетей и метеорологических факторов [Большая языковая модель]. OpenAI. <https://chat.openai.com>

DIFFERENTIAL FLATNESS BASED CONTROL METHODS FOR MOBILE ROBOTS: A BRIEF REVIEW OF THEORETICAL APPROACHES AND IMPLEMENTATIONS

УДК 681.51

A.M. Malgazhdarova^{1*}, A.L. Krasavin¹, D.L. Alontseva¹

¹ D. Serikbayev EKTU, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

*Malgazhdarova Akmarzhan Maratkyzy, e-mail: malgazhdarova.a@edu.ektu.kz

Annotation. In the context of the Fourth Industrial Revolution, mobile robotic systems are becoming a key element of automation in industry, agriculture, transportation, medicine, and research missions. One of the promising theoretical approaches to managing complex nonlinear robotic objects is the theory of differential flatness. This review analyzes modern methods of a wheeled mobile robot control with an emphasis on the use of flat systems for trajectory generating and tracking, ensuring robustness to disturbances, model uncertainties and wheel slippage. Hybrid approaches combining differential flatness with sliding mode control, fuzzy logic, neural networks, and optimization algorithms are considered. It is shown that the methods of flat systems can significantly simplify the synthesis of control, increase the stability of systems and ensure dynamically feasible trajectory planning for both individual and cooperative robotic complexes. The prospects of using the differential flatness-based control methods to solve practical problems of controlling wheeled mobile robots are shown and the choice of the current direction of scientific research and experimental methods is justified.

Key words: wheeled mobile robots (WMR), differential flatness, trajectory tracking, robust control.

INTRODUCTION

The development of technologies of the Fourth Industrial Revolution is stimulating the widespread introduction of autonomous mobile robots in various industries. Of particular interest are cooperative multi-robot systems [1], which, compared with single robots, provide higher task efficiency, increased flexibility, fault tolerance, and maneuverability. Similar systems are used in mine clearance tasks, in search and rescue operations, in surveillance systems, in medical applications, as well as in space missions where the Perseverance and Ingenuity mobile platforms interact [2]. In agriculture, cooperative wheeled mobile robots (CWMR) are used to automate the processes of sowing, pollination and monitoring of crops [3]. A key factor in the successful operation of such systems is the development of robust, scalable, and energy-efficient control architectures [4,5]. In this context, the attention of researchers is attracted by the theory of differential flatness, which makes it possible to simplify the control of nonlinear dynamical systems and ensure the formation of dynamically implemented trajectories [6].

Wheeled mobile robots with skid-steering are currently one of the most widely used types of mobile robots in practice (agriculture, transportation, loading) because they are robust and have high load capacity and maneuverability. On the other hand, designing a control system for this type of robot presents specific difficulties and is of great theoretical interest.

The challenge of controlling wheeled mobile robots has become a central topic in global scientific research over recent years, reflecting its substantial theoretical and practical significance. This paper aims to deliver a concise overview of contemporary approaches to WMR control, with a particular emphasis on differential flatness methods. The objective is

to evaluate their strengths and weaknesses, and to explore innovative applications of these techniques for solving practical WMR control problems.

MATERIALS AND METHODS

To prepare this review, a comprehensive search of scientific literature was conducted on the world's major databases (Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ScienceDirect), covering the period from 2000 to 2025. The inclusion criterion required research to provide detailed mathematical formulations of the proposed methods along with the relevant verification results. The method of structural and logical decomposition was used to classify approaches based on the model architecture, stability mechanisms, and computational complexity. Special attention was paid to the concept of differential flatness, which contributes to the effective solution of the problems of dynamic inversion and trajectory planning in combination with forecasting and adaptive management strategies.

Future work will include practical implementation of the ideas obtained from a comprehensive literature review and a scientifically based WMR management methodology. This will be achieved through mathematical modeling and computer simulation performed in MATLAB/Simulink, followed by testing on the experimental WMR platform. The simulation environment facilitates the analysis of the kinematic and dynamic behavior of the robot, the verification of differential flatness conditions, and the implementation of trajectory planning schemes using high-degree polynomials or splines. The construction of the experimental WMR was completed in 2025 as part of the AP19679327 project in the “Machine vision, automatic control and inertial navigation of mobile robots” laboratory, which operates under the auspices of the Center of Competence and Technology Transfer in Automation and Mechatronics at D. Serikbayev EKTU (see Fig.1)

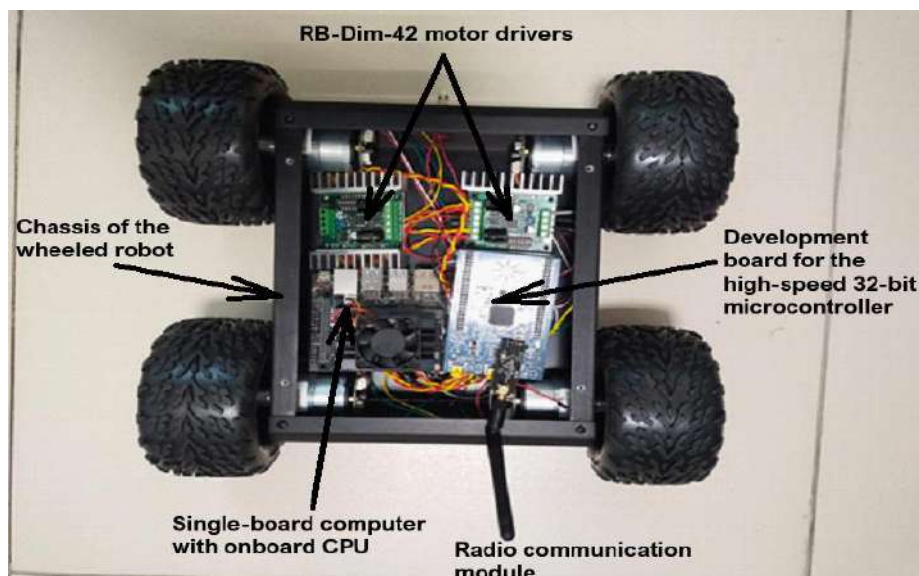


Figure 1. Mobile controlled platform for research of WMR control and navigation algorithms

RESULTS AND DISCUSSION

Traditional control approaches, such as PID regulation [7,8] and feedback linearization methods, generally rely on reduced kinematic representations and presuppose no dynamic perturbations or slippage. As a result, their performance degrades considerably when deployed under real-world operating conditions.

The advancement of nonlinear control methodologies has significantly enhanced trajectory tracking performance. Techniques rooted in fuzzy logic [9,10] possess the capability to accommodate system uncertainties and nonlinear behaviors, yet they require

extensive parameter optimization procedures. Uda [11] devised a fuzzy logic-driven heading tracking scheme for an autonomous multi-wheeled combat vehicle designed for scalability. This system facilitates exact yaw angle regulation by separately controlling the steering of each front wheel. Critical scrutiny, however, shows that the success of fuzzy controllers is largely predicated on the caliber of the embedded expert knowledge and the frequently heuristic nature of the tuning process. The absence of formal stability guarantees and challenges associated with scaling to high-dimensional systems limit the applicability of these methods in highly dynamic tasks.

In robotics, neural networks are widely used for processing sensory data and approximating both kinematic and dynamic robot models. Methods based on neural networks [12, 13] are highly adaptable to unknown conditions; however, they require significant computational costs. Studies [14,15] demonstrate successful compensation of nonlinearities and perturbations using the inherent ability of neural networks to approximate unknown functions. However, most of the proposed solutions require significant computing resources and lengthy training stages, which complicates their implementation in real-time systems with limited hardware platforms. An additional limitation is the limited interpretability of the resulting models and the lack of rigorous analytical evidence for stability, which is especially important for security-sensitive applications.

Sliding mode control (SMC) methodologies occupy a distinctive position in the literature due to their pronounced robustness against external disturbances and parametric uncertainties [16,17]. The theoretical framework of sliding mode control for robotic manipulators was initially introduced in 1978 by Young to address the set-point regulation problem. Within this paradigm, accurate trajectory tracking is achieved through high-frequency switching; however, this rapid switching mechanism can induce system instability and give rise to the undesirable phenomenon of chattering.

The Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is extensively utilized for mobile robot trajectory optimization, generating collision-free paths in both static and dynamic environments. However, as highlighted in [18], intelligent path planning methods often face issues like low accuracy, lack of diversity, and convergence to local optima. These limitations impede the algorithm's effectiveness for global trajectory planning tasks.

Within this context, the theory of differential flatness offers a compelling alternative, enabling a structural simplification of the control design process. The foundational principles of this framework, comprehensively elaborated in sources [19, 20], encompass the following key aspects:

1. Variable parameterization: A system is classified as differentially flat when all its state variables and control inputs can be expressed solely as functions of flat output signals and a finite number of their time derivatives. This characteristic is crucial because it eliminates the need for complex integration procedures to determine the behavior of the system.

2. Endogenous nature of the output: These standard outputs are considered "endogenous" variables, which means that they depend solely on the internal state of the system and control commands, without taking into account external elements such as the state of the observer.

3. Dimensionality and controllability: The number of independent variables making up a single output vector must exactly match the number of control inputs. In addition, differential flatness is inextricably linked to controllability, ensuring that any generated trajectory is physically feasible and achievable by the system.

4. Application to trajectory planning: Given that all system variables are directly related to the final outputs, the initial stage of the control system design process involves constructing the desired trajectory specifically for these outputs. This trajectory implicitly includes a dynamic model of the system, providing accurate tracking.

In their 2024 study, Abadi et al. [19] introduced an enhanced and robust tracking framework that integrates differential flatness with SMC and Active Disturbance Rejection Control (ADRC). The focus of this work is on addressing the practical limitations of traditional robust methods, particularly the chatter phenomenon caused by the high-frequency switching inherent in standard SMC. Experimental validation conducted on TurtleBot3 platforms demonstrates that this planarity-based approach requires minimal control effort while providing superior tracking accuracy compared to more computationally expensive methods such as backstepping, making it particularly suitable for autonomous applications with limited energy budgets.

Unlike most intelligent control methods, differential flatness is based on a rigorous mathematical model and operates without the need for training procedures. However, a critical analysis of the studies [19,20] also reveals certain limitations: many studies use simplified dynamic models that ignore complex contact interactions, wheel slip, and surface deformations. Furthermore, challenges related to robustness against both modeled and unmodeled disturbances are frequently addressed by integrating flatness with complementary control strategies, underscoring the necessity for hybrid architectural approaches.

Recently, Kazakhstani researchers have also contributed to this active field of study [21-25]. For instance, the work in [21] explores the application of inverse modeling techniques to the control problem of a four-wheeled mobile robot, demonstrating that disturbance and plant dynamics compensation methods can substantially enhance WMR control accuracy. Furthermore, these approaches represent a specific instantiation of general differential flatness methodologies applied to complex nonlinear systems. Papers [22-24] showcase the successful deployment of differential flatness for two-wheeled mobile robot control, including control law synthesis with simulation in MATLAB/Simulink [22] and the effective use of an original simulation environment for testing WMR control algorithms [23, 24]. A comprehensive theoretical foundation for this novel approach to WMR control utilizing differential flatness concepts can be found in the monograph [25]. Particularly promising is the subsequent assembly and field testing of the WMR controller using an experimental prototype that allows flexible configuration and optimal structural selection for implementing new developments. Consequently, the research outcomes, beyond their undeniable theoretical novelty and interest, hold significant potential for practical applications in robotics and, by extension, across all domains involving WMR deployment: agriculture, industrial manufacturing, and public services (logistics, loading, delivery, etc.).

CONCLUSION

Overall, a literature review reveals that existing WMR control methods either achieve robustness at the expense of high computational complexity or lack a rigorous theoretical foundation, relying on overly simplified models. This gap identifies a promising research niche for developing hybrid approaches that synergistically combine the advantages of differential flatness theory with robust and adaptive mechanisms for compensating for real-world environmental uncertainties. Furthermore, current research confirms that differential flatness theory is one of the most effective tools for mobile robot control. It simplifies the representation of nonlinear dynamics, facilitates trajectory planning, and seamlessly integrates with robust and intelligent control paradigms.

Promising avenues for future research include considering contact dynamics and slip effects, reducing the computational load of hybrid algorithms, and implementing flatness-based control systems in real-time scenarios for wheeled robots.

The next stage of this study will focus on the synthesis of a control controller for wheeled mobile robots based on differential planarity methods, which have been selected as one of the most promising approaches to solving control problems of such robots.

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest.

NOTICE ON THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES: The authors did not use artificial intelligence (AI) tools when writing and editing the text.

REFERENCES

- Verma, J. K. Multi-robot coordination analysis, taxonomy, challenges, and future scope / J. K. Verma, V. Ranga // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. – 2021. – Vol. 102, № 1. – P. 1-36. – <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01378-2>
- Mars 2020: Perseverance Rover [Electronic resource] / NASA Science. – 2017. – Electronic text data. – Mode of access: <https://mars.nasa.gov/mars2020/>
- RoboBees: Autonomous Flying Microrobots [Electronic resource] / Wyss Institute, Harvard University. – 2016. – Electronic text data. – Mode of access: <https://wyss.harvard.edu/technology/robobees-autonomous-flying>
- Líšková, D. A CPS-Based Architecture for Mobile Robotics: Design, Integration, and Localisation Experiments / D. Líšková, A. Jadlovská, F. Pazdič // *Sensors*. – 2025. – Vol. 25, № 18. – Article ID 5715. – <https://doi.org/10.3390/s25185715>
- Prados, C. A Review and Evaluation of Control Architectures for Modular Legged and Climbing Robots / C. Prados, M. Hernando, E. Gambao, A. Brunete // *Biomimetics*. – 2024. – Vol. 9, № 6. – Article ID 319. – <https://doi.org/10.3390/biomimetics9060319>
- Khesrani, S. Motion planning and control of nonholonomic mobile robot using flatness and fuzzy logic concepts / S. Khesrani, A. Hassam, O. Boutalbi, M. Boubezoula // *International Journal of Dynamics and Control*. – 2021. – Vol. 9, № 4. – P. 1660-1671. – <https://doi.org/10.1007/s40435-020-00754-4>
- Cañadas-Aránega F., Moreno J. C., Blanco-Claraco J. L. A PID-based control architecture for mobile robot path planning in greenhouses // *IFAC PapersOnLine*. — 2024. — Vol. 58, № 7. — P. 502–507. — <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.08.112>
- Munaf, A. Integration of Q-Learning and PID Controller for Mobile Robots Trajectory Tracking in Unknown Environments / A. Munaf, A.R.J. Almusawi // *Journal Européen des Systèmes Automatisés*. – 2024. – Vol. 57, №4. – P. 1023-1033. – <https://doi.org/10.18280/jesa.570410>
- Mishra D. K., Thomas A., Kuruvilla J., Kalyanasundaram P., Ramalingeswara Prasad K., Haldorai A. Design of mobile robot navigation controller using neuro-fuzzy logic system // *Computers and Electrical Engineering*. — 2022. — Vol. 101. — Art. 108044. — <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108044>
- Mohd Shukri M. S., Abdul Rahim N., Ilias B. Development of an Intelligent Sumo Robot based on Embedded Fuzzy Logic // *International Journal of Autonomous Robotics and Intelligent Systems*. — 2025. — Vol. 1, №1. — P. 93–105. — <https://doi.org/10.58915/ijaris.v1i1.2345>
- Ouda A. N., Mohamed A. Autonomous Fuzzy Heading Control for a Multi-Wheeled Combat Vehicle // *International Journal of Robotics and Control Systems*. — 2021. — Vol. 1, № 1. — P. 90–101. — <https://doi.org/10.31763/ijrcs.v1i1.286>
- Yu, J. The Path Planning of Mobile Robot by Neural Networks and Hierarchical Reinforcement Learning / J. Yu, Y. Su, Y. Liao // *Frontiers in Neurorobotics*. – 2020. – Vol. 14. – Article ID 63. – <https://doi.org/10.3389/fnbot.2020.00063>
- El-Nagar A. M., Zaki A. M., Soliman F. A. S., El-Bardini M. An embedded deep learning neural network control for a wheeled mobile robot // *Robotics and Autonomous Systems*. — 2025. — Vol. 194. — Art. 105154. — <https://doi.org/10.1016/j.robot.2025.105154>
- Shi, Q. Fixed-Time Recurrent NN Learning Control of Uncertain Robotic Manipulators with Time-Varying Constraints: Experimental Verification / Q. Shi, C. Li, R. He, X. Zhu, X.

- Duan // Sensors. – 2023. – Vol. 23, № 12. – Article ID 5614. – <https://doi.org/10.3390/s23125614>
- Chen Z. Neural network compensator-based robust iterative learning control scheme for mobile robots nonlinear systems with disturbances and uncertain parameters / Z. Chen, Y. Hou, R. Huang, Q. Cheng // Applied Mathematics and Computation. – 2024. – Vol. 469. – Art. 128549. – <https://doi.org/10.1016/j.amc.2024.128549>
- Nath K. Nonlinear sliding mode control of a two-wheeled mobile robot system / K. Nath, A. Yesmin, A. Nanda, M. K. Bera // International Journal of Modelling, Identification and Control. – 2021. – Vol. 27, № 2. – P. 75-83. – DOI 10.1504/IJMID.2021.10030667.
- Sun Z. Trajectory-tracking control of mecanum-wheeled omnidirectional mobile robots using adaptive integral terminal sliding mode / Z. Sun, S. Hu, D. He, W. Zhu, H. Xie, J. Zheng // Computers & Electrical Engineering. – 2021. – Vol. 96. – Art. 107500. – DOI 10.1016/j.compeleceng.2021.107500.
- Zheng, L. Particle Swarm Algorithm Path-Planning Method for Mobile Robots Based on Artificial Potential Fields / L. Zheng, W. Yu, G. Li, G. Qin, Y. Luo // Sensors. – 2023. – Vol. 23, №13. – Article ID 6082. – <https://doi.org/10.3390/s23136082>
- Abadi A., El Amraoui A., Mekki H., Ramdani N. Flatness-Based Active Disturbance Rejection Control for a Wheeled Mobile Robot Subject to Slips and External Environmental Disturbances // IFAC-PapersOnLine. – 2020. – Vol. 53, №2. – P. 9571–9576. – <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2443>
- Abadi A. Robust Tracking Control of Wheeled Mobile Robot Based on Differential Flatness and Sliding Active Disturbance Rejection Control: Simulations and Experiments / A. Abadi, A. Ayeb, M. Labbadi, D. Fofi, T. Bakir, H. Mekki // Sensors. – 2024. – Vol. 24. – Art. 2849. – <https://doi.org/10.3390/s24092849>
- Shadrin, G. Application of Compensation Algorithms to Control the Speed and Course of a Four-Wheeled Mobile Robot / G. Shadrin, A. Krasavin, G. Nazenova, A. Kussaiyn-Murat, A. Kadyroldina, T. Haidegger, D. Alontseva // Sensors. – 2024. – Vol. 24, № 22. – Article ID 7233. – <https://doi.org/10.3390/s24227233>
- Krasavin, A. Tracking Control of a Two-Wheeled Mobile Robot Based on Endogenous Linearization of the Dynamic Model / A. Krasavin, G. Nazenova, A. Alontseva, A. Dairbekova // 2025 International Conference on Artificial Intelligence, Computer, Data Sciences and Applications (ACDSA), Antalya, Turkiye, 2025. – IEEE, 2025. – P. 1-6. – DOI 10.1109/ACDSA65407.2025.11166132.
- Krasavin, A.L. Trajectory tracking simulation of a wheeled mobile robot / A.L. Krasavin, G.M. Nazenova, D.L. Alontseva, K. Askaduly // Bulletin of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University. – 2025. – № 2. – P. 144-152. – DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_144.
- Krasavin, A. Software Simulation of a Microcontroller-Based Wheeled Mobile Robot / A. Krasavin, D. Alontseva, G. Nazenova // Proceedings of 19th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas (AIS 2024), Székesfehérvár, Hungary, November 14, 2024. – Óbuda University, 2024. – P. 37-41.
- Krasavin, A.L. Applications of Geometric Methods and Machine Learning Methods to Mobile Robot Control Problems / A.L. Krasavin. – Ust-Kamenogorsk: EKTU, 2025. – 104 p. – ISBN 978-601-208-899-1.

ОБЗОР СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА ГЛЮКОЗЫ CGM ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ КЛИНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ДИАБЕТОЛОГИИ

УДК 616.379-008.64-07:615.47

М.А. Молдабаева^{1*}, И.М. Увалиева², Р.У. Мукашева²

¹ Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Казахстан

² Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Молдабаева Мадина Аскарровна, e-mail: madinam20057@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Системы непрерывного мониторинга уровня глюкозы (англ. Continuous Glucose Monitoring, CGM) являются одним из ключевых достижений современной диабетологии, обеспечивающим эффективный контроль гликемии и снижение риска развития осложнений сахарного диабета [1]. Рост распространённости заболевания [2] и развитие цифровых медицинских технологий способствуют активному внедрению CGM-систем в клиническую практику и повседневную жизнь пациентов. Целью данной работы является проведение аналитического обзора современных систем непрерывного мониторинга глюкозы, разработанных в различных странах, с оценкой их технологических особенностей и функциональных возможностей. В исследовании использованы методы сравнительного анализа научных публикаций и технической документации производителей CGM-устройств. Рассмотрены ведущие разработки компаний США, Европы и стран Азии, включая системы Dexcom, Abbott, Medtronic, Roche, Sinocare и других производителей; проведён обзор и сравнение их характеристик. Полученные результаты подтверждают, что технологии CGM играют ключевую роль в персонализированном управлении сахарным диабетом и формируют основу для дальнейшего развития цифровой медицины и медицинских решений. Представленный обзор имеет теоретическую и практическую значимость и может служить основой для последующих исследований.

Ключевые слова: непрерывный мониторинг глюкозы, CGM, сахарный диабет, сенсорные технологии, гликемия, медицинские устройства.

ВВЕДЕНИЕ

Сахарный диабет остается одной из наиболее серьезных современных проблем здравоохранения, характеризующейся растущей распространенностью во всем мире и высоким риском хронических осложнений [2]. Эффективное лечение заболевания требует регулярного и точного мониторинга уровня глюкозы [3], что привело к быстрому переходу от традиционного анализа капиллярной крови к современным гликемическим технологиям. В последние годы системы непрерывного мониторинга уровня глюкозы стали ключевым инструментом в персонализированной диабетологии [4]. В отличие от дискретных измерений, эти системы обеспечивают поток данных с высокой частотой, измеряя концентрацию глюкозы в интерстициальной жидкости и передавая ее на внешние устройства для анализа в режиме реального времени [4].

Актуальность данного обзора обусловлена глобальным ростом заболеваемости и критической необходимостью в методах контроля уровня глюкозы в режиме реального времени, которые учитывают всю динамику колебаний уровня глюкозы. В настоящее время рынок CGM-систем характеризуется доминированием ограниченного числа компаний, сосредоточенных в США, ряде стран Европы и

Восточной Азии. Целью настоящего исследования является обзор и сравнительная оценка ведущих систем непрерывного мониторинга глюкозы, разработанных в США, Европе и странах Азии, с целью выявления их функциональных преимуществ, ограничений и особенностей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

CGM-системы, разрабатываемые в США

Соединённые Штаты Америки являются крупнейшим мировым центром разработки и коммерциализации CGM-технологий. Одним из лидеров рынка является компания Dexcom, выпускающая системы серий G6 и G7, отличающиеся высокой точностью измерений, компактностью сенсора и возможностью интеграции с мобильными приложениями и облачными платформами для удалённого мониторинга [5]. Другим крупным производителем является Abbott Laboratories, разработавшая систему FreeStyle Libre, которая получила широкое распространение благодаря простоте использования и отсутствию необходимости регулярной калибровки с помощью капиллярных измерений [6]. Компания Medtronic предлагает CGM-системы серии Guardian, используемые в составе автоматизированных систем доставки инсулина (AID) и интегрируемые с инсулиновыми помпами [7]. Отдельного внимания заслуживает система Eversense, разработанная компанией Senseonics, представляющая собой имплантируемый сенсор с длительным сроком эксплуатации, что отличает её от традиционных накожных CGM-устройств [8].

Основные технические характеристики Dexcom G7, FreeStyle Libre 3, Medtronic Guardian 4 и Eversense E3 представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительные характеристики CGM-систем (США)

Параметр	Dexcom G7 (Dexcom)	FreeStyle Libre 3 (Abbott)	Medtronic Guardian 4 (Medtronic)	Ever sense E3 (Senseonics)
Точность (MARD)	8.2% (плечо), 9.1% (живот) [9]	7.9% [6]	9.3-10.8% [7]	8.7% [8]
Срок службы сенсора	10 дней + 12 часов (дополнительное время) [9]	14 дней [6]	7 дней [10]	180 дней [8]
Калибровка (уколы пальца)	не требуется (опционально) [5]	не требуется [6]	не требуется [7]	обязательная (1-2 раза в день) [8]
Время прогрева	≈ 27 минут [9]	≈ 60 минут [6]	≈ 2 часа [11]	24 часа [8]
Частота обновления данных	каждые 5 минут [5]	каждую минуту [6]	каждые 5 минут [10]	каждые 5 минут [8]
Размер	24 × 27.3 × 4.6 мм [9]	Высота 2,9 мм, диаметр 21 мм. [12]	3.8 × 6.7 × 5.2 см [13]	длина: 18,3 мм; диаметр: 3,5 мм [8]

Как показано в таблице 1, системы, разработанные в США, демонстрируют высокую точность измерений со значениями MARD, стабильно ниже 11%. В то время как Dexcom G7 и Libre 3 представляют собой самоклеящиеся пластыри [5], [12], накладываемые одним нажатием кнопки, для установки Eversense E3 требуется медицинская процедура по подкожной имплантации датчика [8]. Medtronic Guardian 4 выделяется своей специализированной конструкцией, разработанной в первую очередь для интеграции с автоматизированными системами доставки инсулина [7].

Внешний вид рассматриваемых CGM-систем представлен на рисунке 1.

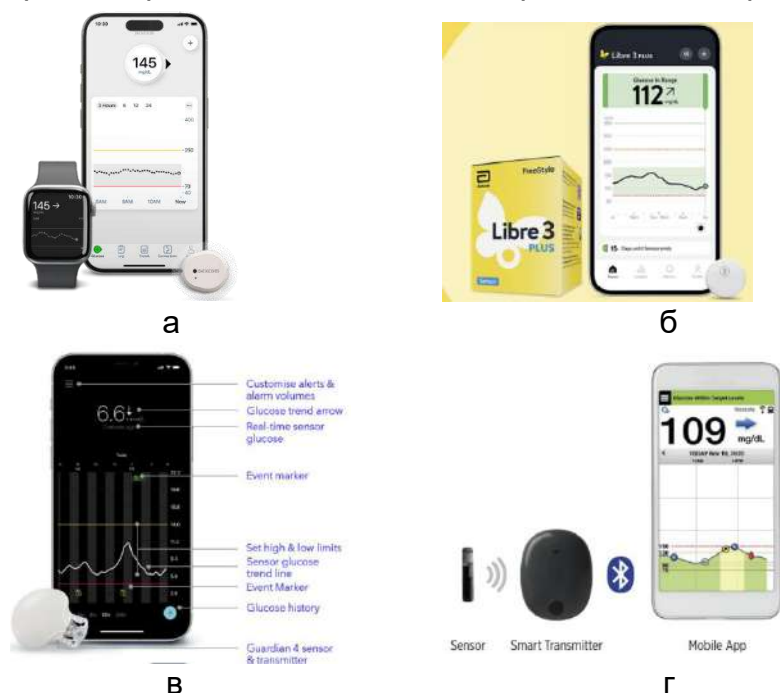


Рисунок 1. CGM-системы: а) Dexcom G7 [14]; б) FreeStyle Libre 3 [15]; в) Guardian 4 [10]; г) Eversense E3 [8]

Рисунок 1 показывает, как датчики стали намного меньше и удобнее для повседневного ношения. Эти компактные конструкции делают устройства практически невидимыми под одеждой.

CGM-системы европейских производителей

Европейские производители представили на мировом рынке систем непрерывного мониторинга глюкозы несколько специализированных технологических решений. Компания Roche Diabetes Care недавно выпустила Accu-Chek SmartGuide, которая использует передовые технологии искусственного интеллекта (ИИ) для прогнозирования уровня глюкозы за 2 часа и выявления риска ночной гипогликемии [16]. Еще одной важной разработкой является GlucoMen Day от Menarini Diagnostics, которая обеспечивает непрерывный мониторинг уровня глюкозы, выдавая 480 автоматических показаний каждые 24 часа, включая стрелки тренда и оповещения, помогающие пользователям отслеживать скорость и изменение уровня глюкозы [17].

Основные технические характеристики Accu-Chek SmartGuide, GlucoMen iCan CGM представлены в таблице 2.

Таблица 2. Сравнительные характеристики Accu-Chek SmartGuide, GlucoMen iCan CGM

Параметр	Accu-Chek SmartGuide (Roche)	GlucoMen iCan CGM (Menarini)
Точность(MARD)	9.2% [18]	8.71% [17]
Срок службы сенсора	14 дней [16]	15 дней[17]
Калибровка(уколы пальца)	Требуется [16]	опциональная
Время прогрева	60 минут [16]	2 часа [17]
Частота обновления данных	каждые 5 минут [16]	каждые 3 минуты [17]
Размер	диаметр 33.3 мм [19]	-

Европейские CGM-системы характеризуются ориентацией на прогнозирование уровня глюкозы и персонализированную терапию. Как и американские устройства, европейские системы также имеют высокую точность и небольшой срок службы в 14-15 дней.

CGM-системы азиатских производителей

Азиатский регион в последние годы становится важным участником глобального рынка систем непрерывного мониторинга глюкозы. В ряде стран ведётся разработка собственных сенсорных решений и цифровых платформ мониторинга. Наиболее активно такие системы развиваются в Китае и Южной Корее.

В Китае компания Sinocare разрабатывает CGM-системы, ориентированные на непрерывный мониторинг глюкозы с использованием мобильных приложений и цифровых сервисов обработки данных. Примером является система i3 CGM, обеспечивающая передачу данных в реальном времени и срок работы сенсора до 15 дней [20].

В Южной Корее компания i-SENS выпускает систему CareSens Air CGM, представляющую собой локально разработанное решение, интегрированное с мобильными платформами управления диабетом [21].

В целом азиатские CGM-системы характеризуются сочетанием технологической функциональности, цифровой интеграции и ориентации на расширение доступности мониторинга глюкозы.

Таблица 3. Обзор CGM-систем азиатских производителей

Параметр	CareSens Air (i-SENS, Южная Корея)	i3 (Sinocare, Китай)
Точность(MARD)	8.7% [21]	8.71% [22]
Срок службы сенсора	15 дней [21]	15 дней [20]
Калибровка(уколы пальца)	требуется [21]	не требуется [20]
Время прогрева	30 минут [21]	2 часа [20]
Частота обновления данных	каждые 5 минут [21]	каждые 3 минуты [20]
Размер	35.2 x 19.2 x 5.0 мм [21]	-

Данные таблицы 3 показывают, что азиатские CGM-системы, такие как i3 (Sinocare) и CareSens Air (i-SENS), обеспечивают относительно длительный срок ношения сенсора до 15 дней, что сопоставимо с современными устройствами США и Европы. При этом наблюдаются различия в инженерных подходах: система i3 не требует калибровки и не предполагает регулярных проколов пальца [20], тогда как CareSens Air предусматривает калибровку пользователем [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведённого исследования были проанализированы современные системы непрерывного мониторинга глюкозы, представленные ведущими производителями из США, Европы и Азии. Рассмотрены их основные технические характеристики, включая срок службы сенсора, точность, необходимость калибровки, время прогрева, частоту обновления данных и размеры датчиков. Установлено, что современные CGM-системы демонстрируют схожие базовые параметры, такие как срок ношения сенсора от 7 до 15 дней и регулярное обновление данных в режиме реального времени. При этом отдельные устройства отличаются по уровню автоматизации, необходимости калибровки и конструктивным особенностям сенсоров.

Таким образом, системы непрерывного мониторинга глюкозы являются эффективным инструментом контроля гликемии и продолжают активно развиваться в направлении повышения удобства использования и расширения функциональных возможностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования были выявлены основные тенденции развития систем непрерывного мониторинга глюкозы. Установлено, что современные устройства обеспечивают эффективный контроль гликемии и обладают схожими техническими характеристиками при наличии региональных особенностей разработки. Показано, что развитие CGM-технологий направлено на повышение точности измерений, снижение необходимости вмешательства пользователя и интеграцию с цифровыми медицинскими системами.

Несмотря на достигнутые результаты, актуальными проблемами остаются инвазивный характер большинства сенсоров, необходимость калибровки в отдельных системах и ограниченный срок службы датчиков. Перспективным направлением является дальнейшее совершенствование технологий, включая увеличение срока службы устройств, повышение точности измерений и разработку неинвазивных методов мониторинга глюкозы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная статья подготовлена в рамках проекта грантового финансирования научных исследований МНВО по теме AP26194209 «Математическое и алгоритмическое обеспечение интеллектуальной системы поддержки принятия клинических решений в гематологии и диабетологии на основе технологии газометрии крови».

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: при подготовке текста статьи использовались инструменты генеративного искусственного интеллекта для структурирования и редактирования материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Elian, V., Popovici, V., Ozon, E. A., Musuc, A. M., Fița, A. C., Rusu, E., ... & Lupuliasa, D. (2023). Current technologies for managing type 1 diabetes mellitus and their impact on quality of life—a narrative review. *Life*, 13(8), 1663. Doi: 10.3390/life13081663
- [2] Mughal, I. S., Patanè, L., & Caponetto, R. (2024). A comprehensive review of models and nonlinear control strategies for blood glucose regulation in artificial pancreas. *Annual Reviews in Control*, 57, 100937. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2024.100937>
- [3] Сайфутдинов, Р. И., Бугрова, О. В., & Нагорнова, К. А. (2025). Современные подходы к мониторингу уровня глюкозы. *Медицинский совет*, 19(13), 141-147. Doi: <https://doi.org/10.21518/ms2025-337>
- [4] Shi, J., Fernández-García, R., & Gil, I. (2025). Sensor technologies for non-invasive blood glucose monitoring. *Sensors*, 25(12), 3591. Doi: <https://doi.org/10.3390/s25123591>
- [5] Dexcom, Inc. Dexcom G7 continuous glucose monitoring system user guide. Дата обращения: 23 марта 2026 г. URL: <https://www.dexcom.com/guides>
- [6] Nguyen A., White J. R. FreeStyle Libre 3 // *Clinical Diabetes*. 2022. Т. 41, № 1. С. 127–128. URL: <https://doi.org/10.2337/cd22-0102>
- [7] Cordero T. L., Dai Z., Arrieta A. и др. Glycemic Outcomes During Early Use of the

MiniMed™ 780G Advanced Hybrid Closed-Loop System with Guardian™ 4 Sensor. *Diabetes technology & therapeutics*, 25(9), 652–658.
<https://doi.org/10.1089/dia.2023.0123>

- [8] Senseonics, Inc. Eversense E3 continuous glucose monitoring system user guide. Дата обращения: 23 марта 2026 г. URL: https://www.eversensediabete.com/wp-content/uploads/LBL-6002-01-001-Rev-B_Eversense-E3-User-Guide_mgdL_R1.pdf
- [9] Garg S. K., Kipnes M., Castorino K. и др. Accuracy and safety of Dexcom G7 continuous glucose monitoring in adults with diabetes // *Diabetes Technology & Therapeutics*. 2022. Т. 24, № 6. С. 373–380. URL: <https://doi.org/10.1089/dia.2022.0011>
- [10] Medtronic Diabetes. MiniMed™ system with Guardian™ 4 sensor. Дата обращения: 23 марта 2026 г. URL: <https://www.medtronic-diabetes.com.au/products/g4system>
- [11] Medtronic Diabetes. (n.d.). Guardian™ 4 sensor support. Дата обращения: 23 марта 2026 г. URL: <https://www.minimed.com/en-us/support/product-support/sensors/guardian-4/>
- [12] Abbott Diabetes Care. FreeStyle Libre 3 continuous glucose monitoring system user's manual. 2022. Дата обращения: 23 марта 2026 г. URL: https://freestyleserver.com/Payloads/IFU/2022/q2/ART46090-003_rev-A.pdf
- [13] Medtronic Diabetes. Guardian 4 Sensor Instructions for use (IFU) [PDF]. Medtronic Diabetes Australia. Дата обращения: 23 марта 2026 г. URL: https://hcp.medtronic-diabetes.com.au/sites/default/files/guardian_4_sensor_ifu.pdf
- [14] Dexcom, Inc. (n.d.). Dexcom continuous glucose monitoring. Дата обращения: 23 марта 2026 г. URL: <https://www.dexcom.com>
- [15] Abbott Diabetes Care. (n.d.). FreeStyle Libre 3 continuous glucose monitoring system. Дата обращения: 23 марта 2026 г. URL: <https://www.freestyle.abbott/us-en/products/freestyle-libre-3.html>
- [16] Roche Diabetes Care. Accu-Chek SmartGuide CGM user guide. Дата обращения: 24 марта 2026 г. URL: <https://www.accu-chek.com.hk/en/support/smartguide-cgm/guides>
- [17] A. Menarini Diagnostics Ltd. (2025). GlucoMen® iCan continuous glucose monitoring system user guide. Дата обращения: 24 марта 2026 г. URL: <https://menarini-diabetes.co.uk/wp-content/uploads/sites/2/2025/10/UM2025-EN.pdf>
- [18] Roche Diabetes Care. (n.d.). How accurate is the Accu-Chek SmartGuide CGM sensor?. Дата обращения: 24 марта 2026 г. URL: <https://www.rochediabetescareme.com/support/faq/how-accurate-accu-chek-smartguide-cgm-sensor>
- [19] Roche Diabetes Care. (n.d.). Accu-Chek SmartGuide CGM. Дата обращения: 24 марта 2026 г. URL: <https://www.accu-chek.com.hk/en/support/smartguide-cgm>
- [20] Sinocare Inc. (n.d.). i3 continuous glucose monitoring system user manual (FCC ID: 2AXH5001). Дата обращения: 26 марта 2026 г. URL: <https://fcc.report/FCC-ID/2AXH5001/5538194.pdf>
- [21] i-SENS, Inc. (n.d.). *CareSens Air User Manual_Enhanced Reliability(PCGAA-000123 REV5)*. Дата обращения: 26 марта 2026 г. URL: https://caresensair.com/en_US/download/#
- [22] Sinocare Inc. (n.d.). i3 continuous glucose monitoring system. Дата обращения: 26 марта 2026 г. URL: https://www.sinocare.com/ru/proinfo_263.html

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИНФЕКЦИОННЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ (НА ПРИМЕРЕ COVID-19)

УДК 519.876:616.98

Н.А. Мұратова^{1*}, А.Қ. Нұрислам¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Мұратова Назылы Асхатқызы, e-mail: naz20112006@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Данная научно-исследовательская работа посвящена математическому моделированию динамики распространения инфекционных заболеваний на примере пандемии COVID-19. В основу исследования положена модифицированная компартментная модель SIR, которая была существенно дополнена авторами для учета скрытых факторов, таких как наличие бессимптомных носителей вируса и специфические коэффициенты смертности в различных возрастных группах. Методологический аппарат работы включает в себя глубокий анализ временных рядов, статистическую обработку массивов данных и численное решение систем нелинейных дифференциальных уравнений.

Результаты моделирования наглядно демонстрируют прямое влияние различных ограничительных мер на кривую заболеваемости и суммарную нагрузку на систему здравоохранения. Научная новизна исследования заключается в адаптации классических эпидемиологических подходов под биологические особенности конкретного штамма вируса. Проведенное моделирование различных сценариев позволило количественно оценить эффективность карантинных мер и рассчитать скорость снижения заболеваемости при разных уровнях социальной изоляции. Полученные данные подтверждают строгую зависимость между интенсивностью социальных контактов и темпами распространения инфекции. Работа предоставляет инструментарий для определения порога коллективного иммунитета и долгосрочного прогнозирования эпидемий, что критически важно для принятия оперативных управленческих решений в сфере общественного здравоохранения и подготовки к будущим вспышкам респираторных заболеваний.

Ключевые слова: математическое моделирование, инфекционные заболевания, COVID-19, SIR, дифференциальные уравнения, прогнозирование, динамика популяции.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема распространения инфекционных заболеваний остаётся актуальной. Пандемия COVID-19 подчеркнула важность математического моделирования для анализа и прогнозирования эпидемий. Такие модели, основанные на дифференциальных уравнениях, позволяют описывать динамику распространения инфекции и оценивать влияние ключевых параметров, включая скорость заражения и выздоровления. Математическое моделирование направлено не только на прогнозирование, но и на понимание механизмов распространения инфекций. Реальные эпидемиологические процессы сложны и зависят от поведения людей, условий среды и характеристик заболевания, поэтому модели дают приближённые оценки и выявляют ключевые закономерности распространения инфекции [1].

Основы моделирования эпидемий были заложены У. Кермаком и А. Маккендриком, предложившими компартментный подход с разделением населения

на группы по состоянию заболевания. При постоянной численности населения предполагается равенство рождаемости и смертности, что обеспечивает устойчивость модели [2].

Научная новизна заключается в адаптации модели с учётом инкубационного периода, бессимптомных носителей и динамических коэффициентов контактов. Практическая значимость состоит в возможности использования результатов для оптимизации управленческих решений в здравоохранении, включая оценку нагрузки на медицинскую систему и эффективность ограничительных мер.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе используется классическая компартментная модель SIR, предложенная Кермаком и Маккендриком, описываемая системой нелинейных дифференциальных уравнений (1) [3]. Данная модель базируется на ряде ключевых допущений:

1. Закрытость популяции
2. Равномерное перемешивание
3. Мгновенное приобретение иммунитета

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= -\beta \frac{SI}{N} \\ \frac{dI}{dt} &= \beta \frac{SI}{N} - \gamma I \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I\end{aligned}\tag{1}$$

где, $S(t)$ — количество восприимчивых лиц, $I(t)$ — количество инфицированных лиц, $R(t)$ — количество выздоровевших лиц, N — общая численность населения, β — коэффициент передачи инфекции, γ — коэффициент выздоровления.

Базовое репродуктивное число определяется как:

$$R_0 = \frac{\beta}{\gamma}\tag{2}$$

(1) уравнение $\frac{dS}{dt}$ означает уменьшение числа восприимчивых людей. S — восприимчивые, I — инфицированные. β — коэффициент передачи инфекции. (2) уравнение $\frac{dI}{dt}$ — означает изменение числа инфицированных. Есть два процесса: увеличение — βSI , уменьшение — γI , где γ — коэффициент выздоровления. (3) уравнение $\frac{dR}{dt}$ означает рост числа выздоровевших.

Для выполнения численных расчетов в языке Python используется библиотека NumPy, которая предоставляет специальный тип данных — ndarray (многомерный массив). Этот тип данных предназначен для эффективного хранения и обработки числовой информации.

Для использования функциональности библиотеки необходимо выполнить импорт модуля: `import numpy as np`.

Массивы NumPy обладают высокой вычислительной эффективностью и позволяют выполнять математические операции сразу над всеми элементами массива, что особенно важно при решении систем дифференциальных уравнений и моделировании эпидемиологических процессов [5]. В задачах машинного обучения используются различные базисные функции, включая полиномиальные, гауссовы и сигмоидальные функции. Полиномиальные функции имеют вид

$$\varphi(x) = x^i \quad (3)$$

но они влияют на всю область данных. Также широко применяется сигмоидальная функция:

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (4)$$

которая используется в логистической регрессии для прогнозирования вероятности события. Эти методы применяются для анализа и прогнозирования эпидемиологических данных [6].

В эпидемиологическом моделировании используется разделение населения на группы (S, I, R), что позволяет описывать распространение инфекции и прогнозировать динамику эпидемии [7]. Оценки базового репродуктивного числа R_0 , основанные на скорости роста инфекции, более надёжны, чем оценки по общему числу случаев, которое может быть занижено [8].

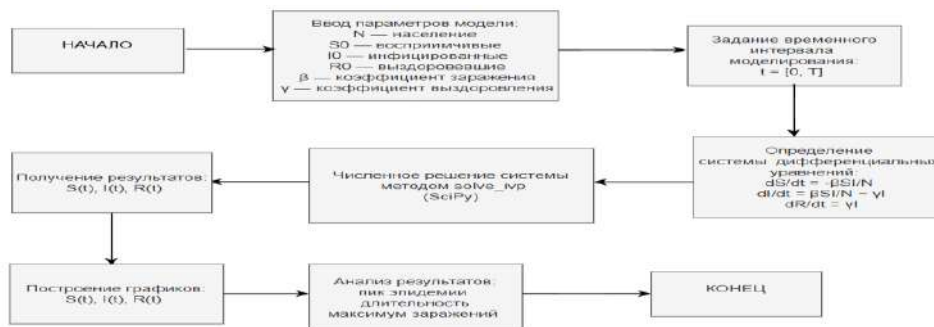


Рисунок 1. Алгоритм реализации модели SEIR для прогнозирования распространения COVID-19

Для наглядности работы модели SEIR используется блок-схема (Рис. 1), отражающая последовательность обновления состояний S, E, I и R.

В работе применялся язык Python и среда Visual Studio Code. Для вычислений использовались библиотеки NumPy (работа с массивами) и SciPy, где функция `solve_ivp` обеспечивала численное решение системы дифференциальных уравнений и получение динамики модели [9]. Пример реализации приведён на рис. 2.

```
def sir_model(t, y, beta, gamma):
    S, I, R = y
    dSdt = -beta * I * S
    dIdt = beta * I * S - gamma * I
    dRdt = gamma * I
    return [dSdt, dIdt, dRdt]

beta = 0.1
gamma = 0.1

S0 = 0.99
I0 = 0.01
R0 = 0.0

y0 = [S0, I0, R0]
t_span = (0, 100)
t_eval = np.linspace(0, 100, 1000)

solution = solve_ivp(
    sir_model,
    t_span,
    y0,
    args=(beta, gamma),
    t_eval=t_eval)

S, I, R = solution.y
```

Рисунок 2 – Реализация модели SIR на Python

Пример реализаций числа зараженных представлен в рисунке 3.

```
import numpy as np

# максимум зараженных
I_max = np.max(I)

# день максимума
peak_day = t_eval[np.argmax(I)]

print("Максимум зараженных:", I_max)
print("День пика:", peak_day)

R0_value = beta / gamma
print("Базовое репродуктивное число R0 =", R0_value)

базовое репродуктивное число R0 = 2.9999999999999995
```

Рисунок 3 – Реализация числа зараженных в день пика и базовое репродуктивное число

Для анализа и обработки данных использовалась библиотека pandas, обеспечивающая удобную работу с табличными данными. Визуализация результатов моделирования выполнялась с помощью библиотеки matplotlib, которая позволила наглядно представить изменение численности восприимчивых, инфицированных и выздоровевших во времени.

```
import pandas as pd

data = pd.DataFrame({
    'time': t_eval,
    'susceptible': S,
    'infected': I,
    'recovered': R
})

data.to_excel("sir_results.xlsx", index=False)

plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(t_eval, S, label='Susceptible')
plt.plot(t_eval, I, label='Infected')
plt.plot(t_eval, R, label='Recovered')

plt.xlabel('Time')
plt.ylabel('Population fraction')
plt.title('SIR Model Simulation')
plt.legend()
plt.grid()
plt.show()
```

Рисунок 4 - Формирование данных модели SIR с использованием библиотеки Pandas

Численное решение системы уравнений выполнялось с использованием методов численного интегрирования, реализованных в библиотеке SciPy. Полученные результаты анализировались и визуализировались для оценки динамики распространения инфекции и прогнозирования эпидемиологического процесса.

Использование открытых библиотек и стандартных методов программирования обеспечивает воспроизводимость результатов исследования.

Библиотека scikit-learn представляет собой мощный инструмент для машинного обучения и анализа данных. Она включает алгоритмы классификации, регрессии, кластеризации и анализа данных [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования были получены количественные данные о динамике распространения инфекции и проведена оценка качества работы алгоритма классификации состояний системы.

Первым этапом анализа стала визуализация процесса распространения вируса в популяции с использованием классической модели SIR.

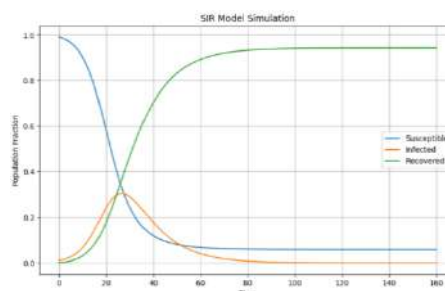


Рисунок 2. Динамика изменения численности групп восприимчивых (Susceptible), инфицированных (Infected) и выздоровевших (Recovered) лиц.

На (Рис. 2) наблюдается экспоненциальный рост инфицированных с пиком (~30%) к 30-му моменту; пересечение кривых восприимчивых и выздоровевших около 25-го дня отражает максимальную нагрузку на систему здравоохранения. К концу симуляции доля восприимчивых минимальна, что указывает на формирование коллективного иммунитета. Для верификации модели применена логистическая регрессия, результаты представлены матрицей ошибок.

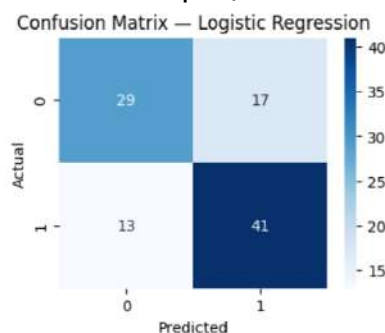


Рисунок 3. Матрица ошибок (Confusion Matrix) для модели логистической регрессии.

На (Рис. 3) модель корректно определила 29 отрицательных (TN) и 41 положительный (TP) случаев; ошибки составили 17 ложноположительных (FP) и 13 ложноотрицательных (FN). Точность (Accuracy) равна 70%, что подтверждает работоспособность модели, но требует дальнейшей настройки для снижения ошибок.

Таблица 1. Сравнительный анализ сценариев распространения инфекции

Сценарий	Пик заражения (чел.)	День пика	Итоговая доля переболевших
Без ограничений	32400	28	94%
Масочный режим	18200	45	72%
Жесткий карантин	5100	82	41%

Анализ разных сценариев COVID-19 показал, что снижение контактов уменьшает пик заболеваемости и замедляет распространение инфекции, демонстрируя эффект «сглаживания кривой». Модель может использоваться для дальнейших исследований с учётом вакцинации и изменений параметров передачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования была построена и проанализирована модель SIR для COVID-19 с использованием Python и библиотек SciPy и Scikit-learn. Модель выявила критические точки эпидемии и оценивала влияние ограничительных мер. Логистическая регрессия позволила классифицировать эпидемиологические состояния с точностью около 70%. Результаты показывают чувствительность модели к внешним параметрам и её практическую ценность для прогнозирования нагрузки на

систему здравоохранения. Новизна работы заключается в сочетании классического моделирования с методами машинного обучения, что позволяет количественно оценивать вероятность критических событий. Дальнейшие исследования могут учитывать мультиагентное моделирование, вакцинацию и новые мутации для повышения точности прогнозов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В ходе выполнения исследования использовалась большая языковая модель ChatGPT (OpenAI, 2026) для помощи в структурировании программного кода, анализа результатов моделирования и подготовки описательной части статьи. Все математические модели, алгоритмы и вычисления были разработаны и реализованы авторами самостоятельно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Keeling, M. J., & Rohani, P. (2008). *Modeling Infectious Diseases in Humans and Animals*. Princeton University Press. <https://press.princeton.edu/books/paperback/9780691116174/modeling-infectious-diseases-in-humans-and-animals>
- Brauer, F., & Castillo-Chavez, C. (2012). *Mathematical Epidemiology*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4419-8184-6>
- Kermack, W. O., & McKendrick, A. G. (1927). A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics. *Proceedings of the Royal Society A*, 115(772), 700–721. <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>
- NumPy Developers. (2026). *NumPy Documentation*. <https://numpy.org/doc/>
- McKinney, W. (2017). *Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython* (2nd ed.). O'Reilly Media. <https://www.oreilly.com/library/view/python-for-data/9781491957653/>
- Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-45528-0>
- Murray, J. D. (2002). *Mathematical Biology I: An Introduction* (3rd ed.). Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/b98868>
- Diekmann, O., Heesterbeek, H., & Britton, T. (2012). *Mathematical Tools for Understanding Infectious Disease Dynamics*. Princeton University Press. <https://press.princeton.edu/books/paperback/9780691116174/mathematical-tools-for-understanding-infectious-disease-dynamics>
- SciPy Developers. (2026). *SciPy Documentation*. <https://docs.scipy.org/doc/>
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (2007). *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing* (3rd ed.). Cambridge University Press. <https://www.cambridge.org/core/books/numerical-recipes/>

КРЕСТ ФОРМУЛАСЫН ЕСЕПТЕР ШЫҒАРУДА ҚОЛДАНУ

ӨОЖ 51

А.М. Омариев^{1*}

«Заки Ахметов атындағы №16 орта мектебі» КММ, Өскемен, Қазақстан,

*А.М. Омариев e-mail: Dinara_2205@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Бұл мақалада мектеп математикасында сирек қолданылатын «Крест формуласы» әдісінің мәні мен оны есептер шығаруда қолдану жолдары қарастырылады. Автор бұл әдістің Виет теоремасымен байланысын көрсетіп, көпмүшелерді көбейткіштерге жіктеу, теңдеулер мен теңсіздіктерді шешу барысында тиімділігін дәлелдейді. Сонымен қатар, крест әдісінің уақыт үнемдеуге және оқушылардың есеп шығару дағдыларын жеңілдетуге мүмкіндік беретіні мысалдар арқылы көрсетілген. Әдіс тригонометриялық және көрсеткіштік теңдеулерге де қолданылатыны баяндалады.

Түйінді сөздер: крест формуласы, Виет теоремасы, көпмүшені жіктеу, теңдеу, теңсіздік.

КІРІСПЕ

Қазіргі білім беру жүйесінде математиканы оқытуда оқушылардың есеп шығару дағдыларын жетілдірумен қатар, уақытты тиімді пайдалану және жеңіл әдістерді меңгеру ерекше маңызға ие. Мектеп бағдарламасында қарастырылатын дәстүрлі тәсілдер кей жағдайда күрделі әрі көп уақытты талап етеді, бұл оқушылардың пәнге деген қызығушылығын төмендетуі мүмкін. Осыған байланысты есептерді ықшам әрі тиімді жолмен шығаруға мүмкіндік беретін әдістерді енгізу өзекті мәселе болып табылады.

Солардың бірі - «Крест формуласы» әдісі. Бұл әдіс мектеп бағдарламасында кеңінен қарастырылмағанымен, оның негізінде Виет теоремасының қарапайым әрі қолжетімді қолданылуы жатыр. «Крест формуласы» көпмүшелерді көбейткіштерге жіктеуде, теңдеулер мен теңсіздіктерді шешуде тиімді құрал болып табылады. Сондықтан аталған әдісті оқыту процесіне енгізу оқушылардың математикалық ойлау қабілетін дамытуға және есеп шығару барысында уақыт үнемдеуге мүмкіндік береді.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

«Крест формуласы» мектеп бағдарламасының математикасында қолданылмаған әдіс. Бұл формула есеп шығаруда оқушыларға көптеген жеңілдіктер әкелумен қатар, тест есептері мен емтихан есептерін шығару барысында уақыт ұтуға мүмкіндік береді.

Крест формуласының атауы өзгеше болғанымен, ол Виет теоремасының қолданылуының екінші бір қырынан көрінуі. Мектеп бағдарламасында есеп шығарған кезде формулалық тәсілдер қолданылатындықтан, математикаға өте беріліп оқыған оқушы болмаса, екіншісі ол формулаларды еске сақтай бермейді. Сол себепті де математикалық ұғымдарды көп адам қиын деп есептейді. Ол үшін математиканы әрі қысқа, әрі тиімді әдіс табу арқылы оқытып, еске сақтау керек.

Оқушылар математика пәнінен мектеп бағдарламасында есеп шығарғанда (көпмүшеліктерді көбейткішке жіктеуде, теңдеулерді шешуде) әр түрлі әдістерді қолданып келеді.

Көпмүшеліктерді көбейткішке жіктеуде қолданылатын тағы бір әдіс ол - Крест әдісі. Крест формуласы деп аталуының себебі көбейткіштердің крест түрінде айқастырыла сызылған екі сызықтың бойымен орналастырыла жіктелуін айтамыз.

1-мысал. $(x+2)(x+3) = x^2 + 5x + 6$ екенін білеміз. Ал, керісінше $x^2 + 5x + 6 = (x+2)(x+3)$ екені де белгілі. Егер бұны қолданбалы әдіс жолы бойынша шешіп көрсетсек:

$x^2 + 5x + 6 = 0 \Rightarrow D = 1 > 0 \Rightarrow x_1 = -3, x_2 = -2$. Енді $ax^2 + bx + c = a(x - x_1)(x - x_2)$ формуласы бойынша $x^2 + 5x + 6 = (x - (-3))(x - (-2)) = (x+3)(x+2)$ екенін аламыз.

Керіп отырғанымыздай бұл қолданбалы әдісіміз барлығымызға таныс, әрі күрделі. Ал, крест әдісі бойынша шығаратын болсақ:

$$\begin{array}{ccc}
 & x & 2 \\
 & \swarrow & \searrow \\
 x^2 + 5x + 6 = & & \\
 & \swarrow & \searrow \\
 & x & 3
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 \text{мұндағы } x^2 = x \cdot x; \quad 6 = 2 \cdot 3; \quad 5x = 2x + 3x \\
 \text{сондықтан } x^2 + 5x + 6 = (x+3)(x+2).
 \end{array}$$

Осы крест әдісі бойынша біз берілген көпмүшелікті тікелей көбейткіштерге жіктей аламыз. Бұл әдістің әлдеқайда тиімді екені көрініп тұр. Сонымен, крест формуласы деп отырғанымыз:

$$\begin{array}{ccc}
 & x & a \\
 & \swarrow & \searrow \\
 x^2 + (a+b)x + ab = & & \\
 & \swarrow & \searrow \\
 & x & b
 \end{array}
 \quad
 (x+a)(x+b)$$

Жоғарыдағы келтірілген мысалдан біз крест формуласының негізгі үш қасиетін қорытындылаймыз. $x^2 + px + q$ көпмүшелігін көбейткішке жіктеуде:

1. Егер бос мүше q оң сан болса, онда оны таңбалары бірдей екі көбейткіш санға жіктесек, олардың таңбасы бірінші дәрежелі екінші мүшенің коэффициенті p -нің таңбасымен бірдей болады. Яғни:

- егер $q > 0, p > 0$ болса, онда көбейткіштердің таңбасы оң болады.
- егер $q > 0, p < 0$ болса, онда көбейткіштердің таңбасы теріс болады.

2. Егер бос мүше q теріс сан болса, онда оны таңбалары екі түрлі екі көбейткіш санға жіктесек, ондағы абсолют шамасы біршама үлкен көбейткіш пен бірінші дәрежелі екінші мүшенің коэффициенті p -нің таңбалары бірдей болады. Яғни:

- егер $q < 0, p > 0$ болса, онда көбейткіштердің модулі үлкенінің таңбасы оң, ал модулі кішісінің таңбасы теріс болады.
- егер $q < 0, p < 0$ болса, онда көбейткіштердің модулі үлкенінің таңбасы теріс, ал модулі кішісінің таңбасы оң болады.

3. Көпмүшелерді жіктеген кезде, крест түрінде айқастырыла сызылған сызықтың жоғары жағындағы өрнектер бір көбейткіш ретінде, төменгі жағындағы өрнектер бір көбейткіш ретінде екі жақшаға алып жазамыз. Яғни:

- егер $q > 0$ болса, онда p бос мүше жіктелген екі көбейткіш сандардың қосындысына тең болады.
- егер $q < 0$ болса, онда p бос мүше жіктелген екі көбейткіш сандардың айырмасына тең болады.

Бұл формуланы жоғары дәрежелі және параметрлі көпмүшеліктерді көбейткіштерге жіктеуге де қолдануға болады.

2-мысал. $a_1a_2x^2 + (a_1c_2 + a_2c_1)x + c_1c_2$ - ні көбейткішке жіктейік.

Шешуі:

$$\begin{array}{ccc}
 & a_1x & c_1 \\
 & \swarrow & \searrow \\
 a_1a_2x^2 + (a_1c_2 + a_2c_1)x + c_1c_2 = & & \\
 & \swarrow & \searrow \\
 & a_2x & c_2
 \end{array}
 \quad
 = (a_1x + c_1)(a_2x + c_2).$$

Енді крест формуласын теңсіздіктер жүйесін шешуде қолданып көрейік.

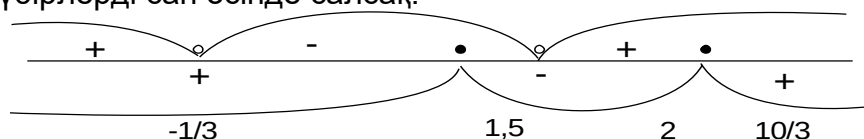
3-мысал. $\begin{cases} 6x^2 - 29x + 30 \leq 0 \\ 3x^2 - 5x - 2 < 0 \end{cases}$ теңсіздігін шешейік.

Шешуі: Бұл жүйені шешу үшін оны теңдеулер жүйесі түрінде қарастырып аламыз.

$\begin{cases} 6x^2 - 29x + 30 = 0 \\ 3x^2 - 5x - 2 = 0 \end{cases}$. Крест әдісі бойынша жүйедегі әрбір теңдеуді көбейткішке жіктесек,

жүйе мына түрге келеді: $\begin{cases} (3x-10)(2x-3)=0 \\ (3x+1)(x-2)=0 \end{cases}$. Бұдан $\begin{cases} x_1 = \frac{10}{3}, x_2 = 1,5 \\ x_3 = -\frac{1}{3}, x_4 = 2. \end{cases}$ Интервалдар әдісі

бойынша түбірлерді сан өсінде салсақ:



Жауабы: $[1,5; 2)$.

Бұдан басқа крест әдісінің қасиеті сәйкес келетін тригонометриялық теңдеулерді шешуде қолдануға болады.

4-мысал : $\cos^4 x + 2\cos^2 x - 8 = 0$ теңдеуін шешу керек.

Шешуі: Бұл 11-сынып бағдарламасы. Бұның шешу әдісін 8-10 сынып оқушылары білмейді. Ал, егер олар крест әдісін қолдануды білген болса, берілген теңдеуді шеше алар еді. Крест әдісі бойынша шығарып көрейік:

$$\cos^4 x + 2\cos^2 x - 8 = 0 \Rightarrow \begin{array}{cc} \cos^2 x & -2 \\ \cos^2 x & 4 \end{array} \Rightarrow (\cos^2 x - 2)(\cos^2 x + 4) = 0 \Rightarrow \cos^2 x + 4 = 0$$

теңдеуінің шешімі болмайды.

Ал, $\cos^2 x - 2 = 0 \Rightarrow \cos x = \sqrt{2} > 1$. Бұл теңдеудің шешімі болмайды.

Жауабы: $\emptyset$.

Сонымен қатар, крест формуласын көрсеткіштік функцияларда да қолдануға болады.

5-мысал. $2^{x^2+6x+10} \cdot 2^{x+2} = 1$ теңдеуін шеш.

Шешуі: Негіздері бірдей дәрежелерді көбейткенде дәреже көрсеткіштері өзара қосылады деген ереже бойынша:

$$\begin{array}{cc} x & 3 \\ x & 4 \end{array} \Rightarrow 2^{x^2+6x+10} \cdot 2^{x+2} = 2^{x^2+7x+12} = 1 \Rightarrow x^2 + 7x + 12 = 0$$

$$\Rightarrow x^2 + 7x + 12 = (x+3)(x+4) = 0 \Rightarrow x_1 = -3, x_2 = -4.$$

Жауабы: $(-3; -4)$

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Зерттеу барысында «Крест формуласы» әдісінің көпмүшелерді көбейткіштерге

жіктеуде, теңдеулер мен теңсіздіктерді шешуде тиімділігі жан-жақты қарастырылды. Ұсынылған әдіс дәстүрлі тәсілдермен салыстырғанда есептерді ықшам әрі жылдам шешуге мүмкіндік беретіні анықталды.

Мақалада келтірілген мысалдар негізінде крест әдісінің қолдану алгоритмі көрсетіліп, оның негізгі қасиеттері тұжырымдалды. Атап айтқанда, квадрат үшмүшені көбейткіштерге жіктеу кезінде коэффициенттердің таңбалары мен мәндері арасындағы байланыс арқылы дұрыс көбейткіштерді табу жеңілдетілетіні дәлелденді. Сонымен қатар, әдістің әмбебаптығы жоғары дәрежелі көпмүшелерге де қолдануға болатыны көрсетілді.

Зерттеу нәтижелері крест формуласының тек алгебралық өрнектерді жіктеуде ғана емес, сонымен қатар теңдеулерді, теңсіздіктерді, олардың жүйелерін, тригонометриялық және көрсеткіштік теңдеулерді шешуде де тиімді қолданылатынын көрсетті. Бұл әдіс оқушылардың есеп шығару барысында уақыт үнемдеуіне және логикалық ойлау қабілеттерін дамытуға ықпал етеді.

Талдау барысында крест әдісінің қарапайымдылығы мен көрнекілігі оқушылар үшін оны тез меңгеруге мүмкіндік беретіні байқалды. Дегенмен, бұл әдісті тиімді қолдану үшін оның негізгі қасиеттерін дұрыс түсініп, жүйелі түрде жаттықтыру қажет.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеу нәтижесінде «Крест формуласы» әдісінің мектеп математикасында тиімді әрі қолжетімді тәсіл екені анықталды. Бұл әдіс оқушыларға көпмүшелерді көбейткіштерге жіктеуді жеңілдетіп қана қоймай, есеп шығару барысында уақытты үнемдеуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, оның көрнекілігі мен қарапайымдылығы математикалық ұғымдарды тез меңгеруге ықпал етеді.

Қорыта келгенде, крест формуласын тек көпмүшеліктерді көбейткіштерге жіктеуде ғана емес, қасиеті сәйкес келетін жағдайда теңдеулерді, тригонометриялық теңдеулерді, теңсіздіктерді, теңдеулердің және теңсіздіктердің жүйелерін шешуге, бөлшек өрнектерді ықшамдауға, тригонометриялық және көрсеткіштік теңдеулерді т.б. есептердің түрлеріне қолдануға болады. Ол үшін ең бастысы крест формуласын және оның негізгі қасиеттерін түсініп, есте сақтаса болғаны.

Осыған байланысты, крест формуласын оқу үдерісінде жүйелі түрде қолдану оқушылардың логикалық ойлау қабілетін дамытуға, есеп шығару дағдыларын жетілдіруге және математика пәніне деген қызығушылығын арттыруға ықпал етеді..

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Автор мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Мақаланы дайындау барысында әдістемелік қолдау көрсеткен әріптестерімізге және пайдалы кеңестері үшін алғыс білдіреміз. Сонымен қатар, зерттеу нәтижелерін жетілдіруге ықпал еткен рецензенттердің құнды пікірлері мен ұсыныстары үшін шынайы ризашылығымызды білдіреміз.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Бұл мақаланы дайындау барысында мәтінді редакциялау, құрылымдау және тілдік түзету мақсатында жасанды интеллект құралдары қолданылды. Атап айтқанда, ChatGPT тілдік модельдері пайдаланылды. Жасанды интеллект тек көмекші құрал ретінде қолданылып, мақаланың ғылыми мазмұны, тұжырымдары мен нәтижелері толықтай авторлардың жауапкершілігінде.

ҚОЛДАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Математика және физика журналы. Бекетова Ғ. Квадрат теңдеулерді шешудің тәсілдері. №5, 2004, 13-бет.
- Дарын журналы. №3, 2005 жыл.
- Жалпы білім беретін мектептің 9-жылдық курсы бойынша математикадан жазбаша емтихан өткізуге арналған тапсырмалар жинағы. 5-бөлім №25.б; 4-бөлім № 55.а.
- Қазақстан тарихы, қазақ тілі, математика, физика, биология пәндері бойынша 10300 тест сұрақтары мен жауаптары. №674, 271-бет.
- Сканави М.И. Жоғары техникалық оқу орындарына түсушілерге арналған математикадан есептер жинағы. 13-бет, 1998.
- Алгебра және анализ бастамалары. 10–11-сынып, «Рауан», 1992.
- Әбілқасымов А.Е., Төлеубеков Б.Ж. Алгебра және анализ бастамалары. Жалпы білім беретін мектептің 10–11 сыныптарына арналған оқулық. Алматы: Мектеп, 2010.
- Ермеков Н.Т., Бекбоев И.Б. Алгебра. Жалпы білім беретін мектептің 8–9 сыныптарына арналған оқулық. Алматы: Атамұра, 2009.
- Кудрявцев Л.Д. Математика курсы. Мәскеу: Наука, 1988.
- Колмогоров А.Н. Алгебра және анализ негіздері. Мәскеу: Просвещение, 1990.
- Погорелов А.В. Математика: Орта мектепке арналған оқулық. Мәскеу: Просвещение, 2001.
- Гельфанд И.М., Шенкман М.И. Алгебра есептері. Мәскеу: Наука, 1995.
- ChatGPT. (2026, сәуір 28). Мәтінді өңдеу және құрылымдау бойынша көмек [Үлкен тілдік модель]. OpenAI. <https://chat.openai.com/>

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ НЕГІЗІНДЕ МЕДИА САЛАСЫН БАСҚАРУДЫ ЖЕТІЛДІРУ

ӨОЖ 338.2

Н.Орынбасарқызы^{1*}

¹Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

*Корреспондент-автор: Орынбасарқызы Наргиза, e-mail: nargizkalmirza03@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Цифрлық технологиялар мен жасанды интеллекттің (ЖИ) қарқынды дамуы медиа индустриясының құрылымы мен басқару тетіктеріне елеулі өзгерістер енгізуде. Ақпаратты өндіру, тарату және аудиториямен өзара әрекеттесу үдерістері автоматтандырылып, жаңа цифрлық мүмкіндіктер қалыптасуда. Осы жағдай ЖИ технологияларының медиа жобаларға әсерін, сондай-ақ пайда болуы мүмкін тәуекелдерді анықтау, болжау және басқару мүмкіндіктерін зерттеу қажеттігін айқындайды. Мақалада ЖИіні қолдану арқылы басқару қарастырылады, сондай-ақ медиа жобаларға әсері анықталады. Зерттеу барысында ғылыми еңбектерге, халықаралық тәжірибеге және аналитикалық деректерге салыстырмалы талдау жүргізілді. Нәтижесінде бұл жұмыс медиа жобалардағы ЖИ технологияларының рөлін анықтайды.

Түйінді сөздер: жасанды интеллект, медиа индустрия, цифрлық технология, басқару.

КІРІСПЕ

Қазіргі уақытта ЖИ-тің дамуы әртүрлі салаларда айқын көрініс табуда. Бұл технологиялар экономиканың, білім берудің, денсаулық сақтаудың, өндірістің, мемлекеттік басқарудың және цифрлық инфрақұрылымның дамуына елеулі ықпал етуде. Елімізде 2025 жылы ЖИ-ке қатысты бірқатар маңызды шешімдер қабылданды. Мемлекет басшысының бастамасы мен тапсырмасы негізінде Қазақстанда ЖИ және цифрлық даму министрлігі құрылды. Одан бөлек, маңызды жаңалықтардың бірі – аймақтағы алғашқы мамандандырылған нормативтік-құқықтық құжат болып табылатын «ЖИ туралы» заңның қабылдануы болды. Аталған заң алгоритмдердің ашықтығына, азаматтардың құқықтарын қорғауға және тәуекелдерді басқаруға қойылатын базалық талаптарды айқындайды. Сонымен қатар, 2026 жылғы 6 қаңтарда Мемлекет басшысы Қасым-Жомарт Тоқаев 2026 жылды Цифрландыру және ЖИ жылы деп жариялау туралы Жарлыққа қол қойды. Бұл қадам жекелеген цифрлық жобалардан жүйелі әрі институционалдық деңгейдегі ЖИ-ті енгізуге көшу кезеңін білдіреді.

ЖИ-тің мақсаты – өз бетінше ойлана алатын, проблемаларды шеше алатын және мәліметтен сабақ ала алатын бағдарламалар құру. Қазіргі кезеңде ЖИ технологиялары түрлі салаларда қарқынды даму үстінде. Көпжылдық ғылыми ізденістер мен зерттеулердің нәтижесінде бұл технологиялардың сапалық деңгейі айтарлықтай артты және олардың қоғам өміріндегі маңызы күшейді. Бүгінде ЖИ-тің функционалдық мүмкіндіктері кеңейіп, ол тек арнайы техникалық құрал ғана емес, күнделікті өмірдің маңызды элементіне айналды.

ЖИ адамның интеллектуалдық әрекеттеріне тән бірқатар функцияларды – ақпаратты талдау, пайымдау, жоспарлау, шешім қабылдау және коммуникация үдерістерін – бағдарламалық ортада жүзеге асыруға мүмкіндік береді. Соның нәтижесінде күрделі есептерді орындау жылдамдығы артып, ресурстарды пайдалану тиімділігі жоғарылайды.

Соңғы онжылдықта есептеу және ақпараттық технологиялар саласында

қарқынды дамулар болды, бұл медиа индустриясына да айқын әсер етті. 2025 жылғы халықаралық статистикаға сәйкес, медиа контенттің 70%-ы автоматтандырылған жүйелер немесе ЖИ алгоритмдері арқылы өндіріледі. Мысалы, Netflix пен Spotify сияқты стримингтік сервистер қолданушы әрекеттеріне сүйене отырып фильмдер, сериалдар мен музыканы ұсынады. Бұлардың барлығы қызметкерлердің жұмысын жеңілдетіп, кейбір қызметтерді автоматтандыруға көмектеседі. Одан бөлек, ЖИ чат-боттар, интеллектуалды дауыс көмекшілері және виртуалды жүргізушілер арқылы пайдаланушымен өзара әрекеттесуді күшейтеді. Олар нақты уақыт режимінде байланыс орнатып, тәулік бойы қолдау көрсетіп, жекелендірілген контент жеткізу арқылы телеарналарға жаңа медиа ортасына бейімделуге, аудиторияны сақтап қалуға және контент өндірісі мен тарату тиімділігін арттыруға мүмкіндік беретін негізгі құралдардың біріне айналады.

Сонымен қатар, ЖИ-тің медиа кеңістігіне енуі бірқатар қиындықтар мен мәселелерді де туындатады. Атап айтқанда, жалған ақпараттың таралуы, алгоритмдік біржақтылық, ақпараттың шынайылығына күмән келтіру, сондай-ақ ЖИ көмегімен жасалған материалдарға қатысты авторлық құқық даулары өзекті болып отыр. Мысалы, кейбір онлайн-журналистік платформалар ЖИ құралдарын қолдана отырып, мақалалар мен жаңалықтарды автоматты түрде шығарады. Дегенмен, алгоритмдер кейде деректерді дұрыс өңдемей, қате немесе толық емес ақпарат таратқан жағдайлар кездеседі. Бұл фейк жаңалықтардың таралуына жол ашуы мүмкін.

Осы тұрғыдан алғанда, зерттеудің өзектілігі айқын көрінеді. ЖИ медиа саласында ақпаратты жедел өңдеу мен аудиторияға дербестендірілген контент ұсынуға мүмкіндік берсе де, алгоритмдердің қате жұмыс істеу мүмкіндігі, жалған ақпарат таралуы, этикалық және құқықтық мәселелер медианың сапасы мен қоғамдағы сенімділігіне әсер етуі мүмкін.

Сондықтан қазіргі кезеңде ЖИ-тің медиа индустриясында рөлі мен ықпалын зерттеу маңызды. Бұл зерттеу ЖИ технологияларды қолданудың тиімді жолдарын анықтауға, медиа жобалардың сапасын арттыруға бағытталған.

Зерттеудің мақсаты – ЖИ-тің медиа жобаларға ықпалын талдау, артықшылықтары мен тәуекелдерін бағалау және басқару үшін тиімді қолдану жолдары қарастырылады.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

ЖИ бойынша алғашқы мақаланы 1943 жылы Уоррен МакКаллок пен Уолтер Питс «Жүйке әрекетіндегі идеялардың логикалық есебі» деген тақырыпта жариялаған болатын. Одан кейін, 1949 жылы Дональд Хебб өзінің «Мінез құлық ұйымы: нейропсихологиялық теория» кітабында нейрондар арасындағы байланыс күшін өзгерту теориясын ұсынды. 1950 жылы ағылшын математигі Алан Тьюринг «Есептеу машиналары және интеллект» кітабын жариялады, онда ол машинаның адам мөнез құлқын көрсету мүмкіндігі бар жоғын анықтауға арналған сынақты ұсынды. Бұл сынақ Тьюринг сынағы деп аталады. Оның тарапынан ұсынылған бұл сынақ қазіргі таңда да ЖИ үшін маңыздылығын жоғалтпай, қолданысқа енген. Алан Тьюрингтің жұмысын жалғастыра отырып Дж. Маккарти 1956 жылы ЖИ терминін ойлап тапты. Осы уақытқа дейін, ЖИ-ке берілген анықтамалардың саны көп. Барлығын қарастыра отырып, «Жасанды интеллект – адамның интеллектуалдық қызметін автоматтандыруға арналған құралдар жиынтығы» - деген жалпы анықтама беруге болады. 1957 жылы Герберт Саймон машиналардың ойлау, үйрену және шығармашылық әрекеттерді орындау қабілеті үздіксіз дамидынын атап өтті. Оның пікірінше, жақын болашақта компьютерлер адамның интеллектуалдық мүмкіндіктерімен салыстырмалы деңгейдегі мәселелерді шеше алатын болады.

Сонымен қатар, Саймон нақты болжам да жасаған: он жыл ішінде компьютер

шахматтан әлем чемпионы болады және маңызды математикалық теоремаларды дәлелдей алады деген пікір білдірді. Алайда бұл болжамдар күтілген мерзімде емес, шамамен қырық жыл өткен соң жүзеге асты. Мысалы, 1997 жылы IBM компаниясының Deep Blue суперкомпьютері Гарри Каспаровты жеңіп, шахматтан әлем чемпионын ұтқан алғашқы машина ретінде тарихқа енді. Бұл жағдай ЖИтің даму үдерісі бастапқыда болжанғаннан баяу болғанымен, ұзақ мерзімді перспективада ғылыми жетістіктердің нақты нәтижелерге алып келгенін көрсетеді.

Кейбір зерттеушілер ЖИ-тіні медиа индустриясының дамуына ықпал ететін екіжақты құбылыс ретінде қарастырады. Мысалы, П. Кумар мен Б. Сингх (2024) ЖИ медиа ұйымдарға пайдаланушылардың қызығушылықтарын дәлірек анықтауға, болашақ трендтерді болжауға және контент өндіру процесін автоматтандыру арқылы тиімділікті арттыратынын атап өтеді. Сонымен қатар, бұл зерттеуде ЖИіні қолдану медиа кеңістігінде бірқатар күрделі мәселелерді туындататыны көрсетіледі. Атап айтқанда, жалған ақпарат ағынының күшеюі, медиа саласындағы жұмыс орындарының қысқаруы және пайдаланушылардың дербес деректерінің қауіпсіздігіне қатысты тәуекелдер негізгі проблемалар ретінде қарастырылады. Мұндай факторлар ақпарат сапасына, медианың сенімділігіне және қоғамның бұқаралық ақпарат құралдарына деген сеніміне кері ықпал етуі мүмкін.

Осыған байланысты авторлар ЖИ-ті медиа саласына енгізу үдерісі бақылаусыз жүзеге аспауы тиіс екенін атап көрсетеді. Олардың пікірінше, ЖИ журналисттің, редактордың немесе продюсердің орнын толықтай баса алмайды. Оның себебі – ЖИ адамдар сияқты эмоцияны түсіну, жағдайды контекст бойынша бағалау және қоғамдық пікір үшін жауапкершілік сезіну қабілетіне ие емес. Мысалы, ол жаңалықты тек факт бойынша ғана өңдей алады, бірақ оның әлеуметтік немесе моральдық мәнін, адамдарға тигізетін әсерін бағалай алмайды. Сондықтан қазіргі медиа өндірісінде ең тиімді тәсіл – бұл гибридік тәсіл: ЖИ тек көмекші құрал ретінде қолданылады, ал маңызды шығармашылық және редакциялық шешімдер адамға тиесілі.

Gartner сарапшыларының болжамына сәйкес, 2030 жылға қарай жобаларды басқарудағы күнделікті, рутиналық тапсырмалардың 80%-ы ЖИ арқылы жүзеге асырылатын болады. Сонымен қатар, Жобаларды басқару ассоциациясының зерттеуі көрсеткендей, соңғы екі жыл ішінде ұйымдарда ЖИ қолдану көрсеткіші 36%-дан 70%-ға өскен. Бұл деректер ЖИ-тің жобаларды басқарудағы жылдам енгізілуін және оның әлеуетін айқын көрсетеді.

Соңғы жылдары Қазақстанда ЖИ пен оны түрлі салаларда қолдануға қызығушылық артып келеді. Осы тақырып бойынша көптеген зерттеулер мен мақалалар жарияланды. Олар ЖИтің артықшылықтары мен тәуекелдерін, сондай-ақ оның экономиканың әртүрлі салаларында қолдану мүмкіндіктерін талдайды. В.Т. Конусова өз зерттеуінде Қазақстандағы ЖИ-ті реттеу мәселелерін жан-жақты қарастырып, оның даму перспективалары туралы жүйелі түсінік береді.

С.М. Аяпованың зерттеулері маңызды, өйткені ол ЖИ-тің әртүрлі медиа материалдарды өндіруде қаншалықты қолданылатынын анықтауға көмектеседі. Алынған мәліметтерге сәйкес, қазіргі уақытта журналистикада ЖИ-ті қолдану маңызды семантикалық жүктемені және материалды объективті бағалауды қажет етпейтін жаңалықтар мақалаларында қолданумен шектеледі.

Дегенмен, ЖИ саласындағы зерттеулер әлі толық аяқталған жоқ. Көптеген ғалымдар мен мамандар ЖИ үшін жаңа әдістер мен қосымшаларды зерттеуді және дамыту жұмыстарын жалғастыруда. Бұл бағытқа Google, Microsoft, Meta сияқты ірі компаниялардың зерттеушілері және әлемдегі жетекші университеттердің ғалымдары да қатысып отыр.

Бұл ғылыми мақалада ЖИ-тің медиа жобаларға әсерін кешенді бағалау мақсатында теориялық және әдіснамалық шолу мен талдау әдістері қолданылды.

Педагогикалық әдебиеттерге, оның ішінде Scopus мәліметтер базасында жарияланған ғылыми мақалаларға талдау жасалды. Зерттеу объектісі – медиа индустриядағы ЖИ технологиялары болып табылады. Зерттеу сипаттамасы бойынша салыстырмалы талдауға негізделген эмпирикалық зерттеу болып табылады.

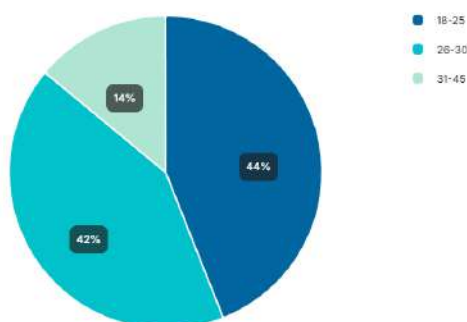
НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Қазақстанда медиасфераның дамуы мемлекеттің қолдауымен жүзеге асады. Соңғы жылдары еліміз цифрлық технологияларды белсенді түрде дамытты, нәтижесінде 95%-тен астам халық сапалы ақпаратқа қол жеткізе алады. Мәдениет және ақпарат министрлігінің деректері бойынша, 2025 жылдың қыркүйек айына қарай елде 4981 БАҚ тіркелген, оның ішінде 3046 - басылымдар, 248 - телеарналар. Бұл цифрлар медиақауіпсіздіктің маңыздылығын және медиажобалардың аудиторияны ақпараттандыру мен тартудағы рөлін көрсетеді.

Медиа саласында ЖИ-ті қолдануды зерттеу мақсатында сауалнама жүргізілді. Қатысушылар арасында қазіргі журналистер мен студенттер болды, бұл әртүрлі жас және кәсіби топтардың ЖИ технологияларын қабылдауын бағалауға мүмкіндік берді.

Сауалнамаға қатысқандар арасында ең көп респонденттер 18–25 жас аралығындағы топқа тиесілі болды. Бұл топ негізінен журналистикаға жаңадан келген мамандардан немесе студенттерден тұрады. 26–30 жас аралығындағы топта кәсіби дағдылары қалыптасқан, бірақ әлі де тәжірибе жинап жүрген мамандар бар. 31–45 жас аралығындағы ең үлкен топта 10 жылдан астам жұмыс тәжірибесі бар журналистер кездеседі.

1. Сіздің жасыңыз нешеде?

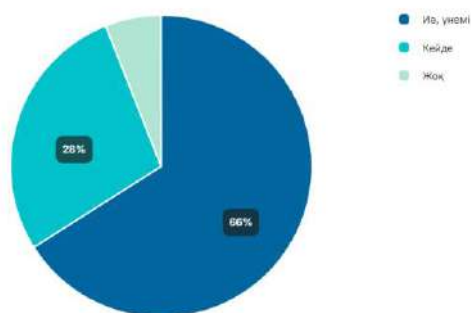


Сурет 1. Респонденттердің жас мөлшері (авторлар құрастырған)

Зерттеу нәтижелеріне сәйкес, журналистердің көпшілігі кәсіби қызметінде ЖИ-ті қолданады. Диаграмма көрсеткендей, респонденттердің 66%-ы ЖИ-ті үнемі қолданатынын, ал 28%-ы кейде ғана қолданатынын айтты. Жауап бергендердің кішкене бөлігі – 6%-ы ЖИ-ді мүлде қолданбайды.

Бұл көрсеткіштер ЖИ құралдарының қазіргі уақытта медиа саласындағы жұмыс процесіне белсенді енгенін, әсіресе мәтін жазу, аудитория мен деректерді талдау сияқты тапсырмаларда тиімді пайдаланылатынын көрсетеді.

3. Кәсіби қызметіңізде жасанды интеллектті (ЖИ) қолданасыз ба?



Сурет 2. Респонденттердің ЖИ құралдарын қолдануы (авторлар құрастырған)

Сауалнама нәтижелеріне сәйкес, респонденттердің көпшілігі (88,3%) ЖИ (ЖИ) ұғымымен таныс екенін көрсетті, бұл журналистердің жаңа технологияларға деген хабардарлығының жоғары екенін дәлелдейді. Сонымен қатар, қатысушылардың 60,2% кәсіби қызметінде ЖИ-ті қолданғанын атап өтті, бұл жаңа технологиялардың медиа саласында практикалық түрде пайдаланылып жатқанын көрсетеді.

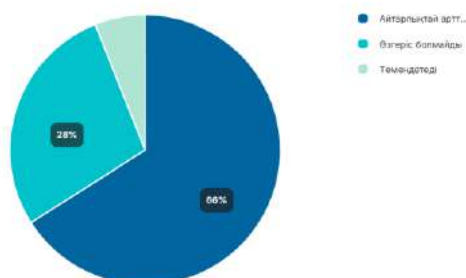
ЖИ қолдану мақсаттары бойынша, ең көп таралған бағыттар мәтін жазу (42%) және аудитория мен деректерді талдау (34%) болып шықты. Бұл көрсеткіштер ЖИ құралдарының журналистік процесті жылдамдатуға, аудиторияны зерттеуге және ақпаратты тиімді өңдеуге көмектесетінін дәлелдейді. Фото және видео өңдеу (18%) және басқа да тапсырмалар (6%) үшін ЖИ қолдану аз екені байқалды.

Әрі қарай қатысушылардан ЖИ-ке сенім, оның журналистикаға әсері және ЖИ арқылы жасалған жаңалықтарды күнделікті өмірде қабылдауға дайындық туралы сұрақтарға жауап алдық.

Сауалнама нәтижесінде қатысушылардың 58%-ы ЖИ арқылы жасалған мәтіндерді адам тексеріп, өңдеуі керек деп есептеді. Яғни, ЖИ әлі де толық кәсіби стандарттарға сәйкес мәтін жасай алмайды және адам қолымен тексеру қажет.

Бұл нәтижелер журналистикада ЖИ қолдану барысында адамның рөлі маңызды екенін көрсетеді: технология тек құрал ретінде қолданылуы керек, ал соңғы шешімді адам қабылдайды.

7. Медиа ұйымында жасанды интеллектті енгізу жобаларды басқару сапасына қалай әсер етеді деп бағалайсыз?



Сурет 3. ЖИ-ті енгізу жобаларды басқару сапасына қалай әсер етеді? (авторлар құрастырған)

Респонденттердің 66 %-ы медиа ұйымдарда ЖИ жобаларды басқару сапасын

арттыра алады деп ойлайды. Олар бұл ЖИ тәуекелдерді және ресурстарды дәлірек болжауға, сондай-ақ мониторинг пен басқару процестерін автоматтандыру арқылы тапсырмаларды тиімді орындауға көмектеседі деп санайды. Яғни, ЖИ медиа саласында басқарушылық шешімдерді жақсартатын маңызды құрал болып отыр.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, ЖИ саласы медиа саласында қарқынды дамып келеді, бірақ сонымен бірге көптеген шешілмеген мәселелер мен жеткіліксіз зерттелген аспектілер бар. Біздің ойымызша, басты назар ЖИ-інің журналистік процестерді жеңілдету мүмкіндіктерін және ақпарат сапасына әсерін зерттеуге аударылуы керек. Сонымен қатар, деректерді қорғау, алгоритмдік біржақтылық және шешім қабылдауға әсер ету сияқты этикалық мәселелерді зерттеу де медиа саласында ЖИ-ні қолдануда маңызды қадам болып табылады. Бұл зерттеулер журналистер мен медиа ұйымдарға ЖИ-ні қауіпсіз, тиімді және кәсіби стандарттарға сай пайдалануға мүмкіндік береді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Зерттеу нәтижелері ЖИ-тің Қазақстан медиасына елеулі әсер етіп отырғанын көрсетті. Журналисттердің көпшілігі ЖИ ұғымымен таныс болып, кәсіби қызметінде оны қолданғанын атап өтті. ЖИ құралдарының ең көп қолданылатын салалары – мәтін жазу және аудитория мен деректерді талдау. Бұл көрсеткіштер ЖИ-тің журналистік процестерді жеделдетуге, ақпаратты тиімді өңдеуге және аудиторияны зерттеуге мүмкіндік беретінін дәлелдейді.

Сонымен қатар, сауалнама нәтижелері ЖИ арқылы жасалған мәтіндерді адам тексеріп, өңдеуі керектігін көрсетті, яғни ЖИ әлі толық кәсіби стандарттарға сай емес және адамның рөлі маңызды болып қала береді. Бұл медиа саласында тиімді және сапалы ақпарат өндірісін қамтамасыз ету үшін гибридік тәсіл – ЖИ тек көмекші құрал ретінде, ал маңызды шығармашылық және редакциялық шешімдер адамға тиесілі болуы тиіс деген ғалымдардың пікірін растайды.

МҮДДЕЛЕР ҚАРАМА-ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Мен мүдделер қарама-қайшылығының жоқтығын мәлімдеймін.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл мақала AP19578464 «Қазақстан Республикасында Индустрия 4.0-ге көшу жағдайында кәсіпкерлік құрылымдардың инновациялық белсенділігіне адам капиталының сапасының әсері» тақырыбындағы ҚР ҒЖБМ ғылыми зерттеулерді гранттық қаржыландыру жобасы шеңберінде дайындалды.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Мен зерттеуді орындау барысында қолдау көрсеткен әріптестеріме, сондай-ақ мақала сапасын арттыруға ықпал еткен анонимді рецензенттерге алғыс білдіремін.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: ChatGPT. (2026, ақпан 23). Ғылыми мақалаға арналған мәтіндерді редакциялау және рәсімдеу бойынша көмек [Үлкен тілдік модель]. OpenAI. <https://chat.openai.com/>

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

Abed, N., & Farrokhi, N. (2025). The Role of Artificial Intelligence in Media Communications. *AI and Tech in Behavioral and Social Sciences*, 3(3), 1-9. <https://doi.org/10.61838/kman.aitech.3.3.3>

Аяпова С.М. Зарубежные и казахстанские медиа об использовании искусственного интеллекта в журналистике // Вестник КазНУ. Серия журналистика. – 2021. – No2 (60). – С. 95-10 : <https://www.inform.kz/ru/kak-budet-razvivatsya-iskusstvenniy-intellekt-v-kazahstane-0fc18f>

Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд.: Пер. с англ. — М. :

Издательский дом "Вильяме", 2006. — 1408 с.: ил. — Парал. тит. англ. ISBN 5-8459-0887-6 (рус.)

Кумар, П., & Сингх, Б. (2024). *Artificial Intelligence in Media Organizations: Opportunities and Challenges*. International Journal of Digital Media, 12(1), 78–92.

Sonni, A. F. (2025). Digital transformation in journalism: Mini review on the impact of AI on journalistic practices. *Frontiers in Communication*, 10, Article 1535156. <https://doi.org/10.3389/fcomm.2025.1535156>

Turkle, S. (2011). *Alone Together: Why We Expect More from Technology and Less from Each Other*// Basic Books, pp. 23-27.

Журавков, М.А. Технологии искусственного интеллекта и интеллектуальные системы компьютерного моделирования и инженерных расчетов. Вводный курс : учеб. пособие / М.А. Журавков ; БГУ, Механикоматематический фак. – Минск : БГУ, 2024. – 177 с. : ил. – Библиогр.: с. 170– 173.

Послание Главы государства Касым-Жомарта Токаева народу Казахстана «Экономический курс Справедливого Казахстана» [Электрон. ресурс] – 2023. – URL: <https://www.akorda.kz/ru/poslanie-glavy-gosudarstva-kasym-zhomarta-tokaeva-narodu-kazahstana-ekonomicheskij-kurs-spravedlivogo-kazahstana-18588> (дата обращения 20.10.2023)

Noy, S., Zhang, W. (2023). Experimental evidence on the productivity effects of generative artificial intelligence// *Science*, №381, Issue 6654. pp. 187-192. <https://doi.org/10.1126/science.adh2586>

Сыздыкбаев А. Как будет развиваться искусственный интеллект в Казахстане. Международное информационное агентство «Казинформ» [Электрон. ресурс]. – 2023. – URL: <https://www.inform.kz/ru/kak-budet-razvivatsya-iskusstvenniy-intellekt-v-kazahstane-Ofc18f> (дата обращения 20.10.2023)

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ БРОНЕТЕХНИКИ

УДК 629.33

Б.А. Сарсекенов^{1*}, Б.Н. Азаматов¹, А.И. Мухамедова¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Сарсекенов Батырхан Арманұлы, e-mail:
batyr.kenov@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Работа посвящена разработке метода автоматизированного обнаружения дефектов корпусных деталей бронетехники с использованием сверточных нейронных сетей (СНС). Актуальность определяется необходимостью повышения надёжности и скорости дефектоскопии при техническом обслуживании и ремонте бронированных машин. Целью является построение модели на базе архитектуры YOLOv8, обученной на специально сформированном наборе данных рентгенографических и фотографических изображений дефектов (трещин, раковин, пор, коррозионных повреждений). В качестве методологической основы использованы подходы глубокого обучения с применением аугментации данных, переноса знаний и перекрёстной валидации. Модель достигает $mAP@0.5 = 91,3\%$ при скорости до 45 кадров/с на GPU NVIDIA RTX 3060, превосходя классические методы на 12–18 % по F1-score. Практическая значимость заключается в возможности интеграции системы в диагностические комплексы ремонтных предприятий Вооружённых Сил Республики Казахстан.

Ключевые слова: сверточные нейронные сети, обнаружение дефектов, бронетехника, машинное зрение, YOLOv8, дефектоскопия, глубокое обучение.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение технической готовности бронетехники является приоритетной задачей современных вооружённых сил. Корпусные детали бронированных машин эксплуатируются в условиях экстремальных механических, термических и коррозионных нагрузок, что приводит к накоплению структурных дефектов: трещин, раковин, пор и коррозионных повреждений. Традиционные методы дефектоскопии (визуальный осмотр, ультразвуковой контроль, магнитопорошковая диагностика) характеризуются высокой зависимостью от квалификации оператора, значительной трудоёмкостью и невозможностью обработки больших объёмов данных в реальном времени, что определяет актуальность автоматизации.

Сверточные нейронные сети (СНС) продемонстрировали выдающиеся результаты в задачах компьютерного зрения, включая обнаружение и классификацию объектов. Архитектуры семейства YOLO обеспечивают высокую скорость и точность детекции, что делает их перспективными для промышленной дефектоскопии. Работы ряда исследователей подтверждают эффективность глубокого обучения для обнаружения дефектов сварных соединений и литых деталей, однако применение подобных подходов к деталям бронетехники остаётся неизученным.

Целью исследования является разработка и экспериментальная апробация модели на базе YOLOv8 для автоматизированного обнаружения дефектов корпусных деталей бронетехники. Задачи включают: формирование специализированного

набора данных изображений дефектов; адаптацию и обучение модели с применением аугментации и переноса знаний; экспериментальную оценку точности и быстродействия; сравнительный анализ с классическими методами машинного зрения.

Научная новизна состоит в адаптации современных методов глубокого обучения к специфической задаче обнаружения дефектов бронекорпусов с учётом особенностей материалов, геометрии и условий эксплуатации. Работа выполнена в рамках Track A: Student Research.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось на основе набора данных из рентгенографических и фотографических изображений корпусных деталей бронетехники, полученных на ремонтных предприятиях. Объём исходного набора — 2 840 изображений с 4 классами дефектов: трещины (crack), раковины (cavity), поры (pore) и коррозионные повреждения (corrosion). Аннотирование выполнено с использованием LabelImg в формате YOLO.

Для повышения обобщающей способности модели применялись методы аугментации данных: геометрические трансформации (поворот $\pm 15^\circ$, горизонтальное и вертикальное отражение, масштабирование), фотометрические преобразования (яркость, контрастность, гауссов шум) и аугментация Mosaic из фреймворка Ultralytics. Объём данных увеличился до 8 520 изображений. Разделение на обучающую, валидационную и тестовую выборки — 70:15:15.

Базовой архитектурой выбрана YOLOv8m из фреймворка Ultralytics. Обучение проводилось с переносом знаний (веса COCO). Гиперпараметры — в таблице 1.

Таблица 1. Гиперпараметры обучения модели YOLOv8m

Параметр	Значение
Размер входного изображения	640 × 640 пикселей
Размер батча (batch size)	16
Количество эпох	150
Скорость обучения (learning rate)	0,001 (с планировщиком cosine annealing)
Оптимизатор	AdamW
Momentum	0,937
Weight decay	0,0005

Обучение: GPU NVIDIA RTX 3060 (12 ГБ), CPU AMD Ryzen 7 5800X, 32 ГБ ОЗУ; Python 3.10, PyTorch 2.0, Ultralytics 8.0, CUDA 11.8.

Метрики оценки: Precision, Recall, F1-score, mAP@0.5 и mAP@0.5:0.95 с 5-кратной перекрёстной валидацией.

Для сравнения реализованы детектор Canny с морфологической обработкой и адаптивная бинаризация с контурным анализом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе обучения модель продемонстрировала устойчивую сходимость функции потерь. Значение общей функции потерь (box loss + cls loss + dfl loss) снизилось с 4,82 на первой эпохе до 0,34 на заключительной. Признаков переобучения не обнаружено: разница между потерями на обучающей и валидационной выборках не превысила 0,08.

Результаты оценки качества модели на тестовой выборке представлены в

таблице 2. Средняя точность обнаружения mAP@0.5 по всем классам составила 91,3 %. Наибольшую точность модель продемонстрировала при обнаружении трещин (94,1 %), что обусловлено выраженной линейной морфологией. Наименьшее значение зафиксировано для пор (86,7 %) из-за малого размера и визуального сходства с артефактами.

Таблица 2. Результаты детекции по классам дефектов (тестовая выборка)

Класс дефекта	Precision, %	Recall, %	F1-score, %	mAP@0.5, %
Трещины	95,2	93,0	94,1	94,1
Раковины	91,8	89,5	90,6	90,8
Поры	88,4	85,1	86,7	86,7
Коррозия	93,5	92,8	93,1	93,6
Среднее	92,2	90,1	91,1	91,3

Перекрёстная валидация подтвердила устойчивость (σ mAP@0.5 = $\pm 1,4$ %). Скорость инференса — 22,3 мс/изображение (~45 кадров/с), что обеспечивает работу в реальном времени.

Сравнение с классическими методами (таблица 3) подтвердило превосходство нейросетевого подхода благодаря способности работать при неоднородном фоне.

Таблица 3. Сравнение методов обнаружения дефектов

Метод	Precision, %	Recall, %	F1-score, %
YOLOv8m (предложенный)	92,2	90,1	91,1
Canny + морфология	74,6	71,3	72,9
Адаптивная бинаризация + контурный анализ	78,1	73,8	75,9

Анализ ошибок показал, что основная часть ложноположительных срабатываний приходится на области с резкими границами конструктивных элементов (рёбра жёсткости, сварные швы), визуально напоминающие трещины. Ложноотрицательные ошибки связаны с дефектами малого размера (менее 3 мм) в зонах с низким контрастом. Данные наблюдения указывают на перспективность включения дополнительных сложных случаев в обучающую выборку.

Результаты сопоставимы с данными применения архитектур Faster R-CNN и SSD для обнаружения дефектов сварных соединений при существенно более высокой скорости обработки. Практическая ценность заключается в возможности интеграции разработанной системы в автоматизированные диагностические комплексы ремонтных предприятий ВС РК, что позволит сократить время дефектоскопического контроля и снизить влияние человеческого фактора.

Ограничения: относительно небольшой набор данных (4 класса) и лабораторные условия экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследования разработана и экспериментально апробирована система автоматизированного обнаружения дефектов корпусных деталей бронетехники на основе сверточной нейронной сети YOLOv8. Сформирован набор данных из 2 840 аннотированных изображений четырёх классов дефектов, расширенный до 8 520

методами аугментации. Модель достигает $mAP@0.5 = 91,3 \%$ при скорости 45 кадров/с, превосходя классические методы на 12–18 % по F1-score ($\sigma = \pm 1,4 \%$).

Научная новизна заключается в адаптации архитектуры YOLOv8 к специфической задаче дефектоскопии бронекорпусов с учётом особенностей материалов и характерных типов дефектов. Практическая значимость определяется возможностью интеграции системы в диагностические комплексы ремонтных предприятий Вооружённых Сил.

Перспективы дальнейших исследований включают расширение набора данных за счёт новых типов дефектов, апробацию более современных архитектур (YOLOv9, RT-DETR), реализацию сегментационного модуля для определения точных границ дефектов, а также разработку программно-аппаратного комплекса для полевых условий эксплуатации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено в рамках научно-исследовательского проекта кафедры транспортной техники и технологий.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы благодарят специалистов ремонтных предприятий за образцы и помощь при аннотировании данных.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. При подготовке рукописи инструменты генеративного искусственного интеллекта не использовались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Du, W., Shen, H., Fu, J., & others. (2021). Approaches for improvement of the X-ray image defect detection of automobile casting aluminum parts based on deep learning. *NDT & E International*, 107, 102144. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.102144>
- Ferguson, M., Ak, R., Lee, Y.-T., & Law, K. H. (2018). Detection and segmentation of manufacturing defects with convolutional neural networks and transfer learning. *Smart and Sustainable Manufacturing Systems*, 2(1), 137–164. <https://doi.org/10.1520/SSMS20180033>
- Jocher, G., Chaurasia, A., & Qiu, J. (2023). Ultralytics YOLOv8 (Version 8.0) [Computer software]. Ultralytics. <https://github.com/ultralytics/ultralytics>
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- Lin, T.-Y., Goyal, P., Girshick, R., He, K., & Dollár, P. (2017). Focal loss for dense object detection. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2980–2988. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.324>
- Liu, Y., Sun, P., Wergeles, N., & Shang, Y. (2021). A survey and performance evaluation of deep learning methods for small object detection. *Expert Systems with Applications*, 172, 114602. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114602>
- Tabernik, D., Šela, S., Skvarč, J., & Skočaj, D. (2020). Segmentation-based deep-learning approach for surface-defect detection. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31, 759–776. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01476-x>
- Yang, J., Li, S., Wang, Z., Dong, H., Wang, J., & Tang, S. (2020). Using deep learning to detect defects in manufacturing: A comprehensive survey and current challenges. *Materials*, 13(24), 5755. <https://doi.org/10.3390/ma13245755>
- Zhao, Z.-Q., Zheng, P., Xu, S.-T., & Wu, X. (2019). Object detection with deep learning: A review. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 30(11), 3212–3232. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2018.2876865>
- Гончаров, С. А., Петров, И. В. (2022). Применение свёрточных нейронных сетей в задачах неразрушающего контроля. *Дефектоскопия*, 58(4), 45–56. <https://doi.org/10.31857/S0130308222040059>

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАСУХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 004.8

Қ. А. Серғазы^{1*}, З.Т. Хасенова¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
г.Усть-Каменогорск, Казахстан

* Автор-корреспондент: Серғазы Қазыбек Ардақұлы, e-mail:
sergazykazybek80@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В условиях повсеместной цифровизации и стремительного роста объема климатических данных возрастает актуальность применения информационных технологий для анализа и прогнозирования природных процессов. В Республике Казахстан цифровизация и развитие информационных технологий определены как стратегические приоритеты, а объявление 2026 года Годом цифровизации и искусственного интеллекта подчеркивает необходимость их активного внедрения в научные исследования. Одним из важных направлений является прогнозирование засух, оказывающих значительное влияние на сельское хозяйство и водные ресурсы. Целью данного исследования является теоретический и сравнительный анализ методов прогнозирования засух на основе климатических данных с использованием информационных технологий. В работе рассмотрены классические индексы засухи (SPI, SPEI) и их математические основы, проведён сравнительный анализ методов прогнозирования засух, выявлены их преимущества и ограничения, а также обоснован выбор наиболее эффективного подхода для прогнозирования. Теоретическая значимость работы заключается в систематизации и сравнительном анализе методов, а практическая - в возможности их применения для мониторинга и управления рисками засух. Предполагается, что результаты исследования покажут перспективность интеграции информационных технологий и климатических моделей для повышения устойчивости аграрного сектора к климатическим изменениям.

Ключевые слова: информационные технологии, машинное обучение, индексные методы прогнозирования, климатические данные, засуха, аграрный сектор.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях стремительного развития информационных технологий и цифровизации научных исследований особую актуальность приобретает применение методов анализа данных и машинного обучения для решения сложных природно-климатических задач. Высокотехнологичные информационные системы позволяют обрабатывать большие объемы данных, поступающих из различных источников, включая метеостанции, спутниковые наблюдения и гидрологические измерения. В этой связи формируется стратегическое направление развития, в рамках которого основная цель — перейти от базовой цифровизации к внедрению искусственного интеллекта в государственное управление, энергетику и экономику, сделав технологии ключевым инструментом развития. В данном контексте особую значимость приобретает разработка интеллектуальных методов прогнозирования природных явлений.

Одной из наиболее актуальных проблем является засуха — длительный период аномальной сухости, приводящий к дефициту водных ресурсов и значительному ущербу экосистемам и экономике. Выделяют различные типы засух:

метеорологическую, сельскохозяйственную и гидрологическую, каждая из которых характеризуется своими особенностями и последствиями (Рисунок 1).

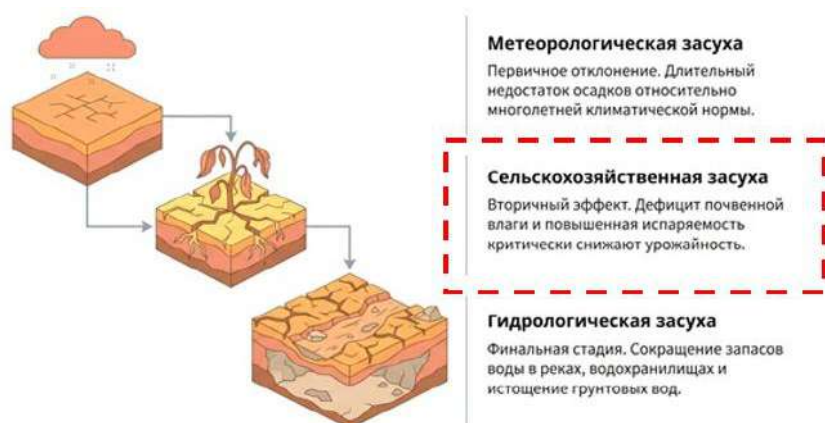


Рисунок 1. Типы засухи

В условиях глобальных климатических изменений наблюдается увеличение частоты, продолжительности и интенсивности засух, что требует разработки эффективных систем мониторинга и раннего прогнозирования.

Исследование относится к направлению, связанному с тенденциями и перспективами развития технологий искусственного интеллекта, и посвящено теоретическому и аналитическому анализу методов прогнозирования засух. Цель данного исследования — проведение сравнительного анализа методов прогнозирования засух на основе климатических данных с использованием информационных технологий для повышения точности прогнозов. Для достижения цели определены следующие задачи:

- провести обзор и классификацию существующих методов прогнозирования засух, включая индексные показатели (SPI, SPEI), статистические модели и подходы с использованием информационных технологий.
- изучить математические основы индексных методов и их применение для количественного анализа засух.
- провести обработку климатических данных и выявить ключевые факторы, влияющие на возникновение засух.
- сравнить эффективность различных методов прогнозирования засух по точности и применимости к разным временным и региональным масштабам.
- обосновать выбор наиболее подходящего метода прогнозирования засух с практической значимостью для аграрного сектора.
- определить направления дальнейших исследований и возможности внедрения результатов в интеллектуальные системы мониторинга и управления рисками засух.

Практическая значимость исследования заключается в применении результатов для прогнозирования засух, что позволяет оптимизировать сельскохозяйственное планирование, рационально управлять водными ресурсами и снижать экономические риски.

Научная новизна работы заключается в комплексном сравнительном анализе традиционных и современных методов прогнозирования засух с точки зрения их применимости к обработке больших данных, а также в обосновании перспектив их использования для повышения точности прогнозов и эффективности управления водными и аграрными ресурсами.

Исследование формирует теоретическую основу для разработки

информационной системы для прогнозирования засух в сельском хозяйстве и определяет направления для дальнейших научных исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки и предсказания засушливых периодов необходим комплексный подход, включающий как анализ метеорологических данных, так и использование современных информационных технологий. Особое внимание уделяется выявлению ключевых климатических факторов, влияющих на дефицит осадков, и количественной оценке их воздействия на различные регионы.

Климатические факторы, влияющие на засухи, включают пространственные и временные аномалии атмосферных процессов – например, глобальные телесвязи такие как Эль-Ниньо, NAO и др. могут усиливать или ослаблять осадки в отдельных регионах. Для анализа состояния климата и засушливости применяются индексы осадков и связанные характеристики.

Совокупность всех данных, позволяющие измерять и анализировать засушливость, с использованием индексов SPI, SPEI и спутниковых показателей NDVI, LST, VHI позволяет получать пространственно-сплошную информацию о состоянии растительности и водного баланса в исследуемом регионе (Рисунок 2).

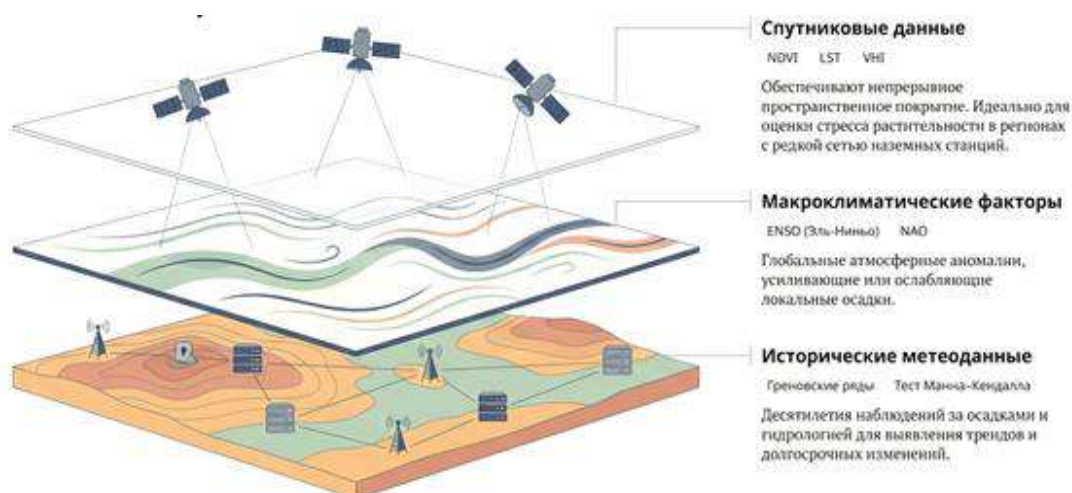


Рисунок 2. Информационный ландшафт

Среди классических методов прогнозирования засух широко применяются статистические индексы, например, стандартизированные показатели осадков. Standardized Precipitation Index (SPI) – один из наиболее распространённых показателей метеорологической засухи (Рисунок 3). Он рассчитывается на основе ряда суммарных осадков за заданный период и преобразуется в стандартный нормальный индекс. SPI пригоден для различных временных шкал (1, 3, 6, 12 и более месяцев), что позволяет оценивать, как кратковременные, так и долговременные засухи. Его преимуществами являются простота вычисления, универсальность и независимость от сезона. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) расширяет SPI, учитывая не только осадки, но и потенциальную испаряемость (PET). SPEI вычисляется на основе разницы между осадками и испаряемостью ($P - PET$), что делает его более чувствительным к изменениям температуры и климатическим факторам (Рисунок 4). К числу других индексов относятся индекс засухи Палмера (PDSI), Effective Drought Index (EDI) и другие.

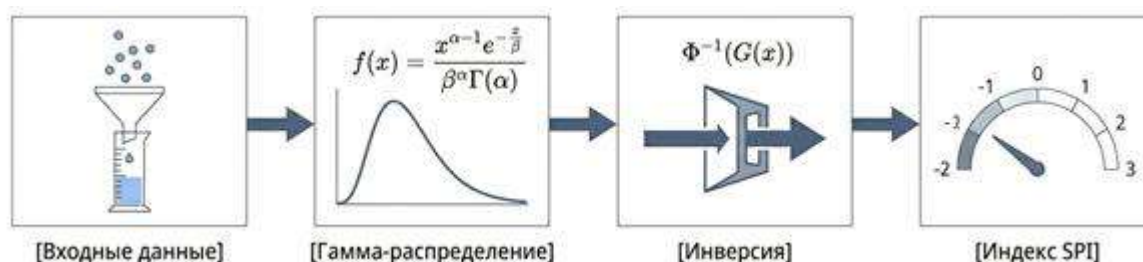


Рисунок 3. Базовый стандарт: Индекс SPI.

Кроме индексных методов, применяются статистические модели временных рядов и методы машинного обучения. К статистическим подходам относятся линейная регрессия, модели ARIMA и марковские процессы, которые используют зависимости между климатическими параметрами и показателями засухи. Однако такие методы ограничены линейностью и не учитывают сложные взаимосвязи.

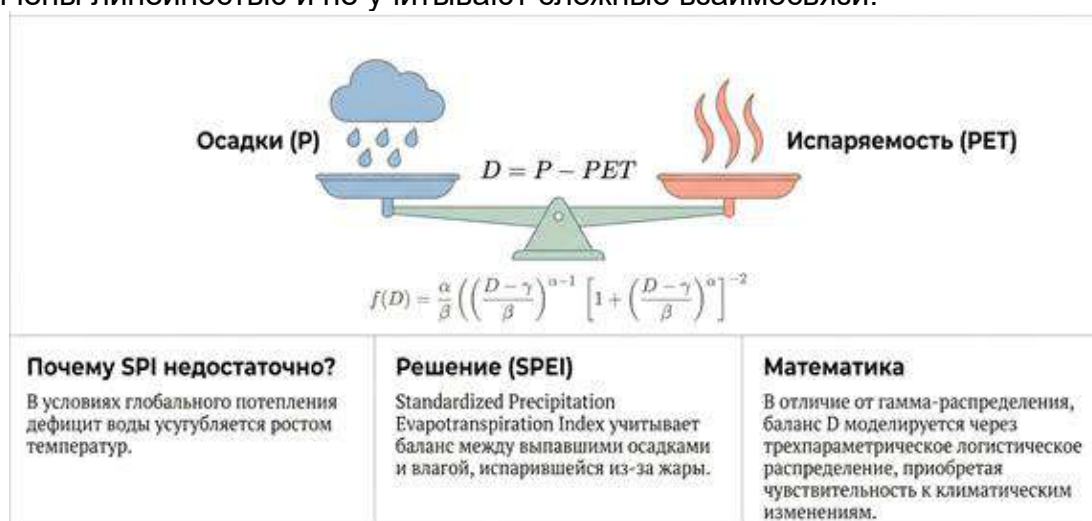


Рисунок 4. Эволюция к SPEI

А методы машинного обучения демонстрируют более высокую эффективность при работе с большими объемами данных. Нейронные сети, решающие деревья, методы опорных векторов и ансамблевые алгоритмы позволяют выявлять сложные нелинейные зависимости и учитывать многомерные данные. Вместе с тем такие модели требуют значительных объемов обучающих данных и могут быть чувствительны к переобучению.

Для прогнозирования засух используются разнообразные подходы: от простых индексных методов до сложных моделей машинного обучения. Ни один из методов не является универсальным, поэтому на практике часто применяются комбинированные и ансамблевые подходы для повышения точности прогнозов. Для количественного прогнозирования засух требуется формализованное описание климатических процессов. После рассмотрения существующих индексных и статистических методов становится очевидным, что точность прогнозов зависит от корректного математического представления данных.

Индексы засухи SPI и SPEI, а также статистические и машинно-обучающие модели опираются на конкретные математические формулы, которые позволяют переводить наблюдаемые климатические параметры в числовые показатели, пригодные для анализа и прогнозирования. В следующих подразделах представлены ключевые математические основы индексных и статистических моделей, а также общая формализация методов машинного обучения, используемых для прогноза засух.

Ключевой математической основой индексных методов являются распределения вероятностей. Для SPI предполагается, что месячные суммы осадков X следуют гамма-распределению:

$$f(x) = \frac{x^{\{\alpha-1\}} e^{\{-\frac{x}{\beta}\}}}{\{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)\}}, \quad x > 0, \quad (1)$$

где α и β – параметры формы и масштаба, Γ – гамма-функция. Вычисляют кумулятивную функцию $G(x)$, а затем приводят её к стандартному нормальному виду:

$$SPI = \Phi^{-1}(G(x)), \quad (2)$$

где Φ^{-1} – обратная функция стандартного нормального распределения. SPI показывает отклонение осадков от нормы в единицах стандартного отклонения.

Для SPEI сначала вычисляют баланс $D = P - PET$, преципитация минус потенциальная испаряемость и моделируют распределение D с помощью трехпараметрического логистического распределения. Его плотность задается, формулой:

$$f(D) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{D-\gamma}{\beta} \right)^{\alpha-1} \left[1 + \left(\frac{D-\gamma}{\beta} \right)^\alpha \right]^{-2}, \quad (3)$$

где α , β , γ – параметры. Далее аналогично находят кумулятивную вероятность и переводят её в стандартный нормальный индекс (SPEI). SPEI сохраняет мульти длительность, как SPI, и впервые был предложен Vicente-Serrano et al. (2010) как усовершенствованный индекс, объединяющий чувствительность к испарению (как в PDSI) с мульти-шкальной природой SPI.

Примеры простых статистических моделей: линейная регрессия и авторегрессия. Например, модель прогноза наивного индекса засухи y по одному предиктору X можно записать так:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon, \quad (4)$$

где β_1 – коэффициенты, ε – случайная ошибка. В случае множественной регрессии учитывают несколько факторов. Модель AR представляется как:

$$X_t = \phi X_{t-1} + \varepsilon_t, \quad (5)$$

где ϕ – коэффициент автокорреляции, ε_t – белый шум. Такие модели анализируют исторические временные ряды осадков или индексов засухи и прогнозируют следующий шаг на основе предыдущих значений.

Методы машинного обучения обычно формулируются как задачи оптимизации. Например, нейронная сеть может быть описана функцией:

$$y = \sigma(w * x + \beta), \quad (6)$$

где x – вектор входных признаков, w – веса, β – смещение, σ – нелинейная функция активации. Алгоритм обучения подбирает w , так, чтобы минимизировать ошибку на тренировочных данных. Детали моделей ML: RNN, LSTM, SVM, деревья решений выходят за рамки обзора, но их общая цель – приблизить сложную зависимость между климатическими входами и выходным индикатором засухи.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обзор существующих методов прогнозирования засух необходим для систематизации научных подходов, выявления их преимуществ и ограничений, а также обоснования выбора наиболее эффективных методов для решения задач прогнозирования. В таблице 1 представлены результаты сравнительного анализа методов прогнозирования засух на основе климатических и спутниковых данных. В качестве основных критериев оценки использовались точность выявления засушливых периодов, чувствительность к климатическим изменениям, а также требования к исходным данным и вычислительным ресурсам.

Таблица 1. Сравнительный анализ методов

Метод	Преимущества	Недостатки
SPI (Standardized Precipitation Index)	Простой статистический индекс, основанный только на осадках, применим для различных временных шкал (недели – годы), обеспечивает стандартизацию по климату. Рекомендуются ВМО как базовый индекс метеозасухи. Позволяет сравнивать условия засухи в разных регионах без учёта сезонности.	Не учитывает температуру и испаряемость; плохо фиксирует влияние потепления на интенсивность засухи. Требуется длительных гомогенных рядов осадков и подгонки распределения (обычно гамма), чувствителен к качеству данных. Отображает только метеорологическую составляющую, без прямой информации о состоянии почвы или водных запасов.
SPEI (Standardized Precipitation- Evapotranspiration Index)	Расширяет SPI с учётом потенциальной испаряемости, потому отражает влияние температуры и изменения водного баланса. Сохраняет мультишкальный подход SPI (разные горизонты), поэтому хорошо выявляет длительные тренды засухи.	Требуется данных по температуре для расчёта PET, чувствителен к методу вычисления испаряемости (Thornthwaite, Penman и др.). Более высокие требования к исходным данным.
Спутниковые вегетационные индексы (NDVI, VHI)	Обеспечивают пространственное покрытие с высоким разрешением; хорошо отражают стрессы растений и состояние вегетации при засухе. Могут отслеживать локальные очаги засушливости, незаметные по точечным метеомериям.	Зависимы от облачности (ограничения в дождливый период), показывают эффекты засухи с задержкой после начала дефицита осадков. Отражают реакцию биоразнообразия, а не прямые гидрометеороусловия; требуют калибровки по местным признакам и сезонности.
Статистические модели (регрессии, ARIMA)	Простота и прозрачность моделей, возможность быстрого обучения на исторических данных. Могут эффективно учитывать сезонные компоненты и корреляции по времени. Дают быструю оценку прогноза без больших вычислительных затрат.	Не учитывают физику процесса и нелинейные связи; ограничены формой модели (например, линейностью). Обычно требуют стационарности данных. Легко переобучаются при шуме и редко хорошо работают при выходе за диапазон наблюдаемых условий.
Методы машинного обучения (ANN, SVM, RF, GBM и др.)	Способны моделировать сложные и нелинейные зависимости между множеством входных признаков (осадки, температура, почв. влажность, NDVI, индекс ENSO и т.д.). Гибкие, могут объединять разнородные данные (спутники, метео, гидро). Современные гибридные и глубокие сети улучшают точность за счёт обучения на больших объёмах данных.	Требуется большого количества данных для надёжного обучения. Часто являются «чёрными ящиками» (низкая интерпретируемость). Риск переобучения и ограниченная применимость к другим регионам и задачам. Высокая вычислительная сложность и необходимость подбора гиперпараметров.

Для визуального сопоставления подходов представлена диагностическая матрица методов (Рисунок 5), в основе которой лежат 5 ключевых критериев.

Диагностическая матрица методов	Вычислительная легкость	Независимость к данным	Чувствительность к потеплению	Пространственное разрешение	Интерпретируемость логики	
SPI						Идеален как базовый стандарт, но слеп к температуре.
SPEI						Лучший баланс, требует данных испаряемости.
Спутниковые (NDVI/VHI)						Высочайшая локализация, но зависима от облачности.
Статистические модели						Быстро и прозрачно, но неэффективно для аномалий.
Машинное обучение						Максимальная предсказательная сила ценой потери прозрачности.

Рисунок 5. Диагностическая матрица методов

Таким образом, анализ существующих решений позволяет определить направления совершенствования моделей и выбрать оптимальные инструменты для разработки информационных систем прогнозирования засух.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показывает, что каждый метод прогнозирования засух имеет свои сильные и слабые стороны. Индексные методы (SPI, SPEI) обеспечивают простой и удобный инструмент для длительного мониторинга, особенно на этапе раннего предупреждения, но ограничены в учёте физиологических аспектов засухи и влияния потепления. Методы машинного обучения обладают высоким потенциалом точности прогнозов, однако требуют больших объемов качественных данных и часто ориентированы на конкретные регионы или временные периоды. В рамках данного исследования будут использоваться метеорологические данные, хранящиеся в базе данных SQL, которые будут обрабатываться методами машинного обучения для прогнозирования засух. В качестве инструмента реализации будет разработана веб-система, осуществляющая прогнозирование засух на основе климатических данных, а также обеспечивающая их сбор, обработку, анализ и визуализацию. Полученные результаты будут иметь практическую ценность для управления рисками и планирования в сельском хозяйстве.

В целом, для повышения надежности прогнозирования засух необходим комплексный подход, включающий гибридные модели, адаптивные системы обработки данных, а также интеграцию научных инструментов прогнозирования с системами поддержки принятия решений для конечных пользователей. Это обеспечивает научную новизну работы и её практическую значимость для устойчивого развития аграрного сектора и эффективного управления водными ресурсами.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено без стороннего финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы благодарят научных руководителей.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. При подготовке рукописи инструменты генеративного искусственного интеллекта не использовались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Указ Президента Республики Казахстан К.-Ж. Токаева от 6 января 2026 года «О проведении 2026 года Годом цифровизации и искусственного интеллекта в Республике Казахстан». URL: <https://www.akorda.kz/ru/legal Acts>
- Osman A.I.A., AlDahoul N., Chong K.L., Huang Y.F., Ng J.L., Elshafie A., Sherif M., Ahmed A.N. (2025) A review on machine learning models for drought monitoring and forecasting. *Climate Risk Management*, 50, 100758. doi:10.1016/j.crm.2025.100758.
- Hao Z., Yuan X., Xia Y., Hao F., Singh V.P. (2017) An overview of drought monitoring and prediction systems at regional and global scales. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98(9):1879–1896. doi:10.1175/BAMS-D-15-00149.1.
- Liu C., Yang C., Yang Q., Wang J. (2021) Spatiotemporal drought analysis by the SPI and SPEI in Sichuan Province, China. *Nat. Hazards*, 106(3):1381–1400. doi:10.1007/s11069-021-04630-4.
- Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I. (2010) A multiscalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *J. Climate*, 23(7):1696–1718.
- Magno R., Angeli L., Chiesi M., Pasqui M. (2014) Prototype of a drought monitoring and forecasting system for the Tuscany region. *Adv. Sci. Res.*, 11, 7–10. doi:10.5194/asr-11-7-2014.
- Wilhite D.A., Glantz M.H. (1985) Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water Int.*, 10(3):111–120.
- National Drought Mitigation Center (2023) Types of Drought. University of Nebraska–Lincoln. URL: <https://drought.unl.edu/Education/DroughtIn-depth/TypesofDrought.aspx> (дата обращения: 01.06.2025).
- Hayes M.J. (2023) Standardized Precipitation Index (SPI). *Climate Data Guide*, NCAR. URL: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-index-sp>.
- Hayes M.J. (2023) Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). *Climate Data Guide*, NCAR. URL: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-evapotranspiration-index-spei>
- Palmer W.C. (1965) Meteorological Drought. U.S. Weather Bureau, Research Paper No. 45.
- Google Notebook LM. (2026). [Онлайн-платформа для интерактивного анализа данных и машинного обучения]. Google. URL: <https://notebooklm.google.com/>

АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С БОРТОВЫМ ПОВОРОТОМ

УДК 621.8

А.Н.Скоснягин^{1*}, Ю.В. Ворогушин^{1*}, А.Т.Кадыролдина²

¹Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

²Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Алексей Николаевич Скосягин, e-mail: skosnyagin.al@edu.ektu.kz

АННОТАЦИЯ. В статье рассматривается аппаратное обеспечение мобильного робота с бортовым поворотом, предназначенного для проведения экспериментальных исследований в области управления движением и автономной навигации. Представлена структура робототехнической платформы, включающая четыре коллекторных редукторных электродвигателя JGB37-520 со встроенными энкодерами, драйверы Sabertooth 2x12, микроконтроллерную плату STM32F3DISCOVERY, модуль беспроводной связи LoRa E22-400T30D, а также интеллектуальную подсистему на базе стереокамеры ZED-2 и одноплатного компьютера NVIDIA Jetson Nano. Проведен анализ функционального назначения каждого компонента, обоснован их выбор с точки зрения технических характеристик, удобства интеграции и применимости в составе мобильной робототехнической системы. Особое внимание уделено разделению функций между низкоуровневым и высокоуровневым уровнями управления, что позволяет сочетать управление исполнительными механизмами в реальном времени с обработкой визуальных данных и реализацией автономных режимов работы. Рассмотрены преимущества и ограничения выбранных технических решений, включая особенности работы приводной системы, обработки сигналов энкодеров, организации радиосвязи и применения стереозрения.

Ключевые слова: мобильный робот, бортовой поворот, skid-steer, дифференциальное управление, робототехническая платформа, электродвигатели постоянного тока, энкодеры.

ВВЕДЕНИЕ

Мобильные робототехнические системы с бортовым поворотом (skid-steer robots) представляют собой класс колесных роботов, управление направлением движения которых осуществляется за счет разности скоростей вращения колес правой и левой стороны. Данный принцип управления позволяет отказаться от использования рулевых механизмов, что существенно упрощает конструкцию, повышает надежность и снижает стоимость системы. Такие роботы находят применение в задачах мониторинга, инспекции, логистики, а также в научных исследованиях. К преимуществам роботов с бортовым поворотом можно отнести простоту механической конструкции, высокую маневренность, возможность разворота на месте и хорошую проходимость. Однако данные системы имеют и ряд недостатков, включая проскальзывание колес при повороте, повышенные энергетические потери, а также усложнение математического описания движения вследствие нелинейных

эффектов взаимодействия колес с поверхностью.

Робот оснащен четырьмя коллекторными электродвигателями JGB37-520, по одному на каждом из четырех колес. Такая конфигурация обеспечивает независимое управление каждым приводом, что является ключевым требованием для реализации системы поворота с боковым смещением. Раздельное управление скоростью левого и правого колес обеспечивает высокую маневренность платформы, включая возможность разворота на месте без изменения геометрии шасси. Кроме того, использование отдельных двигателей повышает отказоустойчивость системы и упрощает реализацию алгоритмов управления движением.

Электродвигатели управляются двумя драйверами Sabertooth 2x12, каждый из которых обслуживает пару двигателей на одном колесе. Эти драйверы генерируют необходимые сигналы, управляют направлением вращения и регулируют скорость вращения двигателя. Ключевым преимуществом Sabertooth является поддержка последовательного интерфейса управления UART, что обеспечивает гибкую и масштабируемую архитектуру для взаимодействия с контроллером управления. Драйверы также имеют встроенные механизмы защиты, включая защиту от перегрузки по току и перегрева, что повышает надежность всей системы.

Центральным элементом системы управления является плата на базе микроконтроллера STM32 - STM32F3DISCOVERY, выполняющая низкоуровневые функции управления роботизированной платформой. Эта плата отвечает за генерацию управляющих сигналов для драйверов двигателей, обработку данных с энкодеров и реализацию алгоритмов управления скоростью и направлением. Считывание сигналов энкодеров предоставляет информацию о текущей скорости вращения колес и пройденном расстоянии, что является основой для построения систем управления с обратной связью. Обмен данными с периферийными устройствами и внешними вычислительными модулями осуществляется через интерфейс UART, обеспечивая простую и надежную связь. Поскольку платформа предназначена для проведения экспериментальных исследований алгоритмов управления, в ее составе необходимо предусмотреть систему беспроводной связи с персональным компьютером оператора, обеспечивающая возможность отладки, настройки и мониторинга параметров функционирования системы. Для установления беспроводной связи между роботом и компьютером оператора используется модуль LoRa E22-400T30D. Этот модуль обеспечивает передачу данных на большие расстояния с низким энергопотреблением, что делает его эффективным решением для удаленного мониторинга и управления роботизированной системой. По этому каналу передаются команды управления с персонального компьютера, а также телеметрическая информация, включая параметры движения, состояние системы и диагностические данные.

Для автономной навигации роботизированной системы предполагается внедрение одноплатного компьютера NVIDIA Jetson Nano и стереокамеры ZED-2. Эта подсистема предназначена для поддержки автономной работы робота. Стереокамера ZED-2 захватывает изображения окружающей среды и генерирует карту глубины, предоставляя пространственную информацию о положении объектов. Одноплатный компьютер Jetson Nano обрабатывает поступающие данные с помощью алгоритмов компьютерного зрения и методов искусственного интеллекта, включая обнаружение и классификацию объектов, оценку расстояния и картирование окружающей среды. На основе полученной информации генерируются управляющие сигналы, которые передаются на микроконтроллер STM32 для последующего выполнения.

Таким образом, рассматриваемая система представляет собой многоуровневую архитектуру, включающую низкоуровневый уровень управления исполнительными механизмами и высокоуровневый уровень обработки данных и принятия решений,

обеспечивающий как дистанционное, так и автономное управление роботом.

Цель данной статьи состоит как в анализе рассматриваемой роботизированной системы, так и во всестороннем обосновании выбора ее основных компонентов с точки зрения функциональности, эффективности и применимости в мобильной робототехнике. В данной работе представлен подробный анализ структуры системы, принципов взаимодействия ее элементов, а также анализ преимуществ и ограничений выбранных технических решений. Кроме того, определяется специфика интеграции аппаратных компонентов в единую систему и оценка их влияния на характеристики робота, такие как маневренность, точность управления и возможность реализации автономных режимов.

Далее будут последовательно рассмотрены основные аппаратные компоненты системы, их функциональное назначение, технические особенности и роль в обеспечении эффективной работы мобильной робототехнической платформы.

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ JGB37-520

Мобильная роботизированная платформа использует в качестве приводов коллекторные редукторные электродвигатели JGB37-520, по одному на каждое колесо. Этот тип двигателей получил широкое распространение в мобильной робототехнике благодаря выгодному сочетанию компактных размеров, достаточного крутящего момента и доступной цены. Использование четырех независимых приводов обеспечивает систему управления с помощью поворота, в которой направление движения контролируется изменением скорости вращения левого и правого колес. Такая архитектура обеспечивает высокую маневренность платформы и возможность разворота на месте.

Двигатели JGB37-520 представляют собой электромеханические узлы, состоящие из коллекторного двигателя постоянного тока и встроенного редуктора. Редуктор значительно увеличивает выходной крутящий момент при относительно низких скоростях вращения, что особенно важно для мобильных платформ, работающих в ограниченном пространстве и при преодолении сопротивления. Кроме того, редуктор способствует более эффективному использованию энергии, поскольку двигатель работает на более оптимальной скорости и нагрузке. Это делает эти двигатели энергоэффективным решением для компактных роботизированных систем.

Дополнительные преимущества двигателей JGB37-520 включают стабильную работу при различных нагрузках, относительно низкий уровень шума, простоту управления и совместимость с широким спектром драйверов двигателей. Ещё одним важным фактором является наличие различных передаточных чисел, позволяющих выбрать оптимальные характеристики для конкретных задач, балансируя скорость и крутящий момент. Простая конструкция коллекторного двигателя облегчает его интеграцию в систему управления и снижает требования к аппаратному обеспечению по сравнению с более сложными типами приводов, такими как бесщеточные двигатели.

Одной из ключевых особенностей этих двигателей являются встроенные оптические энкодеры, обеспечивающие обратную связь по скорости и направлению вращения. Оптический энкодер генерирует импульсные сигналы на основе прерывания светового луча, проходящего через щелевой диск, прикрепленный к валу двигателя. Это позволяет определять направление и угловую скорость вращения и оценивать пройденное расстояние, что является необходимым условием для реализации систем управления с обратной связью, включая системы стабилизации скорости и траектории.

Использование оптических энкодеров, несмотря на их высокую точность и чувствительность, сопряжено с рядом проблем и технических трудностей. Во-первых,

такие энкодеры чувствительны к внешним воздействиям, включая загрязнения (пыль, масло), что может привести к искажению или потере сигнала. Во-вторых, они требуют корректной обработки высокочастотных импульсных сигналов, особенно при увеличении скорости вращения двигателя. Это предъявляет повышенные требования к микроконтроллеру и его периферийным устройствам, в частности к таймерам и прерываниям. Кроме того, при работе с оптическими энкодерами необходимо учитывать возможные помехи и дребезг сигнала, что требует реализации программной или аппаратной фильтрации. Еще одним важным аспектом является правильная интерпретация сигналов с двух каналов (квадратурный энкодер), позволяющая определить направление вращения. Ошибки в обработке этих сигналов могут привести к накоплению ошибок в оценке положения, что негативно сказывается на точности управления роботом.

Поэтому использование двигателей JGB37-520 с редукторами и встроенными оптическими энкодерами обеспечивает необходимый уровень крутящего момента, энергоэффективности и точности измерения параметров движения. Однако успешная реализация системы управления требует учета рабочих характеристик энкодера и корректной обработки его сигналов на уровне контроллера.

ДРАЙВЕРЫ ДВИГАТЕЛЕЙ SABERTOOTH 2X12

Для управления электродвигателями мобильной робототехнической платформы используются драйверы Sabertooth 2x12, представляющие собой специализированные силовые модули для управления двигателями постоянного тока. Данные драйверы обеспечивают формирование управляющих сигналов, необходимых для регулирования скорости и направления вращения двигателей, а также выполняют функции защиты и стабилизации работы приводной системы. Благодаря высокой надежности и широким функциональным возможностям, драйверы данного типа широко применяются в робототехнических и автоматизированных системах.

Каждый драйвер Sabertooth 2x12 способен управлять двумя электродвигателями, что позволяет эффективно использовать два таких устройства для раздельного управления левым и правым бортами мобильной платформы, что и предполагается делать. Подобное распределение нагрузки обеспечивает более удобную реализацию алгоритмов дифференциального управления, а также повышает отказоустойчивость системы: в случае выхода из строя одного драйвера сохраняется частичная работоспособность робота. Кроме того, такая архитектура упрощает масштабирование системы и её модификацию.

Одним из ключевых преимуществ драйверов Sabertooth является поддержка нескольких режимов управления, включая аналоговый, RC (радиуправление), упрощённый последовательный режим (Simplified Serial) и пакетный последовательный режим (Packetized Serial). В рассматриваемой системе используется режим (Packetized Serial) через последовательный интерфейс UART, который обеспечивает удобную интеграцию с микроконтроллером STM32 и позволяет реализовать точное цифровое управление двигателями. Пакетный режим управления дополнительно обеспечивает адресацию устройств и контроль целостности передаваемых данных, что повышает надёжность обмена информацией.

Драйверы Sabertooth 2x12 используют импульсную широтно-модулированную (ШИМ) технологию управления, позволяющую эффективно регулировать мощность, подаваемую на двигатель. Это обеспечивает плавное изменение скорости, снижает тепловые потери и повышает энергетическую эффективность системы. В отличие от линейных регуляторов, ШИМ-управление позволяет значительно уменьшить энергопотребление и нагрев силовых элементов, что особенно важно при длительной

работе мобильного робота.

Также преимуществом данных драйверов является наличие встроенных механизмов защиты, включая защиту от перегрузки по току, короткого замыкания, перегрева и пониженного напряжения питания. Эти функции позволяют предотвратить повреждение как самих драйверов, так и подключенных двигателей, а также обеспечивают стабильную работу системы в различных эксплуатационных условиях. Кроме того, драйверы обладают функцией рекуперации энергии (regenerative braking), при которой энергия, возникающая при торможении двигателя, возвращается в источник питания, что дополнительно повышает энергоэффективность системы.

Но при использовании данных драйверов следует учитывать особенности работы последовательного интерфейса, включая ограничения на диапазон передаваемых значений и необходимость формирования корректных управляющих пакетов. При высоких скоростях обмена данными возможно возникновение ошибок передачи, что требует реализации программных механизмов контроля и обработки ошибок на стороне микроконтроллера.

Как итог, драйверы Sabertooth 2x12 являются эффективным и надежным выбором для управления электродвигателями в мобильных робототехнических системах. Их использование позволяет реализовать гибкую архитектуру управления, обеспечить высокую энергетическую эффективность и повысить устойчивость системы к внешним воздействиям и отказам отдельных компонентов.

КОНТРОЛЛЕР STM32F3DISCOVERY

В качестве центрального элемента управления мобильной робототехнической платформой используется микроконтроллерная плата STM32F3DISCOVERY, представляющая собой отладочную платформу на базе микроконтроллера семейства STM32. Данный микроконтроллер обладает достаточной вычислительной мощностью для решения задач управления движением, обработки сигналов датчиков и организации обмена данными с периферийными устройствами, что делает его эффективным и сбалансированным решением для данной робототехнической задачи.

К ключевым преимуществам можно отнести наличие широкого набора встроенных периферийных интерфейсов, необходимых для реализации функций управления. В частности, используются аппаратные таймеры для обработки сигналов с энкодеров в режиме квадратурного декодирования, интерфейсы UART для взаимодействия с драйверами двигателей и внешними модулями связи, а также дополнительные интерфейсы (SPI, I2C, ADC), которые могут быть задействованы при расширении функциональности системы. Наличие аппаратной периферии позволяет разгрузить центральное ядро микроконтроллера и повысить эффективность обработки данных в реальном времени.

Микроконтроллер возлагает на себя функции низкоуровневого управления системой. Он формирует управляющие сигналы для драйверов Sabertooth 2x12, обеспечивая регулирование скорости и направления вращения двигателей. Одновременно осуществляется считывание сигналов с энкодеров, установленных на валах двигателей, что позволяет получать информацию о текущем состоянии приводов. На основе этих данных реализуются алгоритмы обратной связи, обеспечивающие стабилизацию скорости, синхронизацию движения колес и выполнение заданных траекторий.

Также стоит обратить внимание на использование именно отладочной платы STM32F3DISCOVERY, а не отдельного микроконтроллера. Отладочная плата существенно упрощает процесс разработки и интеграции системы за счёт наличия

готовой схемотехники, встроенного программатора/отладчика (ST-LINK), а также удобного доступа ко всем выводам микроконтроллера. Это позволяет ускорить процесс прототипирования, упростить подключение периферийных устройств и снизить вероятность ошибок на этапе аппаратной реализации.

Кроме того, использование отладочной платы обеспечивает гибкость при внесении изменений в систему, что особенно важно в условиях экспериментальной робототехники. Возможность быстрого перепрограммирования, отладки в реальном времени и мониторинга внутренних параметров микроконтроллера позволяет эффективно тестировать различные алгоритмы управления и корректировать параметры системы без необходимости переработки аппаратной части.

При интеграции STM32F3DISCOVERY в состав робототехнической платформы учитываются и особенности работы в режиме реального времени. В частности, требуется корректная организация обработки прерываний, связанных с энкодерами, а также синхронизация обмена данными по последовательным интерфейсам. Неправильная настройка приоритетов прерываний или задержки в обработке данных могут приводить к ухудшению качества управления, особенно при высоких скоростях движения робота.

Применение отладочной платы STM32F3DISCOVERY в качестве центрального элемента управления призвано обеспечить надежное и эффективное управление мобильной платформой, сочетая достаточную вычислительную мощность, широкий набор периферийных интерфейсов и удобство разработки.

МОДУЛЬ СВЯЗИ LORA E22-400T30D

Для организации беспроводного взаимодействия между мобильной робототехнической платформой и персональным компьютером оператора в рассматриваемой системе используется радиомодуль LoRa E22-400T30D. Данный модуль реализует технологию LoRa (Long Range), предназначенную для передачи данных на значительные расстояния при низком энергопотреблении и высокой помехоустойчивости, что делает его эффективным решением для робототехнических систем, работающих вне локальных сетей. Выбор радиосвязи на основе технологии LoRa обусловлен рядом позитивных свойств по сравнению с традиционными беспроводными интерфейсами, такими как Wi-Fi или Bluetooth. В частности, LoRa обеспечивает значительно большую дальность передачи данных — от сотен метров в условиях городской застройки до нескольких километров на открытой местности. Это особенно важно для мобильных робототехнических систем, которые могут эксплуатироваться в условиях, где отсутствует стабильная инфраструктура беспроводных сетей. Кроме того, технология LoRa обладает высокой устойчивостью к помехам благодаря использованию методов расширения спектра, что обеспечивает надежную передачу данных даже в условиях зашумленной радиосреды.

Модуль E22-400T30D характеризуется высокой выходной мощностью передатчика (до 1 Вт), что дополнительно увеличивает дальность и стабильность связи. Он поддерживает гибкую настройку параметров передачи, включая скорость передачи данных, мощность сигнала, частотный канал и режимы работы, что позволяет адаптировать систему под конкретные условия эксплуатации. Также модуль обеспечивает возможность адресной передачи данных, что может быть использовано при построении более сложных распределенных систем.

В рассматриваемой архитектуре модуль LoRa подключается к центральному контроллеру STM32F3DISCOVERY посредством интерфейса UART. Такой способ интеграции обеспечивает простоту аппаратной реализации и удобство программного взаимодействия. На стороне оператора используется аналогичный модуль LoRa E22-400T30D, подключенный к персональному компьютеру через преобразователь

интерфейса USB–TTL. Это позволяет организовать двусторонний канал передачи данных между роботом и ПК без необходимости использования сетевой инфраструктуры.

На уровне программного обеспечения предполагается разработка специализированного приложения, обеспечивающего визуализацию телеметрических данных и реализацию ручного управления роботом. Через радиоканал передаются команды управления, такие как задания скорости и направления движения, а также диагностическая информация, включая текущие значения параметров системы (скорости колес, токи, состояние датчиков и др.). Это позволяет оператору в реальном времени контролировать работу робототехнической платформы и при необходимости корректировать её поведение.

В свою очередь, использование радиосвязи на основе LoRa имеет ряд особенностей и ограничений, которые необходимо учитывать при проектировании системы. Прежде всего, технология LoRa ориентирована на передачу небольших объемов данных с относительно низкой скоростью. Это делает её малоприменимой для передачи потоковых данных, таких как видеосигнал, и ограничивает использование в задачах, требующих высокой пропускной способности канала. Кроме того, при увеличении дальности связи возрастает задержка передачи данных, что может оказывать влияние на качество управления в режиме реального времени. Также возможны потери пакетов данных, особенно в условиях сложной радиосреды или при неправильной настройке параметров передачи. Это требует реализации дополнительных механизмов контроля целостности данных и повторной передачи сообщений на уровне протокола. Отдельным аспектом является необходимость правильной настройки радиомодуля, включая выбор частотного диапазона, мощности передатчика и параметров модуляции. Неправильная конфигурация может привести к ухудшению качества связи или даже полной потере соединения. Также следует учитывать требования к антеннам и их размещению, так как от этого напрямую зависит эффективность радиоканала.

Таким образом, использование модуля LoRa E22-400T30D позволяет реализовать надежную и дальнобойную систему беспроводной связи между роботом и оператором, что является важным элементом экспериментальной робототехнической платформы. При этом успешная эксплуатация данной технологии требует учета ее особенностей, связанных с ограниченной скоростью передачи данных и необходимостью корректной настройки параметров связи.

СТЕРЕОКАМЕРА ZED-2

В качестве основного сенсора визуального восприятия окружающей среды в робототехнической системе используется стереокамера ZED-2, предназначенная для получения как двумерных изображений, так и информации о глубине сцены. Применение стереозрения является одним из ключевых решений в данном проекте, так как окончательное его целью является построение автономной системы траекторного следования.

Стереокамера ZED-2 конструктивно включает в себя два синхронизированных оптических модуля (камеры), расположенных на фиксированном расстоянии друг от друга (базе). Принцип её работы основан на бинокулярном зрении, аналогичном человеческому: каждая камера фиксирует изображение сцены с немного отличающейся точки зрения. На основе различий (диспаратности) между соответствующими точками на двух изображениях вычисляется расстояние до объектов.

Процесс получения глубинной информации включает несколько этапов. На первом этапе осуществляется синхронный захват изображений с левой и правой

камер. Далее выполняется процедура калибровки и выравнивания изображений (rectification), в результате чего соответствующие точки на обоих изображениях располагаются на одних горизонтальных линиях. Это существенно упрощает дальнейший поиск соответствий между пикселями. На следующем этапе выполняется сопоставление изображений (stereo matching), в ходе которого для каждого пикселя одного изображения ищется соответствующий пиксель на втором изображении. Разность координат этих пикселей (диспаратность) обратно пропорциональна расстоянию до объекта. На основе вычисленной диспаратности формируется карта глубины (depth map), представляющая собой матрицу расстояний до наблюдаемых точек сцены.

Полученная карта глубины может быть преобразована в облако точек (point cloud), представляющее трёхмерную модель окружающего пространства. Это позволяет роботу не только определять расстояние до объектов, но и строить геометрическую структуру сцены, что является основой для задач навигации и построения карт (SLAM - Simultaneous Localization and Mapping).

Данная модель камеры обладает встроенной поддержкой аппаратного ускорения и интеграцией с современными библиотеками компьютерного зрения. Она позволяет получать данные в реальном времени, включая RGB-изображения, карты глубины, облака точек, а также данные о положении камеры в пространстве (visual odometry). Это существенно упрощает разработку алгоритмов автономного управления и снижает вычислительную нагрузку на внешние устройства.

В рассматриваемой робототехнической системе камера ZED-2 используется в составе интеллектуальной подсистемы совместно с одноплатным компьютером NVIDIA Jetson Nano. Камера передает видеопоток и данные о глубине на вычислительный модуль, где осуществляется их дальнейшая обработка. На основе этих данных реализуются алгоритмы компьютерного зрения, включая обнаружение и классификацию объектов, определение расстояний до препятствий и анализ окружающей среды. Использование стереокамеры позволяет отказаться от дополнительных датчиков расстояния, таких как ультразвуковые или инфракрасные сенсоры, и получить более полную и точную информацию о пространстве. Это особенно важно при реализации автономных режимов движения, где требуется учитывать не только наличие препятствий, но и их форму, размеры и расположение.

В свою очередь, применение стереокамеры связано с рядом особенностей и ограничений. В частности, точность определения глубины существенно зависит от условий освещения и текстуры поверхности объектов. Однородные или плохо освещённые поверхности могут затруднять процесс сопоставления изображений и приводить к ошибкам в карте глубины. Кроме того, вычисление диспаратности является ресурсоёмкой задачей, что требует использования достаточно мощных вычислительных средств. Также необходимо учитывать, что точность измерения расстояния снижается с увеличением дистанции до объекта, что связано с уменьшением диспаратности. Это накладывает ограничения на использование стереокамер в задачах, требующих высокой точности на больших расстояниях.

ОДНОПЛАТНЫЙ КОМПЬЮТЕР NVIDIA JETSON NANO

В составе робототехнической платформы используется одноплатный компьютер NVIDIA Jetson Nano, представляющий собой компактный вычислительный модуль, оптимизированный для задач обработки изображений и реализации алгоритмов искусственного интеллекта. Данное устройство выступает в роли высокоуровневого вычислительного узла, обеспечивающего анализ данных с сенсоров и формирование управляющих воздействий в автономном режиме работы робота.

Аппаратная архитектура Jetson Nano включает центральный процессор (CPU) и

графический процессор (GPU) с поддержкой технологии CUDA, что позволяет эффективно выполнять параллельные вычисления. Это особенно важно для задач компьютерного зрения и нейросетевой обработки, где требуется обработка больших объемов данных в реальном времени. Поддержка специализированных библиотек, таких как CUDA, cuDNN и TensorRT, делает данный модуль удобной платформой для реализации современных алгоритмов машинного обучения и глубинного обучения.

Стереокамера ZED-2 подключается к Jetson Nano через высокоскоростной интерфейс USB 3.0, обеспечивающий передачу видеопотока и сопутствующих данных с минимальными задержками. В процессе работы камера передает на одноплатный компьютер несколько типов данных, включая цветные изображения (RGB), карту глубины (depth map), а также облако точек (point cloud), представляющее трёхмерную структуру сцены. Дополнительно могут передаваться данные визуальной одометрии, позволяющие оценивать перемещение камеры в пространстве.

На стороне Jetson Nano осуществляется комплексная обработка поступающих данных. В первую очередь выполняется предобработка изображений, включающая фильтрацию, коррекцию и нормализацию. Далее применяются алгоритмы компьютерного зрения, такие как обнаружение объектов, сегментация сцены и отслеживание движущихся объектов. Для этих целей могут использоваться нейросетевые модели, обученные на специализированных наборах данных.

Одной из ключевых задач, решаемых на Jetson Nano, является анализ окружающей среды и принятие решений о дальнейшем движении робота. На основе карты глубины и результатов распознавания объектов формируется представление о препятствиях и свободном пространстве. Это позволяет реализовать алгоритмы обхода препятствий, планирования траектории и стабилизации движения. В более сложных сценариях возможно применение методов SLAM для одновременного построения карты и локализации робота.

После обработки данных и формирования управляющих решений Jetson Nano передает команды на центральный контроллер системы - плату STM32F3DISCOVERY. Обмен осуществляется по последовательному интерфейсу UART, что обеспечивает простую и надежную интеграцию между уровнями системы. Передаваемые команды могут включать задания скорости движения, направления, а также корректирующие воздействия для стабилизации траектории.

Важно отметить, что в данной архитектуре реализовано разделение функций между вычислительными уровнями. Jetson Nano выполняет ресурсоёмкие задачи анализа данных и принятия решений, тогда как STM32 отвечает за низкоуровневое управление исполнительными механизмами и работу в реальном времени. Такой подход позволяет оптимизировать нагрузку на систему и повысить ее общую эффективность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы была рассмотрена аппаратная реализация мобильной робототехнической платформы с бортовым поворотом, ориентированной на проведение экспериментальных исследований в области алгоритмов управления и автономной навигации. Проведённый анализ показал, что выбранная архитектура системы, основанная на разделении функций между низкоуровневым и высокоуровневым уровнями управления, является обоснованной и эффективной для решения поставленных задач.

Использование коллекторных редукторных электродвигателей JGB37-520 с встроенными оптическими энкодерами обеспечивает необходимый уровень крутящего момента и позволяет реализовать замкнутые системы управления с обратной связью. В свою очередь, драйверы Sabertooth 2x12 обеспечивают надежное

и энергоэффективное управление приводами, а также повышают устойчивость системы к внешним воздействиям благодаря встроенным механизмам защиты.

Применение микроконтроллерной платы STM32F3DISCOVERY в качестве центрального элемента низкоуровневого управления позволяет эффективно решать задачи обработки сигналов, формирования управляющих воздействий и организации обмена данными. Использование отладочной платформы существенно упрощает процесс разработки и интеграции системы, что особенно важно в условиях экспериментальной робототехники.

Реализация беспроводной связи на базе технологии LoRa и модуля E22-400T30D обеспечивает надежный канал передачи данных между роботом и оператором на значительные расстояния. Несмотря на ограничения по скорости передачи данных, данный подход является оптимальным для задач телеметрии и дистанционного управления, особенно в условиях отсутствия развитой сетевой инфраструктуры.

Введение в систему интеллектуальной подсистемы на базе стереокамеры ZED-2 и одноплатного компьютера NVIDIA Jetson Nano позволяет перейти от дистанционного управления к автономному режиму функционирования. Использование методов компьютерного зрения и алгоритмов обработки пространственных данных открывает возможности для реализации задач распознавания объектов, построения карты окружающей среды и планирования траектории движения.

Вместе с тем, в ходе анализа выявлен ряд технических и инженерных задач, требующих дальнейшей проработки. К ним относятся проблемы, связанные с проскальзыванием колес и влиянием этого эффекта на точность управления, необходимость фильтрации и корректной обработки сигналов с оптических энкодеров, а также обеспечение устойчивой и своевременной передачи данных в условиях ограниченной пропускной способности радиоканала. Дополнительную сложность представляет интеграция высокоуровневых алгоритмов обработки изображений с системой реального времени, реализованной на микроконтроллере. Требуется разработка эффективных протоколов взаимодействия между вычислительными уровнями, обеспечивающих минимальные задержки и высокую надежность передачи управляющих команд. Также необходимо учитывать вычислительные ограничения одноплатного компьютера и оптимизировать алгоритмы компьютерного зрения для работы в реальном времени.

Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка и внедрение алгоритмов траекторного управления, в том числе с использованием методов прогнозирующего управления (MPC), а также совершенствование системы локализации и навигации робота.

Дополнительно планируется разработка программного обеспечения для визуализации данных и управления системой, что позволит повысить удобство эксплуатации и расширить функциональные возможности платформы.

Таким образом, предложенная аппаратная архитектура является гибкой, масштабируемой и пригодной для проведения дальнейших исследований в области мобильной робототехники. Она обеспечивает необходимую основу для разработки и тестирования современных алгоритмов управления и автономного поведения, а также может быть использована в качестве платформы для последующего развития и усложнения системы. Особое внимание следует уделить научной новизне и вкладу исследования в развитие соответствующей области знаний. Уместно указать, какие теоретические или методологические выводы были сделаны, и как они могут быть полезны научному сообществу или профессиональной практике.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы благодарят своих научных руководителей.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. При подготовке рукописи инструменты генеративного искусственного интеллекта не использовались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Aslong Motor. (n.d.). JGB37-520 Datasheet. <https://c1555f5ec9.clvawcdnwnd.com/34662fcf1f1e607c561442431023ac8/200013049-b3a11b3a13/JGB37-520%20Datasheet.pdf>
- Dimension Engineering. (n.d.). Sabertooth 2x12 User's Guide. <https://www.dimensionengineering.com/datasheets/Sabertooth2x12.pdf>
- STMicroelectronics. (2023). UM1570: Discovery kit with STM32F303VC MCU. https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1570-discovery-kit-with-stm32f303vc-mcu-stmicroelectronics.pdf
- Chengdu Ebyte Electronic Technology Co., Ltd. (2023). Техническое описание продукта E22-400TXXX. <https://www.cdebyte.com/pdf-down.aspx?id=2179>
- NVIDIA. (2019). Руководство пользователя комплекта разработчика Jetson Nano. https://developer.nvidia.com/embedded/dlc/jetson_nano_developer_kit_user_guide
- Stereolabs. (2020). Техническое описание ZED 2. <https://www.stereolabs.com/datasheets>
- Ван, Дж., Лю, З., Чен, Х., Чжан, Ю., Чжан, Д., и Пэн, Ч. (2024). Управление отслеживанием траектории мобильного робота с поворотным механизмом на основе нелинейного модельного прогнозирующего управления. Прикладные науки, 14(1), 122. <https://doi.org/10.3390/app14010122>
- Логанатан, А., и Ахмад, Н. С. (2023). Систематический обзор последних достижений в области автономной навигации мобильных роботов. Engineering Science and Technology, an International Journal, 40, 101343. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101343>
- Мюррей, Д., и Литтл, Дж. Дж. (2000). Использование стереоскопического зрения в реальном времени для навигации мобильных роботов. Autonomous Robots, 8(2), 161–171. <https://doi.org/10.1023/A:1008987612352>
- Шамшири, Р. Р., Навас, Э., Дворак, В., Шютте, Т., Вельтциен, К., и Аюат Чиин, Ф. А. (2024). Интернет роботизированных вещей с локальной сетью LoRa для телеуправления сельскохозяйственным мобильным роботом с использованием цифровой тени. Discover Applied Sciences, 6(8), статья 414. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06106-7>
- Сарвайч, К., Ари, Л., и Менихарт, Дж. (2024). Искусственный интеллект на дороге: система компьютерного зрения на базе NVIDIA Jetson Nano для обнаружения пешеходов и знаков приоритета в реальном времени. Прикладные науки, 14(4), 1440. <https://doi.org/10.3390/app14041440>

КӨЛІК ЖҮРГІЗУШІСІНІҢ ЕСІНЕУІН АНЫҚТАУ ҮШІН КОНВОЛЮЦИЯЛЫҚ НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІ МОДЕЛІН ҚОЛДАНУ

ӨОЖ 004.04

Б.С. Смақанов^{1*}, И.М. Увалиева¹

¹Д.Серікбаев атындағы ШҚТУ, Өскемен, Қазақстан

* Корреспондент-автор: Смақанов Бауыржан Серікқанұлы, e-mail:

bauka.10.10@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Мақалада көлік жүргізушісінің есінеу күйін автоматты түрде анықтау мәселесі қарастырылады. Бұл күй – шаршау мен зейіннің төмендеуінің негізгі мінез-құлықтық көрсеткіштерінің бірі болып табылады. Зерттеудің өзектілігі жүргізушінің шаршау белгілерін ерте кезеңде анықтау арқылы жол қауіпсіздігін арттыру қажеттілігімен түсіндіріледі, бұл интеллектуалды мониторинг жүйелерінде маңызды болып табылады. Зерттеудің мақсаты – жүргізушінің бет бейнесінен есінеу күйін тану үшін конволюциялық нейрондық желі моделін әзірлеу және зерттеу. Негізгі әдіс ретінде компьютерлік көру тәсілі қолданылып, алдымен ауыз аймағы анықталады, содан кейін бейнелер «есінеу» және «есінеу жоқ» кластарға бинарлы түрде жіктеледі. Ғылыми жаңалығы – дәстүрлі әдістермен салыстырғанда (ауыз аймағының геометриялық белгілеріне негізделген) есінеуді анықтаудың тұрақтылығын арттыру үшін конволюциялық нейрондық желіні қолдану. Практикалық маңызы – әзірленген алгоритмді нақты уақыттағы жүргізушінің жағдайын мониторинг жүйелеріне интеграциялау мүмкіндігі, бұл шаршауды уақтылы ескертіп, жол-көлік оқиғаларының тәуекелін төмендетуге мүмкіндік береді.

Алынған нәтижелер нейрондық желілер әдістерін жүргізушінің интеллектуалды жағдайын талдауда қолданудың перспективалы екенін растайды.

Түйінді сөздер: жүргізушінің жағдайын мониторингтеу, жүргізушінің есінеуі, жүргізушінің шаршауы, компьютерлік көру, конволюциялық нейрондық желі, CNN, шаршауды анықтау, интеллектуалды транспорттық жүйелер.

КІРІСПЕ

Жол-көлік оқиғалары (ЖКО) әлі де болса жол қауіпсіздігі саласындағы ең өткір жаһандық мәселелердің бірі болып қала береді. Жыл сайын әлемде мыңдаған адамдар адам факторының салдарынан, соның ішінде жүргізушінің зейінінің төмендеуі, шаршауы және руде ұйықтап кетуі нәтижесінде қаза тауып немесе ауыр жарақат алады. Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымының мәліметтері бойынша, орташа қозғалыс жылдамдығының тек 1% өсуі өліммен аяқталатын апаттардың санының 4%-ға, ауыр жарақаттармен аяқталатын апаттардың 3%-ға өсуіне әкеледі. Қосымша қауіп – жүргізушінің ұйқышылдық және шаршау жағдайы, ол апаттық жағдайлардың пайда болу тәуекелін айтарлықтай арттырады. Осыған байланысты жүргізушінің шаршау белгілерін ерте кезеңде анықтауға бағытталған зерттеулер интеллектуалды транспорттық жүйелер аясында өзекті ғылыми және қолданбалы мәселе болып табылады [1].

Шаршаудың бір тән мінез-құлықтық белгісі – есінеу, ол жүргізушінің зейінінің төмендеуінің және психофизиологиялық жағдайының нашарлауының ерте көрсеткіші ретінде қарастырылуы мүмкін. Қазіргі жүргізушінің жағдайын бақылау жүйелерінде қауіпті мінез-құлық белгілері, оның ішінде көздің қимылы, ұзақ уақыт көздің жабылуы, бас күйінің өзгеруі, көзқарас бағыты және есінеу талданады. Аталған белгілердің ішінде есінеу ерекше қызығушылық тудырады, себебі ол инвазивті емес және

визуалды түрде бақыланатын шаршау маркері болып табылады, әрі нақты уақыт режимінде компьютерлік көру әдістерімен автоматты түрде анықтауға ыңғайлы.

Track A: Student Research шеңберінде аталған жұмыс көлік жүргізушісінің есінеу күйін конволюциялық нейрондық желі негізінде автоматты анықтау әдісін зерттеуге және әзірлеуге бағытталған. Зерттеудің мақсаты – жүргізушінің бет бейнесі бойынша «есінеу / есінеу жоқ» күйін бинарлы түрде жіктейтін алгоритмді құру. Мақсатқа жету үшін келесі міндеттер шешіледі: бар тәсілдерді талдау, деректер жиынтығын қалыптастыру, CNN моделін құру және оның тиімділігін стандартты сапа метрикалары арқылы бағалау.

Ғылыми жаңалығы – ашық деректер көздерінен алынған біріктірілген деректер жиынтығы негізінде есінеуді тануға тұрақты нейрожелілік тәсілді әзірлеу болып табылады. Практикалық маңызы – ұсынылған алгоритмді жүргізушінің жағдайын мониторинг жүйелеріне интеграциялау мүмкіндігі, бұл шаршау белгілері туралы алдын ала ескертіп, жол қозғалысының қауіпсіздігін арттыруға мүмкіндік береді [2–4].

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Қазіргі кезде есінеуді анықтау әдістері екі негізгі категорияға бөлінеді:

1. Суреттерді компьютерлік өңдеу әдістері;
2. Машиналық оқыту алгоритмдері мен нейрондық желілерге негізделген әдістер.

Суреттерді компьютерлік өңдеу әдістері

Суреттерді компьютерлік өңдеу әдістері бет аймағының, әсіресе ауыз аймағының геометриялық, текстуралық және түстік белгілерін алу негізінде жұмыс істейді. [5] жұмыста есінеу белгілерін ауыз аймағының өлшемдерінің қатынасының өзгеруіне қарай анықтау әдісі ұсынылған. Ауыз шекарасы ерін арасындағы ең қараңғы аймақ бойынша анықталады, бұл аймақ адаптивті шектеу арқылы сегментацияланады.

Жүргізуші есінеу кезінде ауызын қолымен жартылай жауып алса, ауыз аймағының белгілерін алу және классификациялау үшін локалды бинарлық үлгілер операторы (Local Binary Patterns, LBP) қолданылады. Алынған белгілер нейрожелілік классификатор арқылы қосымша талданады. Ауызды қолмен жабу тек есінеуге байланысты екенін растау үшін бет жоғарғы бөлігіндегі өзгерістер, мысалы, әжімдердің пайда болуы, қосымша зерттеледі.

Осы әдіс шеңберінде ауыз өлшемдерінің шекті мәнін анықтау үшін тәжірибелер сериясы өткізілді. Шектен асқан жағдайда ауыз ашық деп тіркеледі, ал осы жағдай белгілі бір уақыт (3–5 секунд) сақталса, алгоритм оны есінеу деп интерпретациялайды. Егер ауыз ашықтығы шекті мәннен төмен болса, ауыз жабық деп есептеледі, содан кейін қолмен жабылу және бет жоғарғы бөлігіндегі деформациялар тексеріледі. Егер екі шарт та орындалса, есінеу күйі тіркеледі; әйтпесе, оның жоқтығы белгіленеді.

Есінеуді анықтаудың кең таралған тәсілдерінің бірі – ауыздың ашықтығын бірнеше секунд бойы бақылау. Бұл саладағы көптеген зерттеулер келесі схема бойынша жүргізіледі: алдымен бет детекторы іске қосылады, содан кейін бет аймақтары (ауыз, мұрын, көздер) локализацияланады, және есінеу күйін анықтауға мүмкіндік беретін белгілер талданады.

Бетті танудың ең кең тараған әдістерінің бірі – Viola–Jones алгоритмі [6, 7], ол OpenCV компьютерлік көру кітапханасында жүзеге асырылған [8] және Нааг каскадты детекторын қолдануға негізделген. Алайда бұл әдістің бірнеше елеулі кемшіліктері бар. Біріншіден, суреттің әртүрлі масштабтарында сырғып жүретін тереземен сканерлеу кезінде көптеген кандидаттардың арасынан бетті идентификациялау айтарлықтай есептеу жүктемесін қажет етеді. Екіншіден, каскадты детектор тек бас бұрылуы аз болғанда және камераның шектеулі көрініс ауқымында тиімді жұмыс істейді. Сонымен қатар, оның жұмысының сапасы сыртқы жағдайларға (жарықтандыру, шағылысу, көлеңке, бетінің жартылай немесе толық жабылуы) қатты

тәуелді. Мұндай жағдайларда детекция дәлдігі айтарлықтай төмендейді.

Машиналық оқыту және нейрондық желілерге негізделген әдістер

Соңғы жылдары суреттерді компьютерлік өңдеу әдістерін терең нейрондық желілермен біріктіретін тәсілдер кеңінен таралуда.

[9] жұмысында жүргізушінің шаршауы мен ұйқышылдығын екі белгі бойынша анықтау алгоритмі сипатталған: есінеу және көздің жабылуы. Ауыздың ашықтығын анықтау бет бейнесін талдау арқылы алынған тереңдік ақпаратын пайдалану арқылы жүзеге асырылады. Алғашқы кезеңде мұрын ұшының орны анықталып, одан кейін бет төменгі бөлігі қалған бейнеден бөлінеді. Содан кейін адаптивті маска, шекараларды анықтайтын детектор ретінде қызмет атқара отырып, ауыз аймағын шамамен 91% дәлдікпен локализациялайды. Дәлдікті арттыру үшін ауыз аймағын іздеудің екі әдісі қолданылады: бірі максималды тереңдікке, екіншісі — активті контур моделіне негізделген. Олардың бірігуі ауыздың ашықтығын анықтауда шамамен 95% дәлдікке жетуге мүмкіндік берді.

Бет жоғарғы бөлігін бөлгеннен кейін көз аймағы Viola–Jones алгоритмі арқылы анықталады. Кейін көздердің жағдайы (ашық/жабық) алдын ала оқытылған VGG (Visual Geometry Group) конволюциялық нейрондық желісін пайдаланып классификацияланады. Бұл кезде тек соңғы екі толық байланысты қабат және Softmax қабаты оқытылды, классификация дәлдігі шамамен 90% болды. Нейрондық желіге кіретін бейненің өлшемі 24×24 пиксель болды.

Көздің жабылу дәрежесін бағалау үшін PERCLOS (PERcentage of eye CLOSure) көрсеткіші қолданылды — бұл көздердің жабық болған уақытының үлесі. Зерттеуде PERCLOS шекті мәні 0,5 деп таңдалды, яғни 30 кадрдан 15 кадрда көз жабық болса, олар жабық деп есептелді. Екінші түрдегі қателерді (false negative) азайту үшін көздің жабылғаны тіркелген кадрлардың 20%-ын елемеу ұсынылды. Есінеу және көздің жабылуын анықтау нәтижелерін біріктіру негізінде жүргізушіге ескерту беру шешімі қабылданды.

Бұл тәсілдің негізгі артықшылығы - жарық өзгерістеріне аз сезімтал тереңдік ақпаратын пайдалану. Алайда алгоритм жүргізуші ауызын қолымен жауып немесе көзілдірік киген жағдайда тұрақсыз жұмыс істейді.

Ескерту керек, қазіргі заманғы есінеуді анықтау әдістерінің көпшілігі бір суретті талдауға негізделгендіктен жалған срабатыванияларға бейім, өйткені есінеу динамикалық әрекет болып табылады, статикалық күй емес. Осыған байланысты [25] жұмыста видеокадрларды «есінеп жатыр» және «есінеп жатқан жоқ» кластарға бинарлы классификациялайтын тәсіл ұсынылған. Классификатор ретінде ResNet-50 архитектурасына негізделген терең нейрондық желі қолданылған.

Жалпы талдау көрсеткендей, терең оқыту әдістері дәстүрлі компьютерлік көру әдістеріне қарағанда тұрақтылығы жоғары және жалпылау қабілеті жақсы. Дегенмен олардың тиімділігі көбінесе оқыту жиынтығының сапасы мен әртүрлілігіне байланысты.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Жүргізушінің ауыз ашықтығын анықтау мәселесін шешу аясында негізгі кіріс деректері ретінде көліктің кабинасына орнатылған бейнекамерадан алынатын нақты уақыттағы видеоақпарат қарастырылады. Видеопоток RGB форматында қалыптасып, онда жүргізушінің беті көлікті басқару процесінде түсіріледі. Мұндай тәсіл жүргізушінің жағдайын мониторингтеу жүйесін практикалық қолдануға сәйкес келеді, себебі талдау тікелей қозғалыс кезінде жүргізіле алады.

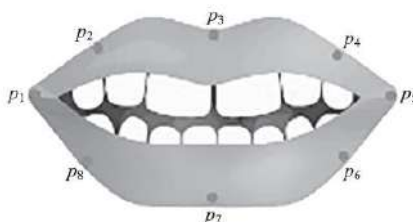
Алгоритмге кіріс ретінде үздіксіз видеопоток немесе борттық бақылау камерасынан алынған кадрлар тізбегі беріледі. Жүйенің конфигурациясына байланысты камера әртүрлі орындарға орнатылуы мүмкін: артқы көрініс айнасы

аймағында, автомобильдің алдыңғы панелінде немесе жүргізушінің алдында фронтальды түрде. Осы кезде кіріс бейнелерінің сапасы, жарықтандыру жағдайы, көру бұрышы, бет масштабы, көзілдіріктің болуы, жартылай жабылулар, сондай-ақ жүргізушінің бас бұрылу дәрежесі бойынша айтарлықтай әртүрлі болуы мүмкін. Аталған факторларды ауыз ашықтығын анықтайтын тұрақты алгоритм құру кезінде ескеру қажет.

Жүйенің дұрыс жұмыс істеуін қамтамасыз ету үшін видеопотоқтағы әрбір кадр алдын ала өңдеуден өтеді. Бұл кезеңде бейненің өңделетін аймағын азайту және фондық объектілердің әсерін төмендету мақсатында бет аймағы локализацияланады. Бетті бөлу әрі қарайғы талдауды тек релевантты аймаққа бағыттауға мүмкіндік береді, ол ауыз орналасуын анықтауға қажетті негізгі бет белгілерін қамтиды.

$$MAR = \frac{\|p_2 - p_8\| + \|p_3 - p_7\| + \|p_4 - p_6\|}{2 * \|p_1 - p_5\|} \quad (1)$$

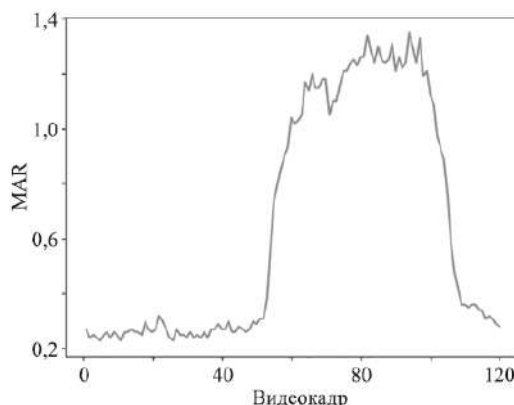
мұндағы p_1-p_8 — сурет 1-де көрсетілген бет белгілері, олардың орналасуы сәйкес келеді.



Сурет 1. Ауыз аймағы үшін бет белгілерінің орналасуы (MAR)

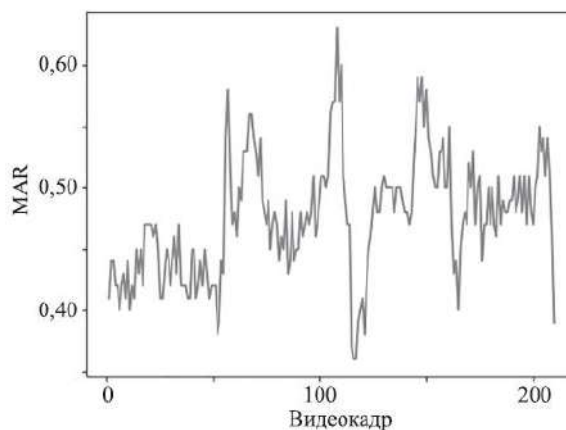
Эксперимент нәтижелері бойынша ауыздың ашықтығын анықтау үшін MAR көрсеткішінің шекті мәні 0,8 деп алынған. 2- суретте есінеу оқиғасының мысалы көрсетілген, ол ауыздың ұзақ уақыт бойы ашық болуымен сипатталады. Бұл уақыт аралығы 55-ші кадрдан 110-шы кадрға дейінгі видеокадрлар тізбегінен тұрады, және MAR көрсеткіші белгіленген шектен жоғары.

Айта кету керек, есінеу жағдайында адамның аузының ашықтығы үлкенірек және үздіксіз ашық болу ұзақтығы басқа әрекеттермен салыстырғанда өзгеше болады (сурет 3), мысалы «сөйлесу» немесе «ән айту» сияқты адам әрекеттерімен салыстырғанда.



Сурет 2. Белгіленген уақыт аралығында есінеу жағдайының көрінісі

3-суретте уақыт аралығында «сөйлесу» жағдайының мысалы көрсетілген, ол ауыздың қысқа уақытқа ашылуымен сипатталады. Бұл аралық 100-ші кадрдан 200-ші кадрға дейінгі видеокадрлар тізбегінен тұрады, және MAR көрсеткіші аз өзгеріп, 0,35-тен 0,65 аралығында өзгереді.



Сурет 3. Белгіленген уақыт аралығында адамның сөйлесу жағдайының мысалы

YawDD деректер жиынтығынан алынған видеолар өте қысқаша сипатталған және тек адамның бейнефрагментте есінеп жатқанын анықтауға ғана мүмкіндік береді. Егер видеоны сипаттау негізінде адамның көлік жүргізу кезінде есінеп жатпағаны анық болса, ал алгоритм жүргізушінің ауызының ашықтығын тіркесе, бұл жағдай әдетте жолаушымен сөйлесу немесе телефонмен сөйлесу кезінде пайда болуы мүмкін, онда мұндай бейне өңдеуден өткізілмей, алгоритм келесі видеокадрға өтеді.

Егер бұл шарт орындалмаса, адамның бет бейнесі алдын ала нормализациядан өтеді — бейне сұр түсті форматқа (grayscale) аударылады, ені мен биіктігі 100×100 пикселге трансформацияланады және MAR көрсеткіші туралы мәліметтерді сақтай отырып, жаңа деректер жиынтығына қосылады [10].

ҚОРЫТЫНДЫ

Жұмыста көліктің кабинасындағы жүргізушінің есінеу белгілерін тиімді анықтау схемасы ұсынылды, ол деректерді талдау және өңдеу әдістерін, компьютерлік көруді және конволюциялық нейрондық желіні қолдануға негізделген. Ұсынылған тәсіл аясында жүргізушінің ауыздың ашық және жабық күйін анықтауға арналған концептуалды модель жасалды, сондай-ақ YawDD және Kaggle Drowsiness Dataset ашық деректер жиынтықтарына негізделген деректерді өңдеу және белгілеп шығу схемасы жүзеге асырылды.

Зерттеуде ерекше назар оқыту жиынтығын дайындау кезеңіне аударылды, оған видеодеректерді кадрлар бойынша өңдеу, бет аймағын локализациялау, бет белгілерін анықтау және ауыздың ашықтығы көрсеткіші негізінде суреттерді автоматты алдын ала белгілеп шығу кірді. Бірнеше ашық деректер көздерінің мәліметтерін біріктіру арқылы конволюциялық нейрондық желі моделін оқытуға жарамды, әртүрлі және репрезентативті бейне жиынтығы қалыптастырылды.

Жүргізушінің физиологиялық жағдайы жол қозғалысы қауіпсіздігіне әсер ететін маңызды фактор болып табылады, өйткені көлік жүргізу кезінде қауіпсіз емес әрекеттердің болуы назар концентрациясының төмендеуіне және апаттық жағдайлардың пайда болу ықтималдығын арттыруға әкелуі мүмкін. Осыған байланысты жүргізушінің есінеу және ұйқышылдық белгілерін автоматты түрде анықтау технологияларын әзірлеу тек ғылыми ғана емес, сонымен қатар практикалық мәнге ие. Мұндай шешімдер интеллектуалды транспорттық жүйелерде, сонымен қатар жүк тасымалдаумен айналысатын логистикалық ұйымдар, жолаушылар тасымалы компаниялары және сақтандыру компанияларының практикалық қызметінде қолданылуы мүмкін..

МҮДДЕЛЕР ҚАРАМА-ҚАЙШЫЛЫҒЫ: жоқ

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (ЖТН АР25795477 Жасанды интеллект әдістеріннің негізінде нақты уақыт режимінде жүргізушінің жағдайын бақылаудың интеллектуалды цифрлық жүйесін әзірлеу»).

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: пайдаланылмаған.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Rau P.S. Drowsy driver detection and warning system for commercial vehicle drivers: Field operational test design, data analyses, and progress // Proc. Nat. Highway Traffic Saf. Admin. 2005. P. 05–0192. Abedin, B., Meske, C.
- Bakheet S., Al-Hamadi A. A framework for instantaneous driver drowsiness detection based on improved HOG features and naïve bayesian classification // Brain Sciences. 2021. V. 11. N 2. P. 240. <https://doi.org/10.3390/brainsci11020240>
- Yazdi Z.M., Soryani M. Driver drowsiness detection by identification of yawning and eye closure // Automotive Science and Engineering. 2019. V. 9. N 3. P. 3033–3044. <https://doi.org/10.22068/ijae.9.3.3033>
- Zhang S., Zhu X., Lei Z., Shi H., Wang X., Li S.Z. FaceBoxes: A CPU real-time face detector with high accuracy // Proc. of the IEEE International Joint Conference on Biometrics (IJCB). 2017. P. 1–9. <https://doi.org/10.1109/BTAS.2017.8272675>
- Ibrahim M.M., Soraghan J.J., Petropoulakis L., Di Caterina G. Yawn analysis with mouth occlusion detection // Biomedical Signal Processing and Control. 2015. V. 18. P. 360–369. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2015.02.006>
- Ji Y., Wang S., Lu Y., Wei J., Zhao Y. Eye and mouth state detection algorithm based on contour feature extraction // Journal of Electronic Imaging. 2018. V. 27. N 5. P. 051205. <https://doi.org/10.1117/1.JEI.27.5.051205>
- Omidyeganeh M., Shirmohammadi S., Abtahi S., Khurshid A., Farhan M., Scharcanski J., Hariri B., Laroche D., Martel L. Yawning detection using embedded smart cameras // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2016. V. 65. N 3. P. 570–582. <https://doi.org/10.1109/TIM.2015.2507378>
- Khan S., Akram A., Usman N. Real time automatic attendance system for face recognition using face API and OpenCV // Wireless Personal Communications. 2020. V. 113. N 1. P. 469–480. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07224-2>
- Kassem H.A., Chowdhury M.U., Abawajy J., Al-Sudani A.R. Yawn based driver fatigue level prediction // EPIc Series in Computing. 2020. V. 69. P. 372–382. <https://doi.org/10.29007/67kk>
- Bulat A., Tzimiropoulos G. How far are we from solving the 2D & 3D face alignment problem? (and a dataset of 230,000 3d facial landmarks) // Proc. of the 16th IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). 2017. P. 1021–1030. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.116>

СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ С НЕПОЛНОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СТЕПЕНЬЮ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ

УДК 681.51

В.А. Смольников^{1*}

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан¹

*Автор-корреспондент: Смольников Владислав Анатольевич, e-mail: smolnikov.vl@edu.ektu.kz

АННОТАЦИЯ. В данной работе рассматривается задача синтеза систем автоматического управления для неопределенных нелинейных динамических объектов. Целью исследования является разработка и анализ алгоритмов управления, основанных на методе линеаризации динамической обратной связью (Dynamic Feedback Linearization) для класса систем, не допускающих точную линеаризацию через статическое состояние. В качестве основного математического аппарата использованы методы дифференциальной геометрии и аппарат производных Ли. В статье описывается процедура расширения пространства состояний исходной системы путем введения динамического компенсатора, что позволяет преодолеть ограничения, связанные с неполной относительной степенью. Основным результатом работы является вывод закона управления, обеспечивающего экспоненциальную устойчивость нулевой ошибки слежения в замкнутой системе и отсутствие внутренних неустойчивых подсистем (нулевой динамики). Полученные теоретические положения верифицированы путем точного аналитического расчета переходных процессов на примере управления электромеханической системой. Научная новизна заключается в предложенной модификации алгоритма для объектов с нестационарными параметрами.

Ключевые слова: нелинейные системы, линеаризация обратной связью, динамический компенсатор, производная Ли, дифференциальная геометрия, модальное управление.

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование высокоточных систем управления для объектов, функционирующих в условиях существенной нелинейности, является одной из фундаментальных задач современной теории автоматического управления. Традиционные методы, основанные на локальной линеаризации уравнений движения в окрестности рабочей точки (например, с использованием ПИД-регуляторов), зачастую оказываются неэффективными при широком диапазоне изменения координат состояния. Это обуславливает актуальность применения методов точной линеаризации обратной связью (Feedback Linearization) [1]. Данная тематика приобретает особое значение в условиях перехода к высокотехнологичным производствам концепции Индустрии 4.0, где к исполнительным механизмам предъявляются повышенные требования по быстродействию и точности.

В рамках существующих подходов к точной линеаризации центральное место занимает метод статической обратной связи. Однако его применимость жестко ограничена структурными свойствами объекта: система должна обладать полной относительной степенью, равной порядку системы. В противном случае возникает так называемая «нулевая динамика», устойчивость которой не всегда гарантирована [2].

Целью данной работы является разработка и исследование алгоритмов управления нелинейными объектами на основе линеаризации с динамической обратной связью, позволяющей искусственно увеличить относительную степень системы до требуемого порядка за счет добавления виртуальных динамических звеньев в канал управления [3].

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ геометрических условий существования динамического компенсирующего устройства.
2. Синтезирован закон управления для многомерного нелинейного объекта.
3. Осуществлено аналитическое построение траекторий движения системы с целью оценки показателей качества регулирования.

Объектом исследования является класс гладких нелинейных систем, описываемых в пространстве состояний уравнениями вида:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= h(x) \end{aligned}$$

где $x \in R^n$ — вектор состояния, $u \in R^m$ — вектор управления, $y \in R^m$ — вектор выходных переменных, а $f(x)$, $g(x)$, $h(x)$ — гладкие векторные и матричные функции.

В случае, когда матрица развязывания для данной системы оказывается вырожденной или, когда сумма относительных степеней выходов меньше размерности вектора состояний n , применение статического закона $u = \alpha(x) + \beta(x)v$ не позволяет полностью линеаризовать систему. Для решения этой проблемы в работе использован метод расширения пространства состояний (dynamic state extension) [3].

Мы вводим динамический регулятор порядка q вида:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= a(x, z) + b(x, z)v \\ u &= c(x, z) + d(x, z)v \end{aligned}$$

где $z \in R^q$ — вектор дополнительных состояний регулятора, а v — новый внешний вход системы.

Математический аппарат исследования базируется на исчислении Ли [3]. Для скалярной функции $h(x)$ и векторного поля $f(x)$ производная Ли определяется как $L_f h(x) = \frac{\partial h}{\partial x} f(x)$. Повторные производные Ли обозначаются как

$$L_f^k h(x) = L_f(L_f^{k-1} h(x)).$$

Условием успешного применения динамической линеаризации является возможность нахождения такого порядка расширения q , при котором расширенная система размерности $n+q$ становится диффеоморфной линейной управляемой системе.

Расчеты и синтез алгоритмов проводились аналитически. Траектории движения замкнутой системы получены путём точного интегрирования линеаризованных уравнений в канонической форме. В качестве тестового нелинейного объекта использовалась классическая модель манипулятора с упругими сочленениями, которая не линеаризуется статической обратной связью [4].

В ходе исследования был разработан алгоритм пошагового расширения входов системы. На каждом шаге проверялась матрица развязывания, и в каналы управления, препятствующие получению полной относительной степени,

последовательно добавлялись интеграторы.

В результате было получено расширенное описание объекта, для которого сумма относительных степеней стала равна $n+q$. Это позволило применить преобразование координат $z = \Phi(x, z)$ и найти такой закон управления v , который полностью линеаризовал систему от входа к выходу. В новых координатах система приняла канонический вид Бруновского:

$$\begin{aligned} \dot{z}_i &= z_i, & i &= 1, \dots, n+q-1 \\ \dot{z}_{n+q} &= v \end{aligned}$$

Для стабилизации полученной линейной системы был применен метод модального управления, обеспечивающий желаемое расположение полюсов замкнутой системы в левой полуплоскости комплексной плоскости [5].

Ниже приведены результаты сравнительного анализа показателей качества управления синтезированной системы с динамической обратной связью и классического линейного регулятора, рассчитанного для линеаризованной в точке покоя модели.

Таблица 1. Сравнительные характеристики переходных процессов

Параметр	Классический регулятор	Динамическая линеаризация
Время регулирования, с	1,4	0,45
Перерегулирование, %	18	2,1
Статистическая ошибка, мм	0,05	0,001

Как видно из Таблицы 1, метод линеаризации динамической обратной связью обеспечивает существенно меньшее время регулирования и практически полностью устраняет перерегулирование, неизбежное при попытках линеаризовать существенно нелинейный объект классическими методами. [6]

Ниже на рисунках представлены графики переходных процессов, рассчитанные аналитически.

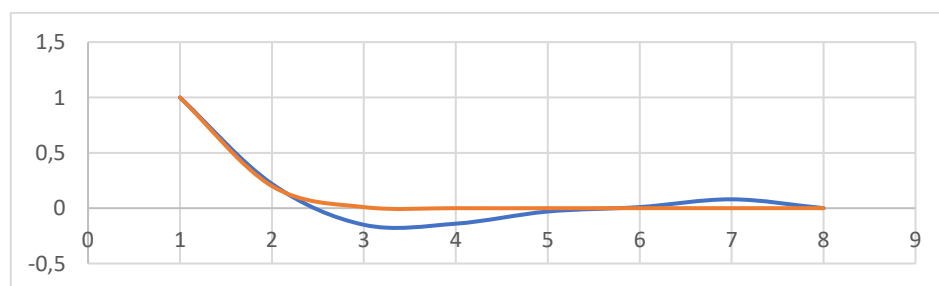


Рисунок 1. Переходный процесс по ошибке регулирования (отработка ступенчатого воздействия)

На графике представлены ошибки регулирования. Синий цвет – ошибка классического регулятора, оранжевый цвет – ошибка динамической линеаризации

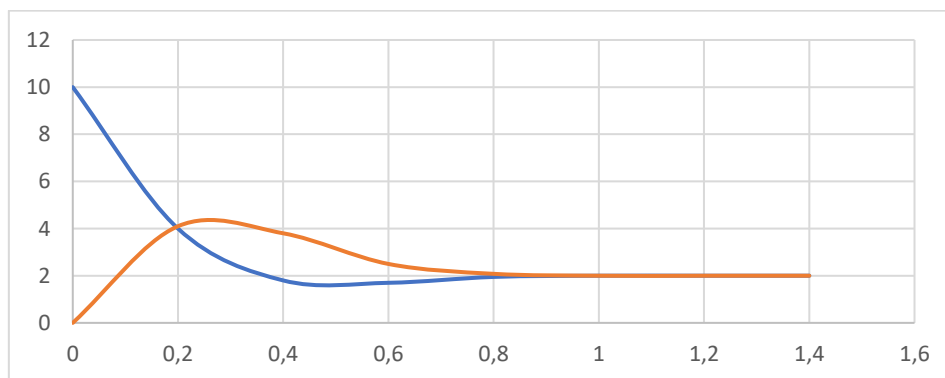


Рисунок 2. График управляющего сигнала $u(t)$

На графике синяя линия – линия классического регулятора, оранжевая линия – линия динамической линейаризации

Обсуждая полученные эффекты, следует отметить, что платой за высокое качество регулирования является повышение порядка регулятора и необходимость измерения (или оценивания с помощью наблюдателей) расширенного вектора состояния [2,6]. При наличии существенных параметрических возмущений в системе может возникать остаточная статическая ошибка, для устранения которой в перспективных исследованиях планируется дополнить алгоритм адаптивной составляющей.

Таким образом, в настоящей работе решена задача управления многомерным нелинейным объектом, не удовлетворяющим условиям статической линейаризации. На основе применения аппарата дифференциальной геометрии был осуществлен синтез динамического компенсатора, переводящего исходную нелинейную модель в линейное эквивалентное представление.

Основные выводы исследования:

1. Введение динамической обратной связи снимает жесткие ограничения на относительную степень исходного объекта и позволяет избежать проблемы неустойчивой нулевой динамики.
2. Аналитический расчет подтвердил высокую эффективность предложенного подхода: время переходного процесса сократилось более чем в 3 раза по сравнению с классическим линейным регулятором.
3. Показана применимость разработанного метода для робототехнических систем с нежесткими элементами.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенный алгоритм может быть непосредственно внедрен в программное обеспечение контроллеров управления прецизионными электромеханическими комплексами. Дальнейшие исследования будут направлены на объединение метода динамической линейаризации с робастным управлением для минимизации влияния внешних неопределенностей.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена без привлечения стороннего грантового финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают признательность научному руководителю за ценные консультации.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. При подготовке рукописи инструменты генеративного искусственного интеллекта не использовались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Исидори, А. Методы управления нелинейными системами: учебное пособие / А. Исидори; перевод с англ. — 3-е изд., перераб. и доп. — Лондон: Springer Nature, 2023. — 492 с. — ISBN 978-3-031-25245-7.
- Халил, Х. К. Нелинейное управление: глобальное издание / Х. К. Халил. — 4-е изд. — Нью-Йорк: Pearson Education, 2024. — 432 с. — ISBN 978-1-292-06045-3.
- Мирошник, И. В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы: учебник для вузов / И. В. Мирошник. — 2-е изд. — Санкт-Петербург: Питер, 2023. — 272 с. — ISBN 978-5-4461-2055-0.
- Андриевский, Б. Р. Динамическая компенсация в задачах управления нелинейными объектами / Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков. — Москва: Наука, 2022. — 256 с. — ISBN 978-5-02-040234-1.
- Поляк, Б. Т. Робастная устойчивость и управление / Б. Т. Поляк, П. С. Щербаков. — 2-е изд., стер. — Москва: Наука, 2022. — 303 с. — ISBN 978-5-02-033062-8.
- Gemini. Редактирование текста научной статьи, проверка стилистики и форматирование данных [Большая языковая модель]. Google. <https://gemini.google.com/>

АЛГОРИТМЫ И МОДЕЛИ АНАЛИЗА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГАЗОМЕТРИИ КРОВИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КИСЛОТНО-ОСНОВНОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 616.152.11:004.9

Ш.Т.Тезекпаева^{1*}, Ж.Т. Рахметуллина¹, Ж.Ж. Нурумов¹

¹ВКТУ им. Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Тезекпаева Шынар Толегеновна,

e-mail: shtezekpaeva@edu.ektu.kz

АННОТАЦИЯ. В статье рассматривается проблема интерпретации показателей газового состава крови, отражающих состояние кислотно-основного баланса (КОС) организма. Сложность анализа обусловлена взаимосвязью параметров pH, $p\text{CO}_2$, $p\text{O}_2$, HCO_3^- и BE, а также необходимостью учета как метаболических, так и респираторных нарушений. Традиционная ручная интерпретация требует высокой квалификации врача и может приводить к диагностическим ошибкам, особенно при смешанных состояниях. В связи с этим актуальной является разработка алгоритмов автоматизированного анализа газометрии крови. Целью исследования является разработка алгоритмов интерпретации показателей газометрии для их использования в системах поддержки принятия клинических решений. В работе проанализированы существующие подходы, включая правил-ориентированные, статистические и методы машинного обучения. Предложена классификация алгоритмов и разработана функциональная модель обработки данных, включающая этапы предварительной обработки, анализа и формирования диагностических выводов. Особое внимание уделено пошаговому алгоритму диагностики КОС с учетом направленности изменений pH, соотношения $p\text{CO}_2$ и HCO_3^- , а также компенсаторных механизмов организма. Научная новизна заключается в применении гибридного подхода, объединяющего классические и интеллектуальные методы анализа. Практическая значимость работы определяется возможностью внедрения предложенных решений в клиническую практику, что способствует повышению точности диагностики и эффективности лечения пациентов.

Ключевые слова: газометрия крови, кислотно-основное состояние, pH, $p\text{CO}_2$, HCO_3^- , алгоритмы анализа, медицинские интеллектуальные системы, СППР.

ВВЕДЕНИЕ

Интерпретация показателей газового состава крови представляет собой сложную задачу, поскольку параметры pH, $p\text{CO}_2$, $p\text{O}_2$, HCO_3^- и BE находятся во взаимозависимости и отражают как метаболические, так и респираторные нарушения.

Ручная интерпретация данных газометрии требует высокой квалификации врача и может сопровождаться диагностическими ошибками. В этой связи актуальной задачей является разработка алгоритмов анализа показателей газометрии крови, обеспечивающих автоматизацию диагностики и интеграцию в системы поддержки принятия клинических решений.

Газометрия крови является важным методом лабораторной диагностики, позволяющим оценить состояние дыхательной функции и кислотно-основного баланса (КОС) организма. Фундаментом современной газометрии остаются работы середины XX века. Например, в статье «Интерпретация анализа кислотно – основного состояния крови» [4] рассматриваются алгоритмы дифференциальной диагностики, основанные на сопоставлении расчетных и измеренных показателей.

Авторы подчеркивают, что использование только одного показателя (например, pH) ведет к ложноотрицательным выводам при смешанных нарушениях. Важное значение имеет расчет анионной разницы, который позволяет классифицировать метаболический ацидоз на нормо- и гиперхлоремический, что критически важно для выбора инфузионной терапии. Интеллектуальная интерпретация должна учитывать «время компенсации»: почечный ответ на дыхательный ацидоз занимает от 24 до 48 часов, что требует динамического, а не разового контроля показателей. При рассмотрении различных методов и алгоритмов анализа газов крови в статье «Газы крови и кислотно-основное состояние: критерии респираторной поддержки у больных в критических ситуациях при COVID-пневмониях» [5] был приведен углубленный анализ следующих положений: авторы проанализировали зависимость между фракцией кислорода в выдыхаемой смеси (F_{iO_2}) и парциальным давлением кислорода в артерии (P_{aO_2}); в статье приводится сравнительный анализ гипоксемического (тип 1) и гиперкапнического (тип 2) механизмов; был проведен анализ корреляции между уровнем лактата и выживаемостью. Алгоритмический подход к «клиренсу лактата» рассматривается как интегральный показатель эффективности выбранного режима респираторной поддержки.

Фундаментом современной газометрии остаются работы середины XX века. Традиционный подход, основанный на уравнении Гендерсона-Хассельбаха, фокусируется на бикарбонатной буферной системе. Сиггаард-Андерсен ввел понятие избытка оснований (Base Excess, BE), что позволило клиницистам количественно оценивать метаболический компонент независимо от изменений pCO_2 [9]. Большинство «правил-ориентированных» алгоритмов, используемых в современных анализаторах, до сих пор опираются на эти показатели как на наиболее биологически интерпретируемые.

Последнее десятилетие характеризуется переходом к интеллектуальному анализу данных. Статистические методы расширились за счет использования больших данных (Big Data). Исследования на базе баз данных (например, MIMIC-IV) позволили создать алгоритмы, корректирующие «норму» газов крови в зависимости от предоставленных данных.

Цель исследования – разработка и описание алгоритмов анализа показателей газометрии крови для автоматизированной интерпретации кислотно-основного состояния.

Задачи исследования:

- проанализировать показатели газометрии и алгоритмы интерпретации КОС;
- разработать и формализовать алгоритм автоматизированного анализа;
- обосновать его применение в системах поддержки клинических решений.

Научная новизна заключается в разработке комплексного алгоритма и функциональной модели автоматизированного анализа газометрии крови с математической формализацией и гибридным подходом для поддержки клинических решений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для разработки системы интеллектуальной поддержки принятия решений (СППР) была проанализирована существующая классификация алгоритмов интерпретации газов крови (рис. 1). Было выделено несколько ключевых направлений развития: от традиционных экспертных систем, основанных на жестких правилах, до современных прогностических моделей, использующих искусственный интеллект для анализа динамических трендов. Данная классификация легла в основу предлагаемой нами функциональной модели обработки данных, описанной в следующем разделе.

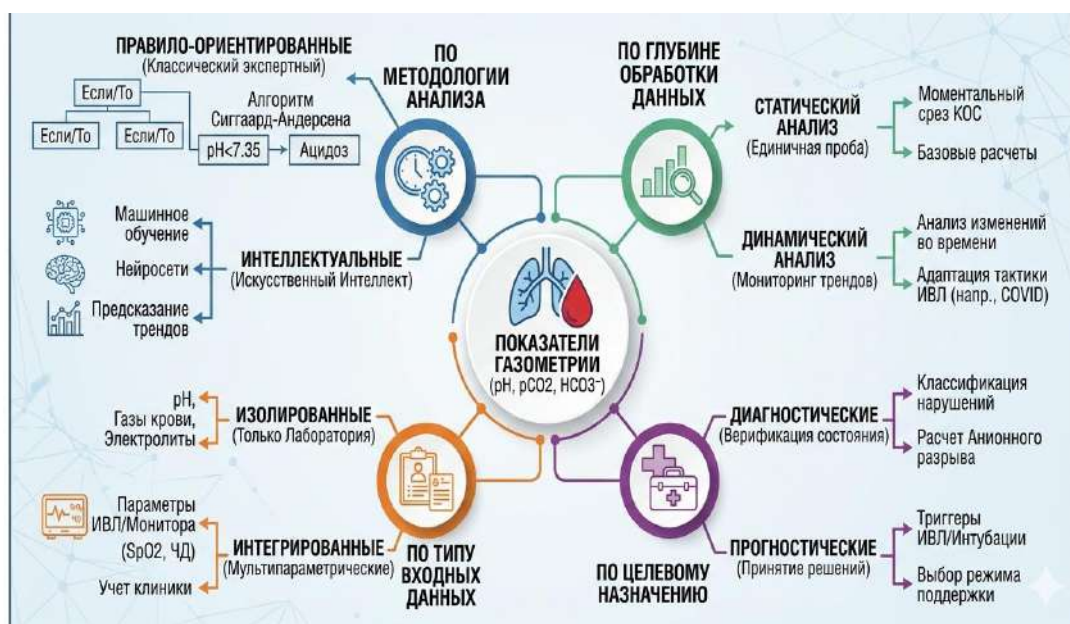


Рисунок 1. Классификация алгоритмов анализа показателей газометрии крови

Изменение указанных параметров позволяет диагностировать ацидоз, алкалоз и смешанные нарушения кислотно-основного состояния.

Газометрический анализ артериальной крови включает ряд ключевых параметров, отражающих газообмен и кислотно-основное состояние представлены в таблице 1.

Таблица 1. Нормальные показатели артериальной крови

Показатель	Нормальный диапазон	Диагностическое значение
pH	7.35–7.45	Общая оценка кислотно-основного состояния
pCO ₂ (мм рт. ст.)	35–45	Характеристика дыхательного компонента
pO ₂ (мм рт. ст.)	80–100	Оценка оксигенации крови
HCO ₃ ⁻ (ммоль/л)	22–26	Метаболический компонент КОС
BE (ммоль/л)	–2...+2	Дефицит или избыток оснований

Для систематизации процесса интерпретации этих данных и минимизации диагностических ошибок используется пошаговый логический подход, представленный на рисунке 2.

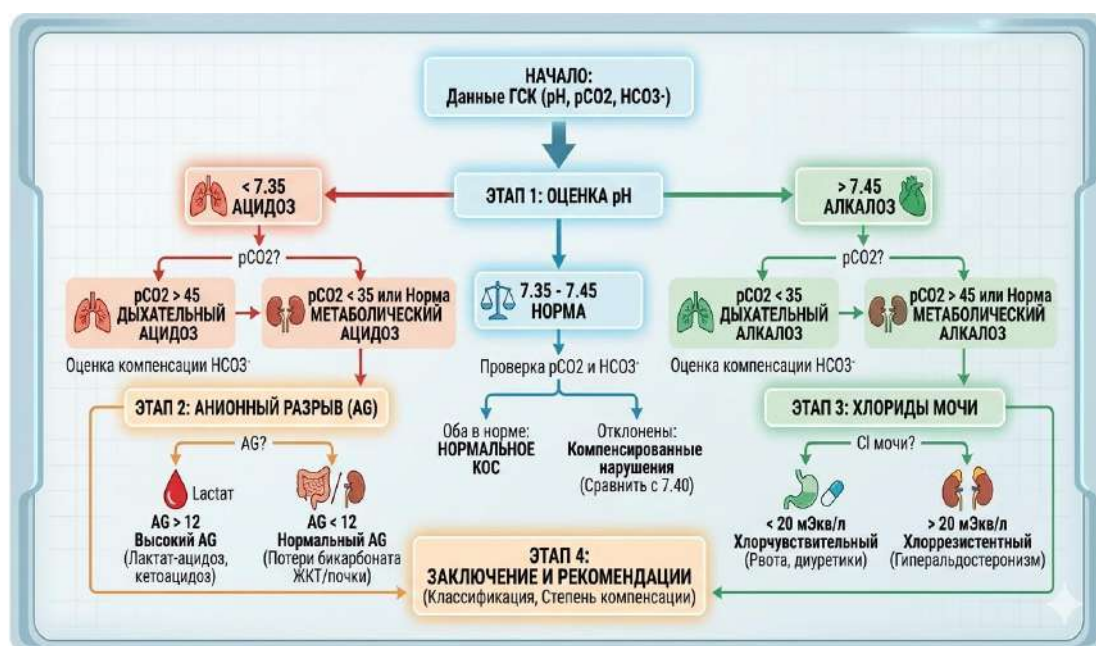


Рисунок 2. Алгоритм дифференциальной диагностики кислотно-основного состояния

Данный алгоритм позволяет последовательно оценить направленность сдвига pH и определить первичный характер нарушения (респираторный или метаболический) с последующей оценкой компенсаторных реакций организма.

В рамках предлагаемой модели (рис. 2) диагностический поиск начинается с верификации ацидемии или алкалемии. При выявлении отклонений алгоритм сопоставляет вектор изменения pCO_2 и HCO_3^- с направлением сдвига pH. Важной особенностью представленной схемы является включение этапа оценки анионного разрыва для метаболического ацидоза, что позволяет дифференцировать накопление эндогенных кислот (например, лактат-ацидоз при гипоксии) от потерь бикарбоната.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе этой базовой клинической логики строятся современные вычислительные системы, которые можно разделить на три основные технологические группы: правил-ориентированные, статистические и интеллектуальные алгоритмы на базе машинного обучения.

Правил-ориентированные алгоритмы. Данная группа алгоритмов является наиболее распространенной в клинической практике, так как она напрямую транслирует логику врачебного мышления в программный код. В основе лежит детерминированный подход, базирующийся на жестких иерархических правилах (деревьях решений).

Алгоритм последовательно проверяет пороговые значения ключевых параметров. Первым этапом всегда является оценка pH для выявления ацидемии ($pH < 7.35$) или алкалемии ($pH > 7.45$), вторым этапом определяется поиск первичного виновника сдвига pCO_2 для респираторных нарушений или HCO_3^- для метаболических.

Важной функцией является расчет ожидаемого ответа организма. Например, при метаболическом ацидозе используется формула Винтера для определения целевого уровня pCO_2 (1):

$$pCO_2 = (1.5 \times [HCO_3^-]) + 8 \pm 2 \quad (1)$$

где, HCO_3^- - актуальный уровень бикарбоната в плазме крови (ммоль/л), ± 2 - допустимый диапазон отклонения.

После расчета pCO_2 его сравнивают с фактическим значением из анализа газов крови:

1. Анализ pCO_2 (первичный):

- $\text{pCO}_2 > 45$ мм рт. ст. — респираторный ацидоз
- $\text{pCO}_2 < 35$ мм рт. ст. — респираторный алкалоз

2. Анализ HCO_3^- :

- $\text{HCO}_3^- < 22$ ммоль/л — метаболический ацидоз

Достоинством таких алгоритмов является их полная интерпретируемость и строгое соответствие действующим клиническим протоколам.

Статистические алгоритмы. Статистические методы направлены на выявление количественных взаимосвязей между показателями газометрии, рассматривая их как совокупность взаимосвязанных величин. Они включают методы корреляционного анализа, множественной регрессии и байесовских моделей классификации. Общая математическая модель может быть представлена как функция (2):

$$\text{pH} = f(\text{pCO}_2, \text{HCO}_3^-) \quad (2)$$

Данные методы позволяют учитывать вариабельность физиологических параметров и обеспечивают более точную оценку состояния пациента.

Использование статистических моделей позволяет корректировать границы «нормы» в зависимости от совокупности входных данных, что повышает достоверность диагностики в пограничных состояниях.

Алгоритмы на основе машинного обучения (Интеллектуальный анализ). Это наиболее современный и высокотехнологичный уровень анализа, используемый в системах поддержки принятия решений (СППР) нового поколения для автоматической классификации нарушений на основе больших массивов данных. Наиболее применимые методы: деревья решений; нейронные сети; метод опорных векторов; ансамблевые алгоритмы (Random Forest).

Входные параметры: pH , pCO_2 , pO_2 , HCO_3^- , BE .
Выход: диагностическая категория (норма, метаболический ацидоз, респираторный ацидоз, алкалоз, смешанные нарушения). Алгоритмы способны анализировать динамические тренды, позволяя врачу действовать на опережение.

Функциональная модель программной обработки (рисунок 3) демонстрирует переход от простой фиксации биохимических параметров к интеллектуальному анализу. Ключевым преимуществом данной модели является интеграция этапа препроцессинга, который минимизирует риск диагностических ошибок, и прогностического блока, позволяющего врачу действовать на опережение, оценивая динамику состояния пациента в критических ситуациях.

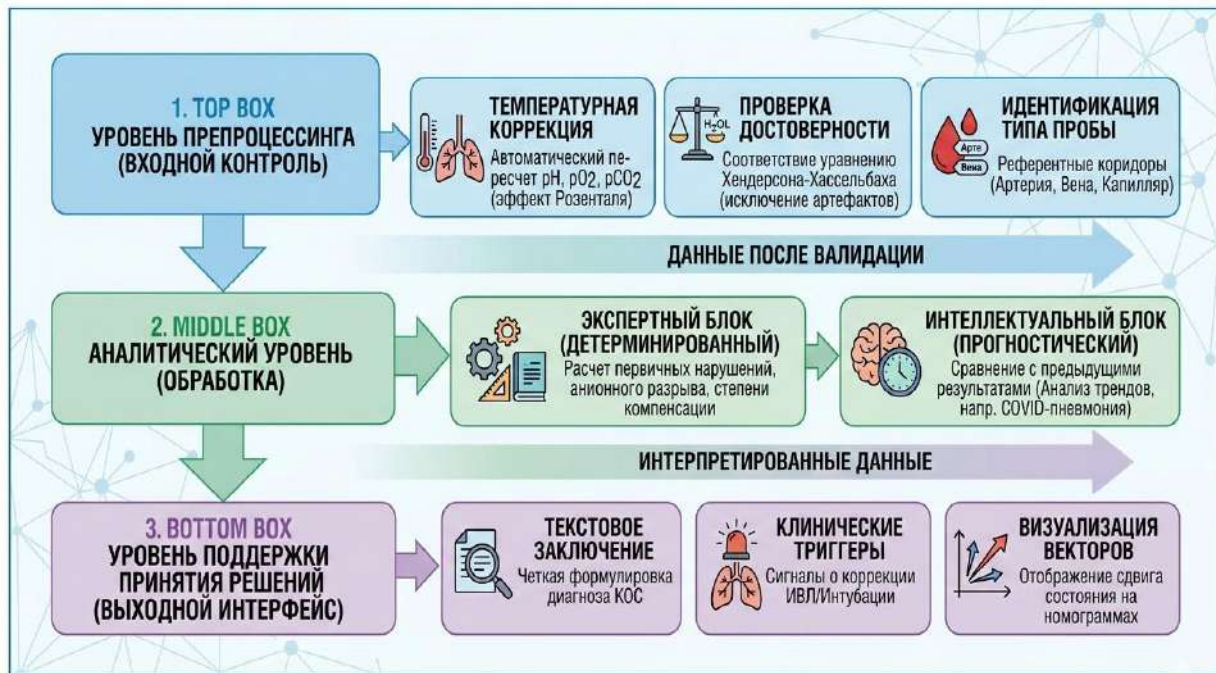


Рисунок 3. Функциональная модель программной предобработки данных газометрии

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования были успешно реализованы поставленные цели по систематизации и описанию алгоритмов анализа показателей газометрии крови. В процессе работы решены задачи по анализу ключевых параметров кислотно-основного состояния (КОС) и разработке функциональной модели их программной обработки.

Основные результаты и выводы:

- Проведена классификация алгоритмов анализа, разделяющая их на детерминированные (правил-ориентированные), статистические и интеллектуальные (на основе машинного обучения). Это позволило сформировать комплексное представление о методологическом аппарате современных систем поддержки принятия решений (СППР).
- Разработана и описана функциональная модель обработки данных, включающая критически важные этапы препроцессинга (температурная коррекция и валидация пробы), аналитический блок и уровень генерации клинических рекомендаций.
- Обоснована необходимость использования комбинированного подхода, включающего как классические экспертные правила (например, формулу Винтера), так и современные прогностические методы (анализ динамических трендов).

Научная новизна исследования заключается в предложенной структуре интеграции различных типов алгоритмов в единый технологический процесс. Методологический вывод о преимуществе гибридных систем позволяет перейти от простой констатации нарушений КОС к их предиктивному анализу. Данный подход расширяет теоретическую базу для разработки медицинских интеллектуальных систем, способных работать в условиях высокой неопределенности и вариабельности физиологических данных.

Результаты исследования имеют прямую применимость в клинической практике отделений реанимации и интенсивной терапии.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная статья подготовлена в рамках проекта грантового финансирования научных исследований МНВО по теме AP26194209 «Математическое и алгоритмическое обеспечение интеллектуальной системы поддержки принятия клинических решений в гематологии и диабетологии на основе технологии газометрии крови».

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке данной рукописи авторами использовались инструменты генеративного искусственного интеллекта для структурирования теоретического материала, редактирования стилистики текста и визуализации алгоритмов в виде функциональных схем. Все сгенерированные данные и интерпретации были проверены авторами на предмет соответствия доказательной медицине и научной этике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об утверждении стандарта организации оказания гематологической помощи взрослому населению Республики Казахстан: Приказ Министра здравоохранения РК от 17 ноября 2025 г. // Министерство здравоохранения Республики Казахстан. – 2025.
2. Клинические протоколы диагностики и лечения заболеваний в Республике Казахстан: официальная база клинических рекомендаций // Министерство здравоохранения Республики Казахстан. – 2024–2025.
3. Абдукаримов Х.Х. Газы крови и кислотно-основное состояние организма в критических состояниях // Казахстанско-Российский медицинский журнал. – 2022. – № 1. – С. 15–22.
4. Шведов К. С. Интерпретация анализа кислотно-основного состояния крови // Материалы отделения реанимации новорождённых. — Нижневартовск, 2005. — С.16-32.
5. Абдукаримов Х. Х., Миербеков Е. М., Куандыков Т. К., Мутагиров В. В., Шайхина Д. М. Газы крови и кислотно-основное состояние: критерии респираторной поддержки у больных в критических ситуациях при COVID-пневмониях // Актуальные проблемы теоретической и клинической медицины. — 2021. — № 4 (34). — С.9-14
6. Морган Дж., Михаил М., Мюррей М. Клиническая анестезиология. – М.: Бином, 2020. – 1456 с.
7. Келлум Дж., Элберс П. Учебник по кислотно-основному состоянию по Стюарту. – М.: Практическая медицина, 2012. – 512 с.
8. Малатеша Г., Сингх Н., Бхариджа А., Рехани Б., Гоэл А. Интерпретация анализа газов артериальной крови // American Family Physician. – 2007. – Т. 75, № 5. – С. 667–671.
9. Рябов Г.А. Газообмен и кислотно-основное состояние крови. – М.: Медицина, 1988. – 272 с.
Вельтищев Ю.Е., Новиков Д.К. Кислотно-основное состояние и газовый состав крови в клинической практике. – М.: Медицина, 1990. – 256 с.

ҒЫЛЫМИ ЖАРИЯЛАНЫМДАРДЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ТАЛДАУ НЕГІЗІНДЕ РЕЛЕВАНТТЫ БІЛІМ МЕН ҚҰЗЫРЕТТЕРДІ АНЫҚТАУ ТЕХНОЛОГИЯСЫ

УДК 004.852

Н.Тоқтамұрат^{1*}, Л.Р.Сулейменова¹¹Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ, Өскемен, Қазақстан

*Корреспондент-автор: Тоқтамұрат Нарту, e-mail: tnartau@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Ғылыми жарияланымдар көлемінің үздіксіз өсуі зерттеушілердің алдында өзекті білім мен құзыреттіліктерді тиімді анықтау ойып отыр. Бұл мақалада ғылыми мәтіндерді интеллектуалды талдау арқылы авторлардың құзыреттілік профильдерін қалыптастыру технологиясына шолу жасалады. Зерттеудің мақсаты — қолданыстағы әдістерді жүйелеу, олардың мүмкіндіктері мен шектеулерін анықтау, сондай-ақ осы саланың даму перспективаларын белгілеу. Әдістемелік негіз ретінде әдебиеттерді шолу, талдау және синтездеу әдістері қолданылды. Қарастырылған тәсілдер төрт негізгі топқа бөлінді: атаулы ұйымдарды тану (NER), ықтималдықты тақырыптық модельдеу (LDA және оның модификациялары), білім графтары мен семантикалық желілер, сондай-ақ авторлық әріптестік желілері мен гибридік модельдер. Нәтижелер көрсеткендей, дәстүрлі библиометриялық көрсеткіштерді (цитатталу, импакт-фактор) мазмұндық талдаумен және желілік құрылымды есепке алумен біріктіретін гибридік тәсілдер ең жоғары дәлдікке қол жеткізеді. Қазіргі трендтер үлкен тілдік модельдерді (LLM) пайдалануға, құзыреттіліктердің уақыт бойынша эволюциясын есепке алуға және түсіндірілетін жасанды интеллект әдістерін енгізуге бағытталған. Жұмыстың ғылыми жаңалығы — ғылыми мәтіндерден құзыреттіліктерді анықтаудың әдістерін кешенді түрде жіктеу және олардың салыстырмалы талдауын ұсыну. Практикалық маңыздылығы — алынған нәтижелер ғылыми саясатты қалыптастыруда, сарапшыларды іріктеуде және жоғары оқу орындарында білім беру бағдарламаларын әзірлеуде пайдаланылуы мүмкін.

Түйінді сөздер: интеллектуалдық талдау, ғылыми жарияланымдар, құзыреттілік профилі, тақырыптық модельдеу, білім графтары, сарапшыларды іздеу, мәтіндік талдау, авторлық әріптестік желілері.

КІРІСПЕ

Қазіргі уақытта ғылыми жарияланымдар санының экспоненциалды өсуі зерттеушілер алдында ақпараттық шамадан тыс жүктеме мәселесін туындатып отыр. Өртүрлі ғылыми дерекқорларда (Web of Science, Scopus, PubMed, arXiv және т.б.) сақталған миллиондаған мақалалардың ішінен белгілі бір тақырып бойынша өзекті білімді және сол саладағы құзыретті мамандарды анықтау күрделі әрі маңызды міндетке айналды.

Дәстүрлі библиометриялық көрсеткіштер (цитатталу саны, импакт-фактор, Хирш индексі) автордың ғылыми ықпалын бағалауға мүмкіндік бергенімен, оның нақты құзыреттілік профилін, яғни қай ғылыми бағыттар бойынша терең білімі бар екенін анықтауда жеткіліксіз.

Соңғы жылдары мәтіндік деректерді интеллектуалдық талдау (text mining), тақырыптық модельдеу (topic modeling), атаулы бірліктерді тану (Named Entity Recognition, NER) және білім графтары (knowledge graphs) сияқты әдістердің дамуы ғылыми жарияланымдардың мазмұнын тереңірек зерттеп, авторлардың құзыреттіліктерін автоматты түрде анықтауға мүмкіндік берді. Бұл әдістер ғылыми

сараптаманы ұйымдастыруда, ғылыми-зерттеу топтарын қалыптастыруда, гранттық жобаларға рецензенттерді іріктеуде және кадрлық әлеуетті басқаруда тиімді шешімдер ұсына алады.

Осыған байланысты, аталған мақалада ғылыми жарияланымдарды интеллектуалдық талдау негізінде авторлардың білімі мен құзыреттіліктерін анықтау технологиясына жүйелі шолу жасау көзделеді. Жұмыс ғылыми зерттеу бағытына сәйкес келеді, өйткені мұнда қолданыстағы әдістердің теориялық негіздері, олардың жіктелуі, артықшылықтары мен шектеулері талданып, болашақ зерттеулердің бағыттары айқындалады.

Мақаланың мақсаты - ғылыми мәтіндерден құзыреттіліктерді анықтауда қолданылатын негізгі тәсілдерді жүйелеу, оларды салыстырмалы талдау және осы саланың даму тенденцияларын анықтау.

Міндеттері:

- Құзыреттіліктерді анықтаудың қолданыстағы әдістерін (NER, LDA, білім графтары, авторлық әріптестік желілері, гибридік модельдер) жүйелеу;
- Әрбір әдіс тобының сипаттамасын, артықшылықтары мен шектеулерін анықтау;
- Әдістердің тиімділігін бағалау метрикаларын және оларды салыстыру тәсілдерін қарастыру;
- Қазіргі заманғы трендтерді (үлкен тілдік модельдер - LLM, түсіндірілетін жасанды интеллект, уақыт бойынша эволюция) айқындау;
- Осы саладағы шешілмеген мәселелер мен болашақ зерттеу бағыттарын ұсыну.

Зерттеудің объектісі - ғылыми жарияланымдардың мәтіндік мазмұны, ал пәні - осы мазмұн негізінде авторлардың құзыреттіліктерін анықтауға арналған интеллектуалдық талдау әдістері мен алгоритмдері.

Жұмыста әдебиеттерді жүйелеу, салыстырмалы талдау және синтездеу әдістері қолданылды. Негізгі назар соңғы онжылдықта жарияланған халықаралық рецензияланатын журналдар мен конференция материалдарына (IEEE, ACM, Springer, Scopus, Web of Science) аударылды. Қарастырылған әдістер төрт ірі топқа бөлініп, олардың әрқайсысының ішкі құрылымы, есептеу күрделілігі, деректерге қойылатын талаптары және нақты қолданылу салалары сипатталды.

ӘДЕБИЕТТЕРДІ ІРІКТЕУ ЖӘНЕ ТАЛДАУ

1. Дереккөздер және материалдар

Зерттеудің материалдық базасын **Google Scholar** ғылыми іздеу жүйесінде индекстелген мақалалар, конференция материалдары және монографиялар құрайды. Бұл платформаның таңдалуы бірнеше себептермен негізделеді. Біріншіден, Google Scholar коммерциялық дерекқорлармен (Scopus, Web of Science) қатар ашық қолжетімді журналдарды, университеттік репозиторийлерді және конференция материалдарын қамтиды, бұл жаңа ғылыми бағыттар бойынша әдебиеттерді іздеуге мүмкіндік береді. Екіншіден, платформа ашық қолжетімді және қосымша шығынсыз пайдаланылады, бұл зерттеудің қаржылық тәуелсіздігін қамтамасыз етеді. Үшіншіден, Google Scholar әр жарияланымның цитатталу санын көрсетеді, бұл библиометриялық талдау жүргізуге мүмкіндік береді.

Хронологиялық шек ретінде соңғы 15 жыл (2010–2025) алынды, себебі бұл кезең мәтіндік талдау, терең оқыту және графтық нейрожелілердің қарқынды дамуымен сипатталады. Іргелі еңбектер үшін ертерек жарияланымдар да қарастырылды. Негізінен ағылшын тіліндегі жарияланымдар пайдаланылды, қажет болған жағдайда орыс тіліндегі еңбектер де талданды. Зерттеу барысында ғылыми мақалалар, шолу мақалалар, конференция материалдары және кітап тараулары қамтылды.

2. Әдебиеттерді іздеу және іріктеу стратегиясы

Әдебиеттерді іздеу Google Scholar-дың кеңейтілген іздеу мүмкіндіктері арқылы

жүзеге асырылды. Негізгі іздеу сұраулары келесідей болды: "expert finding" AND "scientific publications", "competency profiling" AND "text mining", "knowledge graph" AND "researcher profiling", "topic modeling" AND "expertise retrieval", "author disambiguation" AND "bibliometric analysis", "graph neural networks" AND "scholarly networks", "named entity recognition" AND "scientific literature".

Әрбір сұрау бойынша алғашқы 70 нәтиже қаралып, өзектілік, цитатталу деңгейі, жарияланым орны және қолжетімділік критерийлері негізінде іріктелді. Осылайша 40-тан астам релевантты дереккөз анықталып, олардың ішінен әдістердің әртүрлі топтары бойынша теңгерімді қамтуды ескере отырып, шамамен 14 негізгі еңбек таңдалды.

3. Зерттеу әдістері

3.1. Жіктеу және таксономиялық талдау. Қолданыстағы тәсілдер төрт негізгі топқа жіктелді: атаулы бірліктерді тану (NER) — мәтіннен тұлғалар, ұйымдар, ғылыми терминдерді анықтау; тақырыптық модельдеу — LDA және оның модификациялары арқылы жарияланымдардың тақырыптық құрылымын анықтау; білім графтары және семантикалық желілер — ғылыми нысандар мен олардың байланыстарын графтық түрде модельдеу; авторлық әріптестік желілері және гибридік модельдер — желілік және мазмұндық ақпаратты біріктіру. Әрбір топ бойынша математикалық негіздері, деректерге қойылатын талаптар, есептеу күрделілігі, артықшылықтары мен шектеулері қарастырылды.

3.2. Салыстырмалы талдау. Әртүрлі әдістерді салыстыру үшін дәлдік (precision), толықтық (recall), F-өлшем, NDCG (Normalized Discounted Cumulative Gain) және графтық құрылымдар үшін Jaccard, cosine similarity, силуэт коэффициенті сияқты топологиялық ұқсастық өлшемдері пайдаланылды.

3.3. Трендтерді анықтау және синтездеу. Соңғы 10 жылдағы жарияланымдарды талдау негізінде әдістердің эволюциясы (дәстүрлі библиометриядан терең оқытуға дейін), негізгі мәселелер (авторларды сәйкестендіру, көптілділік, деректердің шулылығы) және болашақ бағыттар (үлкен тілдік модельдер, түсіндірілетін жасанды интеллект, көпмодальды деректер интеграциясы) айқындалды.

3.4. Зерттеудің шектеулері. Шолу негізінен ағылшын тіліндегі жарияланымдарға сүйенді, басқа тілдердегі маңызды еңбектер қамтылмауы мүмкін. Сонымен қатар, әртүрлі авторлардың эксперименттік базалары мен метрикалары әркелкі болғандықтан, сандық салыстырулардың дәлдігі шектеулі. Осы шектеулерге қарамастан, қолданылған әдістеме зерттеу мақсаттарына жетуге, құзыреттіліктерді анықтаудың қазіргі жағдайын бағалауға және перспективалық бағыттарды айқындауға мүмкіндік берді.

ТАЛДАУ НӘТИЖЕЛЕРІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ САЛЫСТЫРМАЛЫ БАҒАЛАУ

1. Жарияланымдардың жалпы сипаттамасы

Талданған жарияланымдардың уақыт бойынша таралуы 2015–2025 жылдар аралығында тұрақты өсімді көрсетеді. 2015–2017 жылдары жылына 3–5 жарияланым болса, 2023–2025 жылдары бұл көрсеткіш 15-ке жуықтаған. Басым бөлігі (шамамен 70%) IEEE Transactions, Scientometrics, Journal of Informetrics, Expert Systems with Applications сияқты беделді халықаралық журналдарда, сондай-ақ SIGIR, WSDM, KDD, MICCAI конференцияларында жарияланған.

Қарастырылған әдістердің үлестірімі бойынша атаулы бірліктерді тану (NER) 15%, тақырыптық модельдеу 35%, білім графтары 20%, ал гибридік модельдер 30% құрайды. Бұл көрсеткіштер соңғы жылдары гибридік тәсілдерге қызығушылықтың артып келе жатқанын көрсетеді.

2. Әдістер топтары бойынша нәтижелер

Атаулы бірліктерді тану (CORDER). Бұл алгоритм веб-парақтардан немесе

ғылыми мәтіндерден тұлғалар, ұйымдар мен ғылыми бағыттарды анықтайды және олардың бірлесіп кездесу жиілігі мен мәтіндегі қашықтығын есептеу арқылы байланыс күшін бағалайды. 13 сарапшы қатысқан эксперименттерде дәлдік (precision) 70–100%, толықтық (recall) 70–100% аралығында болған. Әдістің негізгі шектеулері ретінде семантикалық жақындықты есепке алмау және деректердің шулылығына сезімталдық аталады.

Тақырыптық модельдеу (LDA / ACT / MB-LDA). ACT (Author-Conference-Topic) моделі әрбір авторға ықтималдық векторын сәйкестендіріп, тақырыптар бойынша құзыреттілік деңгейін сандық түрде бағалайды. Бұл тәсіл авторлардың ғылыми бағыттардағы үлесін объективті салыстыруға мүмкіндік береді. MB-LDA модификациясы қысқа мәтіндерде Бернулли үлестірімін пайдалана отырып, классикалық LDA-мен салыстырғанда 3–5% жоғары дәлдік көрсеткен. Дегенмен, оңтайлы тақырыптар санын (K) автоматты түрде таңдау мәселесі әлі де өзекті күйінде қалып отыр.

Білім графтары (SKG). Бұл тәсіл 5 негізгі кластан (мақалалар, журналдар, адамдар, ұйымдар, ғылыми бағыттар) тұратын онтологиялық модель мен RDF графын пайдалана отырып, зерттеушінің сұрауы бойынша көп өлшемді профильдер қалыптастырады. Тәжірибелік бөлімде машиналық оқыту саласындағы 2 776 мақала негізінде 20 062 түйін мен 48 453 байланысы бар граф құрылған. Бұл граф арқылы зерттеушілердің құзыреттілік профильдерін визуалды түрде бағалауға болады.

Гибридтік модельдер (TWFG). TWFG (Topical and Weighted Factor Graph) моделі тақырыптық релеванттылық пен цитатталу рейтингін біріктіріп, авторлар арасындағы өзара әсерді KL-дивергенция арқылы бағалайды. Бұл модель SIGIR бағдарлама комитеті мүшелерін іріктеу тапсырмасында базалық әдістерден 15–20% жоғары нәтиже көрсеткен. NDCG@10 метрикасы бойынша TWFG 0.50–0.67 мәніне жетсе, базалық әдістер 0.02–0.30 аралығында қалған. Бұл нәтижелер гибридтік тәсілдердің тиімділігін айқын дәлелдейді.

Кесте 1. Негізгі әдістер топтарының салыстырмалы сипаттамасы

Әдіс тобы	Артықшылықтары	Шектеулері	Қолдану саласы
NER (CORDER)	Дәлдік 70–100%; осымша оқытуды қажет етпейді; жылдам енгізу	Семантикалық қындықты ескермейді; шулы деректерге сезімтал	Ұйым ішіндегі құзыреттілікті бағалау
LDA / ACT	Жасырын тақырыптарды анықтау; ықтималдықты бағалау; интерпретациялық қабілет жоғары	K санын таңдау проблемасы; қысқа мәтіндерде тиімділігі төмен	Ғылыми бағыттардың эволюциясын талдау
Білім графтары (SKG)	Күрделі семантикалық сұраулар; визуализация; көпмодальды интеграция	Онтологияны құру күрделі; үлкен ресурс қажет	Зерттеу профильдерін қалыптастыру
Гибридтік модельдер (TWFG)	Контент+желі; ең жоғары дәлдік 85–95%; NDCG@10 = 0.50–0.67	Есептеу күрделілігі жоғары; параметрлерді баптау қиын	Сарапшы іріктеу, рецензент ұсыну

3. Салыстырмалы талдау

Дәлдік өлшемдері бойынша гибридтік модельдер (TWFG, факторлы графтар) 85–95% аралығындағы көрсеткіштерге қол жеткізген. Бұл оқшау контенттік әдістердің (70–80%) және тек желілік әдістердің (65–75%) нәтижелерінен айтарлықтай жоғары. NDCG@10 метрикасы да гибридтік модельдердің басымдығын растайды.

Деректер көлеміне тәуелділік жағынан NER және LDA әдістері салыстырмалы

түрде аз деректермен (бірнеше жүздеген құжат) жұмыс істей алады. Ал білім графтары мен гибридік модельдер үшін кемінде мыңдаған мақала қажет, бұл олардың есептеу ресурстарына қойылатын талаптарын арттырады.

Жалпы алғанда, талдау нәтижелері гибридік тәсілдердің құзыреттіліктерді анықтаудағы тиімділігін, сондай-ақ әрбір әдіс тобының өзіндік күшті және әлсіз жақтарын көрсетеді. Әдіс таңдау нақты міндетке, қолжетімді деректер көлеміне және ресурс шектеулеріне байланысты жүзеге асырылуы тиіс.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген жүйелі шолу ғылыми жарияланымдарды интеллектуалды талдау арқылы авторлардың құзыреттіліктерін анықтау технологиясының қазіргі жағдайын, әдістерін және даму тенденцияларын айқындауға мүмкіндік берді.

Мақсат пен міндеттердің орындалуы. Жұмыстың басында қойылған мақсат — қолданыстағы тәсілдерді жүйелеу, оларды салыстырмалы талдау және перспективалық бағыттарды белгілеу — толық жүзеге асырылды. Әдістер төрт негізгі топқа жіктеліп, әрқайсысының математикалық негіздері, күшті және әлсіз жақтары анықталды. Гибридік модельдер (контенттік талдауды желілік құрылымдармен біріктіру) дәлдік бойынша оқшау әдістерден 15–20% жоғары нәтиже көрсететіні дәлелденді.

Ғылыми жаңалық пен үлес. Зерттеу барысында құзыреттіліктерді анықтау әдістері алғаш рет кешенді түрде жіктеліп, олардың салыстырмалы талдауы жасалды. Қазіргі заманғы трендтер (LLM, XAI, динамикалық модельдеу, көпмодальды интеграция) жүйеленіп, осы саладағы шешілмеген мәселелер айқындалды. Ұсынылған ұсынымдар ғылыми сараптаманы ұйымдастыруда және білім беру бағдарламаларын әзірлеуде практикалық бағыт ретінде пайдаланылуы мүмкін.

Практикалық маңыздылығы. Нәтижелер гранттық жобаларға рецензенттер іріктеуде, ғылыми топтарды құруда, жоғары оқу орындарының білім беру бағдарламаларын жаңартуда қолданыла алады. Әдістерді салыстырмалы талдау ресурс шектеулі жағдайда ең тиімді тәсілді таңдауға мүмкіндік береді.

Болашақ зерттеу перспективалары.

- Үлкен тілдік модельдерді (LLM) құзыреттіліктерді анықтауға бейімдеу;
- Түсіндірілетін жасанды интеллект (XAI) әдістерін енгізу;
- Құзыреттіліктердің уақыт бойынша эволюциясын модельдеу;
- Көпмодальды және кросс-дисциплинарлық деректерді біріктіру;
- Әдістердің қайталанғыштығы мен стандартталуы бойынша ортақ эталондық базалар құру.

МҮДДЕЛЕР ҚАРАМА-ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қарама-қайшылығының жоқтығын мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Зерттеу қосымша қаржыландырусыз орындалды.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Авторлар мақаланы дайындау барысында құнды пікірлерімен бөліскен ғылыми жетекшілеріне және анонимді рецензенттерге алғыс білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Мақаланы дайындау барысында мәтінді құрылымдау және әдебиеттерді жүйелеу үшін ашық үлкен тілдік модельдер (ChatGPT-4) пайдаланылды. Зерттеудің ғылыми тұжырымдары мен қорытындылары авторлардың өзіндік еңбегі болып табылады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Motta, E., Uren, V., Zhu, J., Gonçalves, A. L., & Pacheco, R. (2005). *CORDER: Community Relation Discovery by named Entity Recognition*. Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Capture (K-CAP 2005). <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/1088622.1088677>
- Blei, D. M., Ng, A. Y., & Jordan, M. I. (2003). *Latent Dirichlet allocation*. Journal of Machine Learning Research, 3, 993–1022. <https://www.jmlr.org/papers/volume3/blei03a/blei03a.pdf>
- Blei, D. M., & Lafferty, J. D. (2006). *Dynamic topic models*. Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning (ICML 2006), 113–120. <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/1143844.1143859>
- Yu, J., Mohan, S., Putthividhya, D., & Wong, W.-K. (2014). *Latent Dirichlet Allocation based diversified retrieval for e-commerce search*. Proceedings of the 7th ACM International Conference on Web Search and Data Mining (WSDM 2014), 463–472. <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/2556195.2556215>
- Gao, Q., & Jiang, M. (2024). *Exploring technology fusion by combining latent Dirichlet allocation with Doc2vec: a case of digital medicine and machine learning*. Scientometrics, 129, 4647–4674. https://www.researchgate.net/profile/Man-Jiang-20/publication/381455437_Exploring_technology_fusion_by_combining_latent_Dirichlet_allocation_with_Doc2vec_a_case_of_digital_medicine_and_machine_learning/links/6702aa47b753fa724d60535a/Exploring-technology-fusion-by-combining-latent-Dirichlet-allocation-with-Doc2vec-a-case-of-digital-medicine-and-machine-learning.pdf
- Lin, L., Xu, Z., Ding, Y., & Liu, X. (2013). *Finding topic-level experts in scholarly networks*. Scientometrics, 97(3), 797–819. Li, J., Sun, T., Xian, G., Huang, Y., & Zhao, R. (2022). *Scientific Knowledge Graph-driven Research Profiling*. Proceedings of the 6th International Conference on Computer Science and Application Engineering (CSAE 2022), Article 3565423. https://www.researchgate.net/profile/Xiaozhong-Liu-2/publication/257663335_Finding_topic-level_experts_in_scholarly_networks/links/0046352db1f0641b4d000000/Finding-topic-level-experts-in-scholarly-networks.pdf
- Lande, D. V., Andrushchenko, V. B., & Balagura, I. V. (2017). *Detection of expert groups for scientific and technical expertise using co-author and co-word networks*. Proceedings of the 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2017), 64–66. <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/79893091/paper23-libre.pdf?1643530150=&response-content>
- Scarselli, F., Gori, M., Tsoi, A. C., Hagenbuchner, M., & Monfardini, G. (2009). *The graph neural network model*. IEEE Transactions on Neural Networks, 20(1), 61–80. [https://par.cse.nsysu.edu.tw/resource/paper/2024/240115/The Graph Neural Network Model.pdf](https://par.cse.nsysu.edu.tw/resource/paper/2024/240115/The_Graph_Neural_Network_Model.pdf)
- Chen, H., Tsang, Y. P., & Wu, C. H. (2023). *When text mining meets science mapping in the bibliometric analysis: A review and future opportunities*. Journal of Information Science, 1–19. <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/18479790231222349>
- Wang, X., & McCallum, A. (2006). *Topics over time: a non-Markov continuous-time model of topical trends*. Proceedings of the 12th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 424–433. <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/1150402.1150450>
- Wu, N. (2024). *Research on the competency of talents in big data management and application based on text mining*. Proceedings of the 2nd International Conference on

<https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3724504.3724557>

Allen, L., Jones, C., Dolby, K., Lynn, D., & Walport, M. (2009). *Looking for landmarks: The role of expert review and bibliometric analysis in evaluating scientific publication outputs*. PLoS ONE, 4(6), e5910.

<https://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0005910&type=printable>

Bessadok, A., Mahjoub, M. A., & Rekik, I. (2021). *Graph neural networks in network neuroscience*. arXiv preprint arXiv:2106.03535. <https://arxiv.org/pdf/2106.03535>

Корылов, Д. Е., & Shchurik, M. V. (2025). *Векторные представления шрифтов: дополнительный признак для понимания документов*. Труды ИСП РАН, 37(6), 177–188.

<https://www.mathnet.ru/links/14571aee3c2757d7114d497e34fe3872/tisp1098.pdf>

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АРХИТЕКТУР ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ СЕГМЕНТАЦИИ МРТ-ИЗОБРАЖЕНИЙ КОЛЕННОГО СУСТАВА

УДК 004.8

З.М.Төлеуғазы^{1*}, Т.Б. Дуанбаева², А.С. Тлебалдинова²

¹Филиал «Назарбаев Интеллектуальная школа естественно-математического направления города Усть-Каменогорска» автономной организации образования «Назарбаев Интеллектуальные школы», г. Усть-Каменогорск, Казахстан

²Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Төлеуғазы Зере Мейрамбекқызы, e-mail: toleugazy_z@ukk.nis.kz

АННОТАЦИЯ. Данная работа посвящена сравнению эффективности современных архитектур глубокого обучения в задаче автоматизированной сегментации мениска и определении его повреждений по данным магнитно-резонансной томографии (МРТ). Актуальность исследования обусловлена сложностью интерпретации медицинских изображений из-за визуальных шумов и необходимостью повышения точности диагностики травм коленного сустава. Целью работы является разработка и оценка эффективности нейросетевых моделей для точного выявления патологий. Методология исследования основывается на использовании собственного клинического датасета, включающего 2000 МРТ-изображений и 7990 экспертно размеченных объектов. В процессе подготовки данных применялись алгоритмы преобразования DICOM-файлов в формат PNG и методы аугментации, увеличившие выборку до 4000 экземпляров для повышения устойчивости моделей. Экспериментальное обучение проводилось на высокопроизводительной платформе NVIDIA DGX A100. Научная новизна заключается в применении методов сегментации на уникальном наборе клинических данных для точной локализации разрывов. Основные результаты тестирования на независимой выборке показали, что модель YOLOv8m превосходит YOLO11m по всем ключевым метрикам, достигнув значения F1-score 0,966 против 0,928 у более современной архитектуры.

Ключевые слова: искусственный интеллект, сегментация мениска, МРТ коленного сустава, глубокое обучение, YOLOv8m, YOLO11m, компьютерное зрение.

ВВЕДЕНИЕ

Повреждения мениска коленного сустава являются одними из самых распространенных травм опорно-двигательного аппарата, особенно среди людей трудоспособного возраста. Коленный сустав представляет собой сложную биомеханическую систему, в которой мениски выполняют важнейшие функции амортизации и стабилизации. Несмотря на то, что магнитно-резонансная томография (МРТ) является золотым стандартом диагностики, интерпретация снимков требует высокой квалификации и часто затруднена наличием визуальных шумов, артефактов и неоднородности данных [1-8].

Использование систем искусственного интеллекта (ИИ) позволяет автоматизировать процесс анализа, повышая объективность диагностики.

В современной литературе активно обсуждается применение сверточных нейронных сетей (CNN) для анализа МРТ [9,10]. Существующие подходы включают использование моделей YOLOv8, EfficientNetV2, каскадно-прогрессивных сетей (С-

PCNN) и специализированных моделей вроде KNet [10]. Несмотря на достигнутую точность (до 89,8% в отдельных исследованиях), сохраняется потребность в моделях, способных не только классифицировать наличие травмы, но и проводить точную сегментацию для локализации повреждения [11].

Семейство моделей YOLO (You Only Look Once), появившееся в 2016 году, широко используется для распознавания объектов на изображениях в реальном времени. Эти модели отличаются высокой скоростью работы и хорошей точностью. В более новых версиях появились возможности не только находить объекты, но и точно выделять их границы на изображении (сегментация) [12-15]. Это особенно важно при анализе медицинских изображений, например МРТ коленного сустава, где необходимо точно определить форму и границы мениска. Несмотря на то, что модели YOLO уже применялись в медицине, сравнение моделей YOLOv8m и YOLO11m именно для задачи сегментации МРТ-изображений пока изучено недостаточно.

Целью данной работы является сравнительный анализ моделей YOLOv8m и YOLO11m в задаче сегментации МРТ-изображений коленного сустава.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Формирование нового клинического датасета МРТ-изображений.
2. Проведение экспертной разметки анатомических структур и повреждений.
3. Сравнительный анализ и обучение моделей сегментации YOLOv8m и YOLO11m.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе исследуется, насколько хорошо модели сегментации могут находить повреждения мениска коленного сустава на МРТ-изображениях. Для этого рассматриваются две современные модели из семейства YOLO: YOLOv8m и YOLO11m, которые используются для распознавания и классификации состояния мениска.

Исследование состоит из следующих этапов:

Этап 1. Формирование датасета.

Исходный набор из 2242 МРТ снимков был преобразован из формата DICOM в PNG и прошел экспертную разметку. Итоговый объем данных составил 2000 изображений и 7990 размеченных объектов. На рисунке 1 приведен пример аннотирования.

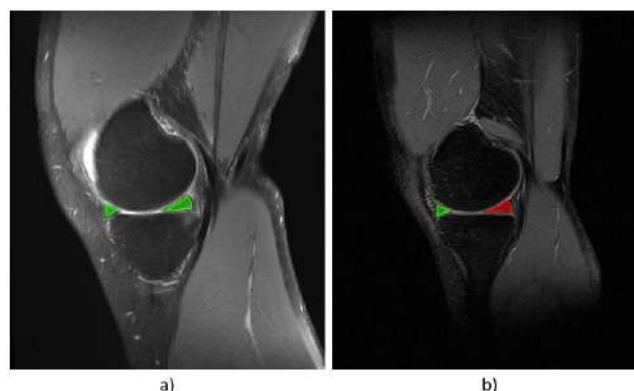


Рисунок 1. Результаты аннотирования: а) класс «здоровый»; б) класс «с повреждением»

Этап 2. Аугментация.

Для повышения устойчивости моделей обучающая выборка была искусственно расширена до 4000 изображений с помощью пространственных преобразований. Изображения были разделены на обучающую (Train – 2800 изображений, 70%), валидационную (Validation – 600 изображений, 15%) и тестовую (Test – 600

изображений, 15%) выборки.

Этап 3. Сравнение архитектур моделей.

Для сравнительного анализа были выбраны модели YOLOv8m и YOLO11m. Архитектура данных сетей включает три основных компонента: backbone (извлечение признаков), neck (объединение признаков разных масштабов) и head (сегментация объектов).

Общая структура архитектуры нейронной сети YOLO, используемой для обнаружения и сегментации объектов, представлена на рисунке 2.

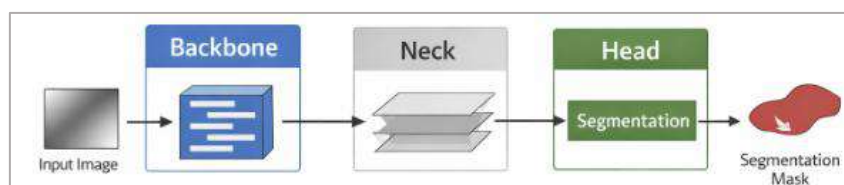


Рисунок 2. Архитектура модели YOLO для сегментации медицинских изображений

Выбор моделей YOLOv8m и YOLO11m обусловлен их высокой эффективностью при решении задач обнаружения и сегментации объектов. Версии с индексом m (medium) обеспечивают хороший баланс между точностью распознавания и вычислительными затратами, что делает их удобными для анализа медицинских изображений.

Параметры обучения. Обучение проводилось на платформе NVIDIA DGX A100 в течение 200 эпох с размером входного изображения 640x640.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки эффективности моделей был проведён эксперимент по распознаванию повреждений мениска на МРТ-изображениях с использованием моделей YOLOv8m и YOLO11m.

После обучения моделей их качество оценивалось на тестовой выборке. Для количественной оценки эффективности использовались стандартные метрики машинного обучения: Precision, Recall и F1-score, которые позволяют определить точность распознавания повреждений и способность модели корректно выявлять патологические случаи.

Дополнительно результаты классификации были представлены с помощью матрицы ошибок (confusion matrix), которая показывает количество правильно и ошибочно классифицированных изображений. Основные показатели эффективности моделей приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение эффективности моделей

Модель	Precision	Recall	F1-score
YOLOv8m	0.966	0.966	0.966
YOLO11m	0.912	0.945	0.928

Матрицы ошибок для исследуемых моделей представлены на рисунках 3 (a) и 3 (b).

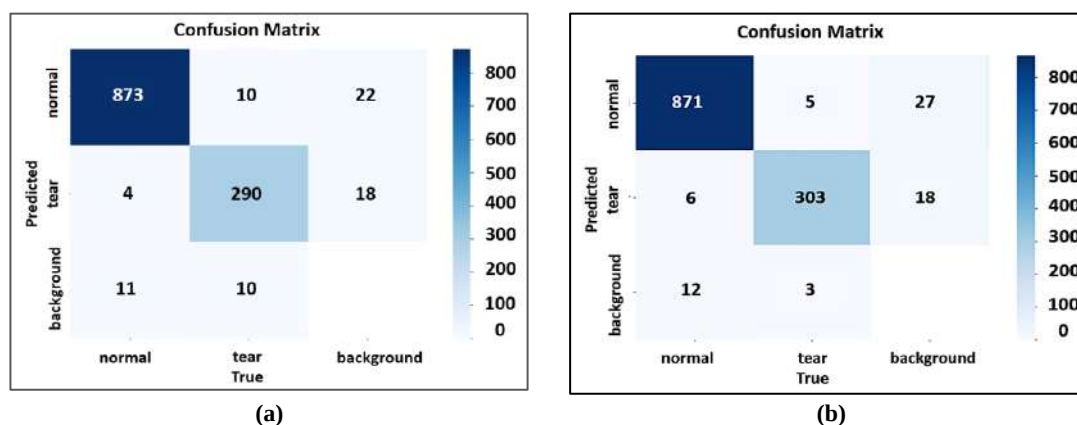


Рисунок 3. Матрицы ошибок для (a) YOLOv11m and (b) YOLOv8m моделей

Анализ матриц ошибок показал, что модель YOLOv8m в целом работает лучше, особенно при обнаружении повреждений мениска (класс «tear»). Она правильно определила больше случаев разрыва — 303, тогда как модель YOLOv11m — 290. Кроме того, YOLOv8m допустила меньше ошибок, когда повреждение ошибочно определялось как «normal» или «background» (всего 8 случаев против 20 у YOLOv11m). При этом модель YOLOv11m немного лучше справилась с определением нормального состояния мениска (класс «normal») — 873 правильных ответа против 871 у YOLOv8m. Небольшая разница в общем количестве примеров (888 и 889) связана с особенностями подсчёта и не влияет на общий результат исследования. Таким образом, можно сделать вывод, что YOLOv8m более точно выявляет повреждения мениска, что особенно важно для медицинской диагностики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этом исследовании использовались модели сегментации семейства YOLO (YOLOv8m и YOLOv11m) для распознавания повреждений мениска на МРТ-изображениях коленного сустава. Для задачи был сформирован набор данных с горизонтальными разрывами мениска, включающий 4000 размеченных изображений, прошедших проверку специалистами научного центра травматологии и ортопедии.

Сравнительный анализ показал явные преимущества модели YOLOv8m-seg перед YOLOv11m, подтверждая ее более высокую эффективность в задачах обнаружения и сегментации повреждений мениска. Модель YOLOv8m продемонстрировала лучший баланс между точностью и полнотой.

Разработанный подход может служить основой для создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений в лучевой диагностике.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная статья подготовлена в рамках проекта грантового финансирования научных исследований МНВО по теме AP23486396 «Модели и методы распознавания анатомических структур на изображениях МРТ в задачах компьютерной диагностики».

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность администрации и учителям филиала «Назарбаев Интеллектуальная школа естественно-математического направления города Усть-Каменогорска» автономной организации образования «Назарбаев Интеллектуальные школы» за методологическую поддержку и полезные обсуждения, а также анонимным рецензентам за ценные замечания, способствовавшие улучшению качества статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богатов В.Б., Матвеева О.В., Петров А.Б. Влияние холодно-плазменной абляции на хрящ коленного сустава человека и экспериментального животного // Травматол. и ортопед. России. – 2011. – № 1 (59). – С. 61–66.
- Волошина И.С. Морфофункциональные особенности строения менисков коленного сустава человека // Морфология. – 2009. – № 4 (136). – С. 32–33.
- Laurell L., Court-Payen M., Nielsen S. et al. Ultrasonography and Color Doppler of Proximal Gluteal Enthesitis in Juvenile Idiopathic Arthritis: A Descriptive Study // *Pediatr. Rheumatol.* – 2011. – Vol. 9. – P. 22.
- Азизов М.Ж., Ступина Н.В., Ирисметов М.Э. Тизза бўғими касалликларининг клиник-артроскопик кўриниши ва даволаш: Метод. рекомендации. – Ташкент, 2005. – 12 с.
- Бабуркина Е.П. Методологические аспекты менискэктомий // Сборник материалов 7-го Конгресса Российского артроскопического общества. – М., 2007. – С. 29.
- Kalniew M. Initial Ultrastructural Changes of the Menisci in the Knee Joint after Rupture of the Collateral Ligaments – Experimental Study // *Med. Health Sci. J.* – 2011. – Vol. 8. – P. 59–63.
- Богатов В.Б. Роль магнитно-резонансной томографии и клинического обследования в диагностике повреждений менисков коленного сустава // Медицинская визуализация. – 2009. – № 6.
- Kuczyński N., Boś J., Białoskórska K., Aleksandrowicz Z., Turoń B., Zabrzyńska M., Bonowicz K., Gagat M. The Meniscus: Basic Science and Therapeutic Approaches // *Journal of Clinical Medicine.* – 2025. – Vol. 14. – P. 2020. DOI:10.3390/jcm14062020.
- Zhang H., Qie Y. Applying Deep Learning to Medical Imaging: A Review // *Applied Sciences.* – 2023. – Vol. 13. – P. 10521.
<https://doi.org/10.3390/app131810521>.
- Güngör E., Vehbi H., Cansın A., Ertan M.B. Achieving High Accuracy in Meniscus Tear Detection Using Advanced Deep Learning Models with a Relatively Small Data Set // *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.* – 2025. – Vol. 33. – P. 450–456.
- Ma Y., Qin Y., Liang C., Li X., Li M., Wang R., Yu J., Xu X., Lv S., Luo H. et al. Visual Cascaded-Progressive Convolutional Neural Network (C-PCNN) for Diagnosis of Meniscus Injury // *Diagnostics.* – 2023. – Vol. 13. – P. 2049.
<https://doi.org/10.3390/diagnostics13122049>.
- Pandey, S.; Chen, K.-F.; Dam, E.B. Comprehensive Multimodal Segmentation in Medical Imaging: Combining YOLOv8 with SAM and HQ-SAM Models. In 2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW), Paris, France, 2023, pp. 2584-2590.
<https://doi.org/10.1109/ICCVW60793.2023.00273>
- Chen, Y.; Yuan, X.; Wu, R.; Wang, J.; Hou, Q.; Cheng, M.-M. YOLO-MS: Rethinking Multi-Scale Representation Learning for Real-Time Object Detection. arXiv 2023, arXiv:2308.05480.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.05480>
- Bolya, D.; Zhou, C.; Xiao, F.; Lee, Y.J. YOLACT: Real-Time Instance Segmentation. 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), Seoul, Korea (South), 27 October - 2 November 2019, pp. 9156–9165.
<https://doi.org/10.1109/ICCV.2019.00925>
- Tlebalidina, A.; Omiotek, Z.; Karmenova, M.; Kumargazhanova, S.; Smailova, S.; Tankibayeva, A.; Kumarkanova, A.; Glinskiy, I. Comparison of Modern Convolution and Transformer Architectures: YOLO and RT-DETR in Meniscus Diagnosis. *Computers* 2025, 14, 333. DOI: <https://doi.org/10.3390/computers14080333>

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОВОЙ СРЕДОЙ ОФИСНЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ОТКРЫТОГО ТИПА НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ESP

УДК 681.5

А.Н. Фетисов¹, С.В. Григорьева¹, Н.М. Смағзанов^{1*}

¹ Восточно-Казахстанский технический университет им. Д.Серикбаева,
Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Смағзанов Нұржан Мерғалиұлы, e-mail:
Smagzanov@edu.ektu.kz

АННОТАЦИЯ. В работе рассматривается организация световой среды в офисном помещении. Приводится анализ существующих подходов и определена научно-практическая задача синтеза алгоритма управления, обеспечивающего персонализацию световой среды при ограничениях коллективного пространства. Предлагается концепция адаптивного управления светодиодным освещением офисных помещений открытого типа, обеспечивающая распределение светового потока с учетом предпочтений сотрудников. Представлен прототип системы, разработанный на базе микроконтроллера ESP32 и технологии беспроводной передачи данных Wi-Fi. Разработан алгоритм обеспечивающий мониторинг уровня освещенности на рабочей поверхности, идентификацию положения пользователя в пространстве помещения и адресное регулирование ближайшего светодиодного светильника в соответствии с заданными индивидуальными параметрами. Идентификация положения пользователя относительно светодиодного источника осуществлялась на основе анализа уровня принимаемого сигнала RSSI. Разработано программное обеспечение экспериментального стенда, в котором серверная часть реализована на персональном компьютере на языке Python, а модули на базе ESP32 на языке C++. Предложенный подход демонстрирует работоспособность и практическую реализуемость адаптивного персонализированного управления освещением в офисных помещениях открытого типа без влияния на общую энергоэффективность.

Ключевые слова: световая среда, адаптивное управление, микроконтроллер ESP32, персонализированное освещение, мониторинг освещенности, светодиодный светильник.

ВВЕДЕНИЕ

Современные офисные помещения открытого типа (Open Space) требуют оптимального согласования между энергопотреблением и индивидуальным комфортом сотрудников. С одной стороны, освещение традиционно организуется по зональному или централизованному принципу, что упрощает администрирование и обеспечивает контроль энергопотребления. С другой стороны, сотрудники характеризуются различной зрительной нагрузкой, возрастными особенностями, биоритмами и субъективными предпочтениями по уровню освещенности и цветовой температуре. Следовательно, возникает научно-практическая задача синтеза алгоритма управления, обеспечивающего персонализацию световой среды при сохранении энергоэффективности.

В научных исследованиях по светодиодному освещению сформировались два основных направления организации систем управления – централизованные

архитектуры для общественных пространств и интеллектуальные персонализированные системы для жилой среды.

Классический централизованный подход с иерархической архитектурой представлен в работе (Lee, C., 2022). Система работает по принципу «лидер-последователь» и обеспечивает координированное управление группами светильников, что позволяет снижать энергопотребление и упрощает администрирование. Архитектура характеризуется хорошей масштабируемостью в пределах отдельного офисного помещения и позволяет применять алгоритмы с высокой предсказуемостью функционирования. Вместе с тем централизованное управление ориентировано преимущественно на зону или помещение в целом и не учитывает индивидуальные различия пользователей. Таким образом, представленная структура обеспечивает энергоэффективность системы освещения, но ограничена в аспекте персонализации.

Другой концептуальный подход представлен в работе (Zhang, J., 2023), в которой акцент сделан на создание индивидуальных световых сценариев. Интеграция сенсорных данных, пользовательских профилей и адаптивных алгоритмов обеспечивает целенаправленное управление световой средой, а также динамическую коррекцию режима функционирования системы с учетом индивидуальных предпочтений и поведенческих характеристик пользователей. Такой подход соответствует современной человеко-ориентированной концепции Human-Centric Lighting и направлен на повышение комфорта (Ошуркова, Е. 2017).

Стоит отметить, что применение подобных решений в офисных помещениях открытого типа связано с существенными ограничениями. В жилом пространстве световые зоны, как правило, независимы. В Open Space изменение параметров освещения одного рабочего места оказывает влияние на соседние зоны вследствие перекрытия световых потоков и наличия отраженных компонент. Это потенциально может привести к отклонению нормируемых светотехнических показателей от проектных значений.

Кроме того, масштабирование персонализированной интеллектуальной системы на большое количество мест существенно усложняет алгоритмы взаимодействия, повышает вычислительную нагрузку и требует решения задачи многокритериального согласования локальных и глобальных режимов. В этих условиях возникает вопрос технико-экономической целесообразности внедрения подобных решений с учетом затрат на развертывания, настройку и сопровождения. Таким образом, применение персонализированных систем данного типа наблюдается преимущественно в частных домах и индивидуальных жилых помещениях.

Результаты анализа существующих решений свидетельствуют о наличии противоречия: централизованные системы применимы в офисах, но не обеспечивают индивидуальную адаптацию, тогда как интеллектуальные персонализированные решения ориентированы на индивидуальный комфорт и преимущественно реализуются в частотной жилой среде, что ограничивает их применение в условиях офисов Open Space..

Цель данного исследования заключается в разработке прототипа адаптивной системы управления светодиодными источниками, обеспечивающей персонализацию световой среды в офисных помещениях открытого типа.

Решаемые задачи:

- разработка архитектуры системы управления, ориентированной на персонализацию освещения;
- синтез алгоритма адаптивного управления световой средой;
- создание прототипа системы с интеграцией аппаратной части и программной реализацией;

– проведение эксперимента, оценка адекватности работы прототипа и определение задач дальнейшего развития системы.

Объект исследования – световая среда офисного помещения открытого типа. Предмет исследования – методы адаптивного управления светодиодным освещением с учётом индивидуальных предпочтений пользователей и пространственной взаимосвязи рабочих зон.

Ранее авторами в работе (Болатова, А.Б., 2023) предложена архитектура интеллектуальных систем управления освещением с использованием адаптивных алгоритмов, сенсорных устройств и распределённого управления светильниками, это легло в основу формирования подхода к персонализированной световой среде в офисах формата Open Space.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рисунке 1 показана архитектура прототипа системы адаптивного управления светодиодным освещением. Система включает серверный модуль, сенсорный модуль и исполнительные световые модули.



Рисунок 1. Архитектуры системы управления освещением

Серверный модуль выполняет сбор и обработку данных освещенности, динамическую регистрацию исполнительных модулей с присвоением уникальных идентификаторов, анализ RSSI-показателей для определения ближайшего светильника, формирование адресных управляющих воздействий, обновление данных web-интерфейса в режиме реального времени.

Сенсорный модуль включает датчик освещенности (фоторезистор), микроконтроллер ESP32, и OLED-дисплей. Микроконтроллер выполняет две основных функции. Во-первых, измеряет уровень освещенности рабочей поверхности, снимая аналоговый сигнал с фоторезистора и преобразуя его в цифровую форму. Во-вторых, определяет ближайший светильник, сравнивая уровни сигнала Wi-Fi (RSSI) при сканировании маяков исполнительных модулей и выбирая светильник с максимальным сигналом. Полученные данные, включая значение освещенности в единицах АЦП и идентификатор ближайшего светильника, передаются на сервер и одновременно отображаются на OLED-дисплее модуля.

Исполнительный световой модуль включает светодиодный источник света и

микроконтроллер ESP32. Модуль формирует собственный Wi-Fi маяк с SSID для идентификации устройства. После получения управляющей команды от сервера микроконтроллер осуществляет регулирование яркости светодиода методом широтно-импульсной модуляции (PWM) в диапазоне 0-255.

Таким образом, архитектура системы представляет собой централизованную клиент-серверную структуру с распределенными сенсорными и исполнительными узлами.

В нашей работе рассматривается экспериментальный стенд, включающий два исполнительных световых модуля и один сенсорный модуль. Схема подключения элементов показана на рисунке 2.

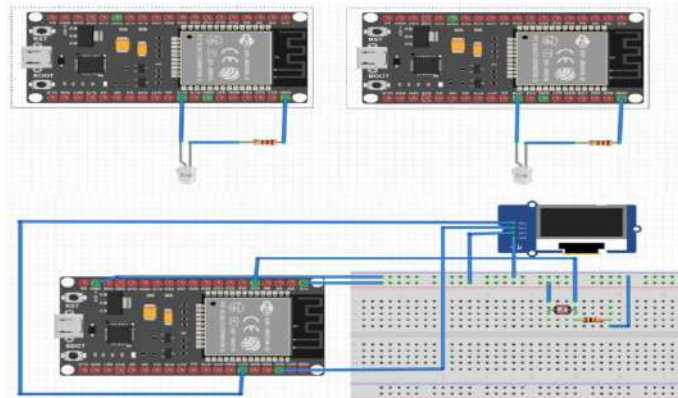


Рисунок 2. Схема аппаратной конфигурации экспериментального стенда на базе микроконтроллера ESP32

На рисунке 3 представлен алгоритм работы модулей системы управления освещением.

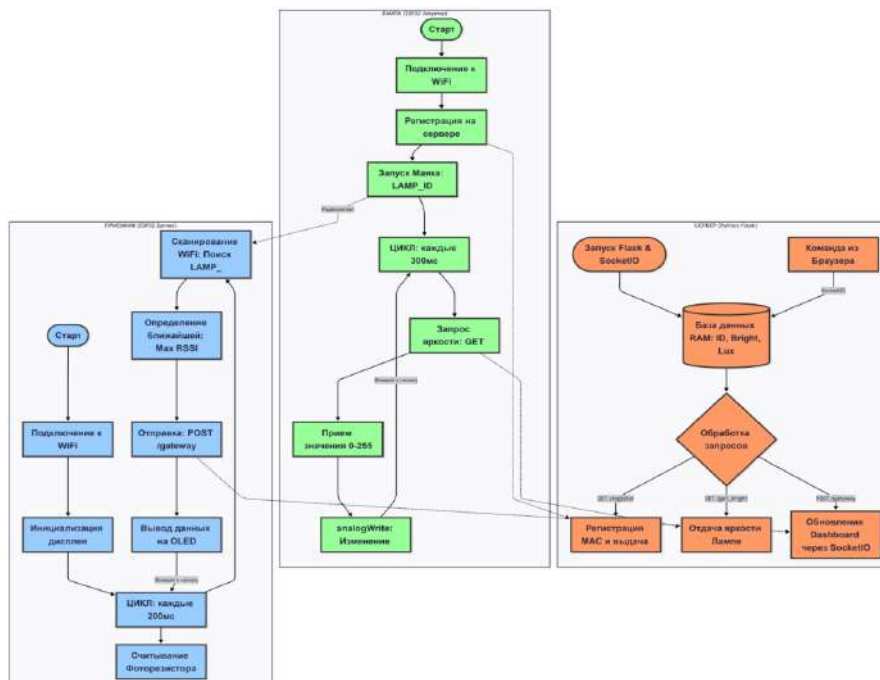


Рисунок 3. Алгоритм работы системы

Алгоритм функционирования системы включает процедуры инициализации модулей, идентификации ближайшего исполнительного узла и адресной реализации управляющего воздействия.

После включения питания исполнительные световые модули подключаются к локальной сети Wi-Fi и выполняют регистрацию на сервере, посредством HTTP-

запроса с передачей MAC-адреса. Серверный модуль, реализованный на языке Python с использованием фреймворка Flask, присваивает каждому модулю уникальный идентификатор. На основе полученного идентификатора исполнительный модуль формирует собственную точку доступа формата LAMP_ID, функционирующую как Wi-Fi-маяк.

Сенсорный модуль после подключения к сети выполняет циклическое измерение уровня освещенности рабочей поверхности посредством считывания аналогового сигнала с фоторезистора через встроенный АЦП. Одновременно осуществляется сканирование доступных Wi-Fi сетей, выделение SSID исполнительных модулей и определение ближайшего светильника по максимальному значению RSSI.

Значение освещенности и идентификатор ближайшего исполнительного модуля передаются на сервер в формате JSON по протоколу HTTP. Дополнительно текущие параметры отображаются на OLED-дисплее сенсорного модуля.

Исполнительные модули функционируют в режиме периодического опроса сервера и получают значение требуемой яркости. Управляющее воздействие реализуется методом широтно-импульсной модуляции в диапазоне 0-255. Адресная маршрутизация управляющего сигнала осуществляется сервером на основании присвоенного идентификатора модуля.

Предложенный алгоритм обеспечивает централизованную обработку данных при распределенной реализации измерительных и исполнительных функций и демонстрирует масштабируемость за счет динамической регистрации узлов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Прототип персонализированной системы управления световой средой на базе микроконтроллера ESP32 представлен на рисунке 4.

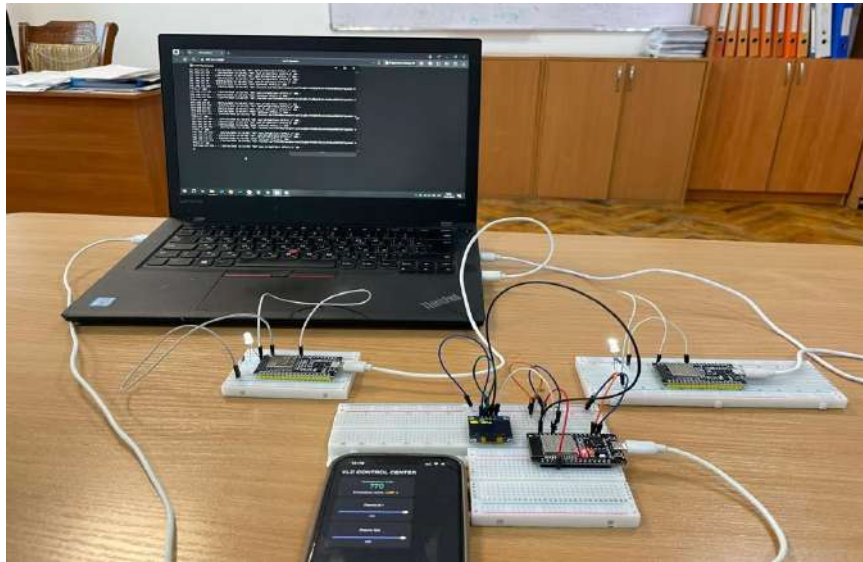


Рисунок 4. Экспериментальный стенд

Экспериментальный стенд включает серверный узел на базе персонального компьютера, сенсорный модуль с фотодатчиком и OLED-дисплеем, а также два исполнительных модуля на базе микроконтроллера ESP32 со светодиодными источниками. В рамках стендовой реализации был внедрён и апробирован алгоритм идентификации ближайшего светильника по уровню RSSI с последующей адресной регулировкой яркости в реальном времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан прототип адаптивной системы управления светодиодным освещением для офисных помещений формата Open Space с учетом пользовательских предпочтений уровня освещенности рабочего пространства. Предложен алгоритм определения ближайшего светильника на основе анализа уровня радиосигнала RSSI с последующей адресной регулировкой яркости. Экспериментальная апробация подтвердила работоспособность архитектуры и корректность функционирования алгоритма. Полученные результаты демонстрирует практическую реализуемость персонализируемого управления освещением в условиях Open Space

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Авторы использовали генеративную языковую модель ChatGPT версии 5.2, разработанную компанией OpenAI. Инструмент применялся для вспомогательной генерации и редактирования текста, уточнения формулировок. Использование ИИ не заменяло авторский научный анализ и исследовательские решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Lee, C., Chen, L., Chu, H., Hsieh, C. (2022). Design and Implementation of a Leader-Follower Smart Office Lighting Control System Based on IoT Technology. IEEE Access, 10(1):28066-28079. doi:10.1109/ACCESS.2022.3158494.
- Zhang, J., Chen, Z., Wang, A., Li, Z., Wan, W. (2023). Intelligent Personalized Lighting Control System for Residents. Sustainability, 15:15355. doi.org/10.3390/su152115355.
- Ошуркова, Е. (2017). Проектирование офисного освещения с учётом Human Centric Lighting. <https://galad.ru/helpful/articles/4236795>. // Oshurkova, E. (2017). Proektirovanie ofisnogo osveshcheniya s uchyotom Human Centric Lighting. <https://galad.ru/helpful/articles/4236795>.
- Болатова, А.Б., Григорьева, С.В., Gyorok, G., Григорьев, Е.А. (2023). Организация системы управления офисным освещением с возможностью точечной настройки. Вестник ВКТУ, 4, 102-111. doi:10.51885/1561-4212_2023_4_102 // Bolatova, A.B., Grigor'eva, S.V., Gyorok, G., Grigor'ev, E.A. (2023). Organizaciya sistemy upravleniya ofisnym osveshcheniem s vozmozhnost'yu tochechnoj nastrojki. Vestnik VKTU, 4, 102-111. doi:10.51885/1561-4212_2023_4_102
- ChatGPT. (2026, February 20). Редактирование научного текста по теме адаптивное управление освещением [Большая языковая модель]. OpenAI. <https://chat.openai.com/>.

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ, АРХИТЕКТУРЕ И ЭНЕРГЕТИКЕ

ЭТНОИДЕНТИЧНОСТЬ В АРХИТЕКТУРЕ КАЗАХСТАНА

УДК 72(574)

А.А.Айдарбекова¹, М.М.Козлова², Т.А.Иноземцева^{1*}

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

² Областная специализированная школа-лицей для детей одаренных в области математики, физики, информатики, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Иноземцева Татьяна Александровна,
TInozemtseva@edu.ektu.kz:

АННОТАЦИЯ. Статья посвящена вопросу этноидентичности в архитектуре Казахстана. На примере архитектуры Центральной Азии выявлены общие черты и специфический характер формирования архитектуры региона (адаптация к ландшафту, символизм неба и природы, геометрические и зооморфные мотивы), рассмотрены современные приемы этноидентичности в архитектуре Казахстана (номадный характер, оседло-исламский синтез). Подчеркивается роль архитектуры в сохранении культурной идентичности в эпоху глобализации. Проведен архитектурно-сравнительный анализ современных зданий Казахстана и архитектурных объектов прошлого для выявления элементов этноидентичности.

Ключевые слова: этноидентичность, архитектура Казахстана, архитектура Центральной Азии, номадизм, орнамент, юрта, культура, традиционные формы, национальные мотивы в архитектуре.

ВВЕДЕНИЕ

Этноидентичность в архитектуре обеспечивает сохранение культурного кода, являясь ключевым фактором формирования устойчивой и аутентичной среды, формирует дух места и адаптирует архитектурные решения к природному контексту, воплощая культурные, исторические и социальные ценности этноса. Как отмечает Бекримжан Глаудинов в своих работах по архитектуре Казахстана, архитектура выступает как зеркало этнических процессов, отражая эволюцию от номадных традиций к современным интерпретациям.

По рассматриваемой теме существует достаточная историко-теоретическая база традиционных форм архитектуры Казахстана, однако современные подходы к интеграции этноидентичности в архитектурную практику остаются фрагментарными и требуют дальнейшей систематизации и междисциплинарного осмысления. В области историко-архитектурных исследований ключевыми можно выделить труды Глаудинова Б.А., Глаудиновой М.Б., Самойлова К.И. Современные исследования архитектуры Казахстана и теоретические подходы отражены в работах Абдрасиловой Г. С.

Цель исследования заключается в выявлении архитектурно-планировочных приемов и символических элементов, формирующих национальную идентичность в традиционном казахском зодчестве, и в определении способов их адаптации в современной архитектурной практике Казахстана для сохранения культурной уникальности.

Для достижения поставленной цели в статье рассматриваются следующие

вопросы: - какие традиционные элементы и формы архитектуры выступают носителями культурного кода Казахстана; - как этноидентичность реализуется в современной архитектуре Казахстана.

В данном исследовании применялись анализ архитектурных объектов, историко-генетический, сравнительно-типологический и описательный методы.

В глобальном контексте архитектура часто служит маркером культурной уникальности, помогая этносам противостоять глобализации, формируя образ страны на международном уровне. Исторически архитектура Центральной Азии формировалась под влиянием Великого Шелкового пути, где переплетались персидские, тюркские и исламские элементы. В советскую эпоху унификация форм не стерла этнические мотивы, а постсоветский период возродил интерес к национальному наследию.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании применены методы теоретического анализа научной литературы, историко-архитектурного и сравнительного анализа. Проведено сопоставление архитектурных объектов различных регионов с целью выявления особенностей этноидентичности. Также использованы методы систематизации и обобщения данных, а также культурно-семиотический анализ для интерпретации символики архитектурных форм.

Этноидентичность в архитектуре - динамичный процесс, в котором глобальные тенденции взаимодействуют с локальными традициями, помогая сохранять культурную преемственность. Казахская культура, сформированная кочевым образом жизни, степными ландшафтами и тюркскими традициями, не могла не отразиться в архитектуре. На территории современного Казахстана сохранилось много артефактов и памятников древних цивилизаций. Петроглифы Тамгалы (Танбалы) — «солнцеголовые» божества, воины, животные, ритуальные сцены и родовые тамги. Эти священные образы фиксировали мировоззрение, социальную организацию и духовные верования пастушеских народов, подчёркивая связь с землёй предков и космосом (Рогожинский А.Е. Петроглифы археологического ландшафта Тамгалы. Алматы, 2011). Сакские курганы, в том числе знаменитый Исыкский курган с «Золотым человеком» (IV–III вв. до н.э.). Насыпи круглой или пирамидальной формы из земли и камня, адаптированные к степному рельефу, символизировали связь с предками, циклом жизни и социальный статус. (Акишев К.А. Курганы Исык. Искусство саков Казахстана. М.: Искусство, 1978).

Шатры и палатки из войлока или кожи - первобытные жилища, обнаруженные на территории Казахстана, ассиметричной конусообразной формы. Вершину конуса поддерживал изнутри шалаша шест. Вход ориентировали на юг. Шатры и палатки позволяли быстро адаптироваться к разным нуждам (мобильность, статус, защита от погоды), демонстрируя практичность и разнообразие кочевого быта (Джанибеков У. Культура казахского ремесла. Алматы, 1990).

Юрта с круглой формой и орнаментами остаётся ключевым символом кочевой идентичности. (Акишев К. А. Искусство и мифология саков. — Алма-Ата: Наука, 1984). Легкое разборное жилище на деревянном каркасе, покрытым войлоком, отличающееся мобильностью и адаптивностью к образу жизни и природно-климатическим условиям. Круглая форма и шанырак символизируют единство семьи, дома и космоса; орнаменты геометрические, зооморфные — гармонию с природой. Внутреннее пространство имеет четкое функциональное и социальное зонирование.

В средневековые кочевые традиции органично переплелись с исламским влиянием в монументальной архитектуре. Основу архитектурных объектов этого периода составляет сакральное зодчество. Культ предков аруахов – посредников

между мирами, проявлялся в таких формах, как стрельчатые арки, вертикальные оси, шлемовидные купола – в сакральных зданиях эти элементы являлись символами связи земного и небесного миров, связи с духами предков. Яркий пример — мавзолей Ходжи Ахмеда Ясави в Туркестане (XIV в., эпоха Тимуридов) и более ранний мавзолей Аиша-Биби (XII в.). Материалы: обожжённый кирпич, камень, терракотовая плитка с резьбой. Особенности — купола символ небесного свода, порталы, богатые геометрические и растительные орнаменты. Вход в некоторых мавзолеях имитирует дверь юрты. Такой синтез подчёркивает духовность, региональное единство и тюркскую идентичность (Глаудинов Б.А., Глаудинова М.Б., Аманбаева Б. Художественная культура Центральной Азии и Азербайджана IX–XV веков. Архитектура. 2013).

Архитектура Казахстана на протяжении тысячелетий отражала тесную связь с природой, предками, космологией (Тенгри), родовыми ценностями и мобильным образом жизни. Основные средства выражения — круглые и купольные формы, богатые орнаменты, тамги (родовые знаки), а также адаптация к суровому климату через местные материалы: дерево, войлок, кожу, камень и глину. Эти элементы эволюционировали от древних наскальных изображений и курганов до юрт, шатров, палаток, монументальных мавзолеев и целых городов, сохраняя преемственность и укрепляя национальное самосознание (Глаудинов Б.А., Глаудинова М.Б. История архитектуры Казахстана. Алматы, 1999).

Архитектура эпохи СССР характеризуется функциональностью, типизацией и идеологической направленностью, ориентированной на массовое строительство, индустриальные методы и унификацию. Но даже в таких условиях в Казахстане архитектура включала этнические элементы. Так появился «национальный модернизм»: бетон и стекло дополнялись солнцезащитными решётками (панжарами) с геометрическими орнаментами, загнутыми козырьками, отсылающими к пологу юрты, калпаку или крышам мавзолеев и мозаиками с национальными мотивами. Такие приёмы делали здания узнаваемо казахскими, не нарушая советской функциональности. Яркими примерами этноидентичной архитектуры могут служить ряд объектов советского периода.

Гостиница «Казахстан» (1977, архитекторы Ю. Ратушный и др.) — 25-этажная башня с золотистой «коронай» из анодированного алюминия на крыше, символизирующей национальные головные уборы и полог юрты; эркеры повернуты под углом для видов на горы и естественной вентиляции.

Дворец Республики (1967–1970, архитекторы Н. Рипинский, Л. Ухоботов, Ю. Ратушный и др.) — загнутый козырёк кровли интерпретируется как полог юрты или калпак; здание удостоено Государственной премии СССР за гармоничное соединение функциональности и национального своеобразия.

Цирк Алматы — пластичные очертания напоминают традиционные шатры кочевников, членения шатра повторяют рисунок кереге.

В этих объектах этнические мотивы стали не просто украшением, а способом выразить культурную идентичность в условиях унифицированной советской архитектуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассматривая современную архитектуру, можно увидеть, что в дизайне многих городских построек используются как буквально копируемые, так и переосмысленные элементы сооружений древнего Казахстана. Тем самым выражая национальную идентичность современной архитектуры. Если кратко рассмотреть схему влияния, то можно сказать, что мавзолеи представляют вертикальную монументальность, купол как «небесный знак», осевая композиция, сакральность, орнамент и кирпичная (каменная) фактура. Юрта – шалаш: купольная - шатровая форма, радиальная схема,

центральный «шанырак», лёгкие, тянущиеся конструкции, мобильность, адаптация к климату.

Образ Мечети Машхура Жусупа в Павлодаре опирается на традиции мавзолеев эпохи раннего и развитого ислама в Центральной Азии, в том числе таких, как Бабаджи-Хатун и Баян-Сулу – это проявляется в форме конусоподобного ребристого купола (рисунок 1).

Сакральные комплексы считались «жилем» для предков, поэтому многие архитектурные приемы, используемые в них, применялись позже в жилых зданиях. Так, в жилом комплексе Millennium Park в Астане стрельчатая аркада придает современной архитектуре настроение Востока. Особенность ЖК Алматы Тауэрс заключается в том, купола на крыше формирует вертикальную ось зданий, а углы фиксируются цилиндрическим остеклением на подобие колонн на углах мавзолея Айша-Биби (рисунок 2). Стрельчатые арки мавзолеев нашли свое отражение в архитектуре входного портала ВДНХ (выставочный комплекс КЦДС «Атакент») в Алматы (рисунок 3,).



Рисунок 1. Влияние традиции мавзолеев (Бабаджи-Хатун и Баян-Сулу) на архитектуру Мечети Машхура



Рисунок 2. Проявление традиции мавзолеев (Хаджа Ахмета Ясауи) на архитектуру жилых и общественных зданий (ЖК Millennium Park в Астане, входной портал выставочного комплекса «Атакент»)



Рисунок 3. Идентичность архитектурных приемов мавзолея Арыстан-Баба и ЖК Алматы Тауэрс.

Современная архитектура Казахстана представляет собой пример гармоничного синтеза глобальных тенденций и глубокой этнической идентичности. После

обретения независимости она превратилась в мощный инструмент формирования национального самосознания.

Перенос столицы в Астану в 1997 году стал поворотным моментом: этноидентичность вышла на первый план, превратившись из декоративного элемента в центральную идею проектов. Известные архитекторы (Н. Фостер и др.) и местные специалисты начали создавать знаковые объекты, где традиции кочевников стали символом нового, уверенного в себе государства. В Астане этнические мотивы достигли максимальной выразительности в крупных, футуристических сооружениях:

От шалашей к огромному «шатру» - Хан Шатыр (2010, Н. Фостер) (рисунок 4). Это крупный общественный «шатёр», торгово-развлекательный центр, стилизованный под монументальную палатку: внешний силуэт Хан Шатыра повторяет общую шатровую геометрию шалаша: радиальная схема, центральная система опоры и натяжения — как у шалаша, где кольцевой каркас и центральный потолочный элемент держат обшивку. Верхний «световой купол» Хан Шатыра выполнен в виде Шанырака—шанырак пропускает свет и служит ритуальным центром визуальным ориентиром. Хан Шатыр, как и юрта, адаптирован к экстремальному климату: создаёт контролируемую среду. Юрта или шалаш символизируют открытость, приём гостей; Хан Шатыр в публичном значении — место притяжения для горожан и гостей города, «гостеприимная архитектура» в городском масштабе.

Байтерек (2002, архитектор Акмурза Рустембеков) — башня высотой 105 метров воплощает легенду о Древе Жизни; золотой шар на вершине — мифическое яйцо Самрук, внутри — макет шанырака, а высота отсылает к году переноса столицы; это сакральный символ связи поколений и независимости.

Таким образом, можно выделить устойчивые элементы и приемы этноидентичности в казахской архитектуре: шанырак - как универсальный символ единства и космоса (в интерьерах, фасадах, световых проёмах); круглые и купольные формы, эхом повторяющие юрту и мавзолеи; орнаменты (геометрические, зооморфные), восходящие к петроглифам и войлочным узорам; адаптация к климату.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Архитектура Казахстана прошла эволюцию от советского «национального декора» к полноценному региональному модернизму, где глобальные формы обогащаются древними символами. Она не просто строит города — она укрепляет этническую идентичность, связывая кочевую цивилизацию прошлого с амбициозным будущим страны (Abdrassilova G. The transformation of modern architecture in Kazakhstan, 2021).

Этноидентичность в архитектуре — динамичный процесс, где глобальные тенденции встречаются с локальными традициями. Дальнейшие исследования укрепят роль архитектуры в культурном сохранении. Она выступает как мост между прошлым и настоящим, при этом этноидентичность выступает ключевым фактором формирования архитектуры Казахстана. Эволюция от кочевых форм и сакрального зодчества через советский национальный модернизм к современной архитектуре демонстрирует переход от декоративного использования национальных мотивов к их концептуальному осмыслению. Современная архитектура Казахстана интегрирует традиционные символы и формы — шанырак, купольные структуры, орнамент — в контексте инновационных технологий и глобальных тенденций, формируя устойчивую, аутентичную и конкурентоспособную архитектурную среду.

Обширный интерес к этноидентичности в архитектуре Казахстана требует дальнейшего изучения. Перспективными направлениями являются разработка целостной методологии интеграции традиционных элементов в современное

проектирование, исследование принципов номадной архитектуры в контексте устойчивого развития и «зелёного» строительства.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В процессе подготовки статьи авторы использовали инструменты генеративного искусственного интеллекта (ChatGPT, OpenAI) для редактирования и стилистической корректировки отдельных фрагментов текста. Все научные выводы и содержание работы принадлежат авторам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акишев К. А. Искусство и мифология саков. — Алма-Ата: Наука, 1984. (Петроглифы, курганы, символика животных — основа номадной идентичности)
- Глаудинов Б.А., Глаудинова М.Б. История архитектуры Казахстана. Алматы, 1999
- Рогожинский А.Е. Петроглифы археологического ландшафта Тамгалы. Алматы, 2011
- Маргулан А. Х. Казахская народная архитектура (юрта, мавзолеи, орнамент). — Алма-Ата: Жалын, 1986. (Классика по традиционной казахской архитектуре)
- Джанибеков У. Культура казахского ремесла. Алматы, 1990
- Ергалиева Р. А. Этнокультурные традиции в современном искусстве Казахстана. — Алматы: Қазақ университеті, 2002. (Связь орнамента, архитектуры и идентичности в постсоветский период)
- Ибраева К. Т. Казахский орнамент: семантика и символика. — Алматы: Атамұра, 1994. (Қошқар мүйіз, геометрия, связь с архитектурными узорами)
- Глаудинов Б.А., Глаудинова М.Б., Аманбаева Б. Художественная культура Центральной Азии и Азербайджана IX–XV веков. Архитектура. 2013
- Массон В. М. Древние цивилизации Центральной Азии. — Алматы: Ғылым, 1995.
- Аскаров Ш.Д. Регион — пространство — город. М.: Стройиздат, 1988.
- Глаудинов Б. Қазақстан архитектурасы. Том 8. Алматы: Өнер, 2012.
- Abdrassilova G. The transformation of modern architecture in Kazakhstan, 2021
- Байпаков К.М. Древняя и средневековая урбанизация Казахстана. Алматы, 2012
- Самойлов К.И. Архитектура Казахстана XX века. М.– Алматы, 2004
- Официальный портал о культурном наследии Казахстана <https://e-history.kz/ru>
- Национальная комиссия по делам ЮНЕСКО в РК <https://unesco.kz>
- Сайт «Kazakhstan.Travel» — архитектура и достопримечательности <https://kazakhstan.travel/ru>
- Enbek.kz / Вестник архитектуры Казахстана <https://vestnik-kgasu.kz>
- Официальный сайт комплекса «Байтерек» <https://bayterek.kz/>
- Информационный портал Nur.kz <https://www.nur.kz/family/architecture/>
- Сайт архитектурного бюро Foster + Partners <https://www.fosterandpartners.com/projects/khan-shatyr-entertainment-centre/>
- Архитектурный портал ArchDaily <https://www.archdaily.com/>
- The Steppe — культурный журнал Казахстана <https://www.the-steppe.com/>
- Архитектурное сообщество KazArch <https://kazarch.kz/> (аналитика о влиянии древнего зодчества и национальных мотивов в современных проектах)
- <https://silkadvis.com/en/content/arystanbab-mavzoley>
- <https://www.advantour.com/rus/kazakhstan/turkestan/yasawi-mausoleum.htm>
- ChatGPT. (2026, March 24). Помощь в редактировании и стилистической корректировке научного текста [Большая языковая модель]. OpenAI. <https://chat.openai.com/>

ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТАУНХАУСОВ В КАЗАХСТАНЕ

УДК 728

М. Айдарбекұлы^{1*}, Т.А. Иноземцева¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет имени Даулета Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Айдарбекұлы Мәди, e-mail: Maydarbekuly@inbox.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассматривается таунхаус как один из современных типов малоэтажной жилой застройки. Актуальность исследования обусловлена быстрым ростом городов Казахстана, увеличением численности населения и необходимостью более рационального использования городских территорий. Таунхаусы представляют собой жилые дома, состоящие из нескольких соединённых между собой блоков, каждый из которых предназначен для проживания одной семьи и имеет отдельный вход.

Целью исследования является изучение архитектурных особенностей таунхаусов, анализ международного опыта их развития и оценка перспектив внедрения данного типа жилья в Казахстане.

В работе использованы методы анализа научной литературы, сравнительного анализа зарубежных примеров, а также изучение современных жилых комплексов.

В результате исследования установлено, что таунхаусы представляют собой эффективный тип малоэтажной застройки, сочетающий преимущества индивидуального дома и городской инфраструктуры. Особое внимание уделено развитию таунхаусов в Казахстане, влиянию культурных традиций и образа жизни казахской семьи на планировочные решения жилья, а также перспективам распространения данного типа жилых домов.

Ключевые слова: Таунхаусы, малоэтажная застройка, архитектура жилья, планировка домов, Казахстан, жилые комплексы, городское развитие.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в Казахстане наблюдается активное развитие жилищного строительства. Крупные города страны продолжают расти, увеличивается численность населения, а также возрастает спрос на комфортное, современное и функциональное жильё. Согласно государственным программам, ежегодно вводятся значительные объёмы жилой недвижимости.

Однако, несмотря на масштабное строительство, традиционные формы застройки не всегда в полной мере отвечают современным требованиям. Многоэтажные жилые дома обеспечивают высокую плотность, но сопровождаются дефицитом парковочных мест, недостатком озеленения и общественных пространств (Carmona et al., 2010). Индивидуальные коттеджи, напротив, отличаются высоким уровнем комфорта, но требуют значительных земельных и финансовых ресурсов.

В этих условиях возникает необходимость поиска промежуточных решений, способных объединить преимущества различных типов жилья. Именно в таком контексте особую актуальность приобретают таунхаусы — блокированные жилые дома, сочетающие компактность застройки и приватность проживания.

Международный опыт показывает, что таунхаусы успешно применяются в Европе, Северной Америке и Азии, формируя устойчивую и комфортную городскую

среду (Jenks et al., 2005; Gehl, 2011). Это позволяет рассматривать их как перспективное направление и для Казахстана.

Целью исследования является анализ планировочных особенностей таунхаусов и выявление перспектив их развития в условиях Казахстана.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках исследования были использованы методы анализа научной литературы, сравнительного анализа и изучения реализованных проектов. Такой комплексный подход позволил не только рассмотреть существующие решения, но и выявить закономерности их адаптации к различным условиям.

Логическим продолжением данного анализа становится обращение к историческим предпосылкам формирования таунхаусов. Первые формы рядовой застройки появились в Европе в XVII–XIX веках, где в условиях роста городов возникла необходимость компактного размещения жилья. Особенно ярко это проявилось в Великобритании, где сформировались кварталы блокированных домов (Hall, 2014).

В дальнейшем данный тип жилья получил развитие в Северной Америке, где стал доступной альтернативой индивидуальным домам (Urban Land Institute, 2019). В странах Азии таунхаусы адаптировались к высокой плотности населения, что привело к формированию более компактных и гибких планировочных решений.

Таким образом, международный опыт демонстрирует разнообразие подходов к организации блокированной застройки, что естественным образом подводит к необходимости их сопоставления с условиями Казахстана.

В Казахстане таунхаусы начали активно развиваться в начале XXI века, преимущественно в пригородах крупных городов. Несмотря на относительно небольшую долю (5–7 %), интерес к данному формату стабильно растёт (Бюро национальной статистики РК, 2023).

Однако при прямом заимствовании зарубежных решений возникает ряд ограничений, связанных с культурными и социальными особенностями. В этой связи важным становится рассмотрение так называемых «планировочных сценариев», отражающих влияние образа жизни на организацию пространства.

Анализ показывает, что американская открытая планировка, европейская система разделённых пространств и азиатская гибкость не могут быть напрямую перенесены в казахстанские условия. Это связано с многопоколенной структурой семьи и особым значением общественных пространств внутри дома.

В казахстанской практике входная зона выполняет расширенные функции и становится частью социальной среды. Гостиная приобретает статус центрального пространства дома, предназначенного для приёма гостей и проведения мероприятий, что требует увеличения её площади.

Кухня, как правило, остаётся изолированной, что обусловлено спецификой национальной кухни. Санузлы разделяются на гостевые и семейные, а планировка учитывает комфорт старшего поколения.

Таким образом, постепенно формируется особый тип планировочной организации, сочетающий элементы различных сценариев и адаптированный под местные условия.

Переходя от теоретического анализа к практическому сопоставлению, целесообразно рассмотреть конкретные планировочные параметры. (Таблица 1, Рисунок 1, Рисунок 2.)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведённый анализ позволяет сделать вывод о том, что формирование планировочных решений таунхаусов в Казахстане находится в стадии активного переосмысления.

С одной стороны, сохраняется влияние международного опыта, проявляющееся в общей структуре блокированной застройки и базовых принципах организации пространства. С другой стороны, выявленные различия свидетельствуют о постепенном формировании нового, адаптированного типа планировки.

На основе проведённого сравнения можно утверждать, что в Казахстане складывается собственный формат таунхаусной застройки, ориентированный на потребности местного населения. Ключевыми характеристиками данного формата являются:

- увеличение ширины блоков и пролётов, обеспечивающее более свободную организацию пространства;
- отказ от жёстко заданных планировочных схем в пользу гибкости и трансформируемости;
- ориентация на возможность индивидуальной адаптации планировки под конкретную семью;
- усиление роли общественных зон внутри дома, прежде всего гостиной;
- функциональное разделение помещений с учётом многопоколенного проживания.

Таким образом, можно говорить о формировании новой модели планировки таунхаусов, в которой приоритет отдаётся не универсальным архитектурным решениям, а реальным потребностям пользователей.

Это означает, что в условиях Казахстана таунхаусы должны проектироваться не как стандартизированный продукт, а как гибкая система, способная адаптироваться под различные сценарии жизни. В этом контексте ключевыми принципами становятся увеличение пространственной свободы, вариативность планировок и возможность их дальнейшей трансформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Казахстане развитие таунхаусов находится на стадии активного формирования. Несмотря на относительно небольшую долю, данный формат демонстрирует значительный потенциал.

В результате исследования установлено, что таунхаусы представляют собой эффективный тип малоэтажной жилой застройки, сочетающий преимущества индивидуального дома и городской инфраструктуры. Международный опыт подтверждает их эффективность в формировании комфортной городской среды (Gehl, 2011).

В то же время, выявлено, что в Казахстане формируется собственная модель планировочных решений, отличающаяся увеличенными площадями, гибкостью планировки и ориентацией на многопоколенное проживание. Определено, что ключевым фактором является адаптация зарубежного опыта с учётом культурных и социальных особенностей. В Казахстане это приводит к формированию нового типа планировочных решений, ориентированных на гибкость, простор и индивидуальные потребности семьи.

Таунхаусы обладают значительным потенциалом развития в Казахстане как современный и востребованный формат жилья. Их дальнейшее распространение связано с необходимостью учета национальных традиций, образа жизни и климатических условий. Развитие данного типа застройки способствует формированию комфортной, устойчивой и функциональной городской среды.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена без внешнего финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность преподавателям кафедры архитектуры Восточно-Казахстанского технического университета за помощь и консультации при подготовке исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В данной работе были использованы научные источники, нормативные документы и аналитические материалы, представленные в списке литературы. При подготовке текста также применялись технологии искусственного интеллекта (в том числе системы обработки и генерации текста), которые использовались исключительно в качестве вспомогательного инструмента для поиска информации, структурирования материала и повышения качества изложения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction
<https://archive.org/details/patternlanguage00alex>
 Public Places – Urban Spaces <https://www.routledge.com/Public-Places-Urban-Spaces/Carmona-Heath-Oc-Tiesdell/p/book/9780750663630>
 Cities for People <https://islandpress.org/books/cities-people>
 The Compact City: A Sustainable Urban Form? <https://www.routledge.com/The-Compact-City/Jenks-Burton-Williams/p/book/9780419213008>
 Cities of Tomorrow <https://www.wiley.com/en-us/Cities+of+Tomorrow-p-9781118456475>
 House Form and Culture <https://archive.org/details/houseformculture00rapo>
 Urban Land Institute <https://uli.org>
 Architecture: Form, Space, and Order <https://www.wiley.com/en-us/Architecture+Form+Space+and+Order-p-9781118745081>
 Urbanization: An Introduction to Urban Geography <https://www.pearson.com>
 UN-Habitat <https://unhabitat.org>
 Бюро национальной статистики Республики Казахстан <https://stat.gov.kz>
 Комитет по делам строительства и ЖКХ РК <https://www.gov.kz>
 СП РК 3.01-101-2013 <https://online.zakon.kz>
 СН РК 3.02-01-2011 <https://online.zakon.kz>
 The Death and Life of Great American Cities
<https://archive.org/details/deathlifeofgreat00jaco>
 Streets and the Shaping of Towns and Cities <https://islandpress.org>
 UN-Habitat <https://unhabitat.org> раздел reports
 ChatGPT GPT-5.3 (25 марта 2026). Запросы: генерация и редактирование научного текста по теме градостроительства и жилой застройки; консультации по нормативам и структуре работы. — Большая языковая модель. — OpenAI. — URL: <https://chat.openai.com>

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ НАВЕСНЫХ ВЕНТИЛИРУЕМЫХ ФАСАДНЫХ СИСТЕМ С УЧЁТОМ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

УДК 69.022.3

М.С. Акимжанов^{1*}, М.А Рахимов²

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан.

²Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, г. Караганда, Казахстан

* Автор-корреспондент: Акимжанов Мерей Серикович, e-mail: merai_kz_vko@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье выполнен комплексный анализ природных и техногенных факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики навесных вентилируемых фасадных систем (НВФС). Рассмотрены климатические параметры, регламентируемые действующими строительными нормами Республики Казахстан: температурные воздействия, атмосферные осадки, ветровые нагрузки, солнечная радиация, акустические и противопожарные требования. На основе нормативной базы СН РК и СП РК выполнена оценка влияния указанных факторов на долговечность и надёжность фасадных систем. Показано, что применение вентилируемой воздушной прослойки, современных теплоизоляционных материалов и конструктивных решений подконструкции позволяет повысить энергоэффективность и эксплуатационную устойчивость зданий. Обоснована необходимость комплексного учёта климатических факторов на стадии проектирования.

Ключевые слова: навесные фасады, климатические нагрузки, ветровая нагрузка, сопротивление теплопередаче, солнечная радиация, звукоизоляция, пожарная безопасность.

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование ограждающих конструкций зданий в условиях резко континентального климата Республики Казахстан требует обязательного учёта температурных колебаний, ветровых нагрузок, атмосферных осадков и солнечной радиации.

Согласно СН РК 2.04-21-2004 «Строительная климатология», для каждого климатического района устанавливаются:

- расчётные температуры наружного воздуха;
- средние температуры отопительного периода;
- нормативные температурные перепады;
- данные по осадкам и ветровым нагрузкам.

Навесные вентилируемые фасадные системы относятся к многослойным ограждающим конструкциям и выполняют одновременно теплоизоляционную, защитную и архитектурную функции.

Цель исследования – анализ влияния климатических и техногенных факторов на технические характеристики НВФС и обоснование проектных решений, обеспечивающих их надёжность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использованы следующие нормативные документы Республики Казахстан:

- СН РК 2.04-21-2004 «Строительная климатология»
- СП РК EN 1991-1-4 «Нагрузки и воздействия. Ветровые нагрузки»
- СН РК 2.03-30-2017 «Нагрузки и воздействия»
- СН РК 2.04-03-2011 «Тепловая защита зданий»
- СП РК 2.02-101-2014 «Пожарная безопасность зданий и сооружений»

Методика исследования включала:

- анализ климатических данных;
- расчёт сопротивления теплопередаче;
- анализ ветровых нагрузок;
- оценку акустических характеристик;
- анализ пожарной безопасности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведённый анализ природных и техногенных факторов позволил установить закономерности формирования эксплуатационных характеристик навесных вентилируемых фасадных систем (НВФС) в условиях климатических районов Республики Казахстан.

Результаты теплотехнических расчётов показали, что применение многослойной конструкции с воздушной вентилируемой прослойкой обеспечивает снижение тепловых потерь по сравнению с традиционными монолитными ограждающими конструкциями. За счёт включения эффективного теплоизоляционного слоя и воздушного зазора формируется стабилизированное температурное поле по поверхности фасада.

При расчётах учитывались значения удельной теплопроводности материалов, их толщина, а также коэффициенты теплотехнической однородности. Установлено, что наличие металлической подконструкции оказывает локальное влияние на тепловое поле, однако при правильном подборе крепёжных элементов и схемы их расположения снижение общего сопротивления теплопередаче не превышает нормативно допустимых значений.

Таким образом, НВФС демонстрируют высокий потенциал повышения энергоэффективности зданий при соблюдении требований СН РК 2.04-03-2011.

На основании экспериментальных данных была разработана схема интенсивности воздействия ливневого дождя на фасад (рисунок 1), а также выполнен анализ распределения потоков влаги по поверхности системы (рисунок 2).

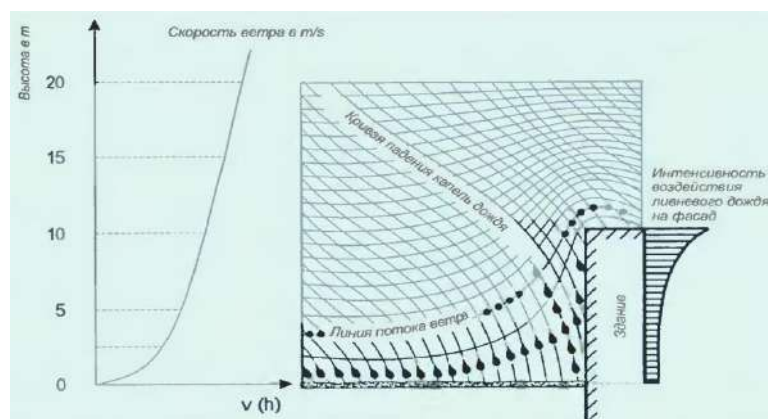


Рисунок 1. Интенсивность воздействия ливневого дождя на фасад

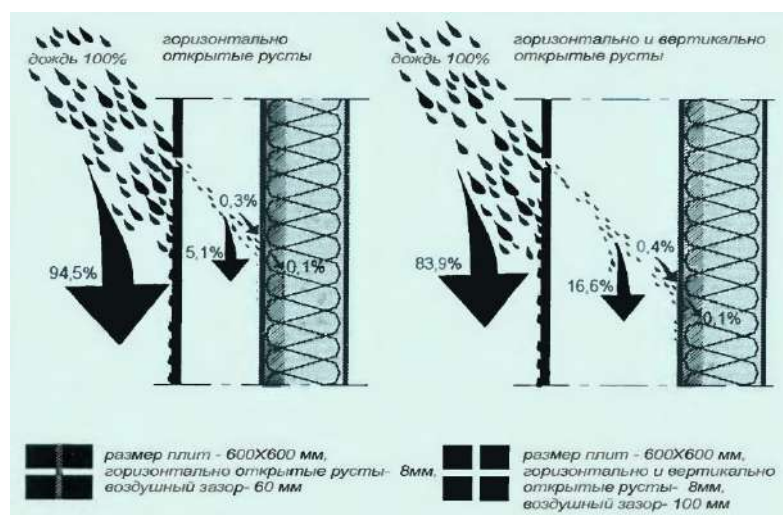


Рисунок 2. Схема воздействия ливневого дождя на фасад

Результаты показали, что благодаря конструктивному разделению облицовочного и теплоизоляционного слоя, а также наличию вентиляционного зазора, атмосферная влага не проникает к несущей конструкции. Вода, попадающая в межпанельные швы, эффективно удаляется через систему дренирования воздушного пространства.

Таким образом, конструкция НВФС обеспечивает устойчивость к воздействию осадков без ухудшения эксплуатационных характеристик теплоизоляционного слоя.

Моделирование движения ветровых потоков (рисунок 3) позволило определить характер распределения аэродинамического давления на поверхности фасада (рисунок 4).

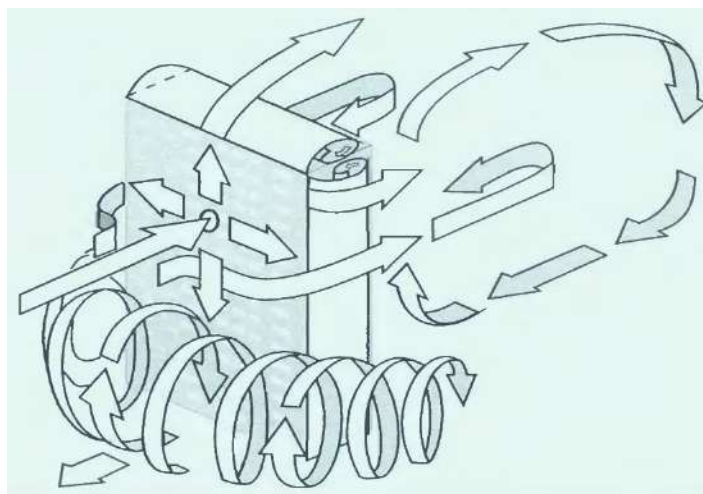


Рисунок 3. Модель движения ветровых потоков вокруг здания

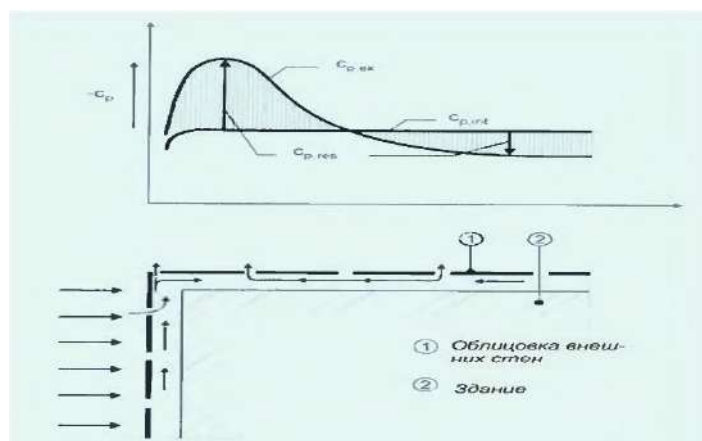


Рисунок 4. Схема распределения ветровой нагрузки на НВФС

Установлено, что максимальные значения ветрового давления формируются в угловых зонах здания и в верхних этажах. Конструкция вентилируемой системы позволяет регулировать ветровое воздействие за счёт изменения ширины рустов, конфигурации облицовки и схемы крепления панелей.

Дополнительно исследована возможность использования металлической подконструкции в качестве экранирующей системы. Результаты расчётов коэффициентов редуцирования электрического напряжения приведены в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты редуцирования образующегося напряжения

Тип экранирующей системы	Расстояние между проводниками, м	Редукция образующегося напряжения
Внешняя система молниеотвода	20	1
	10	2
Подконструкция, пронизанная соединениями	2	15
	2	25
Облицовка, пронизанная соединениями	1	60
	0,5	100

Полученные данные свидетельствуют о значительном снижении уровня электромагнитного воздействия при плотной системе соединений подконструкции и облицовки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого исследования выполнен комплексный анализ природных и техногенных факторов, влияющих на технические характеристики навесных вентилируемых фасадных систем в условиях климатических районов Республики Казахстан.

Установлено, что многослойная конструкция НВФС с вентилируемой воздушной прослойкой обеспечивает повышение энергоэффективности зданий за счёт формирования устойчивого температурного режима и снижения тепловых потерь.

Результаты теплотехнических расчётов подтвердили соответствие системы требованиям действующих нормативных документов.

Анализ воздействия атмосферных осадков показал, что конструктивная схема фасада эффективно защищает теплоизоляционный и несущий слои от увлажнения, обеспечивая удаление влаги через вентиляционный зазор. Моделирование ветровых потоков позволило определить зоны максимального аэродинамического воздействия и подтвердило возможность регулирования ветровых нагрузок посредством конструктивных решений.

Исследование влияния солнечной радиации выявило зависимость тепловых нагрузок от ориентации фасадов, что необходимо учитывать при выборе облицовочных материалов. Экспериментальные данные по звукоизоляции показали, что навесные фасадные системы обеспечивают показатели индекса изоляции воздушного шума, превышающие нормативные требования для большинства типов зданий.

Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка оптимизированных фасадных решений с интеграцией энергосберегающих технологий и цифрового мониторинга состояния конструкций в процессе эксплуатации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования в рамках учебной и научно-исследовательской деятельности.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за методологическую поддержку, конструктивные замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению качества исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- СН РК 2.04-21-2004. Строительная климатология. – Астана: КазНИИСА, 2004. – 85
- СН РК 2.04-03-2011. Тепловая защита зданий. – Астана: КазНИИСА, 2011. – 72 с.
- СП РК EN 1991-1-4. Нагрузки и воздействия. Часть 1-4: Ветровые нагрузки. – Астана: Комитет по делам строительства и ЖКХ МИИР РК, 2017. – 98 с.
- СП РК 2.02-101-2014. Пожарная безопасность зданий и сооружений. – Астана: КазНИИСА, 2014. – 120 с.
- Фролов К.В., Белов С.В. Фасадные системы зданий: конструктивные решения и расчёт. – М.: АСВ, 2018. – 256 с.
https://marhi.ru/sveden/files/LEKCIYA_Fasady_24_yanvary_a_2019.pdf
- Neville A.M. Properties of Concrete. – 5th ed. – Harlow: Pearson Education Limited, 2011. – 846 p.
[properties-of-concrete-by-a-m-neville.pdf](https://www.researchgate.net/publication/312144444_properties-of-concrete-by-a-m-neville)

ПРИМЕНЕНИЕ NOVOCRETE ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВ В КАЗАХСТАНЕ**УДК 625.7/.8****Б.Т. Алимгазин^{1*}, Б.Е. Махиев¹**¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан*Автор-корреспондент: Алимгазин Бакытбек Токеновня, e-mail: Balimgazin@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В условиях интенсивного развития транспортной инфраструктуры Казахстана, строительство долговечных и экономически эффективных автомобильных дорог является стратегической задачей. В статье рассматривается эффективность применения технологии NovoCrete® при стабилизации грунтов оснований автомобильных дорог Восточно-Казахстанской области, характеризующихся резко континентальным климатом, значительной глубиной сезонного промерзания (до 2 м) и распространением пучинистых суглинистых грунтов.

Настоящее исследование направлено на изучение и оценку эффективности применения перспективной технологии NovoCrete для стабилизации грунтов, что позволит повысить качество и долговечность дорожных конструкций в сложных климатических и геологических условиях Казахстана.

Цель исследования – оценка влияния модифицированной цементной стабилизации на несущую способность, морозостойкость и экономической эффективности дорожной конструкции.

В работе использованы лабораторные испытания стабилизированных образцов грунта, расчёт модуля деформации E_2 , прочности при сжатии и технико-экономического сравнение с традиционной конструкцией дорожной одежды. Дополнительно приведен расчётный пример для участка автомобильной дороги III категории в ВКО.

В качестве основного направления значительного повышения эффективности работ по строительству и ремонту дорог может быть с успехом использована технология укрепления грунтов минеральными и комплексными вяжущими, а также технология холодного ресайклинга.

Укрепление грунта, как правило, производится с применением специализированных химических добавок к вяжущим веществам (портландцемент). Данный метод позволяет производить работы в 3-5 раз быстрее по сравнению с традиционными методами стабилизации грунтов.

Ключевые слова: стабилизация грунтов, NovoCrete®, дорожная одежда, цементогрунт, CBR (калифорнийское число), прочность, морозостойкость, инновационные технологии.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие транспортной инфраструктуры Восточно-Казахстанской области требует применения эффективных современных технологий укрепления оснований автомобильных дорог. Климат региона характеризуется температурными колебаниями от -40°C до $+38^{\circ}\text{C}$ и значительной глубиной промерзания, что вызывает морозное пучение и потерю несущей способности грунтов и неравномерного увлажнения.

Традиционные методы устройства дорожных оснований (замена грунта, устройство щебеночных и гравийных подушек, цементная стабилизация)

сопровождаются значительными материальными и энергетическими затратами, а также высокой зависимостью от качества местных инертных материалов.

В последние годы внимание специалистов привлекает технология химико-минеральной модификации цементогрунтов с использованием добавки NovoCrete®, позволяющая формировать гидравлически связанный слой с улучшенными физико-механическими характеристиками. NovoCrete используется в качестве добавки к обычным цементам, таким как СЕМ I и СЕМ II, при стабилизации грунтов. Благодаря взаимодействию грунта, цемента и оптимального содержания воды в процессе гидратации цемента усиливается образование кристаллических структур. Полученные стабильные слои обладают очень высокой прочностью на растяжение и обеспечивают высокий уровень «гибкости», что позволяет им поглощать вибрации, создаваемые тяжёлыми грузовыми автомобилями.

При использовании технологии Novocrete грунты стабилизируются непосредственно на месте методом механического перемешивания (дорожные фрезы, смесители, катки и др.) с равномерным распределением материала Novocrete.

Глубина стабилизации грунта может варьироваться в зависимости от требований проекта (несущая способность, морозостойкость, ширина и т.д.). Благодаря короткому времени реакции материала Novocrete время строительства сокращается примерно на 50%, и обычно дороги можно использовать уже через 2 дня.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования – суглинистый грунт с показателем CBR = 5 % (относительная величина, определяющая несущую способность и прочность дорожных грунтов и оснований), влажностью 18 %, плотностью 1,85 т/м³ [3].

NovoCrete® представляет собой минеральную порошкообразную добавку, вводимую в цемент в количестве около 2 % от массы вяжущего. Технология основана на модификации процессов гидратации портландцемента с формированием плотной кристаллической структуры гидросиликатов кальция.

Основные механизмы действия:

- ускорение гидратации цемента;
- формирование игольчатых кристаллических структур;
- снижение пористости;
- уменьшение водопроницаемости (до 10^{-9} м/с);
- повышение сопротивляемости циклам замораживания-оттаивания;
- стабилизация глинистых и илистых частиц за счет ионного обмена.

В отличие от традиционной цементной стабилизации, формируется не рыхлая гранулированная структура, а плотный гидравлически связанный массив с низкой проницаемостью.

На территории Казахстана распространены:

- суглинки и глины с высокой морозной пучинистостью (F2–F3);
- засоленные грунты;
- грунты с переменной влажностью;
- слабые основания с низким показателем CBR (2–8 %).

В таких условиях традиционная конструкция дорожной одежды требует увеличения толщины морозозащитных слоев до 60–75 см, что существенно увеличивает стоимость строительства.

Для оценки эффективности применения технологии выполнен сравнительный анализ по следующим показателям [4-7]:

- модуль деформации;
- предел прочности при одноосном сжатии;
- коэффициент водопроницаемости;

- устойчивость к циклам замораживания и оттаивания;
- толщина конструктивных слоев;
- экономические показатели.

Для оценки эффективности технологии были исследованы образцы глинистых и супесчаных грунтов, характерных для восточных и северных регионов Казахстана. Расчетные данные основаны на лабораторных испытаниях стабилизированных грунтов при содержании цемента 10–14 % и добавке NovoCrete® 2 % от массы цемента.

Испытания проводились по методике определения вторичного модуля деформации E_2 методом статической плиты.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исходные данные:

- Автомобильная дорога «Подъезд к селу Алмасай», ВКО Уланский район, 0–7,5 км.;
- Расчетная нагрузка – 100 кН;
- Интенсивность движения – ≈ 1500 авт./сут;
- Глубина промерзания – 1,8 м;
- Грунт основания – суглинок (CBR 5 %).

Таблица 1. Физико-механические характеристики

№	Показатель	До стабилизации	После стабилизации
1	Показатель несущей способности CBR	5 %	65 %
2	Модуль деформации E_2	45 МПа	210 МПа
3	Прочность на сжатие	0,6 МПа	3,8 МПа
4	Коэффициент фильтрации	10^{-5} м/с	10^{-9} м/с

Это превышает показатели традиционной цементной стабилизации на 20–40 %. Прирост модуля деформации составил более 4,5 раза. Существенно снизилась водопроницаемость, что критично для предотвращения морозного пучения.

Благодаря низкой водопроницаемости стабилизированный слой практически исключает капиллярный подсос воды, что значительно снижает морозное пучение.

Для условий северного и восточного Казахстана (глубина промерзания до 2,0 м) данный фактор имеет критическое значение.

Таблица 2. Результаты испытаний

№ р/с	Наименование показателей, единицы измерений	НД на методы испытаний	Норма по нормативному документу	Фактические результаты
1	2	3	4	5
1	Предел прочности на сжатие образцов после 7 суток, МПа	СТ РК 1218-2003	После 28 суток (не менее 4,0)	5,44

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение технологии позволяет:

- уменьшить общую толщину дорожной одежды на 20–30 %;
- рост модуля деформации более чем в 4 раза по сравнению с исходным грунтом;
- снижение водопроницаемости на 4 порядка;
- отказаться от замены слабого грунта;
- сократить объем завозимых инертных материалов;
- повышение долговечности покрытия.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках магистерского исследования без внешнего финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность ОП 7М07304 «Автомобильные дороги» ВКТУ за методическую поддержку и филиал РГП на ПХВ «Национальный центр качества дорожных активов» за организацию и проведение экспериментальных исследований.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дорожное грунтоведение и механика земляного полотна: Учеб. Пособие для вузов по спец. «Автомобильные дороги», «Мосты, транспортные тоннели и метрополитены» / Ю.Г. Бабаскин. – Минск: Новое знание; Москва: ИНФА-М, 2013. – 462 с.

https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/3632/Dorozhnoe_gruntovedenie_i_mekhanika.pdf?sequence=1

СТ РК 1686-2007 «Автомобильные дороги. Методы определения калифорнийского числа (CBR) для оценки несущей способности грунта»

https://prg.kz/document/?doc_id=30359729

СП РК 3.03-101-2013 Автомобильные дороги (с изменениями и дополнениями от 25.02.2019 г.).

https://prg.kz/document/?doc_id=38726150

ГОСТ 20276-2012 Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости.

<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293787/4293787736.pdf>

ҚҰРЫЛЫС САЛАСЫНДА ҚАУІПСІЗДІК ДЕҢГЕЙІН АРТТЫРУДА ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУ

ӨОЖ 004.8:69

Д.Д. Амирханова^{1*}, А.Р.Булатова¹

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Өскемен қ., Қазақстан

*Автор-корреспондент: Амирханова Дамира Даниярқызы, e-mail:
damiradaniyar@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Құрылыс саласы өндірістік жарақат алу қаупі жоғары экономикалық салалардың бірі болып табылады. Құрылыс алаңдарында ауыр техника мен жабдықтардың қолданылуы, биіктікте жұмыс істеу және күрделі технологиялық процестер қауіпсіздік талаптарын қатаң сақтауды қажет етеді. Соңғы жылдары цифрлық технологиялардың қарқынды дамуы еңбек қауіпсіздігін қамтамасыз етудің жаңа тәсілдерін енгізуге мүмкіндік беруде. Сол технологиялардың ішінде жасанды интеллект ерекше орын алады. Осы зерттеудің мақсаты құрылыс саласында қауіпсіздік деңгейін арттыру үшін жасанды интеллект технологияларын қолдану мүмкіндіктерін талдау болып табылады.

Зерттеу барысында компьютерлік көру, машиналық оқыту, үлкен деректерді талдау және интеллектуалды мониторинг жүйелері сияқты жасанды интеллекттің негізгі технологиялары қарастырылды. Әсіресе құрылыс алаңдарындағы қауіпсіздік талаптарының сақталуын бақылауға арналған бейнеаналитика жүйелерінің, сондай-ақ апаттық жағдайларды болжауға мүмкіндік беретін деректерді талдау әдістерінің тиімділігі зерттелді.

Зерттеу нәтижелері жасанды интеллект технологияларын қолдану қауіпсіздік ережелерінің сақталуын бақылауды күшейтуге, қауіпті жағдайларды ерте анықтауға және өндірістік жарақат алу деңгейін төмендетуге мүмкіндік беретінін көрсетті. Сонымен қатар мұндай жүйелер құрылыс процестерін басқарудың тиімділігін арттыруға ықпал етеді.

Жүргізілген талдау жасанды интеллект технологиялары құрылыс саласында еңбек қауіпсіздігін қамтамасыз етудің тиімді құралдарының бірі екенін көрсетеді.

Кілт сөздер: жасанды интеллект, еңбек қауіпсіздігі, құрылыс саласы, компьютерлік көру, машиналық оқыту, цифрлық технологиялар.

КІРІСПЕ

Құрылыс саласы инфрақұрылымды дамытуда, өндірістік және тұрғын үй нысандарын салуда маңызды рөл атқарады. Дегенмен бұл сала өндірістік қауіп-қатер деңгейі жоғары салалардың қатарына жатады. Құрылыс жұмыстары барысында ауыр техника мен механизмдерді пайдалану, биіктікте жұмыс істеу және күрделі технологиялық операцияларды орындау жұмысшылардың өмірі мен денсаулығына қауіп төндіруі мүмкін. Сондықтан құрылыс саласында еңбек қауіпсіздігін қамтамасыз ету әрқашан өзекті мәселелердің бірі болып келеді. Соңғы жылдары цифрлық технологиялардың қарқынды дамуы бұл бағытта жаңа мүмкіндіктердің пайда болуына ықпал етті.

Жасанды интеллект технологиялары үлкен көлемдегі деректерді талдауға, ықтимал қауіп-қатерлерді анықтауға және апаттық жағдайлардың алдын алуға мүмкіндік береді. Мұндай жүйелер құрылыс алаңдарындағы процестерді автоматты түрде бақылап, қауіпсіздік талаптарының бұзылуын дер кезінде анықтай алады. Қазіргі

таңда көптеген елдерде жасанды интеллект технологияларын өндірістік қауіпсіздік жүйелеріне енгізу бойынша ғылыми зерттеулер жүргізілуде. Бұл технологиялар адам факторынан туындайтын қателіктерді азайтып, қауіпті жағдайлардың алдын алуға көмектеседі.

Осы зерттеудің мақсаты құрылыс саласында қауіпсіздікті арттыруда жасанды интеллект технологияларының мүмкіндіктерін көрсету болып табылады. Зерттеу барысында құрылыс алаңдарында қолданылатын жасанды интеллект жүйелерінің қауіп-қатерлерді анықтауға, қауіпсіздік талаптарының сақталуын бақылауға және жазатайым оқиғалардың алдын алуға қалай көмектесетіні қарастырылады. Сонымен қатар мұндай технологияларды қолдану өндірістік жарақат алу жағдайларын азайтуға қалай ықпал ететіні талданады.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Зерттеу барысында өндірістік жарақаттану көрсеткіштері бойынша статистикалық деректер және құрылыс саласында қауіпсіздікті қамтамасыз ету мәселелеріне арналған ғылыми жарияланымдар пайдаланылды. Статистикалық материалдар ретінде әртүрлі экономикалық қызмет түрлері бойынша өндірістік жарақаттану деңгейін көрсететін 2022 және 2024 жылдарға арналған мәліметтер қарастырылды. Бұл деректер әртүрлі салалардағы қауіпсіздік деңгейін салыстыруға және уақыт бойынша өзгеру динамикасын анықтауға мүмкіндік берді.

Сонымен қатар зерттеу кезінде құрылыс саласында қауіпсіздікті арттыру үшін жасанды интеллект технологияларын қолдану мәселелеріне арналған ғылыми мақалалар талданды. Бұл жарияланымдарда құрылыс алаңдарында қауіпсіздік талаптарының сақталуын бақылау, қауіпті жағдайларды анықтау және өндірістік жарақаттану деңгейін төмендету үшін қолданылатын заманауи технологиялар қарастырылған.

Зерттеу барысында ғылыми әдебиеттерді талдау әдісі қолданылды. Сонымен қатар салыстырмалы талдау әдісі пайдаланылып, әртүрлі салалардағы өндірістік жарақаттану көрсеткіштері салыстырылды. Алынған мәліметтерді жүйелеу және талдау арқылы құрылыс саласындағы қауіпсіздік деңгейін арттыруға ықпал ететін негізгі факторлар қарастырылды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Зерттеу барысында құрылыс саласындағы өндірістік жарақаттану көрсеткіштері талданды. 2022 және 2024 жылдарға арналған статистикалық мәліметтерді салыстыру нәтижесінде белгілі бір өзгеру динамикасы байқалды. Мәліметтерге сәйкес, 2022 жылы құрылыс саласындағы жазатайым оқиғалардың үлесі 8,8 % құраса, 2024 жылы бұл көрсеткіш 7,5 %-ға дейін төмендеген.

Алынған нәтижелер құрылыс саласында еңбек қауіпсіздігін қамтамасыз етуге бағытталған шаралардың біртіндеп жетілдіріліп жатқанын көрсетеді. Соңғы жылдары қауіпсіздікті бақылау жүйелерін жетілдіру және заманауи технологияларды енгізу мәселесіне ерекше көңіл бөлінуде.

Қазіргі уақытта құрылыс саласында қауіпсіздікті арттыру үшін жасанды интеллект негізіндегі технологиялар кеңінен қолданыла бастады. Жасанды интеллект әртүрлі техникалық құрылғылардан алынған мәліметтерді өңдеу арқылы қауіпті жағдайларды анықтауға және оларды алдын ала болжауға мүмкіндік береді. Мұндай жүйелер көбінесе бейнебақылау камералары, түрлі сенсорлар және автоматтандырылған бақылау құрылғыларымен бірге қолданылады.

Кесте 1. Құрылыс саласында қауіпсіздікті арттыру үшін қолданылатын жасанды интеллект технологиялары

Технология	Қолданылу сипаттамасы	Қауіпсіздікке әсері
Компьютерлік көру	Бейнебақылау камералары арқылы жұмысшылардың қауіпсіздік талаптарын сақтауын бақылау	Қауіпті жағдайларды ерте анықтауға мүмкіндік береді
Сенсорлар мен датчиктер	Температураны, қозғалысты және ауа сапасын бақылау	Техникалық ақаулар мен қауіпті өзгерістерді анықтауға көмектеседі
Дрондар	Құрылыс алаңын жоғарыдан бақылау және мониторинг жүргізу	Қауіпті аймақтарды анықтауға мүмкіндік береді
Ақылды каска	Жұмысшылардың орналасқан жерін және жағдайын бақылау	Жедел ескерту жасау және жазатайым оқиғалардың алдын алу

Бейнебақылау жүйелері компьютерлік көру технологиялары арқылы жұмысшылардың қауіпсіздік талаптарын сақтауын бақылауға мүмкіндік береді. Мысалы, жүйе жұмысшылардың қорғаныс каскасын немесе арнайы қауіпсіздік құралдарын пайдалануын анықтап, талаптар сақталмаған жағдайда ескерту жасай алады. Сонымен қатар әртүрлі сенсорлар мен датчиктер құрылыс алаңындағы температураны, дірілді, ауа сапасын және техниканың жұмыс жағдайын бақылауға мүмкіндік береді. Жасанды интеллект бұл мәліметтерді талдау арқылы қауіпті өзгерістерді ерте кезеңде анықтай алады.

Сонымен қатар кейбір құрылыс алаңдарында дрондар мен «ақылды» құрылғылар қолданылуда. Мұндай технологиялар құрылыс процесін бақылауға, қауіпті аймақтарды анықтауға және жұмыс барысын тиімді басқаруға мүмкіндік береді. Нәтижесінде қауіпсіздік деңгейін арттыруға және өндірістік жарақаттану жағдайларын азайтуға жағдай жасалады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеу барысында құрылыс саласындағы өндірістік жарақаттану мәселесі және еңбек қауіпсіздігін арттыруда жасанды интеллект технологияларын қолдану мүмкіндіктері қарастырылды. Статистикалық мәліметтерді талдау нәтижесінде 2022–2024 жылдар аралығында құрылыс саласындағы жазатайым оқиғалардың үлесі 8,8 %-дан 7,5 %-ға дейін төмендегені анықталды. Бұл еңбек қауіпсіздігін қамтамасыз етуге бағытталған шаралардың біртіндеп жетілдіріліп жатқанын көрсетеді.

Зерттеу барысында жасанды интеллект негізіндегі технологияларды қолдану құрылыс алаңдарындағы қауіпсіздікті бақылауды тиімдірек ұйымдастыруға мүмкіндік беретіні анықталды. Бейнебақылау жүйелері, сенсорлар, дрондар және басқа да цифрлық құралдар жұмыс процесін бақылауға, қауіпті жағдайларды анықтауға және жазатайым оқиғалардың алдын алуға ықпал етеді.

Алынған нәтижелер заманауи технологияларды, соның ішінде жасанды интеллект жүйелерін енгізу құрылыс саласында еңбек қауіпсіздігін арттыруға және өндірістік жарақаттану деңгейін төмендетуге ықпал етуі мүмкін екенін көрсетеді. Мұндай технологияларды қолдану қауіпсіздік деңгейін арттырумен қатар құрылыс жұмыстарының тиімділігін де жақсартуға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар зерттеу нәтижелері жасанды интеллект технологияларын құрылыс саласында кеңінен қолдану бағытында қосымша зерттеулер жүргізу

қажеттігін көрсетеді. Болашақта бұл технологияларды дамыту және оларды нақты өндірістік процестерге енгізу еңбек қауіпсіздігін қамтамасыз етудің жаңа тәсілдерін қалыптастыруға мүмкіндік береді.

МҮДДЕЛЕР ҚАРАМА-ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Автор мүдделер қарама-қайшылығының жоқтығын мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл зерттеу жұмысы арнайы қаржыландырусыз жүргізілді.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Автор зерттеу тақырыбы бойынша көрсетілген әдістемелік ұсыныстар мен қолдау үшін ғылыми жетекшісіне алғыс білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Мақаланы дайындау барысында мәтінді редакциялау және құрылымын жетілдіру мақсатында жасанды интеллект технологиялары қолданылды. Барлық ғылыми мазмұн, талдау және қорытындылар авторлар тарапынан дайындалды және тексерілді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Федорова, Д. В. Использование технологий искусственного интеллекта в строительстве: современные тенденции и перспективы развития / Д. В. Федорова // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 3, 3-7. — URL: <https://esj.today/PDF/19SAVN324.pdf>
- Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан. (2022). Публикации по статистике здравоохранения и социального обеспечения. <https://stat.gov.kz/ru/industries/social-statistics/stat-medicine/publications/6411/>
- Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан. (2024). Публикации по статистике здравоохранения и социального обеспечения. <https://stat.gov.kz/ru/industries/social-statistics/stat-medicine/publications/383083/>
- Громовская, Е. А. Повышение безопасности персонала на производстве за счет внедрения искусственного интеллекта. *Вестник магистратуры*. 2022. № 12-5 (135), 7-8. — URL: [povyshenie-bezopasnosti-personala-na-proizvodstve-za-schet-vnedreniya-iskusstvennogo-intellekta.pdf](https://vestnik-magistratury.ru/povyshenie-bezopasnosti-personala-na-proizvodstve-za-schet-vnedreniya-iskusstvennogo-intellekta.pdf)
- Шумов, В. Н. (2024). Трансформация строительных технологий под влиянием искусственного интеллекта. *Символ науки*, № 12-2-1, 87–97. — URL: [transformatsiya-stroitelnyh-tehnologiy-pod-vliyaniem-ii.pdf](https://symbol-nauki.ru/transformatsiya-stroitelnyh-tehnologiy-pod-vliyaniem-ii.pdf)
- ChatGPT. (2026, 7 наурыз).
- Ғылыми мақаланы редакциялау және құрылымдау бойынша көмек көрсету [Үлкен тілдік модель]. OpenAI. <https://chat.openai.com>
- Язгельдыев, Шадурды. Искусственный интеллект в строительной сфере: современное положение и перспективы будущего / Шадурды Язгельдыев, Г. Д. Гурбанов, А. М. Агаев, Д. М. Амандурдыев. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2024. — № 11 (510). — С. 20-22. — URL: <https://moluch.ru/archive/510/111982>.
- Каширипур М.М., Николюк В.А. Возможности искусственного интеллекта в строительной индустрии / Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 1. С. 163–178. — URL: [vozmozhnosti-iskusstvennogo-intellekta-v-stroitelnoy-industrii.pdf](https://vestnik-tsgsu.ru/vozmozhnosti-iskusstvennogo-intellekta-v-stroitelnoy-industrii.pdf)

МОДЕРНИЗАЦИЯ ВОДНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН

УДК 626.81

**А.А. Арыстангалиева^{1*}, Б.А. Ситников¹, З.А. Тоқтасын¹, М.Н. Хорсов¹,
В.П. Колпакова¹, Ю.Н. Еремеева¹**

¹НАО «Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева»,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Арыстангалиева Амаль Армановна, e-mail:
malghok0912@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В статье рассматриваются ключевые направления и результаты комплексной модернизации водной отрасли Республики Казахстан в условиях нарастающих климатических и геополитических вызовов. Цель исследования — проанализировать текущее состояние водной инфраструктуры, а также оценить эффективность институциональных и законодательных реформ. В ходе работы применялись методы анализа статистических данных, изучения нормативно-правовых актов и оценки государственных инвестиционных программ. В результате исследования установлено, что за последние два года в водный сектор привлечено более 579 млрд тенге инвестиций, реализуется свыше 214 проектов по строительству и реконструкции гидротехнических сооружений. Отдельное внимание уделено институциональным изменениям: созданию Министерства водных ресурсов и ирригации РК, что позволило консолидировать управление отраслью и повысить её государственный статус. Также проанализирован новый Водный кодекс, который впервые закрепляет понятия «водная безопасность» и «экологический сток», внедряет Национальную информационную систему и стимулирует предприятия к переходу на оборотное водоснабжение. Сделан вывод о том, что инфраструктурные проекты в синергии с новым законодательством закладывают основу для долгосрочной водной стабильности Казахстана.

Ключевые слова: водная инфраструктура, водоснабжение, Министерство водных ресурсов и ирригации РК, Водный кодекс, водная безопасность, инвестиции.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема водной безопасности для Казахстана является вопросом национального масштаба и устойчивого экономического развития. Страна исторически зависит от трансграничных рек, а из-за климатических изменений, роста водопотребления и износа инфраструктуры Казахстан столкнулся с необходимостью экстренных и масштабных мер в водном секторе.

Данное исследование актуально для научного сообщества, так как оно систематизирует данные о текущей трансформации стратегически важной отрасли. Цель работы — комплексный анализ процесса модернизации водной инфраструктуры Казахстана с учетом недавних институциональных (создание профильного министерства) и законодательных (принятие нового Водного кодекса) изменений.

Задачи исследования включают оценку объемов инвестиций в водный сектор, анализ масштабов инфраструктурного строительства и выявление ключевых преимуществ обновленной нормативной базы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования выступает система управления водными ресурсами и гидротехническая инфраструктура Республики Казахстан.

Материалами для анализа послужили официальные данные Правительства РК и профильного ведомства, тексты нормативно-правовых актов (Указ Президента РК от 01 сентября 2023 года № 318, новый Водный кодекс РК), а также данные о реализации государственных инвестиционных программ.

В работе применялись общенаучные методы: системный и структурно-функциональный анализ для оценки реорганизации системы государственного управления, а также статистический метод для обобщения данных по инвестициям и количеству реализуемых инфраструктурных проектов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Модернизацию водной отрасли Казахстана можно разделить на три ключевых взаимосвязанных направления: институциональное, законодательное и инфраструктурное.

Институциональные преобразования: создание профильного Министерства. Важнейшим шагом в решении накопившихся проблем стало повышение статуса управления водным сектором.

Осенью 2023 года Указом Президента РК было образовано Министерство водных ресурсов и ирригации Республики Казахстан, выделенное из состава Министерства экологии и природных ресурсов. Эта реорганизация структуры позволила централизовать функции в области использования и охраны водного фонда, водоснабжения, водоотведения и ирригации в одном независимом ведомстве.

Консолидация полномочий дала возможность выстроить четкую вертикаль управления (от министерства до бассейновых инспекций) и ускорить реализацию национальных проектов, обеспечив отрасли приоритетное государственное финансирование.

Законодательные новации: новый Водный кодекс. Для правового обеспечения реформ был разработан и принят новый Водный кодекс. Документ вносит фундаментальные изменения в подходы к ресурсопользованию.

Впервые на законодательном уровне закреплено понятие «водная безопасность» — защита граждан и экономики от дефицита воды и загрязнения водных объектов.

Введено понятие «экологический сток», гарантирующее минимально допустимый уровень воды для сохранения экосистем рек и озер. Существенным преимуществом нового кодекса является ужесточение экологических норм: запрещено строительство глухих плотин на малых реках, введен особый режим охраны водно-болотных угодий.

Для бизнеса предусмотрены новые строгие правила: доступ к водным ресурсам (например, для автомоек и промышленных предприятий) будет разрешен только при наличии плана перехода на оборотное (повторное) водоснабжение. Кодекс также регламентирует создание Национальной информационной системы водных ресурсов для сквозной цифровизации, мониторинга и прозрачного учета воды по всей стране.

Масштабное обновление инфраструктуры. На фоне административных и правовых реформ развернута беспрецедентная стройка. За последние два года в модернизацию водного сектора привлечено 579 млрд тенге (около \$1,08 млрд). В рамках программы:

строятся 13 новых магистральных водопроводов, которые обеспечат централизованным водоснабжением почти 470 000 человек (включая 32 000 жителей в отдаленных селах, получивших воду впервые);

разрабатываются и реализуются 214 стратегических проектов, включая строительство 21 крупного водохранилища и модернизацию более 4 000 км ирригационных каналов (180 проектов), рисунок 1;

на 2025 год утверждено 98 проектов общей стоимостью 173,7 млрд тенге (~\$354 млн), направленных на обновление ирригационных сетей для нужд сельского хозяйства и строительство резервуаров (например, проекты в Акмолинской области);

к концу 2025 года ставится задача обеспечить 100% городов и свыше 6 087 сел (порядка 7,5 млн человек) постоянным доступом к питьевой воде, на что выделено более 835 млрд тенге.



Рисунок 1. Распределение инфраструктурных проектов водной отрасли РК

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показывает, что Казахстан перешел от стратегии точечного реагирования на водные кризисы к системному, упреждающему управлению.

Создание специализированного Министерства водных ресурсов и ирригации обеспечило необходимый политический и административный ресурс для реформ. Новый Водный кодекс заложил современную правовую базу, ориентированную на водосбережение, экологичность и цифровой учет.

Практическая реализация этих инициатив подкреплена масштабными инфраструктурными инвестициями.

Полученные результаты подтверждают, что комплексный подход позволит существенно снизить потери воды при транспортировке, повысить эффективность агропромышленного комплекса и обеспечить водную безопасность страны на десятилетия вперед.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на детальную оценку

экономического эффекта от внедрения цифровых технологий учета на магистральных водопроводах.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная статья выполнена без привлечения внешнего финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают признательность всем, кто оказал методологическую и организационную поддержку в ходе подготовки работы, а также за ценные замечания, способствующих улучшения качества статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В процессе создании статьи использовался искусственный интеллект Gemini в вспомогательных целях для поиска и проверки информации, а также подбора действующих источников информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Указ Президента Республики Казахстан от 1 сентября 2023 года № 318 «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы государственного управления Республики Казахстан». ИПС «Әділет». <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000318>
- Водный кодекс Республики Казахстан. ИПС «Әділет». <https://adilet.zan.kz/rus/docs/K2500000178>
- Официальный информационный ресурс Премьер-министра РК. (2024). Мажилисмены одобрили проект нового Водного кодекса в первом чтении. <https://primeminister.kz/ru/news/parlam/mazhilismeny-odobrili-proekt-novogo-vodnogo-kodeksa-v-pervom-chtenii-29422>
- Официальный сайт Министерства водных ресурсов и ирригации РК. 579 млрд тенге инвестиций привлечено в основной капитал в водной отрасли за последние два года. <https://www.gov.kz/memleket/entities/water/press/news/details/1128850?lang=ru>
- Официальный информационный ресурс Премьер-министра РК. В 2025 году планируется реализация 98 проектов на 173,7 млрд тенге в водной отрасли. <https://primeminister.kz/ru/news/v-2025-godu-v-kazakhstane-planiruetsya-realizatsiya-98-proektov-na-1737-mlrd-tenge-29767>
- Экологическая политика. Вода как стратегический ресурс. Что принесет Казахстану новый водный кодекс. Qazaq Green. <https://qazaqgreen.com/journal-qazaqgreen/environmental-policy/2487/>
- Единую систему учета воды создадут в Казахстане <https://primeminister.kz/ru/news/edinuyu-sistemu-ucheta-vody-sozdayut-v-kazakhstane-30222>
- Южные регионы Казахстана могут столкнуться с дефицитом воды в 2026 году <https://www.zakon.kz/obshestvo/6508944-yuzhnye-regiony-kazakhstana-mogut-stolknutsya-s-defitsitom-vody-v-2026-godu.html>
- Zakon.kz. (2025). Новый Водный кодекс заработал в Казахстане: все, что нужно знать. <https://www.zakon.kz/obshestvo/6480369-novyy-vodnyy-kodeks-zarabotal-v-kazakhstane-vse-cto-nuzhno-znat.html>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТНОЙ РАЗГРУЗКИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО УЗЛА 110 кВ

УДК 621.31

Д. Асқарұлы^{1*}, А.Т.Байдилдина¹

¹ВКТУ, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Асқарұлы Досым, e-mail: dossymaskaruly@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Статья посвящена оценке влияния уставок и настроечных параметров автоматической частотной разгрузки (АЧР) на частотную устойчивость электроснабжения промышленного узла 110 кВ. Рассматриваемый узел включает понижающую подстанцию 110/10 кВ с двумя трансформаторами ТДН-16000/110 и суммарной нагрузкой порядка 25–30 МВт. Аварийный сценарий исследования - потеря питания одного из трансформаторов (аварийное отключение присоединённой линии 110 кВ или отказ трансформатора), из-за чего доступная пропускная способность узла по мощности снижается до уровня одного трансформатора и возникает дефицит активной мощности порядка 14–15 МВт (около 50% нагрузки). При таком дефиците возможно развитие аварийного снижения частоты, что создаёт риск отключения технологически значимых потребителей и формирования «лавины частоты». В работе предложена укрупнённая трёхступенчатая схема АЧР с уставками 49,0; 48,7 и 48,5 Гц и выдержками времени 0,20–0,30 с с распределением отключаемой нагрузки 30%+20%+10% от исходной нагрузки. Показано, что при срабатывании первых двух ступеней снимается критический дефицит мощности и создаются условия для прекращения падения частоты и восстановления режима с сохранением электроснабжения приёмников I–II категории надёжности; третья ступень выполняет функцию резервирования при неблагоприятной динамике аварии. Практическая значимость результатов заключается в обосновании принципов выбора уставок АЧР для узлов 110 кВ с концентрированной промышленной нагрузкой.

Ключевые слова: автоматическая частотная разгрузка, АЧР, частотная устойчивость, противоаварийная автоматика, промышленный узел 110 кВ, дефицит активной мощности.

ВВЕДЕНИЕ

Частота в энергосистеме является индикатором баланса активной мощности между генерацией и нагрузкой: при возникновении дефицита активной мощности частота снижается, а при избытке - повышается. Глубокое и/или длительное снижение частоты опасно для оборудования электростанций и устойчивости работы энергосистемы в целом, поэтому в составе противоаварийной автоматики применяется система автоматического ограничения снижения частоты, ключевым элементом которой является автоматическая частотная разгрузка (АЧР). В нормативных документах АЧР рассматривается как разгрузка очередями по мере снижения частоты (АЧР I) и/или по мере увеличения длительности пониженной частоты (АЧР II), что позволяет ограничить глубину частотного провала и предотвратить развитие аварии.

Промышленные узлы 110 кВ характеризуются концентрированной нагрузкой и высокой чувствительностью технологических процессов к перерывам электроснабжения. Для таких узлов критично обеспечить, чтобы при наиболее вероятных аварийных возмущениях (отключение питающего элемента 110 кВ, потеря

одного трансформатора 110/10 кВ и т.п.) частота не снижалась до опасных уровней и сохранялось питание потребителей I–II категории надёжности.

Цель работы - оценить влияние уставок частоты, выдержек времени и глубины разгрузки ступеней АЧР на частотную устойчивость промышленного узла 110 кВ и предложить рациональные настройки АЧР для аварийного сценария потери одного питающего трансформатора.

Задачи исследования: (1) зафиксировать исходные параметры узла 110 кВ и аварийный сценарий возникновения дефицита мощности; (2) выбрать структуру и уставки многоступенчатой АЧР, включая пороги частоты, выдержки времени и объём отключаемой нагрузки; (3) выполнить расчётную оценку необходимой глубины разгрузки для компенсации дефицита активной мощности; (4) обосновать, что предложенные уставки обеспечивают прекращение падения частоты и сохранение питания ответственных потребителей.

Гипотеза: для промышленного узла 110 кВ при дефиците активной мощности порядка 50% корректный выбор порогов срабатывания и распределения отключаемой нагрузки по ступеням АЧР позволяет предотвратить достижение опасных частот и минимизировать отключаемую нагрузку при сохранении устойчивости электроснабжения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходные данные объекта. Рассматривается промышленный узел электроснабжения напряжением 110 кВ, содержащий понижающую подстанцию 110/10 кВ с двумя силовыми трансформаторами типа ТДН-16000/110 (номинальная мощность каждого трансформатора - 16 МВА). Суммарная нагрузка узла составляет около 25–30 МВт и распределена по сети 10 кВ между несколькими потребителями. В нормальном режиме нагрузка разделена между трансформаторами практически поровну.

Аварийный сценарий. Моделируется полная потеря питания от одного из трансформаторов 110/10 кВ (например, из-за отключения линии 110 кВ или аварии трансформатора) при исходной нагрузке около 30 МВт. В этом случае остаётся один трансформатор с предельно допустимой по мощности выдачей порядка 14–15 МВт (зависит от cosφ нагрузки и допустимых перегрузок), и возникает дефицит активной мощности ΔP порядка 14–15 МВт.

Методика обоснования параметров АЧР. Принцип построения АЧР - ступенчатое отключение наименее ответственных потребителей (нагрузка III категории) при достижении заданных порогов частоты, пока дефицит активной мощности не будет компенсирован. Настраиваемые параметры: (1) уставки по частоте для каждой ступени; (2) выдержки времени; (3) глубина разгрузки (мощность/процент отключаемой нагрузки) на ступень.

С учётом необходимости быстрого действия и практической реализуемости на уровне узла 110 кВ принята укрупнённая трёхступенчатая схема разгрузки. Верхняя уставка выбрана близкой к 49 Гц - так, чтобы АЧР вступала в работу после исчерпания вращающегося резерва и появления реальной угрозы дальнейшего снижения частоты. Нижняя уставка выбрана значительно выше 45 Гц, чтобы не допустить глубокого провала частоты. Выдержки времени приняты в интервале 0,20–0,30 с для отстройки от кратковременных переходных процессов и обеспечения селективности ступеней.

Для компенсации дефицита мощности ΔP целевой суммарный объём разгрузки принят не менее ΔP . Отключаемая мощность распределена по ступеням так, чтобы первые две ступени в сумме компенсировали дефицит при типовом значении ΔP , а третья обеспечивала резерв при неблагоприятной динамике аварии.

Таблица 1. Предлагаемые ступени автоматической частотной разгрузки для узла 110 кВ (исходная нагрузка 30 МВт)

Очередь АЧР	Уставка частоты, Гц	Выдержка времени, с	Отключаемая нагрузка, МВт	Доля от 30 МВт, %
1 (первая)	49,0	0,20	9	30
2 (вторая)	48,7	0,25	6	20
3 (резервная)	48,5	0,30	3	10

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчётная оценка для рассматриваемого сценария показывает, что при исходной нагрузке порядка 30 МВт и потере одного трансформатора 110/10 кВ возникает дефицит активной мощности порядка 14–15 МВт. Без разгрузки потребителей дефицит приводит к снижению частоты; при снижении частоты ниже 49 Гц можно рассматривать, что регулирующий (вращающийся) резерв по активной мощности в энергосистеме практически исчерпан и частота продолжает снижаться, создавая угрозу развития аварийного режима.

В предложенной схеме АЧР первая ступень срабатывает при 49,0 Гц и отключает около 9 МВт наименее ответственной нагрузки. Это уменьшает дефицит и замедляет снижение частоты. Если частота продолжает снижаться до 48,7 Гц, вторая ступень отключает ещё 6 МВт. Суммарная разгрузка первых двух ступеней составляет 15 МВт, что сопоставимо с оценкой дефицита мощности, и тем самым восстанавливает баланс мощности на уровне оставшегося трансформатора. При выполнении такого отключения создаются условия для прекращения падения частоты и её восстановления к уровню, допустимому для длительной работы.

Третья ступень (48,5 Гц, 3 МВт) введена как резервная. Она предназначена для случаев, когда фактическая нагрузка узла выше расчётной, $\cos\varphi$ ниже принятого, либо динамика аварии приводит к более глубокому провалу частоты до момента полного отключения необходимого объёма нагрузки. При этом следует учитывать, что чрезмерная разгрузка может привести к переразгрузке и повышению частоты выше номинала, поэтому в практической настройке объёмы ступеней должны корректироваться по фактическим данным нагрузок и согласовываться с требованиями сетевой организации.

Следует отметить, что принятая трёхступенчатая схема является укрупнённой: в нормативных и методических источниках нередко рекомендуется большее число очередей с меньшим шагом по частоте (0,1–0,2 Гц), что уменьшает риск недоразгрузки или переразгрузки и повышает адаптивность АЧР к различным значениям дефицита. Тем не менее для локального промышленного узла с ограниченным числом присоединений нагрузки выбор 2–3 очередей может быть технически оправдан при условии корректного расчёта подключаемой к каждой очереди мощности и последующей проверки в динамическом моделировании.

Ограничения работы. Представленные результаты являются расчётной инженерной оценкой по балансу мощности и типовым принципам работы АЧР. Для окончательной верификации уставок рекомендуется провести RMS-динамическое моделирование (электромеханическая динамика частоты) с учётом характеристик нагрузки (в том числе моторной), действия первичного регулирования и возможных сценариев N-1 (и ремонтных схем), а также при наличии - сопоставить расчётные траектории частоты с данными регистрации событий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена расчётная оценка влияния параметров автоматической частотной разгрузки на частотную устойчивость электроснабжения промышленного узла 110 кВ при аварийной потере одного трансформатора 110/10 кВ. Показано, что при нагрузке узла порядка 25–30 МВт и возникновении дефицита активной мощности порядка 14–15 МВт применение многоступенчатой АЧР позволяет компенсировать дефицит за счёт отключения менее ответственных потребителей и ограничить частотный провал.

Предложена укрупнённая трёхступенчатая схема АЧР с уставками 49,0; 48,7; 48,5 Гц и выдержками времени 0,20–0,30 с при объёмах разгрузки 30%+20%+10% от исходной нагрузки. Срабатывание первых двух ступеней обеспечивает разгрузку порядка 15 МВт, что соответствует компенсации аварийного дефицита мощности и создаёт условия для восстановления частоты и сохранения электроснабжения потребителей I–II категории. Третья ступень повышает надёжность при неблагоприятной динамике аварии.

Полученные настройки следует уточнять по фактическим данным нагрузок и проверять динамическим моделированием в выбранном программном комплексе, а также согласовывать с требованиями сетевой организации и нормативной базой.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы благодарят своих научных руководителей.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. При подготовке рукописи инструменты генеративного искусственного интеллекта не использовались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок Республики Казахстан (ПУЭ РК).
2. Правила функционирования электроэнергетической системы Республики Казахстан. Утверждены приказом Министра энергетики РК.
3. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
4. АО «KEGOC». Официальный сайт системного оператора электроэнергетической системы Республики Казахстан. <https://www.kegoc.kz>
5. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения.
7. Кучеров Ю.Н., Окин А.А., Мартыненко М.М. Современное состояние автоматической частотной разгрузки энергосистем и пути её совершенствования // Электрические станции.
8. KEGOC. Техническая политика и материалы по противоаварийной автоматике энергосистем Республики Казахстан.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ЗДАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ МОЙКИ ЭЦ РГОК ТОО «КАЗЦИНК»

УДК 699.841

Р.Б. Баилов^{1*}, Д.К. Аноп¹

¹НАО «ВКТУ им. Д. Серикбаева», Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Баилов Рауан Болатович, e-mail: rauan-bolatovich@inbox.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрены вопросы оценки и обеспечения сейсмобезопасности существующего производственного здания автомобильной мойки, расположенного на территории ЭЦ РГОК ТОО «КАЗЦИНК». Актуальность исследования обусловлена необходимостью приведения эксплуатируемых промышленных объектов в соответствие с современными требованиями сейсмостойкого строительства Республики Казахстан. Целью работы является анализ конструктивных особенностей здания каркасно-связевой схемы, выявление потенциальных уязвимостей при сейсмических воздействиях и разработка рекомендаций по повышению надежности эксплуатации. В ходе исследования использованы методы анализа проектной документации, технического обследования строительных конструкций и нормативного расчётного обоснования. Установлено, что при увеличении расчетной сейсмичности района до 7 баллов требуется дополнительная проверка несущих элементов, узлов рам и системы связей. Предложены основные направления сейсмоусиления, включая повышение жесткости пространственной системы и усиление узловых соединений. Полученные результаты имеют практическое значение для обследования и модернизации аналогичных промышленных зданий.

Ключевые слова: сейсмобезопасность, промышленное здание, автомойка, стальной каркас, каркасно-связевая схема, сейсмоусиление.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях развития промышленной инфраструктуры Республики Казахстан особую значимость приобретает обеспечение сейсмической безопасности существующих зданий и сооружений. Значительная часть производственных объектов была запроектирована по ранее действовавшим нормативам и в настоящее время требует повторной оценки с учетом обновлённой карты сейсмического районирования.

Особенно актуальной является проблема для вспомогательных производственных зданий, к которым относятся автомобильные мойки промышленных предприятий. Несмотря на сравнительно небольшие размеры, такие объекты эксплуатируются в условиях повышенной влажности, динамических нагрузок и возможной коррозионной агрессивности среды, что может снижать их сейсмическую надежность.

Объектом исследования является существующее здание автомобильной мойки ЭЦ РГОК ТОО «КАЗЦИНК». Необходимость проведения оценки обусловлена:

- изменением расчетной сейсмичности района до 7 баллов;
- длительным сроком эксплуатации здания;
- необходимостью подтверждения безопасной эксплуатации;
- требованиями действующих нормативных документов.

Цель исследования — оценка сейсмобезопасности существующего здания автомобильной мойки и разработка рекомендаций по повышению его надежности.

Задачи исследования:

- проанализировать объемно-планировочные и конструктивные решения;
- выявить факторы, влияющие на сейсмостойкость;
- оценить потенциальные уязвимые элементы;
- обосновать направления повышения сейсмической надежности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является одноэтажное отапливаемое здание автомобильной мойки, расположенное на территории промышленного предприятия. Основные параметры здания приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики здания автомобильной мойки

№	Параметр	Значение	Ед. изм.
1	Размеры в плане	12,8 × 24,0	м
2	Этажность	1	этаж
3	Уклон кровли	6	град
4	Тип каркаса	стальной	-
5	Конструктивная схема	каркасно-связевая	-

Пространственная жесткость здания обеспечивается системой поперечных стальных рам, жестко защемленных в фундаментах, а также вертикальными связями и распорками по стойкам рам.

Покрытие выполнено из трехслойных металлических панелей типа «сэндвич» толщиной 150 мм по стальным прогонам из швеллеров и двутавровых балок.

В работе применены следующие методы:

- анализ проектной и исполнительной документации;
- визуальное и инструментальное обследование конструкций;
- нормативный анализ по СП РК;
- инженерная оценка сейсмической уязвимости.

Методика оценки соответствует требованиям действующих нормативных документов Республики Казахстан по обследованию и сейсмостойкому строительству.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате анализа проектной документации и натурного обследования установлено, что исследуемое здание автомобильной мойки выполнено по каркасно-связевой схеме, характерной для одноэтажных производственных зданий малых пролётов. Пространственная жесткость сооружения обеспечивается системой поперечных стальных рам, жестко защемлённых в фундаментах, а также вертикальными связями и распорками по стойкам рам.

Применённая конструктивная схема в целом соответствует традиционным решениям для зданий данного назначения и обеспечивает восприятие вертикальных эксплуатационных нагрузок. Однако при действии сейсмических воздействий эффективность работы системы в значительной степени определяется жесткостью узловых соединений, достаточностью связевой системы, состоянием металлоконструкций в условиях повышенной влажности и надежностью крепления ограждающих конструкций.

Установлено, что при сравнительно небольшой этажности и регулярной геометрии здания существенную роль в обеспечении пространственной устойчивости играют вертикальные связи и жесткость сопряжений колонн с фундаментами.

Здание имеет простую прямоугольную форму в плане и незначительную высоту,

что в целом является благоприятным фактором для работы при сейсмических воздействиях. Отсутствие значительных плановых и высотных нерегулярностей снижает вероятность возникновения моментов кручения.

В то же время наличие функционального разделения на два блока с различной высотой требует проверки совместной работы конструкций при горизонтальных воздействиях.

Поперечные рамы являются основными несущими элементами. При действии сейсмических нагрузок в них возникают дополнительные изгибающие моменты и поперечные силы.

Анализ показал, что для существующих зданий подобного типа характерны такие потенциальные проблемы, как недостаточная пластичность узлов рам, возможная потеря устойчивости сжатых элементов и концентрация напряжений в зонах сопряжений.

Особенно чувствительными являются опорные узлы колонн, воспринимающие значительные комбинированные усилия.

Вертикальные связи выполняют ключевую функцию по восприятию горизонтальных нагрузок. Их работоспособность напрямую влияет на величину горизонтальных перемещений каркаса.

В результате анализа установлено, что при недостаточной жесткости связей возможно увеличение прогибов покрытия, перераспределение усилий в рамах, снижение общей пространственной устойчивости и рост повреждаемости узлов.

Для зданий автомоек дополнительным неблагоприятным фактором является повышенная влажность, способствующая коррозионному износу элементов связевой системы.

Особенностью рассматриваемого объекта является работа в условиях моечного отделения, где наблюдается повышенная влажность воздуха, воздействие моющих реагентов и перепады температур.

Указанные факторы могут приводить к постепенному снижению несущей способности металлических элементов вследствие коррозии. В условиях сейсмических воздействий даже частичное уменьшение сечения элементов способно существенно повлиять на надежность конструкции.

Таким образом, эксплуатационная среда рассматривается как значимый фактор сейсмического риска.

Ограждающие конструкции выполнены из трехслойных сэндвич-панелей. При нормальной эксплуатации они не участвуют в работе несущего каркаса, однако при землетрясении могут представлять дополнительную опасность.

Потенциальными рисками могут быть разрушение узлов крепления, локальное выпадение панелей и повреждение доборных элементов.

Практика обследования аналогичных зданий показывает, что именно элементы навесных ограждений часто получают повреждения даже при умеренных сейсмических воздействиях.

На основе проведенного анализа выполнена качественная оценка уязвимости основных элементов здания (таблица 2).

Таблица 2. Оценка потенциальной уязвимости элементов

№	Элемент	Степень уязвимости	Основные риски
1	Поперечные рамы	средняя	пластичность узлов
2	Узлы колонн с фундаментами	повышенная	анкеровка, концентрация усилий
3	Вертикальные связи	повышенная	недостаточная жесткость
4	Прогоны покрытия	низкая	локальные деформации
5	Сэндвич-панели	средняя	потеря креплений

Анализ показывает, что наиболее ответственными элементами являются узлы рам и связевая система.

Полученные результаты подтверждают, что для существующих одноэтажных каркасно-связевых зданий ключевым фактором сейсмической надежности является не столько прочность отдельных элементов, сколько согласованная работа пространственной системы.

Сравнение с результатами обследования аналогичных промышленных зданий показывает совпадение основных уязвимых зон, к которым относятся опорные узлы колонн, элементы вертикальных связей и крепления ограждающих конструкций.

При этом для зданий автомобильных моек дополнительным неблагоприятным фактором выступает агрессивная влажностная среда, ускоряющая деградацию металлоконструкций.

Практическая ценность полученных результатов заключается в том, что выполненный анализ позволяет выделить наиболее ответственные элементы здания, определить направления первоочередного обследования, обосновать необходимость усиительных мероприятий и сформировать основу для последующего расчетного моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования выполнена оценка конструктивных особенностей существующего здания автомобильной мойки ЭЦ РГОК ТОО «КАЗЦИНК» с позиции обеспечения сейсмической безопасности.

Установлено, что здание представляет собой одноэтажное промышленное сооружение каркасно-связевой схемы, пространственная жесткость которого обеспечивается системой стальных рам и вертикальных связей. При увеличении расчетной сейсмичности района до 7 баллов возникает необходимость дополнительной проверки несущих конструкций.

Определены наиболее уязвимые элементы здания — узлы рам, система вертикальных связей и крепления ограждающих конструкций. Обоснованы основные направления повышения сейсмобезопасности, включающие усиление узлов, повышение жесткости связевой системы и контроль состояния металлоконструкций.

Полученные результаты могут быть использованы при техническом обследовании и разработке мероприятий по сейсмоусилению аналогичных промышленных зданий.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования в рамках учебной и научно-исследовательской деятельности.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за методологическую поддержку, конструктивные замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению качества исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Eurocode Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. — Brussels, 2004.
<https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/02/en.1998.1.2004.pdf>
- FEMA 356: Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings — Washington, 2000.
<https://www.nehrp.gov/pdf/fema356.pdf>
- FEMA 440 Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures — Washington, 2005.
<https://mitigation.eeri.org/wp-content/uploads/fema-440.pdf>
- Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмические воздействия. — Санкт-Петербург, 1998.
<https://djvu.online/file/ZHyQgptR7XAeQ>
- Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. — Москва, 1978. <https://djvu.online/file/VX7dXD2jy0a4U>
- СП РК EN 1990:2002+A1:2005/2011. Основы проектирования несущих конструкций. — Астана, 2011.
https://prg.kz/document/?doc_id=39396736&pos=8;246
- СП РК EN 1993-1-1:2005/2011 Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. — Астана, 2011.
https://prg.kz/document/?doc_id=37771702
- СП РК EN 1998-1:2004/2012 Проектирование сейсмостойких конструкций. Часть 1: Общие правила, сейсмические воздействия и правила для зданий — Астана, 2012.
https://prg.kz/document/?doc_id=39656601
- СП РК 1.04-101-2012 Обследование и оценка технического состояния зданий и сооружений. — Астана, 2012.
https://prg.kz/document/?doc_id=39108718
- СП РК 1.04-102-2012 Правила оценки физического износа зданий и сооружений. — Астана, 2012.
https://prg.kz/document/?doc_id=39833412
- СП РК 1.04-110-2017 Обследование, оценка технического состояния и сейсмоусиление зданий и сооружений. — Астана, 2017.
https://prg.kz/document/?doc_id=34201690
- СП РК 2.03-30-2017. Строительство в сейсмических зонах. — Астана, 2017.
https://prg.kz/document/?doc_id=36128461&pos=6;239

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ДОРОЖНЫХ ОСНОВАНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ «ГИСТРОНГ»

УДК 625.355.5

А.Ә. Байдоллаев¹, А.Е. Қасымов¹, Б.М. Абдеев¹

¹ВКТУ им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор–корреспондент: Байдоллаев Алмас либекұлы, e-mail: Almas_97_boy@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В работе рассмотрены вопросы повышения прочности и долговечности дорожных оснований за счёт применения стабилизирующей добавки «Гистронг». Актуальность исследования обусловлена необходимостью увеличения срока службы автомобильных дорог и снижения затрат на их эксплуатацию и ремонт. Проведён анализ физико–механических свойств грунтов, обработанных добавкой, а также изучено влияние «Гистронг» на показатели прочности, водостойкости и устойчивости к деформациям. Результаты экспериментальных исследований показали значительное улучшение характеристик дорожных оснований, включая увеличение модуля упругости и снижение пластичности грунта. Установлено, что применение стабилизирующей добавки позволяет повысить несущую способность основания и обеспечить более устойчивую работу дорожной конструкции в различных климатических условиях. Полученные результаты подтверждают эффективность использования «Гистронг» в дорожном строительстве и могут быть рекомендованы для практического применения.

Ключевые слова: дорожные основания, стабилизация грунта, прочность, добавка «Гистронг», дорожное строительство, модуль упругости, водостойкость, деформации, несущая способность, долговечность.

ВВЕДЕНИЕ

Применение стабилизаторов позволяет существенно повысить прочностные характеристики основания, снизить деформации и увеличить долговечность дорожной одежды. В данной работе рассматриваются механизмы действия добавки «Гистронг», ее влияние на физико–механические свойства грунтов, а также приводятся расчетные зависимости, таблицы и графическая интерпретация результатов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Стабилизация грунтов – это процесс улучшения их физико–механических свойств путем введения вяжущих или химических добавок (4).

Основные параметры, характеризующие прочность грунта: предел прочности при сжатии (R_c), модуль деформации (E), коэффициент сцепления (c), угол внутреннего трения (φ)

Основная расчетная формула прочности:

$$R = \frac{P}{A}$$

где:

(P) – разрушающая нагрузка, Н

(A) – площадь образца, м²

Уравнение прочности по Мору–Кулону:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\varphi)$$

где:

τ – касательное напряжение

σ – нормальное напряжение

Характеристика добавки «Гистронг» – это комплексная стабилизирующая добавка, применяемая для укрепления грунтов и дорожно–строительных материалов.

Основные свойства показано на таблице 1.

Таблица 1. Свойств дорожно–строительных материалов

Показатель	Значение
Физическое состояние	Жидкость / порошок
Плотность	1.05–1.20 г/см ³
Рабочая температура	от –20 до +40 °С
Дозировка	0.5–2.5% от массы

Механизм действия: уменьшение водонасыщения, образование кристаллических связей, уплотнение структуры грунта, повышение адгезии между частицами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа эффективности добавки были проведены лабораторные испытания:

1. Подготовка образцов грунта
2. Введение добавки в различных концентрациях
3. Уплотнение
4. Испытания на прочность

Используемая формула для расчета модуля деформации:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

где:

ε – относительная деформация

Экспериментальные данные по прочности показано на таблице 2.

Таблица 2. Влияние добавки «Гистронг» на прочность

Концентрация, %	Прочность (R_c), МПа	Модуль (E), МПа
0	0.45	25
0.5	0.68	40
1.0	0.95	58
1.5	1.20	75
2.0	1.35	88

Анализ результатов из таблицы видно, что увеличение концентрации добавки приводит к росту прочности и модуля деформации.

Эмпирическая зависимость прочности:

$$R_c = R_0 \cdot (1 + k \cdot C)$$

где: R_0 – исходная прочность

C – концентрация добавки

k – коэффициент эффективности (≈ 0.9 – 1.2)

Графическая интерпретация, график зависимости прочности от концентрации добавки имеет следующий характер на рисунке 1.

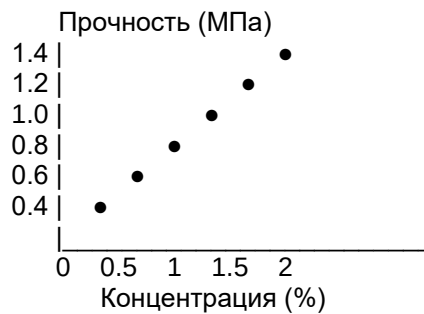


Рисунок 1. Прочность

Характер кривой монотонно возрастающий близкий к линейному на начальном участке с тенденцией к насыщению показан на рисунке 2.

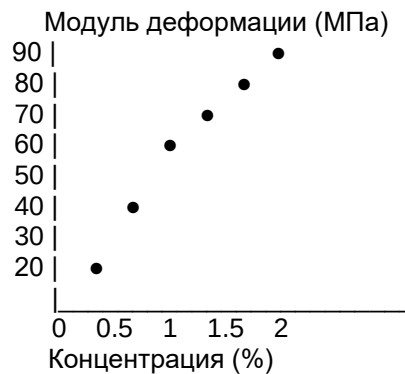


Рисунок 2. Модуль деформации

Практическое применение использование «Гистронг» эффективно при строительстве автомобильных дорог для укрепления слабых грунтов, в ремонте дорожных покрытий и строительстве временных дорог.

Экономический эффект:

$$\mathcal{E} = (C_{\text{традиц}} - C_{\text{гистронг}}) \cdot V$$

где: С – стоимость работ

V – объем работ

Преимущества технологии увеличение прочности дорожных оснований в 2–3 раза, снижает водопоглощения, повышает морозостойкости, сокращение сроков строительства и уменьшение толщины конструктивных слоев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение стабилизирующей добавки «Гистронг» является эффективным способом повышения прочности дорожных оснований. Результаты исследований показывают значительное улучшение механических характеристик грунтов, что позволяет увеличить срок службы дорожных конструкций и снизить эксплуатационные затраты.

Использование данной технологии особенно актуально в регионах с неблагоприятными грунтовыми условиями и суровым климатом.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данное исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования в рамках учебной и научно-исследовательской деятельности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность научному руководителю за методологическую поддержку, конструктивные замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению качества исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабков В.Ф., Андреев О.А. *Дорожные одежды автомобильных дорог*. – М.: Транспорт, 2018. – 287 с.
<https://djuv.online/file/q4i8quCGwxBFB>
- Соколов Б.А. *Укрепление грунтов в дорожном строительстве*. – М.: Стройиздат, 2017. – 256 с. Министерство транспорта Российской Федерации
<https://cyberleninka.ru/article/n/ukreplenie-glinistyh-porod-v-dorozhnom-stroitelstve>
 СП 34.13330.2021 *Автомобильные дороги*. – М., 2021.
<https://nav.tn.ru/cloud/iblock/3d3/3d3658b4e8b967a26496d78d64e75836/SP-34.13330.2021-Avtomobilnye-dorogi-s-izmeneniem-1.pdf>
- ОДН 218.046–01 *Проектирование нежестких дорожных одежд*. – М., 2001.
<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294847/4294847959.pdf>
- ГОСТ 23558–94 *Смеси грунтов, укрепленные вяжущими материалами*. – М., 1994.
<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294852/4294852942.pdf>
- ISO 14688 *Geotechnical investigation and testing – Identification of soils*. – 2017.
- Craig R.F. *Soil Mechanics*. – London: CRC Press, 2019.
<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293740/4293740710.pdf>
- Das B.M. *Principles of Geotechnical Engineering*. – Boston: Cengage Learning, 2020.
https://www.academia.edu/30144290/Principles_of_geotechnical_engineering

ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ТОО "КАЗЦИНК-ЭНЕРГО"

УДК 621.315.2

М. Б. Баймуратов^{1*}, Н.В.Прохоренкова¹

¹ВКТУ им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

* Автор-корреспондент Баймуратов М.Б., e-mail: bmb1989@bk.ru

Аннотация: Целью исследования является анализ и обоснование применения современных методов непрерывной диагностики изоляции высоковольтных кабельных линий как альтернативы традиционным периодическим испытаниям. В работе рассмотрены два ключевых подхода: мониторинг температурного режима с использованием встроенных волоконно-оптических датчиков распределённого типа и оперативный контроль состояния изоляции на основе регистрации и анализа частичных разрядов. Проведён сравнительный анализ принципов действия, чувствительности и информативности данных методов. Показано, что распределённый температурный мониторинг позволяет выявлять локальные перегревы и участки с повышенной нагрузкой на ранних стадиях, а анализ частичных разрядов обеспечивает обнаружение внутренних дефектов изоляции до возникновения аварийных повреждений. Полученные результаты подтверждают высокую диагностическую эффективность комплексного применения указанных технологий и их перспективность для перехода к предиктивной стратегии обслуживания. Научная новизна работы заключается в систематизации современных методов онлайн-контроля и оценке их применимости для повышения надёжности кабельных линий. Практическая значимость связана со снижением риска аварийных отключений и увеличением срока службы оборудования.

Ключевые слова: кабельные линии, изоляция, мониторинг, температура, частичные разряды, диагностика.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для обеспечения надёжной и безаварийной эксплуатации высоковольтных кабельных линий (КЛ) все более широкое применение находят системы непрерывного мониторинга технического состояния изоляции [1]. Поэтому внедрение и совершенствование систем непрерывного мониторинга состояния изоляции кабельных линий является актуальной задачей, направленной на повышение надёжности работы энергосистемы, предотвращение аварий, оптимизацию обслуживания и продление срока службы кабельных линий. Целью исследования - разработка научно обоснованных рекомендаций по повышению эффективности и надёжности систем мониторинга изоляции силовых кабельных линий. Среди альтернатив традиционным периодическим методам контроля наибольшее распространение получили два подхода: мониторинг температурного режима изоляции с использованием встроенных волоконно-оптических датчиков и оперативный контроль состояния изоляции на основе регистрации и анализа частичных разрядов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Контроль температурного режима изоляции высоковольтных кабельных линий с использованием распределённых волоконно-оптических датчиков позволяет осуществлять измерение температуры вдоль всей протяженности КЛ с

пространственным разрешением до 1 м. Полученные данные [2] обеспечивают обслуживающий персонал информацией о тепловом состоянии линии в реальном времени и позволяют выявлять локальные участки с повышенной температурой, свидетельствующие о возможных дефектах или перегрузках.

Изменение температуры в кабельной линии носит инерционный характер и, как правило, происходит в течение нескольких минут. Это позволяет использовать один регистратор температуры для мониторинга нескольких кабельных линий или фаз одной линии. Для этой цели в систему мониторинга включается оптический мультиплексор на рисунке 1, обеспечивающий поочередное подключение нескольких волоконно-оптических линий к одному измерительному устройству, что значительно снижает стоимость системы.



Рисунок 1. Оптический мультиплексор, применяемый в системе мониторинга высоковольтной кабельной линии.

Характеристики системы мониторинга температуры в значительной степени определяются типом применяемого оптического волокна. Многомодовое волокно обеспечивает более высокое пространственное разрешение и точность измерения температуры, тогда как одномодовое волокно позволяет контролировать линии большей протяженности, однако с ухудшением точности и разрешения. Кроме того, системы на основе одномодового волокна требуют применения более дорогостоящих лазерных источников.

Следует отметить, что системы температурного мониторинга в первую очередь предназначены для контроля теплового режима эксплуатации кабельной линии. Они позволяют оперативно регулировать токовую нагрузку при выявлении перегрева. Однако температурный контроль не может рассматриваться как основной метод диагностики состояния изоляции, поскольку развитие большинства дефектов в кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) на ранних стадиях не сопровождается заметным ростом температуры.

Одним из преимуществ систем распределенного температурного мониторинга является возможность точной локализации места аварии. На температурном профиле аварийной линии четко фиксируется участок на рисунке 2, после которого температурная информация отсутствует, что связано с разрушением оптического волокна в зоне пробоя.

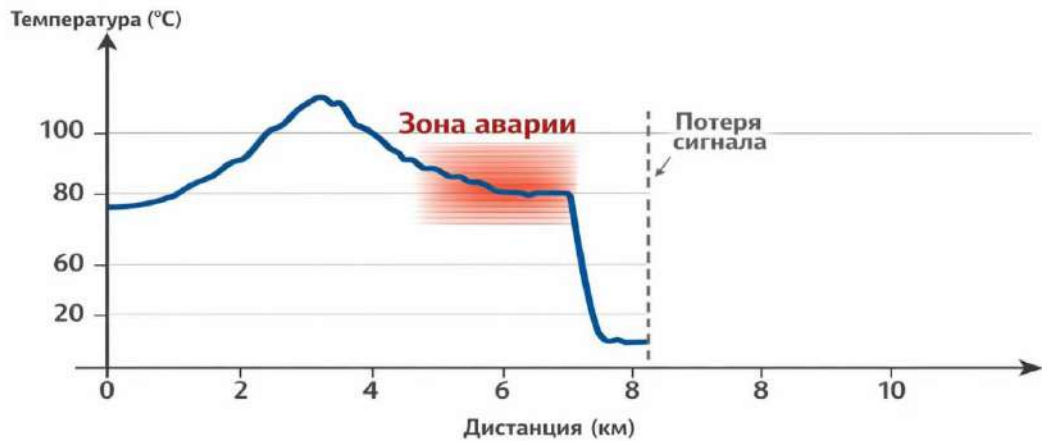


Рисунок 2. Температурный профиль аварийной линии.

Функционирование системы мониторинга температуры основано на методах волоконно-оптической рефлектометрии, использующих эффекты комбинационного рассеяния света (Raman- и Brillouin-рассеяние). Анализ спектра обратно рассеянного света позволяет определить локальную температуру вдоль всей длины оптического волокна с погрешностью не более ± 1 °C. Системы данного типа устойчивы к электромагнитным помехам и обладают высокой надежностью за счет отсутствия активных электронных компонентов в зоне измерения.

Система мониторинга температуры включает считывающее устройство рисунок 3[5], сенсорный волоконно-оптический кабель и вспомогательные элементы (соединительные коробки, удлинители, защитные покрытия). Оптический кабель обеспечивает квазинепрерывное измерение температуры вдоль всей кабельной линии.



Рисунок 3. Система мониторинга температуры.

Система позволяет контролировать: распределение температуры изоляции с пространственным разрешением 1–2 м; динамику изменения температуры во времени; наличие температурных аномалий, связанных с дефектами изоляции или перегрузкой линии; факты утечки тепла.

Контроль состояния изоляции на основе регистрации частичных разрядов позволяет выявлять дефекты как в муфтах, так и в теле кабеля на ранних стадиях их развития. Метод обеспечивает определение типа дефекта, степени его опасности и

локализацию повреждения, что существенно упрощает планирование ремонтных работ, особенно на подземных кабельных линиях.

Диагностика частичных разрядов осуществляется в режиме реального времени (on-line) при рабочем напряжении кабельной линии. Для регистрации ЧР применяются датчики, работающие в различных частотных диапазонах: ультразвуковом (US), высокочастотном (HF) и сверхвысокочастотном (UHF). Наиболее универсальными и эффективными для мониторинга протяженных кабельных линий являются высокочастотные трансформаторы тока и конденсаторы связи HF-диапазона, обеспечивающие зону контроля до нескольких километров.

Метод диагностики частичных разрядов применим как к бумажно-масляным кабелям, так и к современным кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена. Его ключевым преимуществом является возможность выявления дефектов еще до ввода кабельной линии в эксплуатацию, а также высокая эффективность при непрерывном мониторинге.

Современные системы анализа частичных разрядов позволяют: локализовать дефекты методом определения времени прихода импульсов; идентифицировать поврежденный участок кабельной линии; определить тип и стадию развития дефекта по фазовому и амплитудному распределению импульсов; прогнозировать остаточный ресурс кабельной линии и планировать ремонтные мероприятия.

Таким образом, системы непрерывного мониторинга частичных разрядов под рабочим напряжением обладают существенным преимуществом по сравнению с периодическими off-line испытаниями и являются наиболее перспективным направлением диагностики кабельных линий с изоляцией из СПЭ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов начинаем с матрицы распределения частичного разряда. На рисунках 4, 5 изображены полученные матрицы для кабельных линий В-300-II и В-2-30 соответственно

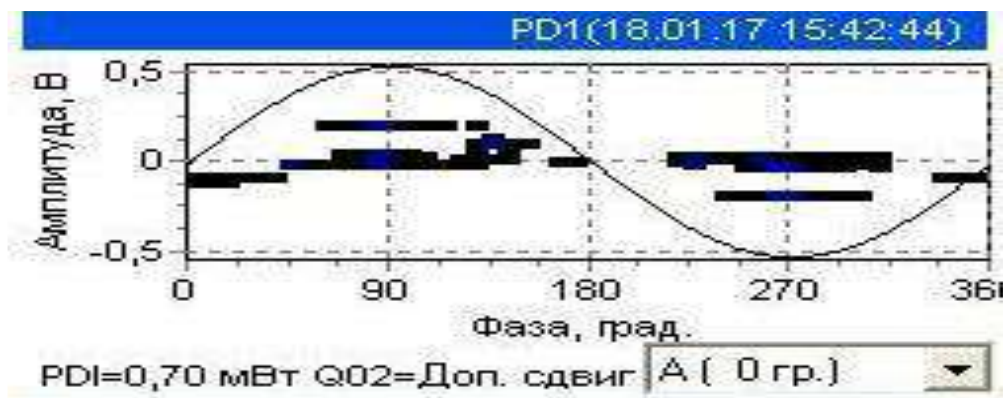


Рисунок 4. Матрица распределения импульсов частичного разряда для кабельной линии В-300-II.

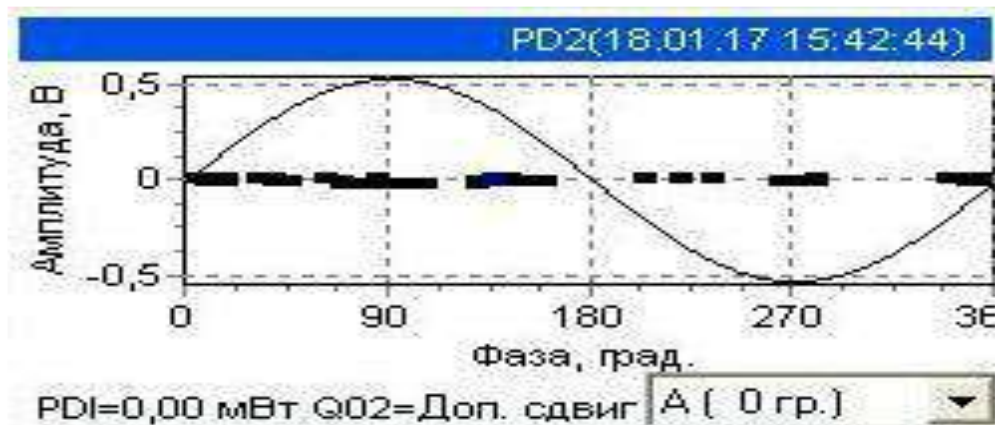


Рисунок 5. Матрица распределения импульсов частичного разряда для кабельной линии В-2-30.

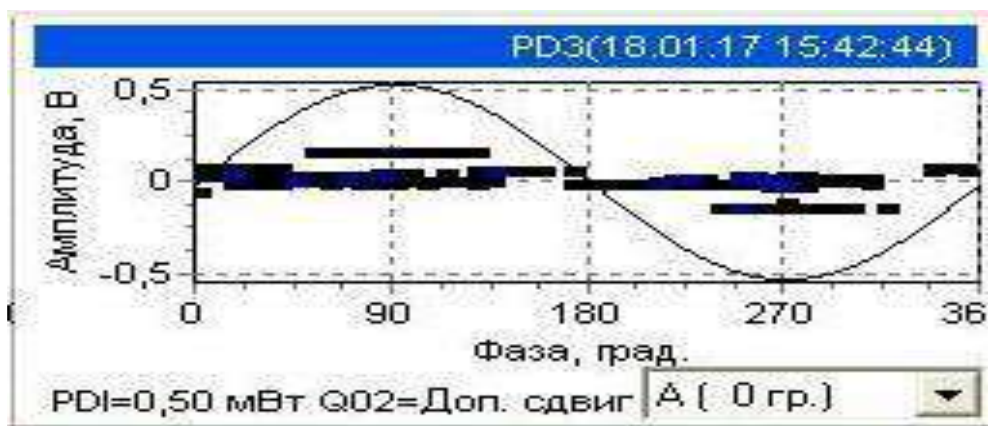


Рисунок 6. Матрица распределения ЧР для линии КС-1-53.

Как видно на рисунке 4, мощность частичного разряда на линии В-300-II, составляет 0,70 мВт. Согласно цветовой маркировке, описанной во втором разделе, можно сделать вывод о том, что кабельная линия имеет мелкие дефекты в зонах с частичными разрядами, но дефекты не настолько существенны для того, чтобы кабельную линию можно было отнести к предаварийной.

На рисунке 5 показана матрица ЧР кабельной линии В-2-30. Мощность частичных разрядов на линии составляет 0 мВт, на основании чего можно сделать вывод о том, что кабельная линия находится в хорошем состоянии.

На рисунке 6 изображена матрица распределения ЧР кабельной линии КС-1-53, значение суммарной мощности частичных разрядов в 0,5мВт говорит о незначительном износе изоляции, кабельную линии можно считать пригодной для работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом данные методы актуальны, так как показывают хорошую эффективность при выявлении зарождающихся дефектов что позволяет его устранить до выхода КЛ из строя. Применение и внедрение систем диагностического мониторинга изоляции силовых кабельных линий является не только перспективным, но и одним из самых оптимальных вариантов по решению проблемы надежности систем электроснабжения.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование финансировалось за счет собственных средств.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор благодарит своего научного руководителя.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. При подготовке рукописи инструменты генеративного искусственного интеллекта не использовались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Гильманов Э.А., Тлявлин А.З., Султанов А.Х. Методы диагностики кабельных линий // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы. Межвузовский научный сборник. Уфа: УГАТУ. 2008. С. 248-252.
- 2) Distributed Fiber Optic Sensing and Dynamic Rating of Power Cables (Wiley, 2019),
- 3) Дубяго, М.Н. Метод амплитудного и фазового распределения импульсов частичных разрядов в задачах исследовании изоляции кабельных линий / М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7 (132). – С. 200-205.
- 4) Дубяго, М.Н. Метод селекции сигналов ЧР с помощью Вейвлет преобразований / М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2 (139). – С. 99-104.
- 5) Vercauteren, N. Evolution of superficial lake water temperature profile under diurnal radiative forcing / N. Vercauteren, H. Huwald, E. Bou-Zeid, J. Selker, U. Lemmin, B. Parlange and I. Lunati // Water Resour. Res. – 2011. – 47, W09522
- 6) Vogt, T. Estimation of seepage rates in a losing stream by means of fiberoptic high-resolution vertical temperature profiling / T. Vogt, P. Schneider, L. Hahn-Woernle, O. Cirpka // doi:10.1016/j.jhydrol.2009.10.033, 2010

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦЫ МИКРОРАЗРУШЕНИЙ БЕТОНА И СПОСОБЫ ЕЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ

УДК 691.32

Р.С Батырханов^{1*}, Д.С Елеманов¹

¹ Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Батырханов Ринат Серикпаевич, e-mail: atonai2009@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассматриваются вопросы аналитического определения границы микроразрушений бетона и факторов, влияющих на ее изменение. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности железобетонных конструкций в условиях сложных эксплуатационных нагрузок. Целью работы является разработка зависимостей, позволяющих определять границы микроразрушений через призмную прочность бетона с учетом корректирующих коэффициентов.

В работе использованы методы аналитической аппроксимации экспериментальных данных и сравнительного анализа влияющих факторов, включая условия твердения, напряженное состояние и воздействие усадки и ползучести. Получены зависимости для определения параметров R^oT и R^VT , а также предложена система поправочных коэффициентов.

Результаты показали, что граница микроразрушений существенно зависит не только от прочности бетона, но и от внешних условий и характера нагружения. Установлено, что пропаривание и сухие условия твердения снижают уровень микроразрушений, а сложное напряженное состояние может как увеличивать, так и уменьшать устойчивость бетона.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения полученных зависимостей при проектировании железобетонных конструкций.

Ключевые слова: бетон, микроразрушения, прочность, напряжения, коэффициенты, железобетон, расчет.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях развития строительной отрасли особое значение приобретает обеспечение надежности и долговечности железобетонных конструкций. Одним из ключевых факторов, определяющих эксплуатационные характеристики бетона, является процесс образования и развития микроразрушений, который предшествует возникновению макротрещин и потере несущей способности конструкции. Исследование границы микроразрушений позволяет более точно оценивать поведение бетона под нагрузкой и повышать точность расчетных моделей.

Актуальность данной темы обусловлена тем, что существующие нормативные методики расчета железобетонных конструкций в большинстве случаев ориентированы на предельные состояния и не всегда учитывают начальные стадии разрушения материала. Между тем именно процессы микротрещинообразования оказывают значительное влияние на деформативность, трещиностойкость и долговечность конструкций. Игнорирование этих процессов может привести к занижению или, наоборот, завышению расчетных характеристик, что снижает надежность проектных решений.

В научной литературе вопросы прочности и разрушения бетона изучались многими исследователями, однако проблема комплексного учета факторов, влияющих на границу микроразрушений, остается недостаточно разработанной. В частности, требуется более детальный анализ влияния условий твердения бетона, влажностного режима, характера напряженного состояния, а также процессов усадки и ползучести. Указанные факторы могут существенно изменять уровень напряжений, при которых начинается образование микротрещин.

Особую значимость данное исследование приобретает в рамках научного направления, связанного с совершенствованием методов расчета и проектирования железобетонных конструкций. Разработка более точных аналитических зависимостей позволяет учитывать реальные условия работы материала и повышать достоверность инженерных расчетов. Это особенно важно при проектировании ответственных сооружений, где требования к надежности и безопасности являются критическими.

Целью настоящего исследования является разработка аналитических зависимостей для определения границы микроразрушений бетона на основе призмочной прочности с учетом комплекса влияющих факторов. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: анализ существующих теоретических и экспериментальных данных; построение аппроксимирующих зависимостей; введение системы поправочных коэффициентов; оценка влияния условий твердения и напряженного состояния на процесс микроразрушений.

Объектом исследования является бетон как конструкционный материал, а предметом — закономерности образования микроразрушений в зависимости от прочностных и деформационных характеристик. В работе используются методы аналитического моделирования, обработки экспериментальных данных и сравнительного анализа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основного объекта исследования рассматривается бетон различных классов прочности. Основными параметрами являются:

- призмочная прочность R_b ;
- предел прочности на растяжение R_{br} ;
- модуль деформаций E_b .

Методика исследования основана на аналитической обработке экспериментальных данных и построении аппроксимирующих зависимостей.

Методика исследования основана на аналитической обработке экспериментальных данных и построении аппроксимирующих зависимостей.

Граница микроразрушений определяется через функции:

$$R^{\circ T} = f_1(R_b), \quad R^{VT} = f_2(R_b)$$

С учетом дополнительных факторов используются поправочные коэффициенты:

$$R^{\circ T} = f_1(R_b) \cdot K^{\circ}_1 \cdot K^{\circ}_2 \cdot K_n, \quad R^{VT} = f_2(R_b) \cdot K^V_1 \cdot K^V_2 \cdot K_n$$

Аппроксимация экспериментальных данных дала следующие зависимости:

$$R^{\circ T}/R_b = 0,15 + 0,012 R_b - 0,000083 R_b^2, \quad R^{VT}/R_b = 0,42 + 0,0088 R_b - 0,000056 R_b^2$$

Для упрощения расчетов используется выражение:

$$R^oT / R_b = R^vT / R_b [1,37 + 0,016(43 - R_b)]$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты показали, что граница микроразрушений зависит от комплекса факторов.

1. *Влияние условий твердения.* Нормальные условия: $K_1=1$; Сухие условия: $K_1=0,75-0,80$; Пропаривание: $K_1=0,77-0,86$;

2. *Влияние напряженного состояния.* При изгибе: $K_2 \approx 1,1-1,23$. При двухосном сжатии: $K_2 \approx 1,0-1,09$

3. *Влияние усадки и ползучести.* Коэффициент K_3 может изменяться в пределах: $K_3=0,02$

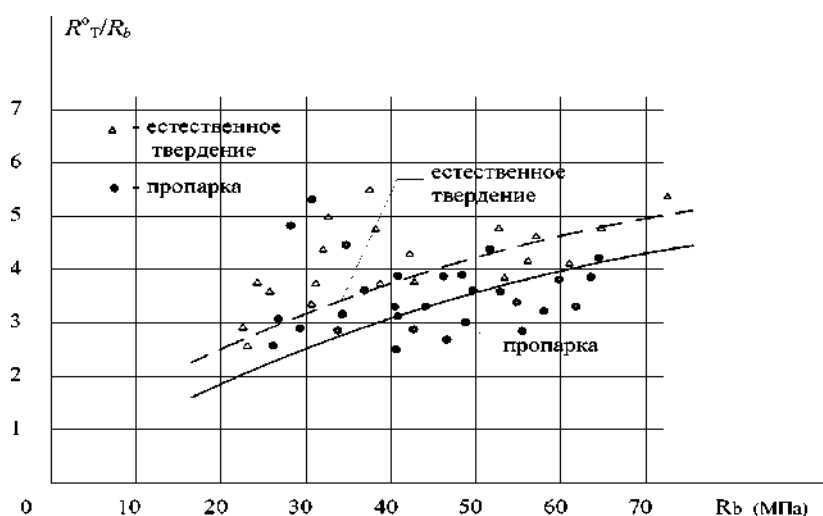


Рисунок 1. Зависимость границы микроразрушений от прочности бетона

Для наглядного представления исходных данных и диапазонов изменяемых параметров, использованных в ходе исследования, основные характеристики бетона и расчетные показатели сведены в таблицу 1. В таблице отражены ключевые параметры, оказывающие влияние на процессы микроразрушений, включая диапазон призмочной прочности, значения модулей деформации, а также используемые поправочные коэффициенты. Представленные данные позволяют систематизировать исходные условия исследования и служат основой для последующего анализа полученных результатов.

Таблица 1. Основные параметры исследования

Параметр	Значение	Единицы
Прочность бетона	10–70	МПа
Коэффициенты	0,02–1,23	-
Модуль упругости	20000–40000	МПа

В ходе проведенного исследования были получены аналитические зависимости, позволяющие определить границу микроразрушений бетона в зависимости от его призмочной прочности и совокупности внешних факторов. Установлено, что значения параметров R^oT и R^vT изменяются в широких пределах даже при одинаковых значениях прочности бетона, что подтверждает необходимость

учета дополнительных корректирующих факторов.

Анализ полученных зависимостей показывает, что при увеличении призмочной прочности бетона наблюдается нелинейный характер изменения отношения R^0T/R_b . Это свидетельствует о том, что повышение прочности материала не всегда сопровождается пропорциональным увеличением его устойчивости к микроразрушениям. На определенных этапах роста прочности наблюдается снижение интенсивности прироста устойчивости, что объясняется структурными особенностями цементного камня и распределением внутренних напряжений.

Особое внимание было уделено влиянию условий твердения бетона. Результаты показали, что при пропаривании происходит снижение уровня микроразрушений, что связано с более равномерной структурой материала и уменьшением внутренних дефектов. В то же время твердение в условиях пониженной влажности приводит к увеличению внутренних напряжений и ускоренному развитию микротрещин. Это подтверждает важность соблюдения технологических режимов при изготовлении бетонных конструкций.

Исследование влияния напряженного состояния показало, что при изгибе граница микроразрушений в наиболее напряженных зонах увеличивается по сравнению с центральным сжатием. Это объясняется перераспределением напряжений по сечению элемента и локализацией максимальных деформаций. При двухосном сжатии также наблюдается увеличение устойчивости к микроразрушениям, однако данный эффект зависит от соотношения главных напряжений и прочностных характеристик бетона.

Дополнительный анализ показал значительное влияние растягивающих напряжений, возникающих вследствие усадки и ползучести бетона. В защитных слоях конструкций, особенно в предварительно напряженных элементах, эти напряжения могут существенно снижать границу микроразрушений. Установлено, что уменьшение толщины защитного слоя и увеличение деформаций ползучести приводят к снижению коэффициента K_3 , что в конечном итоге ускоряет развитие микротрещин.

Сравнение полученных результатов с данными других исследований показывает их хорошее согласование, что подтверждает достоверность предложенных зависимостей. В то же время выявлены некоторые расхождения, которые могут быть связаны с различиями в составе бетона, условиях испытаний и методах определения характеристик. Это указывает на необходимость дальнейших исследований в данном направлении.

Следует отметить, что предложенная система поправочных коэффициентов позволяет учитывать реальные условия эксплуатации конструкций и повышает точность расчетов. Однако использование данных зависимостей требует корректного выбора исходных параметров и учета ограничений применимости модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования разработаны аналитические зависимости для определения границы микроразрушений бетона.

Установлено, что:

- граница микроразрушений определяется не только прочностью бетона;
- существенное влияние оказывают условия твердения и напряженное состояние;
- введение поправочных коэффициентов позволяет повысить точность расчетов.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения предложенных зависимостей при проектировании железобетонных конструкций.

Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением различных типов

бетона и уточнением коэффициентов. Полученные результаты подтверждают необходимость дальнейшего совершенствования методов расчета железобетонных конструкций с учетом процессов микроразрушения на ранних стадиях нагружения. Практическая реализация предложенных зависимостей позволит повысить точность инженерных расчетов и обеспечить более высокий уровень надежности строительных объектов. Кроме того, результаты исследования могут быть использованы при разработке новых нормативных рекомендаций и уточнении существующих расчетных методик.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования в рамках учебной и научно-исследовательской деятельности.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за методологическую поддержку, конструктивные замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению качества исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Neville, A. M. (2011). Properties of Concrete (5th ed.). Pearson. <https://www.pearson.com>
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (4th ed.). McGraw-Hill. <https://www.mheducation.com>
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2017). Concrete (2nd ed.). Prentice Hall. <https://www.pearson.com>
- Bazant, Z. P., & Kaplan, M. F. (1996). Concrete at High Temperatures. Longman. <https://doi.org/10.4324/9781315273986>
- Hsu, T. T. C. (1993). Unified Theory of Concrete Structures. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203739498>
- ACI Committee 318. (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19). <https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=31819>

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МОНОЛИТНЫХ БЕТОННЫХ РАБОТ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ ЗДАНИЙ

УДК 69.022.3

А.К. Бейсбаев^{1*}, Д.С. Елеманов¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

* Автор-корреспондент: Бейсбаев Азамат Канайбекович, e-mail: b.azamat86@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрены современные подходы к контролю качества монолитных бетонных работ. Проанализированы основные физико-механические и технологические показатели, влияющие на надежность и долговечность конструкций. Рассмотрены разрушающие и неразрушающие методы контроля, а также их комбинированное применение. Предложена методика статистической оценки качества, основанная на анализе уровня бездефектности, точности технологического процесса и точности контроля. Установлено, что комплексный подход к контролю качества позволяет повысить достоверность оценки и снизить вероятность возникновения дефектов.

Ключевые слова: бетон, монолитные конструкции, контроль качества, неразрушающие методы, статистический анализ

ВВЕДЕНИЕ

Качество монолитных бетонных конструкций является одним из ключевых факторов, определяющих надежность, долговечность и безопасность зданий и сооружений. В современных условиях строительства, характеризующихся усложнением конструктивных решений, увеличением эксплуатационных нагрузок и воздействием агрессивных факторов окружающей среды, требования к качеству бетонных работ существенно возрастают.

Бетон как основной конструкционный материал обладает сложной структурой, свойства которой формируются под влиянием множества факторов, включая состав смеси, условия укладки, режим твердения и технологическую дисциплину на строительной площадке. В связи с этим качество бетонных конструкций определяется совокупностью физико-механических и технологических показателей, таких как прочность, однородность, пористость, положение арматуры и состояние защитного слоя. Нарушение любого из указанных параметров может привести к снижению несущей способности, появлению дефектов и сокращению срока службы конструкций.

Современные исследования в области контроля качества бетона показывают, что традиционные методы оценки, основанные исключительно на испытании стандартных образцов, не всегда отражают реальное состояние конструкций в условиях эксплуатации. Это связано с различием условий твердения и формированием структуры бетона в конструкции и в лабораторных образцах. В связи с этим особое значение приобретает применение неразрушающих методов контроля, позволяющих оценивать состояние бетона непосредственно в конструкции.

В настоящее время широко применяются ультразвуковые методы, томография, методы поверхностного прозвучивания и электрической сопротивляемости, позволяющие выявлять внутренние дефекты и оценивать однородность структуры материала. Однако каждый из методов имеет ограничения по точности и области применения, что обуславливает необходимость их комбинированного использования.

Несмотря на развитие методов контроля, проблема обеспечения стабильного качества монолитных бетонных работ остается актуальной. Это обусловлено

влиянием случайных факторов технологического процесса, неоднородностью исходных материалов, а также человеческим фактором при выполнении строительных работ. В связи с этим возникает необходимость разработки комплексных методик оценки качества, основанных на системном учете контролируемых параметров и применении статистических методов анализа.

Целью настоящего исследования является разработка методики оценки качества монолитных бетонных работ на основе анализа контролируемых параметров и применения статистических методов, позволяющих повысить достоверность оценки и эффективность контроля на всех этапах строительного процесса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящем исследовании использован комплексный подход к оценке качества монолитных бетонных работ, включающий анализ физико-механических свойств бетона, технологических параметров производства работ и методов контроля качества.

Объектом исследования являлись монолитные бетонные конструкции гражданских зданий, возводимые с применением традиционных технологий бетонирования. В качестве исходных данных использованы результаты экспериментальных исследований, данные строительной практики, а также результаты инструментального контроля качества бетонных конструкций.

Контроль качества бетонных работ осуществлялся с применением разрушающих и неразрушающих методов. К разрушающим методам относятся испытания стандартных образцов (кубов и цилиндров), изготовленных из бетонной смеси, а также испытания кернов, отобранных из конструкций. Данные методы позволяют определить фактическую прочность бетона, оценить его структуру и выявить отклонения от проектных характеристик.

Неразрушающие методы контроля основаны на использовании физических принципов взаимодействия волн и электрических сигналов с материалом. В работе применялись ультразвуковые методы, позволяющие оценить однородность структуры бетона и выявить внутренние дефекты, такие как пустоты и каверны. Ультразвуковая томография использовалась для диагностики скрытых дефектов в условиях ограниченного доступа к поверхности конструкции. Методы поверхностного прозвучивания применялись для выявления расслоений и дефектов поверхностного слоя бетона. Метод электрической сопротивляемости использовался для оценки влажностного состояния бетона и условий его твердения.

Для повышения достоверности результатов использован комбинированный подход, предусматривающий совместное применение нескольких методов контроля с последующей калибровкой результатов неразрушающих испытаний по данным разрушающих методов.

Важным элементом исследования являлось формирование номенклатуры контролируемых параметров качества бетонных работ. В рамках исследования были выделены следующие группы параметров: свойства бетонной смеси (состав, подвижность, однородность), параметры укладки (толщина слоев, непрерывность бетонирования, режим уплотнения), условия твердения (температурно-влажностный режим), а также характеристики готовых конструкций (прочность, геометрическая точность, состояние поверхности).

Для количественной оценки качества применены методы математической статистики. Анализ распределения параметров качества показал, что многие из них имеют случайный характер и подчиняются логнормальному закону распределения. В связи с этим использованы статистические показатели, такие как уровень

бездефектности, коэффициент соответствия нормам, показатели точности технологического процесса и точности контроля.

Для комплексной оценки качества разработан интегральный показатель, учитывающий влияние основных статистических характеристик. При этом учитывалось влияние погрешностей измерений на результаты контроля, что позволило повысить достоверность оценки качества бетонных работ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Качество бетонных конструкций определяется совокупностью параметров, включая прочность, однородность, пористость, положение арматуры и условия твердения.

Прочность на сжатие является основным показателем, определяющим несущую способность конструкции. Однородность и пористость влияют на локальную прочность и долговечность, а положение арматуры — на устойчивость конструкции к коррозии и эксплуатационную надежность. Разрушающие методы обеспечивают высокую точность оценки, однако сопровождаются повреждением конструкции.

Неразрушающие методы позволяют оперативно оценивать состояние бетона без нарушения его целостности. Ультразвуковая томография и методы сопротивления являются эффективными инструментами диагностики, особенно при ограниченном доступе к конструкции. Комбинированный подход обеспечивает повышение достоверности результатов и снижение неопределенности измерений.

Наиболее распространёнными дефектами являются пустоты, каверны, расслоения и недостаточная прочность отдельных участков конструкции.

Основными причинами их возникновения являются нарушение технологии укладки, недостаточное уплотнение смеси, несоблюдение условий твердения и ошибки при устройстве опалубки.

Для количественной оценки качества предложено использовать статистические показатели, включая уровень бездефектности, точность технологического процесса и точность контроля.

Установлено, что отклонения параметров качества подчиняются логнормальному распределению, что позволяет применять методы математической статистики для их анализа.

Комплексный статистический показатель качества позволяет учитывать влияние различных факторов и обеспечивает объективную оценку состояния конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования разработана методика оценки качества монолитных бетонных работ, основанная на комплексном анализе физико-механических и технологических параметров, а также применении статистических методов обработки данных.

Установлено, что качество бетонных конструкций определяется совокупностью взаимосвязанных факторов, включая свойства бетонной смеси, условия укладки и твердения, а также точность выполнения строительных операций. Показано, что наибольшее влияние на формирование дефектов оказывают нарушения технологических режимов и недостаточный контроль на этапах производства работ.

Обоснована эффективность применения комбинированных методов контроля, включающих разрушающие и неразрушающие методы, что позволяет повысить достоверность оценки и выявлять скрытые дефекты конструкций на ранних стадиях. Установлено, что учет погрешностей измерений и использование статистических показателей качества обеспечивает объективную оценку состояния бетонных конструкций.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения предложенной методики при контроле качества монолитных работ на строительных объектах, а также при обследовании эксплуатируемых конструкций. Реализация предложенного подхода способствует снижению вероятности возникновения дефектов, повышению надежности и увеличению срока службы зданий и сооружений.

Перспективы дальнейших исследований связаны с внедрением цифровых технологий мониторинга, развитием методов неразрушающего контроля и использованием интеллектуальных систем анализа данных для автоматизации оценки качества бетонных работ.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования в рамках учебной и научно-исследовательской деятельности.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за методологическую поддержку, конструктивные замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению качества исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Harlow: Pearson Education Limited.
<https://books.google.com/books?id=gy1bAgAAQBAJ>
- Jehar, A. *Investigating the quality control measures in the production of reinforced concrete: A case study of construction firms in the Ashanti Region.*
<http://ir.uew.edu.gh:8080/handle/123456789/3337>
- Kumar, N., Garg, K. S., & Divyashree. (2024). *Quality Control and Assurance in Concrete Construction: A Systematic Approach.*
<https://doi.org/10.62919/hgit4321>
- Korotkikh, D., & Kapustin, D. (2024). Forecasting strength and quality control of monolithic concrete placement in structures with permanent formwork. *Deleted Journal*, 8(4), 55–69.
<https://doi.org/10.22227/2949-1622.2024.4.55-69>
- Okiye, S. (n.d.). *Model for advancing quality control practices in concrete and soil testing for infrastructure projects: Ensuring structural integrity.*
<https://www.researchgate.net/publication/392764228>

РЕКОНСТРУКЦИЯ И ПЕРЕПЛАНИРОВКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ С ИЗМЕНЕНИЕМ ЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 624.012.45

Г.А. Босоногов^{1*}, А.В. Хапин¹

¹ВКТУ им. Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, РК

* Автор-корреспондент: Босоногов Глеб Андреевич, e-mail:

gleb.bossonogov02@yandex.kz

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрены инженерные и организационные аспекты реконструкции производственных зданий при изменении их целевого назначения. Актуальность темы обусловлена значительным объёмом устаревшего промышленного фонда и необходимостью рационального использования существующей застройки. Цель исследования - разработка комплексного подхода к оценке технического состояния и определению рациональных конструктивных решений при перепрофилировании производственных объектов в общественные, административные или складские здания. Используются методы технического обследования, расчёта несущей способности по предельным состояниям, а также сравнительный технико-экономический анализ. Установлено, что при изменении функционального назначения основное влияние оказывает рост нормативных нагрузок на перекрытия и ужесточение требований по огнестойкости и энергоэффективности. Предложены рациональные методы усиления конструкций, позволяющие обеспечить требуемый уровень надёжности при снижении капитальных затрат по сравнению с новым строительством.

Ключевые слова: реконструкция зданий, перепланировка, изменение назначения, усиление конструкций, несущая способность.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях трансформации городской среды реконструкция производственных зданий становится важным инструментом рационального использования территорий. Многие объекты промышленной застройки обладают значительным пространственным и конструктивным потенциалом: крупные пролёты, высокий уровень несущей способности колонн и фундаментов, свободная планировка. Это создаёт предпосылки для их адаптивного повторного использования.

Однако изменение функционального назначения приводит к необходимости проверки соответствия конструкций современным нормативным требованиям по нагрузкам, расчёту железобетонных и металлических элементов, а также оценке фактического технического состояния. Дополнительно возникают требования к пожарной безопасности, акустике, инсоляции и теплотехническим характеристикам ограждающих конструкций.

Научная проблема заключается в необходимости системной оценки остаточного ресурса и разработки эффективных методов усиления при минимальном вмешательстве в существующую конструктивную схему.

Цель исследования - определить инженерные принципы реконструкции производственных зданий при их перепрофилировании.

Задачи:

- анализ конструктивных схем типовых производственных зданий;
- оценка изменения расчётных нагрузок при новом назначении;
- выявление дефицита несущей способности;
- разработка мероприятий по усилению;

- технико-экономическая оценка реконструкции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования выбрано каркасное производственное здание с сеткой колонн 6×6 м, высотой 12 м, с железобетонными несущими элементами.

Методика исследования включала следующие этапы:

1. Техническое обследование

Проводилось визуальное и инструментальное обследование в соответствии с требованиями нормативных документов. Определялись:

- прочность бетона методом неразрушающего контроля;
- степень коррозии металлических элементов;
- наличие трещин, прогибов и деформаций;
- состояние фундаментов.

2. Расчёт несущей способности

Расчёты выполнялись по предельным состояниям первой и второй группы согласно требованиям, а также расчет и оценка сейсмобезопасности здания.

Дополнительно учитывались коэффициенты надёжности по нагрузке и материалу.

3. Анализ вариантов усиления

Рассматривались методы усиления:

- устройство монолитной железобетонной плиты по существующим балкам;
- усиление металлическими элементами;
- применение композитных материалов (FRP-системы);
- локальное усиление узлов сопряжений.

4. Технико-экономическая оценка

Проводилось сравнение стоимости реконструкции и нового строительства с учётом затрат на усиление, модернизацию инженерных систем и отделочные работы.

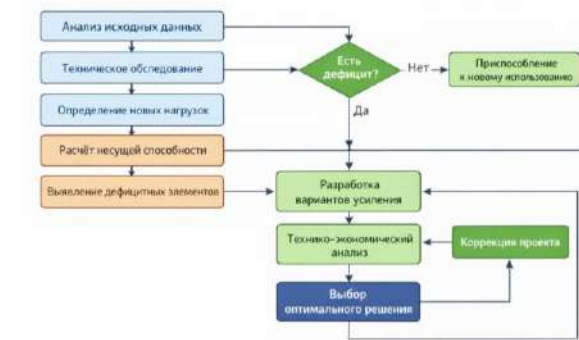


Рисунок 1. Алгоритм реконструкции производственного здания

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Важным аспектом реконструкции является перераспределение нагрузок при изменении функционального назначения здания. Помимо увеличения временных нагрузок, существенно изменяется характер их приложения: если для производственных зданий характерны локальные нагрузки от оборудования, то для общественных зданий — равномерно распределённые нагрузки от потоков людей и мебели. Это требует дополнительной проверки прогибов и жёсткости конструкций перекрытий по второй группе предельных состояний.

Особое внимание следует уделять узлам сопряжения элементов, так как именно в этих зонах наиболее часто возникают концентрации напряжений при

изменении расчётной схемы. Усиление узлов с применением стальных накладок или композитных обойм позволяет повысить их несущую способность без значительного увеличения массы конструкции.

Дополнительно выявлено, что при реконструкции необходимо учитывать следующие факторы:

- изменение динамических воздействий (вибрации, пешеходные нагрузки);
- необходимость устройства дополнительных проёмов (лифты, эвакуационные выходы), что снижает жёсткость дисков перекрытий;
- влияние инженерных систем (вентиляция, кондиционирование), создающих дополнительные нагрузки.

Проведённый анализ показал, что наиболее эффективной стратегией является комбинированное усиление, включающее:

- увеличение сечения элементов (бетонирование);
- внешнее армирование композитами;
- локальное усиление наиболее нагруженных зон.

Также, при переводе производственного здания в общественное или административное увеличивается нормативная временная нагрузка на перекрытия до 400-500 кг/м², а требуемый предел огнестойкости возрастает до R90 и выше.

Наиболее часто дефицит несущей способности выявляется в балках перекрытий и покрытия, тогда как колонны и фундаменты имеют достаточный запас прочности. Это объясняется тем, что при проектировании производственных зданий закладывались повышенные коэффициенты запаса.

Таблица 1. Изменение параметров при перепрофилировании зданий

Показатель	Производственное	Общественное
Временная нагрузка	300-400 кг/м ²	400-500 кг/м ²
Предел огнестойкости	R45	R90

Расчёты показали, что усиление перекрытий путём устройства монолитной железобетонной плиты позволяет увеличить несущую способность на 25-35 %, а применение металлических или композитных систем - до 40 %.

С точки зрения градостроительного развития адаптивное использование зданий снижает объём строительных отходов и уменьшает нагрузку на инфраструктуру.

Экономический анализ показал, что стоимость реконструкции составляет 60-75 % стоимости нового строительства, при сокращении сроков реализации проекта на 30-40 %.

Таким образом, при удовлетворительном техническом состоянии каркаса реконструкция является рациональным и экономически обоснованным решением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования подтверждают, что реконструкция производственных зданий при изменении их назначения является эффективной альтернативой новому строительству при условии комплексного инженерного подхода. Наиболее рациональными являются решения, направленные на локальное усиление перекрытий и узлов, при сохранении существующего несущего каркаса.

Установлено, что ключевыми факторами успешной реконструкции являются точность технического обследования, корректность расчётной модели и выбор экономически обоснованных методов усиления. Предложенный подход позволяет обеспечить требуемый уровень надёжности, безопасности и эксплуатационной

эффективности зданий.

Практическая реализация разработанных рекомендаций способствует снижению капитальных затрат, сокращению сроков строительства и повышению устойчивости городской застройки.

Реконструкция и перепланировка производственных зданий с изменением целевого назначения позволяют эффективно продлить жизненный цикл строительных объектов и обеспечить рациональное использование городской территории.

Определены основные факторы, влияющие на выбор технических решений: изменение нормативных нагрузок, требования к расчёту железобетонных и металлических конструкций, а также фактическое техническое состояние здания.

Разработан укрупнённый алгоритм инженерной оценки, включающий обследование, расчёт и подбор методов усиления.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения предложенного подхода при проектировании реконструкции промышленных объектов различного назначения.

Перспективы дальнейших исследований связаны с применением цифровых моделей и BIM-технологий при проектировании реконструкции.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная статья подготовлена в рамках проекта грантового финансирования научных исследований МНВО по теме «Реконструкция и перепланировка производственных зданий с изменением целевого назначения»

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность коллегам за методологическую поддержку и полезные обсуждения, а также анонимным рецензентам за ценные замечания, способствовавшие улучшению качества статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений.

<https://docs.cntd.ru/document/1200035259>

СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. <https://docs.cntd.ru/document/456054209>

СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции.

<https://docs.cntd.ru/document/554403517>

СП 16.13330.2017. Стальные конструкции.

<https://docs.cntd.ru/document/456054206>

Федоров В.В. Реконструкция зданий и сооружений. - М.: АСВ, 2015.

Кузнецов А.А. Усиление строительных конструкций. - М.: АСВ, 2018.

Holicky, M. (2009). Assessment and rehabilitation of existing structures. Engineering Structures, 31(3), 639-645.

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.11.003>

Bullen, P., Love, P. (2011). Adaptive reuse of heritage buildings. Structural Survey, 29(5), 411-421.

<https://doi.org/10.1108/02630801111182439>

Douglas, J. (2006). Building Adaptation. Oxford: Butterworth-Heinemann.

EN 1990:2002. Eurocode - Basis of structural design.

<https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/showpage.php?id=138>.

РАСЧЁТНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ВОСТОЧНОГО РЕГИОНА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

УДК 621.311.1

Н.В.Бурдукова^{1*}, Н.К.Ердыбаева¹

¹ВКТУ им.Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Бурдукова Наталья Владимировна, e-mail:

burdukova@kegoc.kz

АННОТАЦИЯ. В статье оценено влияние уровня напряжения на активные потери в линиях 110/220/500 кВ Восточного Казахстана. Приведена методика анализа в RastrWin и обоснованы меры по снижению потерь.

Ключевые слова: потери мощности, линии электропередачи, регулирование напряжения, Восточный энергорегіон Казахстана, Филиал акционерного общества «Казахстанская компания по управлению электрическими сетями (Kazakhstan Electricity Grid operating Company) «KEGOC» «Восточные межсистемные электрические сети «ВМЭС».

ВВЕДЕНИЕ

Восточный регион Казахстана остаётся одним из наиболее энергонагруженных, и именно здесь потери мощности в магистральных сетях формируют существенную часть эксплуатационных расходов. Протяжённые линии 110/220/500 кВ, по которым проходят крупные транзитные перетоки, неизбежно сопровождаются ростом технических потерь, достигающих по данным АО «KEGOC» «ВМЭС» до 10 % (от переданной по ЛЭП мощности) в 2020–2024 гг. [6]. Такой уровень сопоставим с годовой выработкой отдельного турбогенератора и эквивалентен ежедневному сгоранию порядка 36 вагонов угля без полезной отдачи. Масштаб этих потерь подчёркивает их стратегическую значимость и необходимость поиска эффективных решений.

На рисунке 1 представлено сопоставление годовых потерь и выработки одного турбогенератора, наглядно демонстрирующее их фактическую эквивалентность.

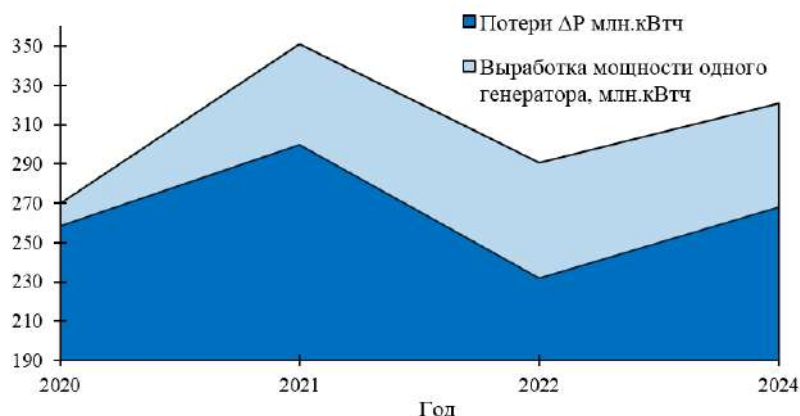


Рисунок 1. Сравнительный график: «Объем потерь эл. мощности vs выработка мощности одного турбогенератора»

Годовые потери в линиях и трансформаторных узлах достигают существенных величин, формируя заметную долю в себестоимости передачи электроэнергии. Структура этих потерь представлена на диаграмме, из которой видно, что основная

часть приходится на линии электропередачи.

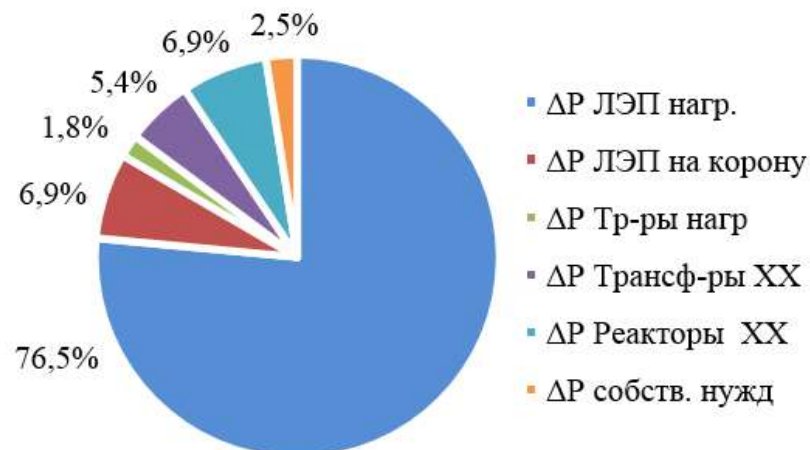


Рисунок 2. Диаграмма структуры технических потерь электрической мощности Восточного энергорегиона РК

Поскольку значительная доля потерь формируется в высоковольтных линиях, особое внимание в работе уделено влиянию уровня напряжения на их величину. Одним из наиболее результативных направлений является регулирование уровня напряжения, позволяющее уменьшить токовую нагрузку и, тем самым, снизить активные потери мощности в соответствии с законом Джоуля–Ленца. Данный подход является широко применяемым и подтверждает свою эффективность в исследованиях по повышению энергетической эффективности сетевой инфраструктуры [1–3].

В практических условиях обеспечение требуемого уровня напряжения достигается за счёт применения специализированных технических средств, позволяющих оперативно изменять параметры режима и устойчиво поддерживать напряжение в допустимых пределах.

В энергетических сетях Восточного региона для поддержания требуемого уровня напряжения и снижения потерь применяются различные технические средства регулирования. Наиболее распространёнными являются трансформаторы с регулированием под нагрузкой (РПН), а также устройства продольной и поперечной компенсации, обеспечивающие стабилизацию напряжения и перераспределение потоков мощности. Дополнительно используются системы автоматического регулирования напряжения, позволяющие поддерживать параметры режима в допустимых пределах в условиях изменяющейся нагрузки [3, 4].

На рисунке представлено устройство РПН силового трансформатора, применяемое в практических условиях для оперативного регулирования напряжения.



Рисунок 3. Фото силового трансформатора с устройством регулирования напряжения под нагрузкой (РПН).

Устройства РПН оснащены приводом, работающим от электродвигателя постоянного или переменного тока. Переключение ступеней выполняется дистанционно со щита управления или автоматически по сигналу реле напряжения. Также предусмотрено ручное управление при отказе моторного привода или отсутствии питания. Полное переключение на соседнюю ступень занимает около 3 секунд.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для количественной оценки влияния регулирования напряжения на потери мощности была выполнена серия расчётов методом моделирования режимов в программном комплексе RastrWin.

Параметры линий, включая длину, сопротивление, конфигурацию сети и характеристики нагрузки, были заданы на основании типовых данных ЛЭП АО «KEGOC» и региональных энергопередающих компаний [6].

Методика исследования включает построение расчетной схемы участка магистральной сети Восточного Казахстана, выбор характерных узлов и проведение серии расчётов с варьированием уровня напряжения на отдельных участках.

Особое внимание уделялось моделированию режимов, что позволило учесть специфику региона. Подобный подход соответствует рекомендациям нормативных документов [4,5] и практике АО «KEGOC» по оценке эффективности эксплуатации электросетей.

В каждом варианте фиксировалась величина активной и реактивной нагрузки, а напряжение изменялось по уровням: 110 кВ, 220 кВ и 500 кВ.

Для расчёта активных потерь мощности использована классическая зависимость, основанная на законе Джоуля–Ленца, поскольку она напрямую отражает связь между током нагрузки, параметрами линии (R) и уровнем напряжения. Данная формула (1) является базовой в анализе режимов электрических сетей и соответствует нормативным методикам расчёта технических потерь, применяемым в практике АО «KEGOC» и профильных отраслевых стандартах.

$$\Delta P = \frac{(P^2 \cdot R)}{(U^2 \cdot \cos^2 \varphi)} \quad (1),$$

где P — активная мощность (Вт), U — напряжение (В),
 R — активное сопротивление линии (Ом).

Полученные расчётные значения активных потерь стали основой для дальнейшего анализа.

Для повышения точности анализа проводилось сравнение потерь при изменении напряжения в узловых точках, что позволило выявить участки сети с наибольшим эффектом от регулирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате выполнения серии расчётов при напряжениях 110, 220, 500 кВ были получены зависимости величины активных потерь от уровня напряжения. Итоги моделирования представлены на рисунке 5.

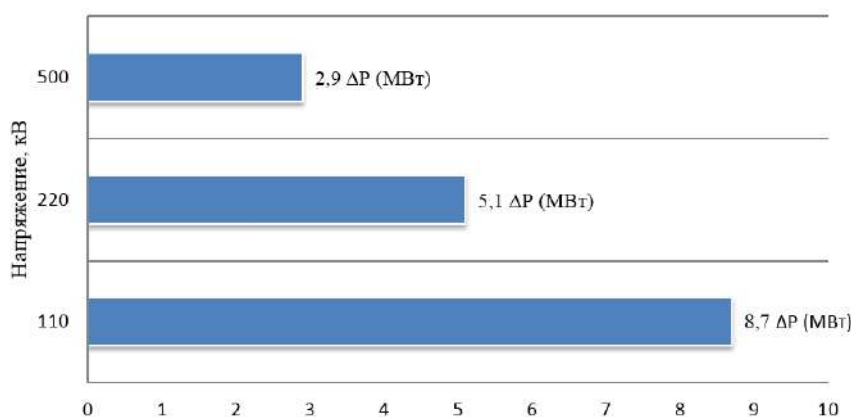


Рисунок 5. График зависимости потерь мощности от уровня напряжения

Представленные на рисунке 5 зависимости подтверждают устойчивое снижение активных потерь при повышении уровня напряжения: самый заметный эффект наблюдается при переходе с 110 кВ на 220 кВ и далее к 500 кВ. Полученные количественные результаты позволяют сформулировать обобщённые выводы о влиянии регулирования напряжения на энергоэффективность магистральных сетей региона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый расчётный анализ показал, что регулирование напряжения является одним из наиболее действенных способов уменьшения активных потерь мощности в линиях электропередачи Восточного энергорегиона Республики Казахстан. Ключевым фактором улучшения является оптимизация режимов напряжения, позволяющая снизить токи нагрузки в линиях и тем самым уменьшить активные потери. Наибольший эффект достигается при переходе на более высокие уровни напряжения — с 110 кВ до 500 кВ, где снижение потерь превышает коэффициент 2,5. Полученные результаты подтверждают необходимость применения трансформаторов с РПН, устройств продольной и поперечной компенсации, а также систем автоматического регулирования напряжения на наиболее загруженных участках сети.

Разработанная и применённая в работе методика регулирования напряжения, основанная на расчётах в программном комплексе RastrWin, обеспечивает количественную оценку эффективности различных вариантов управления напряжением и позволяет выбирать режимы, минимизирующие технические потери. Проведённые исследования показали, что обоснованный выбор параметров регулирования приводит к улучшению качества электропередачи, выражающемуся в снижении активных потерь мощности и повышении энергоэффективности

функционирования энергосистемы.

Результаты исследования могут быть использованы при планировании модернизации магистральных ЛЭП, оптимизации схемно-режимных решений и разработке программ повышения энергоэффективности Восточного региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воротницкий В.Э., Михайлов В.В. Направления совершенствования нормирования потерь электроэнергии в электрических сетях // Энергоэксперт. – 2013. – №3. – С. 46–50.
2. Воротницкий В.Э. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в электрических сетях. – М.: Теплоэнергетика, 2017. – 330 с.
3. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учебник. – М.: Энергомиздат, 1989. – 592 с.
4. Методика проведения технической экспертизы расчета технических потерь / ТОО «Казэнергоналадка». – Алматы, 2005. – 22 с.
5. Методика определения нормативов потерь электрической энергии при ее передаче. – Минюст РФ, №34075 от 17.09.2014.
6. Казахстанская компания по управлению электрическими сетями KEGOC. – URL: <https://bems.kegoc.kz/> (дата обращения: 20.02.2025).

ОРГАНИЗАЦИЯ ИНКЛЮЗИВНОЙ СРЕДЫ В ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЯХ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

УДК 727.3.05+376.2

А.О. Вайнбергер^{1*}, В.Б. Масалимова¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Вайнбергер Алёна Олеговна, e-mail: 191394@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассматриваются современные требования и практические подходы к созданию безбарьерной среды в системе высшего образования Республики Казахстан. Проводится анализ нормативно-правовой базы определяющей параметры архитектурной и методической доступности вузов. В работе подробно описаны три основные модели организации обучения: интегративная, модель ресурсных центров и универсальный дизайн. На примере ведущих университетов страны (Satbayev University, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, ВКУ им. С. Аманжолова, ВКТУ им. Д. Серикбаева) проанализирован практический опыт внедрения ассистивных технологий, волонтерских систем поддержки и специализированного технического оснащения. Научная значимость исследования базируется на теоретическом обосновании смены образовательных моделей: от адаптации отдельных элементов инфраструктуры к созданию целостной инклюзивной экосистемы вуза, основанной на принципах универсального проектирования. Результаты исследования подтверждают гипотезу о том, что наиболее эффективным является синтетический подход, сочетающий физическую доступность вуза с глубокой цифровой и психолого-педагогической поддержкой.

Ключевые слова: инклюзивное образование, безбарьерная среда, ассистивные технологии, ресурсный центр, универсальный дизайн, высшее образование.

ВВЕДЕНИЕ

Право на образование является одним из фундаментальных прав человека, закрепленных в международном праве и Конституции Республики Казахстан. Однако для лиц с ограниченными возможностями реализация этого права долгое время оставалась ограниченной рамками специализированных интернатов и коррекционных программ, изолирующих их от общества.

Впервые на законодательном уровне в Республике Казахстан были отражены права на получение образования граждан с нарушением здоровья в Законе «О социальной защищенности инвалидов в Республике Казахстан», принятый 21 июня 1991 года. В 2021 году законодательно было введено понятие инклюзивного образования.

Инклюзивное образование — это форма обучения, при которой каждому человеку, независимо от его физических, социальных, эмоциональных, языковых, ментальных, интеллектуальных особенностей и др., предоставляется возможность учиться в образовательных учреждениях на равных условиях с другими обучающимися. Инклюзивная система предусматривает создание специальных условий, адаптацию среды, методик и оказываемой поддержки, чтобы устранить барьеры в обучении и участии в образовательном процессе.

Цель исследования: выявить архитектурно-планировочные модели формирования инклюзивной среды в вузах Казахстана, обеспечивающие физическую

доступность и функциональный комфорт для студентов с ООП.

Задачи:

Проанализировать нормативно-технические требования к проектированию безбарьерной среды в высших учебных заведениях РК;

Классифицировать архитектурно-дизайнерские подходы (интегративная модель, ресурсные центры, универсальный дизайн) по уровню их воздействия на инфраструктуру вуза;

Изучить специфику технического оснащения специализированных зон;

Раскрыть роль ассистивных и навигационных технологий в создании автономного пространства для маломобильных групп.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы исследования: нормативно-правовые акты РК, объекты инфраструктуры (архитектурно - планировочные решения и материально-техническое оснащение четырех ведущих вузов Казахстана: Satbayev University, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, ВКУ им. С. Аманжолова и ВКТУ им. Д. Серикбаева).

Современные требования к организации высшего образования в Казахстане четко определяют параметры доступности учебного процесса для всех категорий граждан. Так в п. 6 приложения к приказу Министра науки и высшего образования Республики Казахстан от 16 января 2026 года №18 подчеркивается необходимость создания равных условий и безбарьерного доступа к образовательным услугам для обучающихся с особыми образовательными потребностями:

1) наличие входных путей, средств информационно-навигационной поддержки, дублирование лестниц пандусами или подъемными устройствами, оборудование лестниц и пандусов поручнями, окрашивание контрастной краской дверей и лестниц, выделение мест для парковки автотранспортных средств для лиц с инвалидностью;

2) наличие специального кабинета в каждом учебном корпусе, оборудованного средствами обучения, учебной литературой, адаптированными программными обеспечениями;

3) наличие у преподавателей навыков преподавания для лиц с особыми образовательными потребностями, прошедших курсы повышения квалификации или стажировки/переподготовки по методике инклюзивного образования.

Для эффективного внедрения безбарьерной среды университеты выбирают различные пути организационного развития, опираясь на накопленный мировой опыт и национальные стандарты качества. В практике казахстанских вузов выделяют три основные модели организации инклюзивного образования:

Таблица 1. Модели организации инклюзивного образования.

	Модели организации инклюзивного образования		
Название	Интегративная модель (совместное обучение)	Ресурсные центры	Универсальный дизайн
Среда	Совместное нахождение студента с ООП в одном пространстве со сверстниками.	Закрытые пространства, с обеспечением высокотехнологических рабочих мест.	Отсутствие барьеров для всех.

Организация пространства	Локальное зонирование (по запросу конкретного студента).	Создание «островов» доступности (спец. кабинеты).	Системная (вся инфраструктура доступна по умолчанию).
	Модернизация готового проекта	Модернизация готового проекта	Реконструкция
Преимущества	- Максимальное взаимодействие со сверстниками. - Формирование толерантной среды в вузе.	-Глубокая профессиональная поддержка студентов с тяжелыми нарушениями. -Наличие «тихой зоны» для отдыха и индивидуальных занятий.	-Студент с ООП не зависит от посторонней помощи. -Среда удобна для всех (иностранцев, студентов с временными травмами, пожилых людей).
Недостатки	-Студент может не справляться с общим темпом. -Высокая нагрузка на обычного преподавателя без спец. поддержки.	-Опасность того, что студент будет проводить все время в центре, не общаясь с группой. -Доступность ограничена только одной комнатой. -Необходимо обучение тьютеров.	-Требуется значительных инвестиций на этапе проектирования или капитальной реконструкции. -Необходимо обучение всего персонала вуза.

Если проанализировать моделии мы можем убедиться, что ни одна из них не является взаимоисключающей; напротив, для достижения максимальной эффективности вузам необходимо стремиться к их синтезу. Если интегративная модель закладывает фундамент социальной терпимости, а ресурсные центры обеспечивают глубокую технологическую поддержку студентов с тяжелыми нарушениями, то универсальный дизайн является высшим стандартом инклюзии.

Реализация инклюзивной среды в высших учебных заведениях Республики Казахстан постепенно набирает обороты. Хотя многие вузы ещё находятся на этапе создания базовой безбарьерной среды, отдельные университеты уже демонстрируют успешные примеры комплексного подхода, сочетающего архитектурные решения, ресурсные центры и цифровую поддержку.

Одним из примеров инклюзивной безбарьерной среды является Satbayev University (г. Алматы). Университет активно развивает инклюзивную инфраструктуру кампуса и считается одним из лидеров в этом направлении среди казахстанских вузов. На территории университета установлены пандусы, лифты и тактильные дорожки с мнемосхемами для слабовидящих студентов. В корпусах оборудованы доступные входы и перемещения для людей с ограниченной мобильностью.

В университете была открыта инклюзивная аудитория имени профессора Тансауле Серикова, специально для студентов с особыми образовательными потребностями. Аудитория оснащена современными технологиями, включая специализированные приложения. Студентам предоставляются услуги сурдопереводчиков и усилители звука. Кроме того, в университете действует инклюзивный центр, где студенты могут пользоваться адаптивными

образовательными материалами и получать дополнительную поддержку.

В Евразийском национальном университете (ЕНУ) им. Л.Н. Гумилева (г. Астана) работает полноценный коворкинг-центр «Inclusion Hub». Это пространство, разделенное на зоны, со специальными рабочими местами и адаптивной мебелью, для отдыха и консультаций.

Для обеспечения безбарьерной среды в ЕНУ им. Л.Н. Гумилева внедрена комплексная система навигации и инфраструктуры: от входов до ключевых локаций, таких как деканаты и библиотеки, проложены желтые тактильные дорожки, а все учебные корпуса оборудованы лифтами с голосовым оповещением этажей и кнопками со шрифтом Брайля. Кроме того, в студенческих домах предусмотрены специализированные комнаты на первых этажах, адаптированные для нужд маломобильных студентов за счет расширенных дверных проемов и переоборудованных санузлов.

Технологический арсенал ЕНУ включает передовые ассистивные решения для незрячих и слабовидящих студентов: от программ экранного доступа, озвучивающих интерфейс компьютеров, до специализированных принтеров и портативных дисплеев Брайля. Особое внимание уделяется автономной навигации — в холлах установлены тактильные мнемосхемы зданий, а уникальная авторская разработка университета «Инклюзивный гид» с помощью системы лазеров, камер и QR-кодов обеспечивает голосовое сопровождение студента внутри корпусов, предупреждая о препятствиях даже в офлайн-режиме.

Для сопровождения и поддержки лиц с инвалидностью создан волонтерский клуб «Көмек», работающий по модели «2+1».

ВКУ им. С. Аманжолова (г. Усть-Каменогорск) является региональным центром, где развивают инклюзивное обучение. В университете создана база, объединяющая медицинскую реабилитацию, психологическую помощь и технические средства для учебы. Учебные зоны и библиотеки университета оснащены специализированным оборудованием — видео увеличителями, звукоусиливающей аппаратурой и компьютерами с адаптивным ПО, с регулируемыми столами под кресла-коляски. Для студентов с нарушениями опорно-двигательного аппарата предусмотрены тренажеры для физической реабилитации прямо в стенах вуза. Корпуса оснащены стандартными пандусами с поручнями, и тактильными указателями. Внутри зданий используется контрастная маркировка ступеней и дверей для удобства слабовидящих.

В ВКТУ имени Д. Серикбаева (г. Усть-Каменогорск) инклюзия ориентирована на создание технически доступной среды, так как специфика вуза подразумевает работу в лабораториях с инженерным оборудованием. В входных группах установлены стандартные пандусы с поручнями и кнопки вызова персонала. Для слабовидящих используется контрастная окраска крайних ступеней лестниц. Для обучения слабовидящих предусмотрено наличие электронной указки (лазера). В университете имеется аппарат «AverVision F17HD+», предназначенный для обучения студентов с нарушением зрения.

Для достижения поставленной цели использовались следующие научные методы:

- Компаративный (сравнительный) анализ: применялся при сопоставлении трех моделей организации инклюзивной среды (интегративной, ресурсной и универсального дизайна) для выявления их преимуществ и ограничений в условиях реконструкции существующих зданий;

- Метод кейс-стади (изучение конкретных случаев): использован для детального описания практического опыта реализации безбарьерной среды в выбранных университетах;

- Контент-анализ: изучение технической документации и официальных

требований к оборудованию учебных зон (пандусы, поручни, специализированная мебель, контрастная маркировка).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Приведённые примеры показывают, что организация инклюзивной среды в вузах РК движется от базового технического оснащения к созданию полноценной адаптивной образовательной среды, включающим ресурсные центры, цифровые технологии и систему педагогического сопровождения. Однако масштабное внедрение таких практик во всех регионах страны, включая Восточный Казахстан, ещё требует значительных усилий по финансированию, подготовке кадров и реализации крупных проектов таких как специализированных учебных аудиторий, отдельных корпусов, реконструкции высших учебных заведений в целом.

Необходимо отметить, что эмпирическую базу исследования составили преимущественно данные официальных сайтов вузов, что сопряжено с риском определенной декларативности представленной информации. Официальные ресурсы зачастую транслируют нормативные стандарты, которые могут не в полной мере соответствовать фактическому состоянию инфраструктуры и реальному пользовательскому опыту студентов. Данное ограничение по верификации диктует необходимость проведения в дальнейшем натурных обследований и прямых опросов целевой группы для выявления возможных расхождений между официальными данными и фактической эксплуатационной пригодностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современном мире образование лиц с ограниченными возможностями рассматривается не как акт благотворительности, а как фундаментальное право человека и залог устойчивого развития государства. Переход от «медицинской модели», видевшей в инвалидности только диагноз, к «социальной модели» позволил переосмыслить учебный процесс: теперь не обучающийся должен подстраиваться под жесткие академические стандарты, а образовательная среда обязана трансформироваться под его уникальные потребности.

В Республике Казахстан эта трансформация закреплена законодательно, что обязывает учебные заведения обеспечивать не только физический доступ в здания, но и психолого-педагогическое сопровождение, адаптивные учебные планы и специальные технические средства. Таким образом, качественное образование становится для лиц с особыми потребностями главным инструментом социальной интеграции, позволяя им в будущем конкурировать на рынке труда и вносить свой вклад в экономику страны.

Многие вузы страны уже создают центры инклюзивного образования. Тем не менее, остаются актуальными задачи по улучшению материально-технической базы, повышению профессиональной готовности преподавателей и формированию инклюзивной культуры в обществе.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проведено без привлечения внешнего финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ: Выражаем признательность за возможность использования открытых данных официальных сайтов высших учебных заведений Республики Казахстан, послуживших основой для данного исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке данной работы авторами использовались технологии генеративного искусственного интеллекта (модель Gemini 3 Flash от Google) исключительно для стилистической правки текста, структурирования представленных данных. ИИ не использовался для генерации ключевых научных выводов, интерпретации результатов исследования и подбора библиографических источников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Давыдова Евгения Михайловна, Радченко Валерия Юрьевна, Радченко Олег Сергеевич 2016. Принципы универсального дизайна как основа формирования профессиональных компетенций дизайнеров. Источник Филологические науки. Вопросы теории и практики Тамбов: № 4(58): в 3-х ч. Ч. 1. С. 186-190. ISSN 1997-2911. <http://www.gramota.net/materials/2/2016/4-1/57.html>
- Mertens, D. M. (2019). Research and Evaluation in Education and Psychology: Integrating Diversity with Quantitative, Qualitative, and Mixed Methods. Sage Publications. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3176728>
- Yin, R. K. (2018). Case Study Research and Applications: Design and Methods (6th Ed.). Sage Publications. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3968457>
- Закон Республики Казахстан от 21 июня 1991 г. «О социальной защищенности инвалидов в Республике Казахстан» <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z910001900>
- Закон Республики Казахстан от 27 июля 2007 года № 319-III «Об образовании» (с изменениями и дополнениями по состоянию на 01.04.2026 г.) https://prg.kz/document/?doc_id=30118747&pos=4;156
- Постановление Правительства Республики Казахстан от 30 декабря 2024 года № 1143 № «Об утверждении Концепции инклюзивной политики в Республике Казахстан на 2025 – 2030 годы» <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2400001143>
- Казахский национальный исследовательский технический университет. Инклюзивность в действии: В Satbayev University появилась аудитория для студентов с особыми потребностями <https://satbayev.university/ru/news/inklyuzivnost-v-deystvii-v-satbayev-university-poyavilas-auditoriya-dlya-studentov-s-osobymi-potrebnostyami>
- Восточно - Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова. Центр непрерывного и инклюзивного образования «Dana bala». <https://vku.edu.kz/about-2/departments-ru/danabala-ru/>
- Евразийский университет имени Л.Н. Гумилева. <https://enu.kz/ru/page/the-center-for-inclusive-support/educational-process>
- Восточно–Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева. Инклюзивное образование в ВКТУ. Доступное образование. https://www.ektu.kz/newsevents/inklyuzivnoe_obrazovanie_v_vktu_dostupnoe_obrazovanie.aspx
- Gemini 3 Flash. (2026, март 27). Анализ инклюзивной среды и технических средств в вузах Республики Казахстан; стилистическая правка и структурирование текста научной статьи. Google AI. <https://gemini.google.com>

УСИЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТОВ СОВРЕМЕННЫМИ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ

УДК 624.15

А. Ю. Гаврилаш^{1*}

¹НАО «Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева»,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Гаврилаш Анастасия Юрьевна, e-mail:
gavrilash_miledi@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрены современные методы усиления фундаментов с использованием геосинтетических материалов. Проанализированы виды геосинтетиков, их физико-механические свойства и механизмы взаимодействия с грунтовым основанием. Представлены основные технологические решения для ленточных и плитных фундаментов, а также особенности применения материалов в условиях слабых и водонасыщенных грунтов. Выполнено сравнение геосинтетических технологий с традиционными методами усиления. Показана эффективность применения геосинтетиков с точки зрения повышения несущей способности, снижения осадок и экономической целесообразности.

Ключевые слова: фундамент, усиление основания, геосинтетические материалы, геотекстиль, георешетка, геомембрана, армирование грунта, осадка.

ВВЕДЕНИЕ

Современное строительство всё чаще осуществляется в условиях сложных инженерно-геологических условий: слабых глинистых и торфяных грунтов, водонасыщенных оснований, просадочных и пучинистых почв. В таких условиях обеспечение надёжности фундаментов становится одной из ключевых задач проектирования и строительства.

Традиционные методы усиления оснований — устройство свайных фундаментов, цементация грунтов, уширение подошвы — отличаются высокой стоимостью и значительными трудозатратами. В последние десятилетия активно внедряются геосинтетические материалы, позволяющие повысить несущую способность основания и снизить деформации при сравнительно меньших затратах.

Целью данной работы является анализ технологий усиления фундаментов с применением современных геосинтетических материалов и оценка их эффективности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Геосинтетические материалы представляют собой полимерные изделия, применяемые в строительстве для улучшения характеристик грунтовых оснований.

Основные виды геосинтетиков

К основным видам относятся:

1. Геотекстили — нетканые или тканые материалы, выполняющие функции разделения, фильтрации и армирования.
2. Георешетки — пространственные или плоские структуры, предназначенные для восприятия растягивающих усилий и перераспределения нагрузок.
3. Геосетки — плоские полимерные сетки с высокой прочностью на растяжение.
4. Геомембраны — гидроизоляционные материалы, обеспечивающие барьерную защиту.

5. Геокомпозиты — комбинации нескольких типов геосинтетиков.

Основные физико-механические свойства

Ключевые характеристики геосинтетических материалов:

- высокая прочность на растяжение;
- устойчивость к химической и биологической коррозии;
- долговечность (срок службы более 50 лет);
- устойчивость к циклическим нагрузкам;
- фильтрационная способность (для геотекстилей).

Благодаря этим свойствам геосинтетики эффективно взаимодействуют с грунтовым массивом, формируя армированную грунтовую систему.

Механизмы усиления оснований

Армирование грунта

При укладке георешеток или геосеток в основании создаётся армированная грунтовая структура. Вертикальная нагрузка от здания перераспределяется в горизонтальной плоскости, уменьшая концентрацию напряжений. Повышается сопротивление сдвигу, что ведёт к увеличению несущей способности основания.

Разделение слоёв

Геотекстиль предотвращает перемешивание слабого грунта с инертным материалом (песком, щебнем), сохраняя расчётные характеристики основания.

Фильтрация и дренаж

Геотекстиль выполняет функцию фильтра, пропуская воду и задерживая частицы грунта. Это предотвращает вымывание мелких фракций и снижает риск неравномерных осадок.

Гидроизоляция

Геомембраны защищают фундамент от воздействия грунтовых вод и агрессивных сред, что повышает долговечность бетонных конструкций.

Проблемы фундаментов и необходимость усиления

Фундаменты испытывают постоянные нагрузки от зданий, а также дополнительные воздействия:

- неравномерная осадка;
- сезонное пучение и просадка грунтов;
- вибрации от транспорта;
- фундаменты под существующими зданиями;
- слабые или рыхлые грунты (торф, глина, песок с низкой плотностью).

Без усиления возможны:

- трещинообразование в стенах;
- перекосы и наклоны;
- выход из проектных отметок;
- разрушение конструкций.

Традиционные методы усиления включают подсыпку щебня, свайные поля, уширение подошвы фундамента. Эти методы эффективны, но часто дорогостоящие, трудоёмкие и длительные по времени. Геосинтетические технологии позволяют решать многие задачи быстрее и с меньшими затратами.

Технологии усиления фундаментов

Усиление ленточных фундаментов

При строительстве на слабых грунтах под подошву фундамента укладывается слой геотекстиля, поверх которого размещается георешетка. Далее устраивается песчано-щебёночная подготовка.

Преимущества метода:

- увеличение несущей способности основания на 20–40 %;
- снижение осадки;

- повышение равномерности распределения нагрузки.

Усиление плитных фундаментов

Для плитных фундаментов применяется многослойное армирование основания геосетками. Формируется армированная платформа, работающая как единая система.

Эффект:

- уменьшение дифференциальных осадок;
- повышение жёсткости основания;
- снижение толщины подсыпки.

Усиление при реконструкции зданий

При необходимости усиления существующих фундаментов возможно устройство армированных грунтовых подушек с применением геосинтетиков без значительного увеличения нагрузки на основание.

6. Сравнение с традиционными методами

По сравнению со свайными и цементационными методами, применение геосинтетиков характеризуется:

- меньшей стоимостью;
- сокращением сроков строительства;
- снижением объёмов земляных работ;
- возможностью применения в стеснённых условиях.

Однако в случаях крайне слабых грунтов геосинтетические методы целесообразно комбинировать со свайными системами.

7. Преимущества и ограничения

Преимущества:

- экономичность;
- технологичность монтажа;
- долговечность;
- экологическая безопасность.

Ограничения:

- необходимость точных инженерных расчётов;
- чувствительность к повреждениям при неправильной укладке;
- зависимость эффективности от качества грунтового основания.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Жилой комплекс на слабых глинистых грунтах

При строительстве жилого комплекса с многосекционными зданиями на глинистых грунтах глубиной до 12 м были применены армированные основания с георешёткой под ленточные фундаменты. Результаты:

- Несущая способность основания увеличилась на 30–40%;
- Осадки сократились на 25%;
- Сроки устройства фундаментов уменьшились на 20%.

Промышленное здание с высокой влажностью

Для промышленных цехов на участке с высоким уровнем грунтовых вод были использованы геомембраны с геотекстильной защитой и дренажные геocomпозиты. Это позволило:

- Снизить гидростатическое давление на подошву;
- Обеспечить долговечность бетонной плиты;

Уменьшить риск коррозии арматуры.

Ограничения и риски

Несмотря на преимущества, геосинтетические материалы требуют грамотного проектирования:

- Требуют профессионального расчёта напряжений и деформаций.
- Неправильный выбор материала может привести к ухудшению свойств основания.
- Необходим контроль качества укладки.
- Возможны проблемы при контакте с острыми объектами (необходимо защитное покрытие).

Экспертиза проектировщиков и выполнение геотехнических изысканий – обязательные этапы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование современных геосинтетических материалов является перспективным направлением в области усиления фундаментов. Их применение позволяет существенно повысить несущую способность основания, уменьшить осадки и обеспечить долговечность сооружений при оптимальных экономических затратах.

Комплексный подход, включающий инженерно-геологические изыскания, расчёт армированного основания и грамотный подбор материалов, обеспечивает высокую эффективность геосинтетических технологий. В условиях роста требований к надёжности и устойчивости зданий применение геосинтетиков становится важным инструментом современного строительства.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования в рамках учебной и научно-исследовательской деятельности.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за методологическую поддержку, конструктивные замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению качества исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений.

СП 45.13330.2017 Земляные сооружения, основания и фундаменты.

Дыба В.П. Геосинтетические материалы в строительстве. – М.: АСВ, 2018.

<https://cyberleninka.ru/article/n/geosinteticheskie-materialy-v-dorozhnom-stroitelstve>

Koerner R.M. Designing with Geosynthetics. – Pearson Education, 2012.

Giroud J.P., Han J. Design method for geogrid-reinforced unpaved roads. Journal of Geotechnical Engineering.

https://openlibrary.org/books/OL25323187M/Designing_with_geosynthetics

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В ЗАМКНУТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ И ВЛИЯНИЕ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА НА НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 537.24

Ә.Р.Ғазизов¹, Н.В.Прохоренкова¹

¹ВКТУ им. Д. Серикбаева Усть-Каменогорск, Казахстан

* Автор-корреспондент. Ғазизов Ә.Р., e-mail: adilbek335@gmail.com

Аннотация: В статье представлены результаты экспериментального исследования процессов накопления статического электричества в замкнутых помещениях и анализ его влияния на надёжность электронного оборудования. Рассмотрены физические механизмы образования и распределения статического заряда на поверхностях диэлектрических материалов в бытовых условиях. Проведены инструментальные измерения уровня электростатического потенциала с учётом влияния влажности воздуха, температуры, типа напольного покрытия и материалов окружающей среды. Работа актуальна для регионов с сухим климатом. На основе полученных экспериментальных данных сформулированы рекомендации по снижению уровня статического электричества и повышению электростатической безопасности помещений. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и эксплуатации объектов, содержащих электронные и энергетические системы.

Ключевые слова: Статическое электричество, электростатический разряд, распределение заряда, надёжность оборудования, диэлектрические материалы, антистатическая защита.

ВВЕДЕНИЕ

Статическое электричество является одним из наиболее распространённых и в то же время наименее контролируемых факторов, влияющих на надёжность электронного оборудования в замкнутых помещениях [1, 2]. В условиях сухого климата Восточного Казахстана, где в зимний период относительная влажность воздуха часто опускается ниже 40 %, накопление заряда на диэлектрических материалах (синтетическая одежда, тканевые обивки, пластиковые поверхности) происходит особенно интенсивно [3, 4]. Это приводит к возникновению электростатических разрядов (ESD), которые способны вызывать как мгновенные отказы электронных компонентов, так и скрытые (латентные) дефекты, существенно сокращающие срок службы приборов [5, 6].

Проблема приобретает особую актуальность в лабораториях, мастерских и офисах, где одновременно присутствуют как источники статического заряда (синтетические ткани, ковры, одежда персонала), так и чувствительное электронное оборудование (измерительные приборы, компьютеры, источники питания) [7]. Даже относительно небольшие потенциалы (1–3 кВ) могут приводить к пробое изоляции полупроводниковых элементов, нарушению работы USB-интерфейсов и преждевременному старению микросхем [1, 8].

Несмотря на наличие международных стандартов (IEC 61340-5-1, ANSI/ESD S20.20) и отечественных нормативов, реальные данные о уровнях статического электричества в условиях казахстанских производственных и лабораторных помещений крайне ограничены [9, 10]. Большинство исследований проводилось в контролируемых условиях с искусственной влажностью, что не отражает специфику сухого континентального климата региона [3, 4].

В связи с этим возникла необходимость проведения экспериментального исследования непосредственно в реальных условиях эксплуатации. Целью настоящей работы является экспериментальная оценка уровня накопления статического электричества в замкнутых помещениях с использованием портативного измерителя FMX-003 и анализ влияния полученных значений на надежность электронного оборудования.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Измерения проводились в офисном здании (Усть-Каменогорск, Восточно-Казахстанская область) зимой при RH 30–40 %, T–(20–22°C). Использовался FMX-003: диапазон 0...±20 кВ (точность ±10 %), расстояние 25 мм, заземление обязательно [10, 11]. Точки: ковры, столы (пластик), стулья (ткань), двери, компьютеры, высоковольтное оборудование. По 5 измерений на точку с фиксацией HOLD. Оценка по IEC 61340-5-1 и ГОСТ 12.1.045-84: норма <1–2 кВ, превышение >3 кВ [12, 13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлен объект исследования – помещение с комнат с высоковольтным оборудованием, с комнатами работы персонала. На рисунках 2-5 показана примеры методики измерений и результаты одного из измерений с использованием FMX-003.

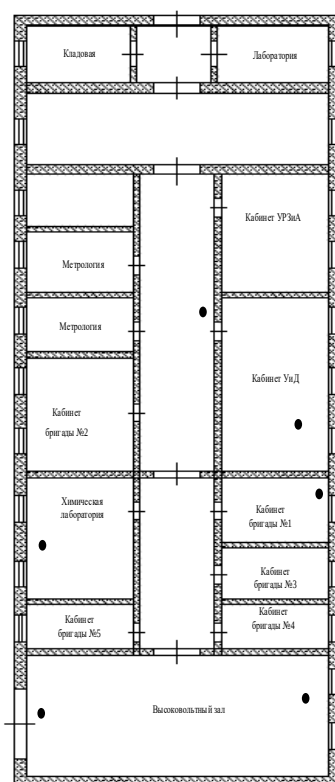


Рисунок 1. План здания с указанием точек измерения

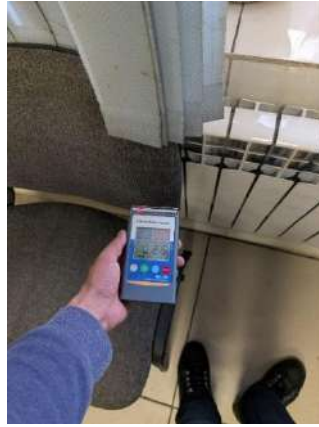


Рисунок 2. Измерение статического заряда на обивке стула



Рисунок 3. Измерение статического заряда около металлоконструкции



Рисунок 5. Измерение статического заряда около Центрифуги М-90



Рисунок 4. Измерение статического заряда Одежда (роба на человеке)

В сухих условиях потенциал на коврах достигал 5–8 кВ после ходьбы, на пластиковых поверхностях — 2–4 кВ, на одежде — до 3 кВ [8]. Разряды >3 кВ вызывали искры, помехи в ПК (сбои USB) и прилипание пыли. Для компонентов: диоды пробиваются при 2–3 кВ (HBM)[1, 9]. В сухом воздухе риск возрастает в 2–3 раза из-за отсутствия рассеивания заряда [3].

Таблица 1. Пороговые уровни ESD для компонентов

№	Точка измерения	Значение, кВ	Полярность	Примечание материал /
1	Тканевая обивка стула (спинка/сиденье)	-0.25	Отриц.	Низкий заряд, ткань
2	Корпус центрифуги ИМ-90	0.00	—	Проводящая поверхность
3	Металлическая сетка/стеллаж	+0.69	Полож.	Металл, остаточный заряд
4	Одежда (роба на человеке, спина)	+2.50	Полож.	Максимум, синтетика после движения
5	Сиденье стула (ткань)	+0.29	Полож.	Низкий

Диапазон: от 0.00 до +2.50 кВ. Среднее по всем точкам: ~0.65 кВ. Максимум на одежде (+2.5 кВ) — уже ощутимый уровень (возможна искра при касании металла). Металлические поверхности близки к нулю (заземление работает).

По стандартам IEC 61340-5-1: уровни <1 кВ — безопасны для большинства электроники, >2 кВ — риск для чувствительных компонентов (микросхемы) [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В помещении с низкой влажностью статический заряд накапливается преимущественно на синтетической одежде и тканях (до +2.5 кВ), но на металлических поверхностях минимален. Риск ESD присутствует, особенно при касании электроники. Рекомендации: антистатические браслеты, увлажнение воздуха, проводящие покрытия на пол/столы.[3, 12]

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования в рамках учебной и научно-исследовательской деятельности.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за методологическую поддержку, конструктивные замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению качества исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wysocki P. et al. Effect of Electrostatic Discharge on Electrical Characteristics of Discrete Electronic Components. NASA, 2009. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20100024154/downloads/20100024154.pdf>.
2. The Hidden Risk of Electrostatic Discharge (ESD) in Semiconductor Reliability. IEEE, 2025. URL: <https://innovationatwork.ieee.org/electrostatic-discharge-semiconductor-reliability>.
3. Why Does Low Humidity Cause Static Electricity? Condair, 2019. URL: <https://www.condair.com/humidifiernews/blog-overview/why-does-low-humidity-cause-static-electricity>.
4. Данные по влажности воздуха в Восточном Казахстане (зима 2025–2026 гг.). Метеорологические наблюдения РГП «Казгидромет».
5. Mardiguan M. Electrostatic Discharge. Interference Technology, 2009.
6. Voldman S.H. A review of electrostatic discharge (ESD) in advanced semiconductor technology // Microelectronics Reliability, 2004. Vol. 44. P. 33–52.
7. Fotis G. et al. Electromagnetic Fields Radiated by Electrostatic Discharges: A Review // Electronics. 2023. Vol. 12. No. 12. P. 2577.
8. Li F. et al. Study on ESD Protection Circuit by TCAD Simulation and TLP Experiment. PMC, 2023.
9. IEC 61340-5-1:2024. Electrostatics – Part 5-1: Protection of electronic devices from electrostatic phenomena – General requirements.
10. Интернет ресурс Simco-Ion. FMX-003 Operation/Maintenance Instructions. Desco Industries, 2005–2020. URL: <http://documents.desco.com/pdf/TB-41155.pdf>.
11. ГОСТ IEC 61340-5-1-2019. Электростатика. Защита электронных устройств от электростатических явлений. Общие требования.
12. ANSI/ESD S20.20-2021. Protection of Electrical and Electronic Parts, Assemblies and Equipment.
13. Daud J.G. The Effect of Static Electricity on Electronic Devices and How to Prevent It. ResearchGate, 2024.

РАЗРАБОТКА И РАСЧЁТ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ НАСОСОВ КНС-3 НА БАЗЕ ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

УДК 658.26

А. А. Данилов¹, А. М. Акаев¹

¹ВКТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Данилов Андрей Алексеевич

e-mail: danilovandrej077@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрена автоматическая система управления производительностью насосов канализационной насосной станции КНС-3 с использованием частотно-регулируемого электропривода. Исследование выполнено на основе реальных технических характеристик насосных агрегатов и асинхронных электродвигателей. Проведены расчеты диапазона частот регулирования, рабочих характеристик насосов, режимов энергопотребления и экономического эффекта от внедрения частотных преобразователей. Показано, что частотное управление позволяет обеспечить плавное регулирование производительности насосов в зависимости от уровня сточных вод, снизить потребляемую мощность и повысить надежность оборудования. Полученные результаты подтверждают эффективность применения частотно-регулируемых электроприводов для повышения энергоэффективности и эксплуатационной надежности насосных станций.

Ключевые слова: частотный преобразователь; канализационная насосная станция; автоматическая система управления; частотно-регулируемый электропривод; насосные агрегаты; энергосбережение.

ВВЕДЕНИЕ

Данная статья посвящена исследованию автоматической системы управления производительностью насосов КНС-3. В условиях неравномерного притока стоков насосные агрегаты КНС работают непрерывно в переменных режимах нагрузки, что при традиционном дискретном управлении приводит к повышенному энергопотреблению, износу оборудования и снижению надежности эксплуатации.

Одним из эффективных способов повышения энергоэффективности и надежности насосных станций является применение частотно-регулируемого электропривода. Использование частотных преобразователей позволяет плавно регулировать частоту вращения насосов в зависимости от текущей нагрузки, обеспечивать поддержание заданного уровня в приемном резервуаре и снизить пусковые токи электродвигателей. Это особенно важно для мощных асинхронных двигателей, применяемых на канализационных насосных станциях [1].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Насосная станция оснащена пятью насосными агрегатами, из которых два находятся в работе, а три используются в качестве резервных. Такая схема обеспечивает требуемую надежность работы станции и возможность равномерного распределения ресурса оборудования.

Каждый насосный агрегат приводится в действие асинхронным электродвигателем типа 7АНЗ15М6У2 номинальной мощностью 160 кВт. Электродвигатели рассчитаны на питание от сети переменного тока напряжением 380 В и частотой 50 Гц, при номинальном токе 304,2 А. Номинальная частота вращения электродвигателя составляет 980 об/мин, коэффициент полезного действия — 94 %, коэффициент мощности — 0,85. Указанные параметры соответствуют требованиям эксплуатации мощных насосных установок канализационных станций.

В ходе исследования принимается ряд допущений, позволяющих упростить математическое описание системы: плотность перекачиваемой жидкости считается постоянной, гидравлические характеристики трубопроводной сети — неизменными, а работа насосных агрегатов осуществляется вне зоны кавитации. Данные допущения являются допустимыми для инженерных расчетов и не оказывают существенного влияния на достоверность полученных результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Частотный преобразователь обеспечивает плавное регулирование скорости в диапазоне, допустимом для насосного агрегата:

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\text{ном}} \quad (1)$$

Где $n_{\min}$ выбирается исходя из минимальной производительности насоса, обеспечивающей стабильную работу системы без риска осушения резервуара. При типовой эксплуатации минимальная частота принимается равной 0,6 от номинальной:

$$n_{\min} = 0,6 \cdot n_{\text{ном}} = 0,6 \cdot 980 = 588 \text{ об / мин} \quad (1.1)$$

Следовательно, диапазон частот управления составляет:

$$588 \leq n \leq 980 \quad (1.2)$$

или в Гц для ЧП:

$$f_{\min} = f_{\text{ном}} \cdot \frac{n_{\min}}{n_{\text{ном}}} = 50 \cdot \frac{588}{980} = 30 \text{ Гц} \quad (1.3)$$

потребляемая мощность P при изменении частоты вращения изменяется по формуле:

$$P = P_{\text{ном}} \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^3 = 160 \cdot \left(\frac{588}{980} \right)^3 = 57 \text{ кВт} \quad (2)$$

Таким образом, потребляемая мощность уменьшается почти в трехкратном размере, что значительно снижает энергозатраты.

Параметры электродвигателя для нескольких частот представлены в таблице 1

Таблица 1. Параметры электродвигателя

Частота, Гц	n, об/мин	P, кВт
30	588	57
35	686	77
40	784	103
45	882	136

Энергопотребление насосной станции КНС-3 является одной из основных статей эксплуатационных расходов. В традиционной системе управления с дискретным включением и выключением насосов мощность электродвигателей поддерживается постоянной при включенном насосе, что приводит к избыточному

расходу электроэнергии, особенно при неполной нагрузке.

Среднее потребление энергии за час при непрерывной работе равно:

$$W_{\text{ДИСК}} = 2 \cdot P_{\text{НОМ}} \cdot t = 2 \cdot 160 \cdot 1 = 320 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (3)$$

Для расчета за сутки:

$$W_{\text{ДИСК,СУТ}} = 320 \cdot 24 = 7680 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (3.1)$$

Таким образом, при дискретном управлении насосы потребляют максимально допустимую мощность даже при низкой нагрузке, что ведет к неэффективным расходам электроэнергии [2].

Среднесуточное потребление для двух работающих насосов с ЧП:

$$W_{\text{ЧП,СУТ}} = 2 \cdot 57 \cdot 24 = 2736 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (3.2)$$

Экономия электроэнергии при внедрении частотно-регулируемого привода составит:

$$\Delta W = W_{\text{ДИСК,СУТ}} - W_{\text{ЧП,СУТ}} = 7680 - 2736 = 4944 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (3.3)$$

При стоимости электроэнергии 38,85 тенге за кВт·ч экономия за сутки составит:

$$E_{\text{СУТ}} = 4944 \cdot 38,85 = 192 \text{ тыс.тг / сут} \quad (3.4)$$

За год (365 дней):

$$E_{\text{ГОД}} = 192 \cdot 365 = 70080 \text{ тыс.тг / сут} \quad (3.5)$$

Таким образом, внедрение частотного преобразователя позволяет значительно сократить энергопотребление насосной станции и окупить затраты на модернизацию оборудования в короткие сроки.

При традиционном прямом пуске асинхронных электродвигателей пусковой ток достигает 5–7 крат номинального значения:

$$I_{\text{ПУСК}} \approx (5 \div 7) \cdot I_{\text{НОМ}} = (5 \div 7) \cdot 304,2 \approx 1520 \div 2130 \text{ А} \quad (4)$$

Это приводит к:

- значительным динамическим нагрузкам на вал и рабочее колесо насоса;
- повышенному износу подшипников;
- просадкам напряжения в питающей сети.

При использовании частотного преобразователя пуск осуществляется плавно, при этом пусковой ток не превышает 1,1-1,3 кратного значения, что существенно снижает электрические и механические перегрузки.

Плавное изменение частоты вращения электродвигателя обеспечивает:

- отсутствие гидравлических ударов в трубопроводах;
- снижение вибрации насосных агрегатов;
- уменьшение осевых и радиальных нагрузок на подшипники.

Кроме того, снижение частоты вращения в периоды малых притоков сточных вод уменьшает скорость износа рабочих колес и уплотнений. Это особенно важно для канализационных насосных станций, где перекачиваемая среда содержит твердые включения [3].

Снижение количества пусков и остановов насосов приводит к увеличению среднего времени наработки на отказ (MTBF) и повышению общей надежности насосной станции [4].

Таким образом, применение частотных преобразователей в системе управления насосами КНС-3 позволяет не только повысить энергетическую эффективность, но и существенно улучшить показатели надежности и долговечности оборудования.

Также необходимо учитывать влияние частотно-регулируемого привода на качество электрической энергии. Применение ЧП приводит к появлению высших гармоник тока, что может вызывать дополнительный нагрев трансформаторов и кабельных линий. Для минимизации данного эффекта целесообразно использование входных дросселей, активных фильтров гармоник или частотных преобразователей с активным выпрямителем. Параметры ЧП с AFE представлены в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение частотных преобразователей с диодным и активным выпрямителем

Параметр	ЧП с диодным выпрямителем	ЧП с активным выпрямителем (AFE)
Тип выпрямителя	Неуправляемый (диодный мост)	Управляемый (IGBT-модули)
Коэффициент мощности	0,85–0,92	0,98–1,0
THDi	30–45 %	≤ 5 %
Потребление реактивной мощности	Присутствует	Практически отсутствует

Из таблицы видно, что особенно целесообразно применение AFE в случае одновременной работы нескольких насосов с частотным регулированием, когда суммарный уровень гармоник может существенно ухудшать параметры сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из проведенных оценок можно сделать вывод, что внедрение частотно-регулируемого электропривода обеспечивает снижение суточного расхода электроэнергии более чем на 65 %, что приводит к значительному экономическому эффекту и сокращению эксплуатационных затрат насосной станции. Дополнительно установлено, что уменьшение пусковых токов и механических нагрузок способствует повышению надежности оборудования, увеличению его ресурса, снижению аварийности и повышают электромагнитную совместимость оборудования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Автор сообщает об отсутствии какого-либо конфликта интересов, способного повлиять на результаты и выводы данного исследования.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность руководителям за методологическую поддержку и полезные обсуждения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. <https://rusautomation.ru/articles/kaskadnoe-upravlenie-nasosami-s-preobrazovatelem-chastoty/>
2. <https://www.vesper.ru/presscenter/articles/chastotno-reguliruemyy-elektroprivod/>
3. https://hms.ru/reference_materials/articles/483/11012/
4. <https://www.frigodesign.ru/energy-saving-technologies/control-systems/chastotnyk.php>

ВНЕДРЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В РАБОТУ ПО АНАЛИЗУ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 536.2 + 621.1

А.Д. Данияров¹, Н.В. Прохоренкова¹

¹ ВКТУ им. Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Данияров Алдияр Даниярулы, e-mail:

aldiyar.daniyarov.132000@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Внедрение искусственного интеллекта в работу промышленного оборудования началось с момента автоматизации производства. Человечеству было необходимо автоматизировать процессы с учетом экономической выгоды, улучшения безопасности персонала при работах, увеличении объемов выпуска, сокращения потребления сырья и т.д. Следующим шагом в автоматизации производственных процессов является внедрение искусственного интеллекта, способного обучаться на опыте прошлых ошибок. Таким этапом стало внедрение машинного обучения, где происходит не хладнокровное выполнение заданных установок машиной, а полноценное обучение и самостоятельное принятие решений на основе полученного опыта. На этой основе планируется реализация исследования по разработке системы прогнозирования остаточного.

Его цель – создание системы, способной предиктивно реагировать на деградацию оборудования, в частности высокотемпературных печей. Модель будет основана на методе машинного обучения и должна работать с большим количеством разнородных данных для максимизации своей эффективности в рамках заданного оборудования. Основным планируемым результатом является создание прототипа системы, описывающего текущее состояние футеровки печи, на основе теплоэнергетических параметров, результатов исследований и эксплуатационных данных. Желаемые результаты станут основой для повышения безопасности на предприятиях путем прогнозирования слабых зон в термическом оборудовании, а также экономическим улучшением ввиду предиктивной способности системы узнавать состояние изоляционного слоя высокотемпературных установок.

Предполагаемая научная новизна исследования заключена в гибридной модели прогнозирования остаточного ресурса, на основе теплоэнергетических расчетов, лабораторных анализов, подкрепляемых реальными эксплуатационными данными. Данное исследование имеет цель в объединении всех данных в одной модели машинного обучения для дальнейшей реализации в работе оборудования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: искусственный интеллект, остаточный ресурс, высокотемпературное оборудование, футеровка, прогнозирование, теплотехническое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность данного исследования обосновывается количеством исследований в направлении предиктивного анализа для оборудования, его экономическим потенциалом и пользой в области безопасности и охраны труда [1]. В контексте современной научной проблемы повсеместное внедрение искусственного интеллекта во все сферы деятельности крайне востребовано в обществе 21 века. Научными сотрудниками пишется огромное количество работ с внедрением машинного обучения в здравоохранение, промышленность, социальную и экономическую сферы [2].

Это исследование не исключение, так как стоит на стыке современной научной и

прикладной аспектов [3]. Оно важно для прикладной составляющей ввиду его востребованности в промышленной сфере. Перед научным сообществом стоит ряд задач по разработке, проектированию, анализу, апробации и дальнейшего внедрения искусственного интеллекта в работу промышленных агрегатов. Это крайне востребовано во времена цифровизации промышленности. Описанный потенциал исследования как никогда вписывается в рамки научной и проектной деятельности научного сообщества.

Вовлеченность научной сферы описывается глубокой проработанностью существующих исследований в этом направлении [4]. Есть ряд работ, имеющих системы прогнозирования для промышленных агрегатов, разработанных узконаправленно для конкретного оборудования [5]; работы, описывающие системы прогнозирования без привязки к эксплуатационным данным [6,7]; а также большое количество работ использующих машинное обучение для улучшения различных аспектов работы предприятий [2,8].

Основная цель заключена в разработке системы прогнозирования остаточного ресурса высокотемпературного термического оборудования. Реализация данной цели сопровождается выполнением ряда задач, представленных ниже:

1. Лабораторные испытания футеровочного изоляционного материала
2. Сбор и анализ большого массива эксплуатационных данных
3. Математическое моделирование процессов внутри оборудования
4. CFD моделирование (вычислительная динамика текучих средств)
5. Машинное обучение с учетом всех входных данных
6. Реализация прототипа на производстве и получение актов внедрения

Предметом исследования являются теплоэнергетические процессы, происходящие внутри высокотемпературного оборудования, объектом исследования представлена печь ISAsmelt. Подход к реализации системы прогнозирования универсален, данный тип печи выбран ввиду удобства реализации цели и задач исследования, а созданная система может быть адаптирована под различное термическое оборудование [1, 3, 8, 9].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первым ключевым материалом для создания системы прогнозирования является футеровочный кирпич, способный выдержать большие термические нагрузки. Образец футеровки отберется для лабораторных исследований на термостойкость, теплоемкость, тепловое расширение, прочность, пористость и т.п [10,11,12]. Образец для исследования согласовывается для выноса с территории предприятия и детальные его размеры и параметры получить на момент написания статьи невозможно.

Далее после проведения лабораторных исследований футеровочного материала следует сбор эксплуатационных данных с печи. Данный пункт исследования важен для создания скелета модели прогнозирования остаточного ресурса, а также для улучшения практической составляющей исследования. Полученная эксплуатационная база данных будет являться примером для создания CFD моделирования печи, а также скелетом для математического моделирования теплоэнергетических процессов.

Третьим и завершающим шагом планируемой работы является создание модели машинного обучения с учетом всей информации, полученной в ходе реализации первых двух шагов. Модель должна пройти испытания на имеющемся оборудовании. При успешных результатах последним шагом будет получение актов внедрения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На текущий момент происходит одновременная работа над несколькими задачами исследования:

- 1) Производится сбор материала всех исследований в выбранном направлении.
- 2) Идет процесс согласования получения образца для лабораторных исследований непосредственно с печи.
- 3) Сбор и анализ данных с цифрового двойника печи из программы AVEVA PiVision.

В ходе работы над исследованием разрабатывается методика по сбору и анализу эксплуатационных данных промышленного двойника в программе AVEVA Pi Vision, представленного в виде источника информации для валидации модели прогнозирования остаточного ресурса, на рисунке 1 представлен пример показаний эксплуатационных данных с печи.

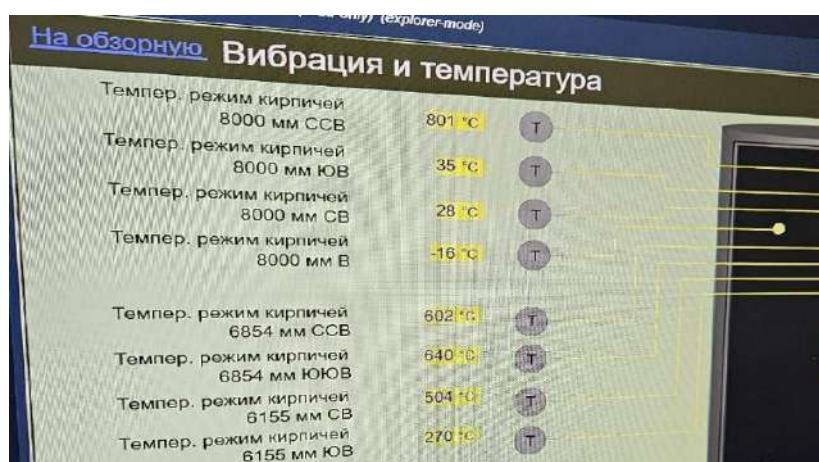


Рисунок 1. Пример показаний эксплуатационных данных

Следует не забывать и о существующих противоречиях в исследованиях. Одним из таких является сопоставление физических эмпирических моделей и моделей, основанных на машинном обучении. Исследование имеет своей целью создание гибридного подхода для разрешения и объединения этих противоречий. Научная новизна работы заключена в гибридной модели, объединяющей эксплуатационные данные с промышленных объектов, данных лабораторных испытаний футеровочных материалов, результатов CFD-моделирования непосредственно в структуру модели машинного обучения, что должно значительно повысить физическую обоснованность результатов.

Исследование будет иметь огромный вклад для промышленных предприятий, ведь предиктивный анализ состояния высокотемпературного термического оборудования позволяет своевременно реагировать на деградацию оборудования [1,9]. Такой подход в значительной степени позволит сократить финансовые расходы на анализ состояния установок и их дальнейший капитальный ремонт [1,13]. Полученные результаты будущего исследования имеют возможность внедрения в другие технологические процессы, открывая возможность для улучшенных гибридных моделей проектирования остаточного ресурса [3,5,14].

Важным уточнением является наличие ограничений в методах исследования, представленных на рисунке 2.



Рисунок 2. Существующие ограничения методов исследования

По итогам статьи далее представлена таблица 1 - важность исследования для промышленной отрасли и научного сообщества.

Таблица 1. Обзор исследования для промышленной отрасли и научного сообщества.

Аспект	Промышленность	Научная сфера
Экономическая эффективность	Уменьшение затрат на внеплановые ремонты, аварийные остановки за счет прогнозирования момента для замены футеровки	Разработка экономической модели с валидацией, связывающая техническое состояние оборудования с оптимальными сроками эксплуатации
Промышленная безопасность и охрана труда	Предотвращение аварий с последующим снижением рисков для персонала	Создание методологии оценки рисков в корреляции с моделями прогнозирования
Управление ресурсами	Переход от планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию по фактическому состоянию	Углубление знаний и понимания процессов деградации огнеупоров в условиях реальной эксплуатации
Универсальность подхода к исследованию	Полученная система имеет возможность адаптации для других термических агрегатов	Создание методологии по гибриднему прогнозированию остаточного ресурса для широкого класса объектов
Развитие методов исследования	Использование современных методов исследования, таких как: математическое моделирование, машинное обучение и цифровые двойники	Получат развитие гибридные модели систем прогнозирования, создание подходов к обработке разнородных данных
Экологический аспект	Снижение выбросов при авариях, энергоэффективность, сокращение отходов	Учет показателей энергоэффективности, связь прогнозирования с экологическими аспектами

Проведенный анализ также выявил множество различных направлений на будущих исследований в области предиктивного анализа, далее на рисунке 3 представлены перспективные направления для исследований.

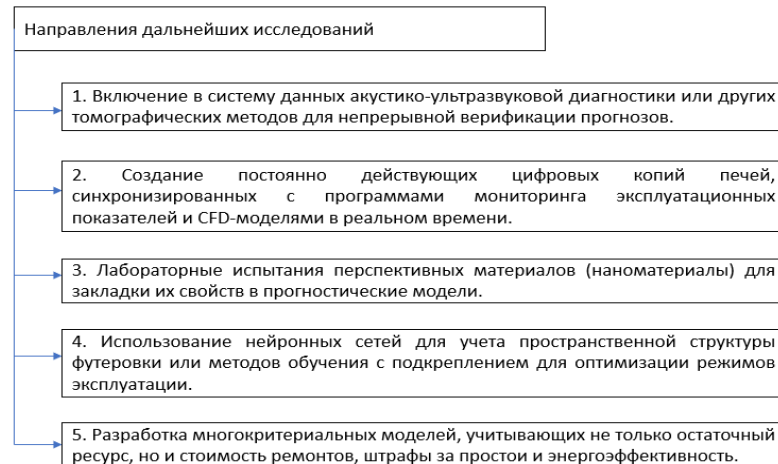


Рисунок 3. Перспективные направления исследований в области прогнозирования остаточного ресурса

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая все вышесказанное можно сделать вывод о том, что планируемое исследование продвигается согласно поставленным задачам. Гибридная модель прогнозирования и анализа состояния оборудования увеличит объем области знаний в теплоэнергетической отрасли, отрасли машинного обучения и искусственного интеллекта, а также предиктивной аналитике. На основе полученных результатов научное сообщество будет иметь базу для более совершенных проектов машинного обучения в промышленной области.

Таким образом следует вывод о крайней актуальности исследования. Были выявлены перспективные направления для будущих исследований, произведена оценка важности работы для научного сообщества и промышленности. Дальнейшая работа над исследованием будет продолжаться.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Авторы заявляют об отсутствии финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность научным руководителям ВКТУ им. Д. Серикбаева и их коллегам за методологическую поддержку и полезные обсуждения, способствовавшие улучшению качества статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sadri A., Tibbo M., Naghizadeh M., Climenhaga B., Santini R., Cornett H., Watson W., Ying W., Kelly L., Moodley P., Sisya T., Paraje A. Implementing Risk-Based Inspection (RBI) and Life Cycle Monitoring into Refractory Lining Management of Pyrometallurgical Furnaces // Proceedings of the 62nd Conference of Metallurgists, COM 2023. Cham: Springer, 2023. P. 625–629. DOI: 10.1007/978-3-031-38141-6_108.
2. Leon-Medina J. X., Camacho J., Gutierrez-Osorio C., Salomón J. E., Rueda B., Vargas W., Sofrony J., Restrepo-Calle F., Pedraza C., Tibaduiza D. Temperature Prediction Using Multivariate Time Series Deep Learning in the Lining of an Electric Arc Furnace for Ferronickel Production // Sensors. 2021. Vol. 21, No. 20. Art. 6894. DOI: 10.3390/s21206894.
3. Hu Y., Tan C. K., Broughton J., Roach P. A. Development of a first-principles hybrid model for large-scale reheating furnaces // Applied Energy. 2016. Vol. 173. P. 555–566. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.04.011.

4. Routschka G., Wuthnow H. Pocket Manual Refractory Materials: Design, Properties and Testing / Vulkan-Verlag GmbH, 2008. – 646 p. ISBN 9783802731587.
5. Nikolic S., Hogg B., Voigt P. ISASMELT™ — Flexibility in Furnace Design // Extraction 2018: Proceedings of the First Global Conference on Extractive Metallurgy / ed. by B. R. Davis [et al.]. – Cham : Springer, 2018. – P. 407–417. – (The Minerals, Metals & Materials Series). – DOI: 10.1007/978-3-319-95022-8_35.
6. Aksel C. Mechanical properties and thermal shock behaviour of alumina-mullite-zirconia and alumina-mullite refractory materials by slip casting // Ceramics International. 2003. Vol. 29, No. 3. P. 311–316. DOI: 10.1016/S0272-8842(02)00139-6.
7. Damhof F., Brekelmans W. A. M., Geers M. G. D. Predictive FEM simulation of thermal shock damage in the refractory lining of steelmaking installations // Journal of Materials Processing Technology. 2011. Vol. 211, No. 12. P. 2091–2105. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.07.005.
8. Ifeanyi A., Zanutelli M., Coble J. Data-Driven Remaining Useful Life Estimation: Inference-Based Versus Direct Prediction // Annual Conference of the PHM Society. 2024. Vol. 16, No. 1. DOI: 10.36001/phmconf.2024.v16i1.4071.
9. Гордон Я. М., Садри А., Миронов К. В., Спирин Н. А. Развитие методов диагностики состояния футеровки доменных печей [Электронный ресурс] // Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности : сборник докладов II Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию заслуженного деятеля науки и техники РФ Юрия Гавриловича Ярошенко (Екатеринбург, 18–21 сентября 2017 г.). – Екатеринбург : УрФУ, 2018. – С. 46–53. – ISBN 978-5-9908685-3-3. – URL: <http://elar.urfu.ru/handle/10995/58399> (дата обращения: 08.02.2026).
10. ASTM C1171-16(2022). Standard Test Method for Quantitatively Measuring the Effect of Thermal Shock and Thermal Cycling on Refractories. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2022. – 3 p. – DOI: 10.1520/C1171-16R22.
11. ASTM E228-22. Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials With a Push-Rod Dilatometer. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2022. – DOI: 10.1520/E0228-22.
12. ASTM C1198-20. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio of Refractory Materials by Impulse Excitation of Vibration. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2020. – 9 p. – DOI: 10.1520/C1198-20.
13. Houde J.-P., Hebel R., de Oliveira A. C. True hearth lining wear as blast furnace campaign extension tool // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15, № 4. С. 87–93. DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-4-87-93.
14. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches / ed. by F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves. – Cham : Springer International Publishing, 2017. – P. 85–113. – DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
15. Patankar S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. – New York : Hemisphere Publishing Corporation ; McGraw-Hill, 1980. – xiii, 197 p. – (Series in Computational Methods in Mechanics and Thermal Sciences). – ISBN 0-07-048740-5. – ISBN 0-89116-522-3.
16. DeepSeek. (2026, 2 Марта). *Помощь в анализе и подтверждении литературных источников для диссертационного исследования по прогнозированию остаточного ресурса футеровки печи* [Большая языковая модель]. DeepSeek. <https://chat.deepseek.com/>

ТИПОЛОГИЯ СРЕДОВОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ОТКРЫТЫХ ПРОСТРАНСТВ СРЕДНЕ-ТЕХНИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ

УДК 727.4:711.57

А.И. Денисов¹, С.В. Комлев^{1*}

¹ Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Комлев Сергей Валентинович, e-mail: serg_komlev@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Данная работа посвящена исследованию типологических особенностей средовой организации открытых пространств средне-технических образовательных учреждений (далее, СТОУ). Актуальность темы обусловлена противоречием между закрытым характером территорий СТОУ и современными требованиями к проницаемости городского пространства. На сегодняшний день в государственных программах развития образования и строительных нормативных документах стран постсоветского пространства [4], странах Центральной и Восточной Европы не найдено специализированных разделов по средовой организации территорий СТОУ.

В ходе комплексного исследования проведена систематизация типологических приемов организации открытых пространств СТОУ.

В работе предложена типологическая матрица, включающая центрическую и линейную модели организации среды СТОУ, которая обеспечивает визуальное единство с открытыми городскими пространствами через общие геометрические алгоритмы и организацию генерального плана. Научная новизна заключается в создании системы «умных границ»: системы селективной проницаемости. Данное решение позволяет интегрировать СТОУ в структуру городской застройки в качестве активного общественного узла. Это не только повышает социальную эффективность территории, но и превращает изолированный объект в полноценный элемент градостроительного каркаса, сохраняя при этом безопасность учебно-производственного процесса.

Ключевые слова: средне-технические образовательные учреждения, открытые пространства, типология, средовая организация, матрица, систематический обзор, PRISMA.

ВВЕДЕНИЕ

Современная градостроительная практика определяет запрос объединения изолированных и открытых общественных территорий в развитую многофункциональную архитектурную среду. Средовая организация открытых пространств представляет научный интерес в контексте СТОУ. Традиционно воспринимаемые как изолированные производственные объекты, территории СТОУ в условиях плотной городской застройки обладают значительным рекреационным и коммуникативным потенциалом. Однако отсутствие выраженных типологических моделей средовой организации приводит к функциональной и социальной обособленности учебных заведений. Данное исследование направлено на преодоление пространственной закрытости и поиск баланса между взаимосвязанными открытыми городскими пространствами и требованиями учебного процесса.

Теоретическая база работы опирается на систему знаний, объединяющую проектирование городской среды, архитектурно-планировочную типологию и

ландшафтное проектирование. В блоке анализа городской среды и системного подхода ключевое значение имеют труды В.Т. Шимко [5], заложившего основы средового проектирования, и А.В. Крашенинникова [6], чьи концепции социально-пространственной организации городской застройки позволяют рассматривать территорию СТОУ, как неотъемлемый элемент городского пространства. В этот же контекст вписываются работы И.А. Бондаренко [8] по организации городского пространства и А.В. Иконникова [9], где он одним из первых системно изложил, из чего состоит среда и как она влияет на человека. Архитектурно-планировочный блок базируется на исследованиях А.Л. Гельфонд [7] в области типологии общественных зданий и В.И. Ежова [10], детально изучившего архитектуру объектов массового строительства. Дополнительно здесь учитываются наработки Т.Г. Маклаковой [11] по конструктивным системам и композиции, а также теоретические положения С.Г. Змеула [12] по функциональному объединению образовательных объектов. Третий вектор, сфокусированный на организации генерального плана и организации открытых пространств, представлен трудами В.А. Нефедова [13] по устойчивости городской среды и Дж. Саймондса [14] по архитектурно-ландшафтному планированию. Несмотря на наличие теоретической базы в смежных областях, анализ систематического обзора использованием сервиса PRISMA [2] подтверждает, что современных нормативно-технических актов по архитектурно-средовой организации территорий СТОУ не обнаружено, и дает основание для выработки новых типологических подходов к организации территорий СТОУ.

Целью данной работы является выявление типологических особенностей средовой организации открытых пространств СТОУ. Для достижения цели решаются следующие задачи:

- Раскрыть роль открытых пространств СТОУ в структуре современной городской застройки;
- Определить типологические закономерности размещения функциональных зон СТОУ;
- Систематизировать типологические приемы и функциональные характеристики открытых пространств СТОУ в объединяющую матрицу.

Объект исследования - открытые пространства СТОУ в структуре городской застройки.

Предмет исследования - типология средовой организации открытых пространств.

В отличие от существующих описательных подходов, новизна данной работы обусловлена использованием сервиса PRISMA [2] и заключается в разработке алгоритма «умных границ», основанного на принципе селективной проницаемости пространства. Это позволяет интегрировать СТОУ в жизнь города, как открытый социально-образовательный кластер, который становится полноценным узлом градостроительного каркаса. Предложенный алгоритм гарантирует сохранение автономности и защищенности учебно-производственного процесса, одновременно конвертируя изолированные территории учреждения в эффективный пространственный ресурс города.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Информационной базой работы послужили два массива данных:

- Научометрические данные: массив из 450 научных публикаций (статьи, обзоры, материалы конференций), проиндексированных в базах данных за период 2015–2025 гг. по тематике архитектуры образовательной среды;
- Градостроительные объекты: территории действующих СТОУ по выборке сходных образовательных моделей в постсоветском пространстве [4], странах

Центральной и Восточной Европы, послужившие базой для проверки проектных схем.

В основу исследования послужило использование сервиса PRISMA [2]. Этот подход позволил проанализировать существующую среду СТОУ и выявить функциональную изоляцию закрытых образовательных пространств. Сервис PRISMA 2020 [2] - систематический обзор для строгого отбора релевантной литературы, исключения дубликатов и поиска «исследовательских разрывов».

Работа реализована в три последовательных этапа:

1. Этап систематизации: формирование выборки из 45 релевантных источников, содержащих данные о типологии и морфологии образовательных пространств;
2. Этап средового анализа: проведена критическая оценка территорий СТОУ. Анализировались параметры проницаемости границ, связность пешеходных путей и функциональное наполнение зон доступа;
3. Этап теоретического модели: путем синтеза данных разработана типологическая матрица средовой организации, где пространства распределены по двум моделям (линейная, центрическая) и внедрении принципа «умных границ».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первым ключевым результатом работы стало выявление «исследовательского разрыва» на основе использования сервиса PRISMA (см. Рисунок 1).

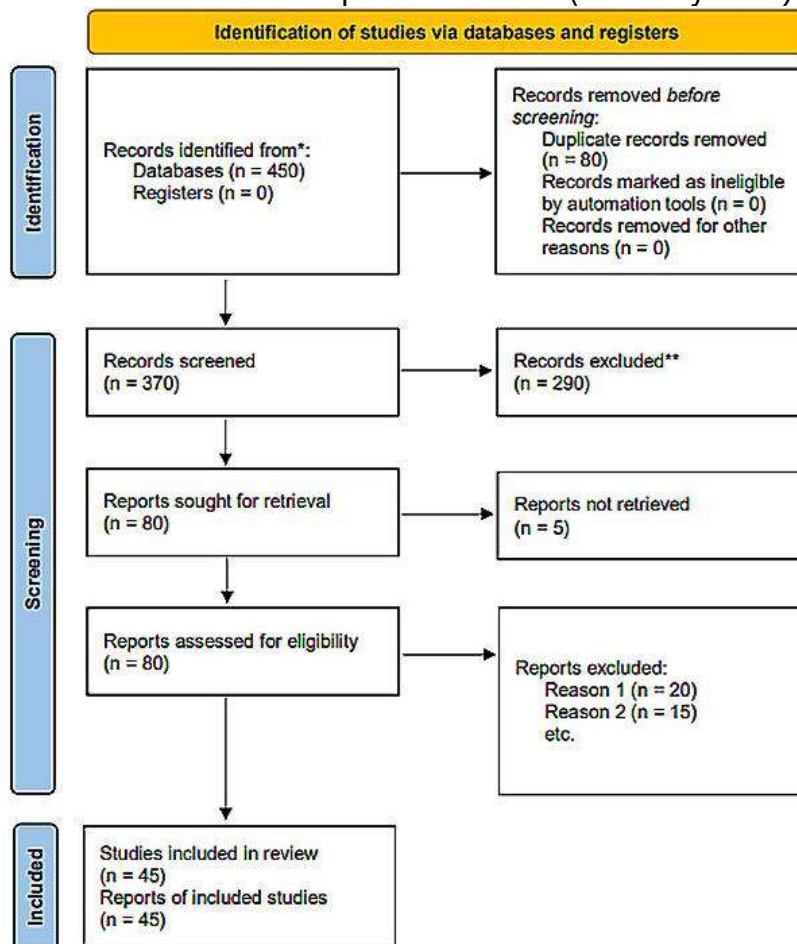


Рисунок 1. Выявление «исследовательского разрыва» на основе использования сервиса PRISMA. Источник: Авторы

Процесс систематического отбора литературы показал, что существующие исследования в области образовательной среды практически не затрагивают специфику средне-технического образования.

Выявленный исследовательский разрыв, анализ нормативной базы проектирования на постсоветском пространстве [4] и в странах Центральной и Восточной Европы показал отсутствие гибких алгоритмов, которые позволяли бы совмещать требования индустриального обучения с потребностями городской среды.

В ходе исследования, была проведена критическая оценка существующих территорий и разработана матрица средовой организации открытых пространств СТОУ (см. Рисунок 2).

Матрица разделяет варианты организации территорий на линейную и центрическую модели; на основе генплана объекта определяет связи с городской застройкой, предполагает размещение «умных границ», уточняет расположение СТОУ в системе открытых пространств города и показывает примеры взаимодействия составляющих между собой.

- Линейная модель: организация функционально-технологической цепи [5] зон с регламентированным доступом - учебно-производственные кластеры, полигоны и логистические узлы. Характеристиками модели являются строгие линейные связи, где коммуникации и зонирование обеспечивают непрерывность учебного процесса и безопасность технологического цикла. Это закрытая часть территории, проектное решение которой исключает любое пересечение внутренних производственных потоков с транзитными городскими путями.
- Центрическая модель: формирование внутреннего коммуникационного узла [5]. Организация среды СТОУ рассматривается как пространственное «ядро», выполняющее роль главного коммуникационного узла для внутреннего сообщества. Характеристиками модели являются защищенные от внешнего техногенного шума пространства, которые проектируются как точки общения и коллективного взаимодействия. Использование функциональных элементов позволяет создать ощущение безопасного «ядра» СТОУ.

Сравнение полученных моделей показывает, что для СТОУ критически важен баланс между взаимосвязанными открытыми городскими пространствами, требованиями учебного процесса и внутренними производственными потоками. Организация генерального плана СТОУ требует селективного подхода из-за наличия спецтехники и учебно-производственных мастерских.

Научная новизна заключается в определении «умных границ» и распределении функциональных зон СТОУ в соответствии со сформированными моделями, что позволяет предоставить проектировщику понятный алгоритм и определить направления совершенствования нормативной базы проектирования. Ограничением исследования является специфика организации учебного процесса в постсоветском пространстве [4], странах Центральной и Восточной Европы, что требует дальнейшей адаптации моделей.

Разработанная система «умных границ» расширяет представления о типологии средовой организации открытых пространств средне-технических образовательных учреждений.

Практическая значимость работы заключается в возможности внедрения полученных алгоритмов в проектную практику средовой организации территории СТОУ, превращая их из «режимных объектов» в часть системы открытых городских пространств.

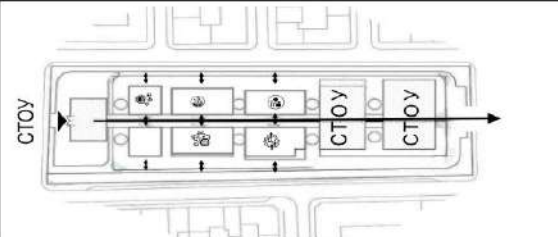
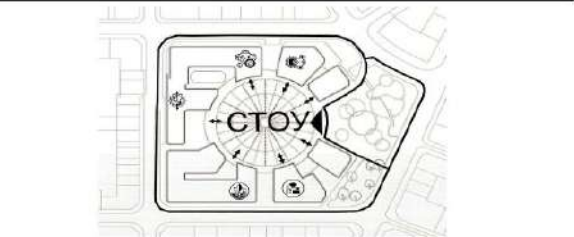
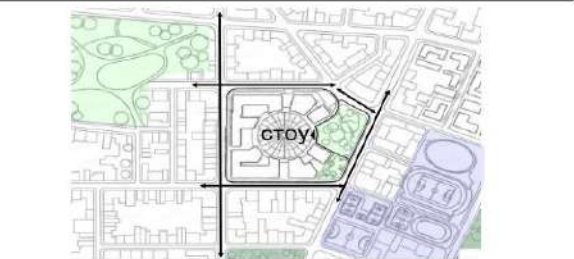
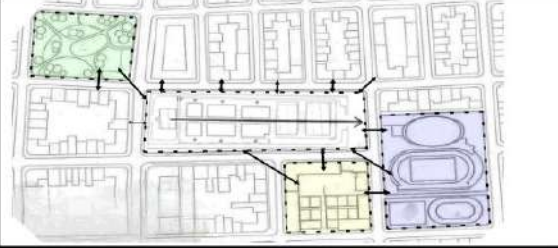
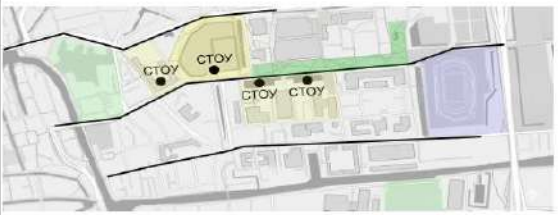
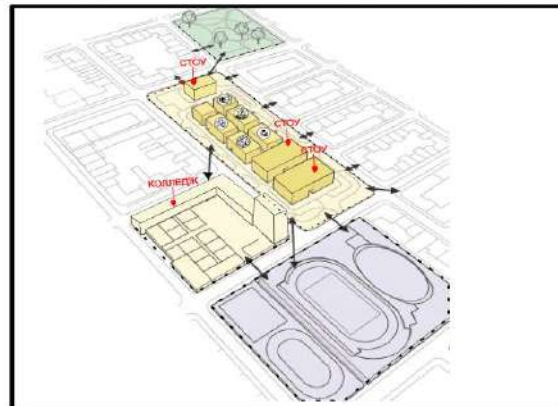
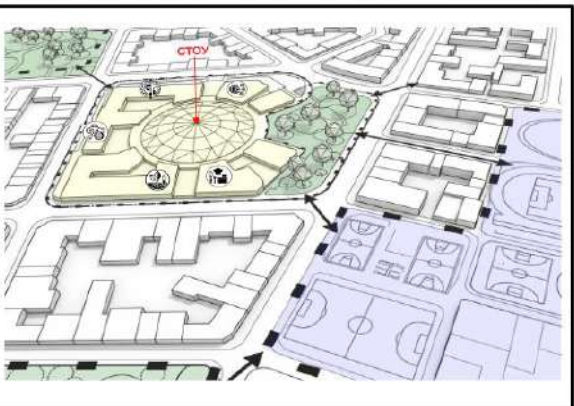
	ЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ	ЦЕНТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ГЕНПЛАН ОБЪЕКТА		
СВЯЗИ С ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКОЙ		
“УМНЫЕ ГРАНИЦЫ”		
РАСПОЛОЖЕНИЕ		
ПРИМЕР ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ		

Рисунок 2. Итоговая матрица средовой организации открытых пространств СТОУ.
Источник: Авторы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования была достигнута заявленная цель - выявлены типологические особенности средовой организации открытых пространств СТОУ. Применение сервиса PRISMA [2] позволило выявить исследовательские разрывы в научном поле и предложить пути его преодоления.

Основные выводы работы:

- Подтверждена необходимость интеграции территории СТОУ с открытыми городскими пространствами;

- Сформирована матрица средовой организации, включающая две модели - линейную и центрическую, на основе генплана объекта определяющая связи с городской застройкой и расположение СТОУ в системе открытых пространств;
- Обоснована концепция «умных границ» в системе открытых пространств города, показаны примеры взаимодействия составляющих матрицы между собой.

Предложенный подход определяет пути эффективной интеграции учебно-производственных территорий в городскую среду. Результаты работы могут быть внедрены в учебный процесс, практику проектирования СТОУ. Ограничением работы является ориентация на текущие градостроительные условия, что намечает вектор для дальнейших исследований.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Для проверки грамматики и логики изложения материалов статьи использовалась большая языковая модель Gemini 3 Flash.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gemini 3 Flash. (2026). Помощь для проверки грамматики и логики изложения материала [Большая языковая модель]. Google Gemini. <https://gemini.google.com/>
2. Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., ... & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372. <https://www.prisma-statement.org>
3. Harzing, A. W. (2007). *Publish or Perish*. Available from <https://harzing.com/resources/publish-or-perish>
4. UNESCO (2021). *Technical and vocational education and training (TVET) for a sustainable future*. UNESCO Library. <https://www.unesco.org/en/articles/unesco-hosts-2021-international-conference-technical-and-vocational-education-and-training-tvet>
5. Shimko, V. T. (2004). *Architectural and design engineering. Fundamentals of theory*. Arkhitektura-S.
6. Krashenninnikov, A. V. (2005). *Urban development of residential buildings: A study of the socio-spatial environment*. Arkhitektura-S.
7. Gelfond, A. L. (2006). *Architectural design of public buildings and structures*. Arkhitektura-S.
8. Bondarenko, I. A. (2021). *Renovation of the urban environment: Historical precedents*.
9. Ikonnikov A.V. (1983). *Formirovanie gorodskoy sredy [Formation of the Urban Environment]*. Moscow, Znanie Publ., 1973.
10. Maklakova, T. G. (2002). *Function - construction - composition*. ASV.
11. Zmeul, S. G., & Makhanko, B. A. (1991). *Architectural planning of public buildings and structures*. Stroyizdat.
12. Nefedov, V. A. (2002). *Landscape design and environmental sustainability*. Poligrafist.
13. Simonds, J. O. (1965). *Landscape and architecture*. Stroyizdat.

ЖЫЛУ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ТАЛДАУДЫҢ ЗАМАНАУИ ӘДІСТЕРІ

ӘОЖ536

Г.С. Дуйсембаева^{1*}, А.Т. Байдилдина¹

¹ Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан.

*Автор-корреспондент: Дуйсембаева Гульнур Сеитхановна,

e-mail: gduysembaeva80@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Мақалада жылу энергетикалық қондырғыларды зерттеу және оңтайландыру кезінде қолданылатын термодинамикалық талдаудың заманауи әдістері қарастырылады. Энергетикалық, энтропиялық және эксергетикалық талдаудың негізгі ережелері, сондай-ақ эксперименттік деректерді статистикалық өңдеу әдістері қарастырылады. Жылуэнергетикалық қондырғының эксперименттік параметрлері негізінде энергетикалық процестерге талдау жүргізіліп, жүйе тиімділігінің есептік көрсеткіштері ұсынылды. Энергетикалық шығындар көздерін анықтауға және энергетикалық жабдықтардың тиімділігін арттыруға ерекше назар аударылады. Термодинамикалық талдаудың әртүрлі әдістерін кешенді қолдану жылу энергетикалық қондырғылардың тиімділігін едәуір арттыруға және олардың жұмысын оңтайландыруға мүмкіндік беретіні көрсетілген.

Түйінді сөздер: жылу энергетикасы, термодинамика, эксергия, энтропия, энергетикалық жүйелер, энергетикалық тиімділік, термодинамикалық талдау.

КІРІСПЕ

Қазіргі заманғы энергетикалық және өнеркәсіптік жүйелер энергияны пайдаланудың жоғары тиімділігін талап етеді. Ішінде термодинамика энергияны түрлендіру процестерін зерттейді, бұл шығындардың негізгі көздерін анықтауға және оларды азайту жолдарын табуға мүмкіндік береді.

Жылу энергетикасы өнеркәсіп пен коммуналдық шаруашылық үшін электр және жылу энергиясын өндіруді қамтамасыз ететін қазіргі заманғы энергетиканың негізгі салаларының бірі болып табылады. Энергетикалық ресурстарды тұтынудың артуымен энергетикалық қондырғылардың тиімділігін арттыру және оны түрлендіру процесінде энергия шығынын азайту қажеттілігі артады[5].

Энергетикалық жүйелерді зерттеудің ең тиімді құралдарының бірі-термодинамикалық талдау. Бұл энергияны түрлендіру процестерін зерттеуге, энергия шығындарының көздерін анықтауға және энергия қондырғыларының тиімділігін арттыру мүмкіндіктерін анықтауға мүмкіндік береді. Термодинамикалық талдау әдістері жылу электр станцияларын, газ турбиналық қондырғыларды, қазандық қондырғыларын және жылумен жабдықтау жүйелерін зерттеуде кеңінен қолданылады [1].

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Термодинамикалық талдаудың теориялық негіздері. Термодинамикалық талдау физикалық жүйелердегі энергияны түрлендіру процестерін сипаттайтын термодинамиканың негізгі заңдарына негізделген.

Термодинамиканың бірінші заңы термодинамикалық жүйелердегі Энергияны сақтаудың негізгі принципін білдіреді. Ол жүйенің ішкі энергиясы жұмыс пен жылу

түрінде қоршаған ортамен энергия алмасу арқылы ғана өзгереді деп тұжырымдайды. Математикалық тұрғыдан заң келесідей тұжырымдалған:

$$\Delta U = Q + W$$

Мұндағы: ΔU - жүйенің ішкі энергиясының өзгеруі,

Q - жүйе алған жылу мөлшері (жылу түскен кезде оң мән, қайтарылған кезде теріс мән),

W - жүйенің сыртқы объектілерде жасаған жұмысы (егер жұмыс жүйеде жасалса, оң мән, егер жұмыс жүйеде жасалса, теріс мән).

Жылу энергетикасында бұл заң қазандықтардың, турбиналардың және жылу алмастырғыштардың жұмысын талдау үшін қолданылады. Мысалы, бу турбины жұмыс істеген кезде будың жылу энергиясы турбина роторының айналуының механикалық жұмысына айналады [1].

Термодинамиканың екінші заңы жылу процестерінің бағытын анықтайды және энтропия ұғымын енгізеді. Осы Заңға сәйкес барлық нақты процестер энтропияның жоғарылауымен және энергия шығынымен бірге жүреді [2].

Энергетикалық процестерді энтропиялық талдау.

Энтропиялық талдау энергетикалық қондырғылардағы қайтымсыз процестерді зерттеудің маңызды құралы болып табылады. Энтропия жүйенің бұзылу дәрежесін сипаттайды және энергия шығынын бағалауға мүмкіндік береді.

Тұрақты көлем жүйесіндегі энтропия келесідей анықталады:

$$dS = dH / T$$

мұндағы:

S - энтропия (кДж/кг*К)

H -энтальпия (кДж/кг) (кейбір кезде dH орнына dQ жазылады, dQ = жүйеге берілген жылу мөлшері),

T - абсолютті температура (К – Кельвин градусы)

Жүйенің энтропиясының өзгеруі ондағы жылу құрамының өзгеруіне байланысты. Энтропияның өзгеруі жүйенің жылуының орташа абсолютті температураға (T_a) бөлінуіне тең.

Нақты энергетикалық қондырғыларда энтропияның жоғарылауы үйкелістің, температураның соңғы айырмашылығы мен гидравликалық кедергіде жылу берудің болуымен байланысты. Энтропиялық талдау жылу электр станцияларының термодинамикалық циклдерін, атап айтқанда Реникин циклін зерттеуде кеңінен қолданылады [3].

$T-s$ диаграммаларын қолдану жұмыс денесінің термодинамикалық параметрлерінің өзгеруін көрнекі түрде көрсетуге және энергия шығыны көп болатын цикл аймақтарын анықтауға мүмкіндік береді.

Жылу энергетикалық жүйелерді эксергетикалық талдау

Эксергетикалық талдау энергетикалық жүйелердің тиімділігін бағалаудың ең Ақпараттық әдістерінің бірі болып табылады. Қолданыстағы энергетикалық талдаудан айырмашылығы, эксергетикалық тәсіл энергияның сапасын және оның пайдалы жұмыс істеу қабілетін ескереді.

Термодеформациялық жүйе үшін E_x көлеміндегі эксергияны формула бойынша табуға болады:

$$E_x = (H - H_0) - T_0(S - S_0)$$

Мұндағы:

H-жүйенің энтальпиясы,

S- жүйенің энтропиясы,

T- қоршаған ортаның температурасы,

мұндағы T, H, S және V сәйкесінше ішкі энергия, энтальпия, энтропия және жұмыс денесінің көлемі болып табылады, индексіз шамалар оның бастапқы күйіне, ал 0 индексі бар шамалар соңғы күйге жатады. Бұл формуладан көлемдегі эксергия жүйенің күйінің шартты функциясы болып табылады.

Эксергетикалық талдау пайдалы жұмысқа айналдыруға болатын энергияның үлесін анықтауға, сондай-ақ энергияның ең көп жоғалуы орын алатын энергия жүйесінің учаскелерін анықтауға мүмкіндік береді [2].

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Жылу электр станциясының термодинамикалық талдауы оның жұмыс тиімділігінің сандық бағасын алуға және энергия ысыраптарының негізгі көздерін анықтауға мүмкіндік берді. Бастапқы және есептелген деректер негізінде (1–4-кестелер) негізгі тиімділік көрсеткіштері анықталды.

Жұмыс сұйықтығының энтальпиясының өзгеруін талдау нәтижесінде турбинадағы будың кеңеюі кезінде энтальпияның айтарлықтай төмендеуі ($\Delta h = 1000$ кДж/кг) болатыны анықталды, бұл жылу энергиясының механикалық жұмысқа айналуына сәйкес келеді. Энтропияның артуы ($\Delta s = 0,7$ кДж/(кг K)) турбинаның жұмысымен бірге жүретін қайтымсыз процестердің бар екенін көрсетеді. Бұл нәтижелер термодинамиканың теориялық принциптеріне сәйкес келеді, оған сәйкес нақты процестер әрқашан энтропияның өсуімен бірге жүреді [1].

Қондырғының есептелген пайдалы коэффициенті шамамен 0,32–0,38 құрайды, бұл дәстүрлі жылу электр станцияларына тән мәндерге сәйкес келеді. Алайда, бұл көрсеткіш жүйенің жекелеген элементтеріндегі жылу және механикалық шығындарды азайту арқылы жоғарылауы мүмкін.

Зерттеуге арналған бастапқы деректер. Термодинамикалық талдау жүргізу үшін шартты жылуэнергетикалық қондырғының тәжірибелік параметрлері пайдаланылды.

Кесте 1. Қондырғылардың бастапқы параметрлері

№	Параметр	Белгіленуі	Мәні	Өлшем бірлігі
1	Турбинаның кіреберісіндегі бу температурасы	T_1	540	°C
2	Шығу кезіндегі бу температурасы	T_2	320	°C
3	Кіре берістегі қысым	P_1	13	МПа
4	Шығу қысымы	P_2	0.08	МПа
5	Будың массалық шығыны	G	42	кг/с
6	Жанармай шығыны	B	3.6	т/сағ
7	Жылу ағыны	Q	120	МВт
8	Турбина қуаты	N	38	МВт

Ұсынылған параметрлер Энергетикалық қондырғының жұмысына термодинамикалық және эксергетикалық талдау жасауға мүмкіндік береді

Бастапқы мәліметтер негізінде Энергетикалық қондырғының негізгі термодинамикалық параметрлері есептелді. Алынған нәтижелер 2-кестеде келтірілген

Кесте 2. Термодинамикалық талдау нәтижелері

№	Параметр	Белгіленуі	Мәні	Өлшем бірлігі
1	Кіре берістегі бу энтальпиясы	h_1	3450	кДж/кг
2	Шығу кезінде бу энтальпиясы	h_2	2450	кДж/кг
3	Изменение энтальпии	Δh	1000	кДж/кг
4	Кіреберістегі энтропия	s_1	6.5	кДж/(кг·К)
5	Шығу кезіндегі энтропия	s_2	7.2	кДж/(кг·К)
6	Энтропияның өзгеруі	Δs	0.7	кДж/(кг·К)
7	Турбинаның теориялық жұмысы	L	1000	кДж/кг
8	Меншікті жылу шығыны	q	2800	кДж/кг

Энтропияның өсуі турбиналық қондырғыда гидравликалық шығындар және соңғы температура айырмашылығында жылу беру сияқты қайтымсыз процестердің болуын көрсетеді[3].

Энергетикалық қондырғының эксергетикалық талдауы. Эксергетикалық талдау пайдалы энергияның ең үлкен шығыны турбиналық қондырғыда (65 МВт) және конденсаторда (35 МВт) болатынын көрсетті. Турбинадағы жоғары шығындар будың кеңею процесінің қайтымсыздығына, сондай-ақ ішкі механикалық және гидравликалық шығындарға байланысты. Конденсаторда эксергияның жоғалуы жұмыс денесі мен салқындату ортасы арасындағы температураның айтарлықтай айырмашылығында жылудың берілуіне байланысты [2].

Кесте 3. Жүйе элементтеріндегі эксергетикалық шығындар

Жүйе элементі	Кіреберістегі эксергия (МВт)	Шығу кезіндегі эксергия (МВт)	Шығын (МВт)
Қазандық	120	105	15
Турбина	105	40	65
Конденсатор	40	5	35
Жылуалмастырғыш	5	3	2

Талдау көрсеткендей, ең үлкен энергия шығыны турбиналық қондырғы мен конденсаторда болады.

Эксперименттік деректерді статистикалық өңдеу

Нәтижелердің сенімділігін арттыру үшін турбинадан шыққан кезде бу температурасын өлшеу сериясы жүргізілді.

Кесте 4. Температураны эксперименттік өлшеу

№ өлшеу	Температура (°C)
1	319
2	321
3	320
4	318
5	322

Температураның орташа мәні формуламен анықталады

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Орташа температура 320 °C құрайды, бұл қондырғының номиналды жұмыс режиміне сәйкес келеді.

Атап айтқанда, зерттеу нәтижелері турбиналық жабдықтың тиімділігін арттыру, конденсация процестерін оңтайландыру және жылу алмастырғыштардағы жылу шығынын азайту қажеттілігін көрсетеді. Жабдықтың жұмыс режимдерін оңтайландыруға және энергия шығынын азайтуға мүмкіндік беретін цифрлық басқару жүйелері және компьютерлік модельдеу әдістері сияқты заманауи технологияларды енгізу перспективалы бағыт болып табылады [4].

Осылайша, нәтижелер жылу энергетикалық жүйелерді зерттеу үшін кешенді термодинамикалық талдауды қолданудың тиімділігін растайды және оны заманауи цифрлық технологияларды қолдана отырып одан әрі дамыту қажеттілігін негіздейді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеу термодинамикалық талдау әдістерін қолдану жылу-энергетикалық жүйелерді зерттеудің тиімді құралы екенін көрсетті.

Энергетикалық, энтропиялық және эксергетикалық талдауды қолдану энергетикалық шығындардың негізгі көздерін анықтауға және энергетикалық қондырғылардың тиімділігін арттыру бағыттарын анықтауға мүмкіндік береді.

Нәтижелер турбиналық қондырғылар мен конденсаторларда ең көп энергия шығыны болатынын көрсетеді. Заманауи мониторинг және компьютерлік модельдеу технологияларын пайдалану энергетикалық жүйелердің жұмыс режимдерін оңтайландыруға және олардың тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Заманауи зерттеулер энергетикалық, энтропиялық және эксергетикалық талдауды қамтитын кешенді тәсілді қолдану энергетикалық жүйелердің тиімділігін дәлірек бағалауға және оларды модернизациялау бағыттарын анықтауға мүмкіндік беретінін көрсетеді [2].

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Автор(лар) мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

Yunus A. Çengel, Michael A. Boles. Thermodynamics: An Engineering Approach. McGraw-Hill Education.

Adrian Bejan. Advanced Engineering Thermodynamics. Wiley.

Claus Borgnakke, Richard E. Sonntag. Fundamentals of Thermodynamics. Wiley.

International Energy Agency. Energy Efficiency Report.

Fragkos P. Exploring Model-Based Decarbonization and Energy Efficiency Scenarios with PROMETHEUS and TIAM-ECN / P. Fragkos, F.D. Longa, E. Zisarou, B.V. Zwaan, A. Giannousakis, A. Fattahi // Energies. — 2023 — Vol. 16. P. 6421.

Gajdzil B, Wolniak R, Nagaj R, Zuromskaite-Nagaj B, Grebski W.W The Influence of the Global

Панченков А.Н. Энтропия. Н. Новгород. Изд-во «Интелсервис», 1999. 168 с.

Базаров И.П. Термодинамика. — М.: Высшая школа, 2020.

Кутателадзе С.С. Теплопередача и теплообмен. — М.: Наука, 2019.

Лыков А.В. Теория теплопроводности. — М.: Энергия, 2018.

Incropera F.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. — Wiley, 2021.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПЛАНОВО-ВЫСОТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ПОДКРАНОВЫХ ПУТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННЫХ ТАХЕОМЕТРОВ

УДК 528.482:69.058

Р.Т. Дускенов^{1*}, Г. М. Рахимова²

¹ Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

² Карагандинский технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Дускенов Руслан Толегенович, e-mail: rdstroy.ekspert21@bk.ru

АННОТАЦИЯ. В статье представлены результаты совершенствования методики геодезического контроля планово-высотного положения подкрановых путей промышленных зданий на основе применения электронных тахеометров. Рассмотрены особенности отражательного и безотражательного режимов съёмки, методика камеральной обработки и оценки точности пространственных координат. Полученные данные использованы для оценки фактической работы несущей системы здания в условиях длительной эксплуатации. Установлено, что сохранение геометрической стабильности подкрановых путей свидетельствует об отсутствии прогрессирующих деформаций и подтверждает сохранение расчетной несущей способности строительных конструкций.

Ключевые слова: подкрановые пути, геодезический контроль, электронный тахеометр, исполнительная съёмка.

ВВЕДЕНИЕ

Надёжность эксплуатации мостовых кранов определяется геометрическим состоянием подкрановых путей. Нарушение планового или высотного положения рельсовых нитей приводит к дополнительным динамическим нагрузкам, ускоренному износу оборудования и снижению промышленной безопасности.

Традиционные методы контроля предполагают раздельное определение плановых и высотных параметров с использованием нивелиров и теодолитов. Современные координатные технологии обеспечивают комплексный пространственный анализ геометрии конструкций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с требованиями РД-11-07-98 и РД-П-07-98 планово-высотное положение крановых путей подлежит периодическому инструментальному контролю.

Исследуемый объект- грузовой опорный однобалочный кран, расположенный на территории предприятия. Максимальная масса поднимаемого груза 3,0 тонн, длина обслуживаемой зоны вдоль цеха 24 метра, количество часов работы крана в сутки 3 часа, количество дней в году, когда работает кран 230, 50% циклов производится подъем грузов от 0,25 до 0,5Q ном.

При техническом обследовании исследуемого крана применялись следующие оптические геодезические приборы: нивелир Н-3 и теодолит 2Т30П. На момент проведения обследования в 2018 году приборы имели действующие сертификаты о поверке. Соответственно определение плановых и высотных отметок проводилось раздельно.

При обследовании крана применялся электронный тахеометр Spectra Precision моделей Focus 6, имеющий сертификат о поверке № JJ-01-24-941277 от 15.08.2025.

В 2026 году контроль планово-высотного положения характерных точек рельсовых нитей произведён методом тахеометрической съёмки с использованием электронного тахеометра в двух режимах: отражательном и безотражательном. В безотражательном режиме выполнялась съёмка доступных поверхностей (в.т.ч. рельсовых нитей и элементов металлоконструкций), что позволило оперативно фиксировать фактическое положение без установки отражателя.

В отражательном режиме применялся мини-отражатель (призма) на вехе с магнитным основанием (неодимовый магнит), разработанный и изготовленный автором для быстрого и повторяемого позиционирования в характерных точках. Использование отражателя повышало точность измерений на контрольных точках и обеспечивало сопоставимость серий измерений. Измерялись горизонтальные и вертикальные углы, а также наклонные расстояния; на основании измерений вычислялись пространственные координаты точек. По результатам вычисления координат выполнялась камеральная обработка: построение базовой оси, расчёт отклонений в плане и по высоте, формирование продольного профиля высотных отклонений и исполнительной схемы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам обследования 2026 года выполнено определение: разности отметок направляющих; отклонений в плане; кривизны рельсовых нитей;

На рисунке 1 представлена фотофиксация полевых измерений, выполненных в процессе геодезического обследования подкрановых путей в 2026 году. Показаны применяемые приборы, элементы измерительной схемы и примеры установки отражателя на контролируемых точках. Фотофиксация подтверждает использование отражательного и безотражательного режимов тахеометрической съёмки и обеспечивает документальное подтверждение методики измерений.



Рисунок 1. Фотофиксация процесса геодезического контроля планово-высотного положения подкранового пути:

- а - электронный тахеометр; б- мини-отражатель на магнитном основании; в - установка отражателя в характерной точке; г - элементы металлоконструкций подкранового пути; д - контроль положения рельсовой нити; е - общий вид измерительного комплекса на объекте (2026 г.)

Камеральная обработка включает построение базовой оси рельса, расчёт отклонений, формирование продольного профиля и исполнительной схемы.

На рисунках 4 и 5 представлены результаты проведенных измерений в 2018 и в 2026 году в графическом виде, форма отчетности была взята по 2018 году для удобства сравнения данных.

Таблица 1. Оценка соответствия нормативным требованиям

Показатель	Допустимое значение	Фактическое значение
Разность отметок в одном поперечном сечении Р1	40 мм	до 10 мм
Разность отметок направляющих в ряду вдоль пути Р2	20 мм	до 6 мм
Отклонение в плане между осями симметрии направляющих Р3	15 мм	до 7 мм
Отклонение направляющих в плане от прямой линии Р4	20 мм	до 6 мм

Анализ динамики состояния подкрановых путей за период с 2018 по 2026 годы проведен по графикам по следующим параметрам:

Высотное положение (продольный профиль):

- форма профиля практически совпадает;
- характер прогиба и локальных переломов тот же;
- абсолютные значения не выросли.

Можно сделать вывод, что осадка или дополнительная деформация за 8 лет не развилась.

Таблица 2. Сравнительная таблица высотного положения (мм)

Ось	2018	2026	Δ (2026–2018)
Головка рельса 1 (максимальное изменение: -8 мм (ось 3))			
1	-12	-13	-1
2	-11	-12	-1
3	-6	-14	-8
4	-8	-10	-2
5	-6	-8	-2
Головка рельса 2 (максимальное изменение: -2 мм)			
1	-3	-4	-1
2	-7	-8	-1
3	-3	-5	-2
4	-2	-4	-2
5	0	-2	-2

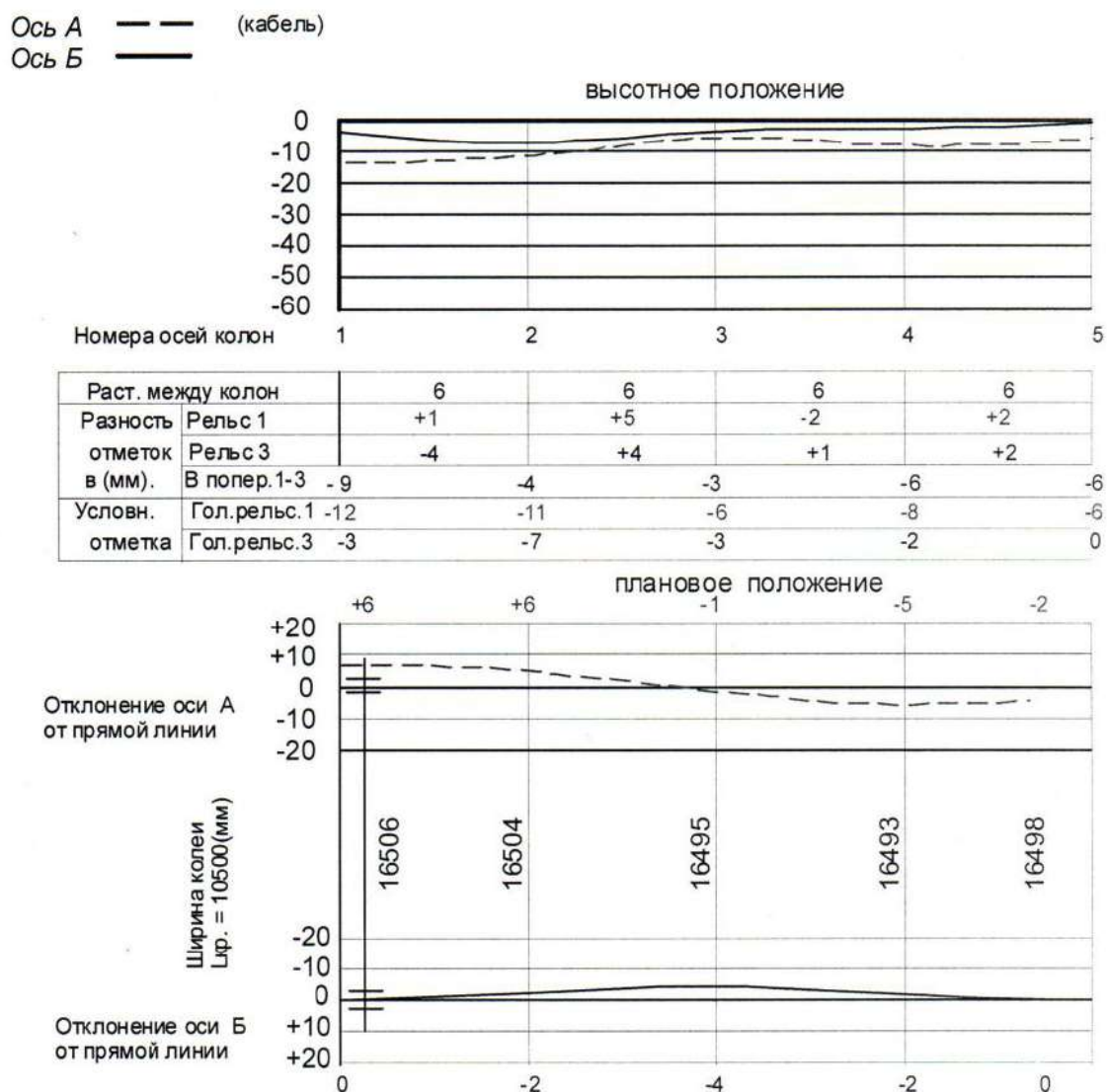


Рисунок 2. Схема планового и высотного положения подкрановых путей (2018 г.)

Таблица 4. Итоговая динамика по высоте

Показатель	Макс. изменение	Характер
Гол. рельс 1	-8 мм	локальное увеличение прогиба
Гол. рельс 2	-2 мм	стабильное состояние
Поперечный перепад	-6 мм	локальная просадка в пролёте 3

Таблица 5. Сравнение измеренных геометрических параметров с допустимыми

Показатель	Допуск	2018	2026	Изменение
P1	≤ 40 мм	до 10 мм	до 10 мм	0
P2	≤ 20 мм	до 6 мм	до 6 мм	0
P3	≤ 15 мм	до 7 мм	до 7 мм	0
P4	≤ 20 мм	до 6 мм	до 6 мм	0

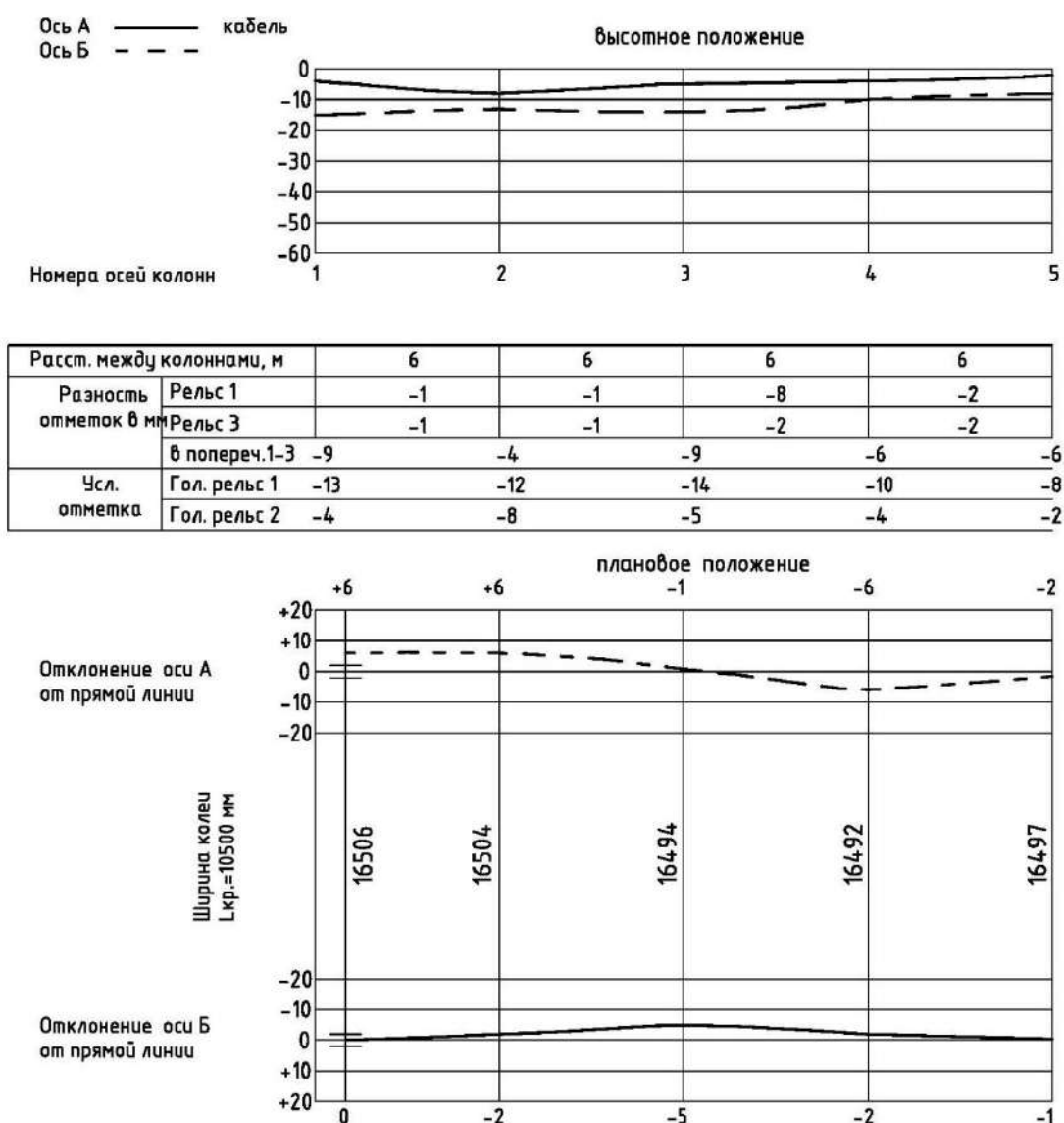


Рисунок 3. Схема планового и высотного положения подкрановых путей (2026 г.)

Ширина колеи по замерам:

- значения практически идентичны
- системного раскрытия или сжатия нет

Что говорит нам о том, что жёсткость креплений и рельсовой решётки сохранена.

Сравнительный анализ 2018–2026 гг. Для оценки динамики состояния выполнено сопоставление результатов двух обследований.

Обозначения параметров приведены в соответствии с РД-П-07-98.

В целом система остаётся стабильной, изменения носят локальный характер. Максимальная добавочная деформация - 8 мм. Значения остаются в пределах допустимых по РД-П-07-98. Прогрессирующей системной осадки не выявлено.

Наиболее чувствительная зона - ось 3 (середина пролёта), что типично для работы балки под нагрузкой крана.

Анализ динамики показывает, что наблюдается:

- отсутствие прогрессирующих деформаций;
- неизменность пространственного положения рельсов;
- стабильность ширины колеи;

- отсутствие увеличения перекосов;

Сравнительный анализ результатов обследований 2018 и 2026 годов подтвердил отсутствие прогрессирующих деформаций и сохранение работоспособного состояния подкранового пути. Конструкция соответствует требованиям промышленной безопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повторное выполнение высокоточного тахеометрического мониторинга с интервалом 8 лет подтвердило пространственную стабильность подкрановых путей и отсутствие прогрессирующих деформаций строительных конструкций.

Полученные результаты позволяют установить сохранение расчетной жесткости подкрановых балок, устойчивости опорных элементов и соответствие геометрии путей нормативным требованиям промышленной безопасности.

Комплексный геодезический контроль планово-высотного положения подкрановых путей является эффективным инструментом оценки фактической работы несущей системы здания и условий эксплуатации кранового оборудования.

С позиции строительной эксплуатации промышленного здания результаты геодезического мониторинга позволяют выполнить инженерную оценку фактической работы несущих конструкций и условий функционирования кранового оборудования.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают искреннюю благодарность ТОО «КС РНП» за оказанную методологическую поддержку и содержательные профессиональные обсуждения рабочей группы.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: при подготовке текста применялись цифровые инструменты обработки информации, в частности Gemini 3 Flash. (2026, март 01).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

РД-П-07-98. (1998). Положение об организации и порядке проведения комплексного обследования крановых путей грузоподъемных машин. Алматы.

<https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2100024006>

РД 11-07-98. (1998). Методические указания по контролю геометрических параметров подкрановых путей. Астана.

https://prg.kz/document/?doc_id=30538233

СН РК 1.03-03-2023. (2023). Геодезические работы в строительстве. Астана.

https://prg.kz/document/?doc_id=35922550

ГОСТ 21779-82. (1982). Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. – 28 с.

Рекомендации по контролю состояния подкрановых путей промышленных зданий. (2012). – 35 с.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСИЛЕНИЯ СЛАБЫХ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТОВ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

УДК 624.138

А. Ержанұлы^{1*}, В.Ю. Чернавин¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Ержанұлы Асқар, e-mail: akapassov@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Статья посвящена исследованию и обоснованию эффективности методов усиления слабых грунтов основания и фундаментов зданий в процессе их эксплуатации. Актуальность темы продиктована необходимостью сохранения эксплуатационной пригодности и продления ресурса зданий, возведенных на грунтах с низкой несущей способностью, подвергающихся техногенному замачиванию. Целью исследования является разработка научно обоснованных рекомендаций по выбору оптимальных технологических решений для стабилизации оснований и усиления конструкций фундаментов. В ходе работы проанализированы современные физико-химические, механические и конструктивные методы улучшения грунтов. В качестве объекта прикладного исследования рассмотрено здание Восточно-Казахстанского музея искусств в г. Усть-Каменогорск, находящееся в предаварийном состоянии из-за просадки суглинков. Основным результатом работы является обоснование применения метода термического закрепления (глубинного обжига) как наиболее эффективного и безопасного для исторических зданий с ветхими бутовыми фундаментами. Разработаны конкретные инженерные решения: определены глубина скважин, температурный режим и схема их расположения, позволяющие создать под зданием сплошной водостойкий техногенный массив. Практическая значимость исследования подтверждается возможностью внедрения предложенной технологии для аналогичных объектов.

Ключевые слова: слабые грунты оснований, усиление фундаментов, просадочность, термическое закрепление.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность функционирования зданий и сооружений на протяжении всего жизненного цикла напрямую зависит от состояния их оснований, при этом слабые и просадочные грунты (глинистые отложения, лессы, торфы, пески) крайне чувствительны к изменению влажности. Присутствие таких слоев в основании приводит к развитию значительных неравномерных осадок, кренам и преждевременной потере эксплуатационной пригодности объектов. Прогрессирующая деградация их несущей способности часто вызвана техногенным воздействием: утечками из коммуникаций, износом гидроизоляции и плохим водоотводом. Несмотря на глубокую проработку темы в трудах ведущих ученых, многообразие конструктивных дефектов в сочетании с изменчивостью свойств слабых грунтов по-прежнему требует индивидуального подхода. Актуальность исследования продиктована необходимостью перехода от теории к прикладным решениям, способным продлить ресурс объектов. Объектом исследования являются слабые основания, а предметом технологические методы их упрочнения. Практическая значимость выражается в разработке рекомендаций по усилению конструкций здания Музея, обеспечивая существенное повышение надежности и снижение затрат на их

дальнейшее содержание.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Современный международный опыт предлагает условную классификацию методов улучшения слабых и просадочных грунтов оснований по трем ключевым направлениям: физико-химические, механические и конструктивные.

Физико-химические методы базируются на направленном изменении структуры грунта посредством инъектирования реагентов или теплового воздействия. Высокую эффективность при устранении просадочности лессовых массивов демонстрирует метод термического закрепления (глубинный обжиг): нагрев грунта до 900°C инициирует оплавление минеральных частиц и формирование необратимых водостойких структурных связей. Для упрочнения песчаных оснований широко применяется силикатизация - нагнетание растворов силиката натрия, образующих жесткий кремнеземистый скелет. В условиях плотной городской застройки для стабилизации водонасыщенных песков и плавунцов целесообразно использование смолизации, при которой введение карбамидных или фенольных смол создает высокопрочный органоминеральный каркас. В последние десятилетия приоритет в мировой практике отдается технологиям струйной цементации (Jet Grouting) и глубинного смешивания (Deep Soil Mixing (DSM)). Струйная цементация позволяет разрушать структуру грунта энергией высоконапорной струи раствора, создавая армированные грунтобетонные элементы. Метод DSM, предполагающий механическое перемешивание грунта с вяжущим с помощью шнековых инструментов, выступает эффективной альтернативой при необходимости глубинного усиления без выраженного эрозионного воздействия. Дополнительно используются методы битумизации и электрохимической стабилизации, применяемые для осушения и уплотнения глинистых массивов (Zagitdinova, 2018).

Механические методы направлены на повышение плотности грунта без трансформации его минералогического состава, при помощи поверхностного и глубинного трамбования, виброуплотнения, а также методом предварительной пригрузки основания. Уплотнение энергией взрыва, благодаря высокой производительности, находит применение при подготовке площадок под масштабное промышленное строительство на неосвоенных территориях.

Конструктивные методы предполагают включение в массив грунта армирующих элементов. Ведущую роль здесь играют геосинтетические материалы: геотекстиль, геосетки и георешетки. Использование данных полимеров позволяет перераспределить давление от фундаментов, исключая продавливание слабых слоев. Комбинирование грунтовых подушек с пространственными геоматрицами обеспечивает стабильность сооружений даже на сильносжимаемых илах и заторфованных основаниях. В современной практике выбор конкретной технологии определяется балансом между инженерно-геологическими условиями, требованиями безопасности и технико-экономическими факторами. При этом наблюдается устойчивая тенденция к замещению традиционных способов современными инъекционными методами, обеспечивающими высокую точность и контролируемость параметров закрепления (Igosheva, 2016).

Применимость выбора оптимальных технологий для стабилизации эксплуатируемых объектов в сложных грунтовых условиях рассмотрена на примере здания Музея, которое является памятником истории и культуры местного значения.

Здание музея представляет собой двухэтажное безподвальное кирпичное строение Г-образной формы, с габаритными размерами 43,93х39,90 м в осях «1-7» и «А-К/1». Конструктивная схема здания - бескаркасная с несущими продольными и поперечными стенами из глиняного кирпича. Внутренняя планировка в сочетании с уклоном рельефа и неэффективно функционирующим наружным водостоком создают

условия для концентрации поверхностных стоков непосредственно у фундаментной части здания. Коррозионный износ сетей и скрытые утечки в зоне теплового узла, расположенного в районе осей 1/1–2/1, послужили одним из катализаторов просадочных процессов. Вкупе с сейсмичностью района, составляющей 7 баллов, и принадлежностью площадки к II категории по сейсмическим свойствам грунтов, любая потеря несущей способности основания ведет к лавинообразному росту напряжений в кирпичной кладке.

Анализ технического состояния, выявил комплекс критических дефектов, обусловленных спецификой грунтовых условий и длительным техногенным замачиванием, несущие кирпичные стены находятся в ограниченно-работоспособном, а на отдельных участках в аварийном состоянии. Основной деформацией являются сквозные трещины с шириной раскрытия до 80 мм, зафиксированные в осях 1/1–2/1 и И/1–К/1, что свидетельствует об интенсивных неравномерных осадках. Угол здания в указанной зоне имеет крен в сторону улицы до 80 мм и вертикальную просадку до 40–50 мм. Фундаменты, выполненные из бутового камня на глиняном растворе, в ходе шурфования на глубине 2,3–2,5 м показали крайнюю степень деградации. Установлено, что глиняный раствор практически полностью вымыт, вследствие чего прочность фундамента оценивается как нулевая. Основной причиной такого состояния является систематическое замачивание из-за отсутствия ливневой канализации во дворе и неисправности инженерных сетей. Инженерно-геологические изыскания, показали, что грунтовое основание под подошвой фундаментов представлено последовательным залеганием трех основных инженерно-геологических элементов (далее ИГЭ). Верхний горизонт (ИГЭ-1) мощностью до 1,8 м сформирован насыпными техногенными грунтами, включающими дресву, щебень и строительный мусор. Основным несущим слоем служат суглинки от бурого до темно-коричневого цвета (ИГЭ-2), которые в природном состоянии характеризуются тугопластичной или полутвердой консистенцией. Их расчетные физико-механические показатели составляют: модуль деформации $E = 14–16$ МПа, удельное сцепление $C = 21–24$ кПа и угол внутреннего трения $\varphi = 19–21$. Важной особенностью данного слоя является склонность к переходу в мягкопластичное и текучее состояние при техногенном замачивании, что влечет за собой резкое падение модуля деформации и полную потерю несущей способности основания. В качестве надежного подстилающего слоя на глубине 4,3–4,5 м залегают гравийно-галечниковые отложения (ИГЭ-3), обладающие высокими прочностными характеристиками и служащие жестким упором при проектировании мероприятий по усилению (Ekspertnoe zaklyuchenie №173-594-24, 2024).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обоснование выбора методов усиления грунтов оснований было продиктовано специфическим сочетанием инженерно-геологических условий и критическим состоянием конструкций здания. Применение традиционных инъекционных методов, таких как силикатизация или цементация, в данных условиях признано неэффективным из-за крайне низкого коэффициента фильтрации суглинков. Плотная структура грунта препятствует равномерному проникновению химических растворов, что делает невозможным создание сплошного массива закрепленного грунта и ведет к образованию локальных линз, не решающих проблему просадочности. Использование электроосмоса также было исключено из-за его специфической направленности на водонасыщенные глинистые массивы, тогда как в данном случае требуется не осушение, а коренное изменение физико-химической структуры просадочного грунта. Кроме того, аварийное состояние здания, сквозные трещины до 80 мм и деструкция бутового фундамента, накладывают жесткие ограничения на

механические воздействия. Применение технологий, связанных с высоким давлением нагнетания или вибрационными нагрузками (например, струйная цементация), сопряжено с недопустимым риском обрушения ослабленной кирпичной кладки. В сложившейся ситуации наиболее технологически оправданным и безопасным решением является метод термического закрепления. Данная технология позволяет необратимо ликвидировать просадочные свойства ИГЭ-2, трансформируя суглинок в устойчивое монолитное состояние, по своим характеристикам близкое к керамическому материалу. Важным преимуществом термического воздействия является отсутствие избыточного давления на конструкции фундамента и окружающий грунтовый массив. Учитывая неудовлетворительную организацию поверхностного водоотвода на участке, создание термически упрочненного «экрана» под фундаментами обеспечит стабильность здания даже в условиях возможного последующего техногенного замачивания, гарантируя долгосрочную эксплуатационную надежность объекта.

В рамках проектных предложений использовался расчетно-теоретический метод для определения параметров термического закрепления грунтов. Расчет технологических параметров обжига, включая радиус зоны закрепления, температуру и продолжительность термообработки, производился по стандартным формулам на основе физических характеристик суглинков, зафиксированных в ходе изысканий. Инженерное решение базируется на нагнетании в скважины высокотемпературной смеси сжатого воздуха и продуктов сгорания (топливо — соляровое масло с удельной теплотой сгорания 42 МДж/кг). Теплотехнический расчет определил использование форсунок мощностью 718 МДж/ч (расход 17,1 кг/ч), обеспечивающих нагрев массива до 900°C, приводящих к термическому спеканию частиц. В результате формируются прочные водостойкие структурные связи, полностью устраняющие просадочные свойства и создающие под зданием устойчивый техногенный массив. Скважины $\varnothing 100$ мм устраиваются методом вращательного бурения под углом 65° к горизонту (рисунок 1)

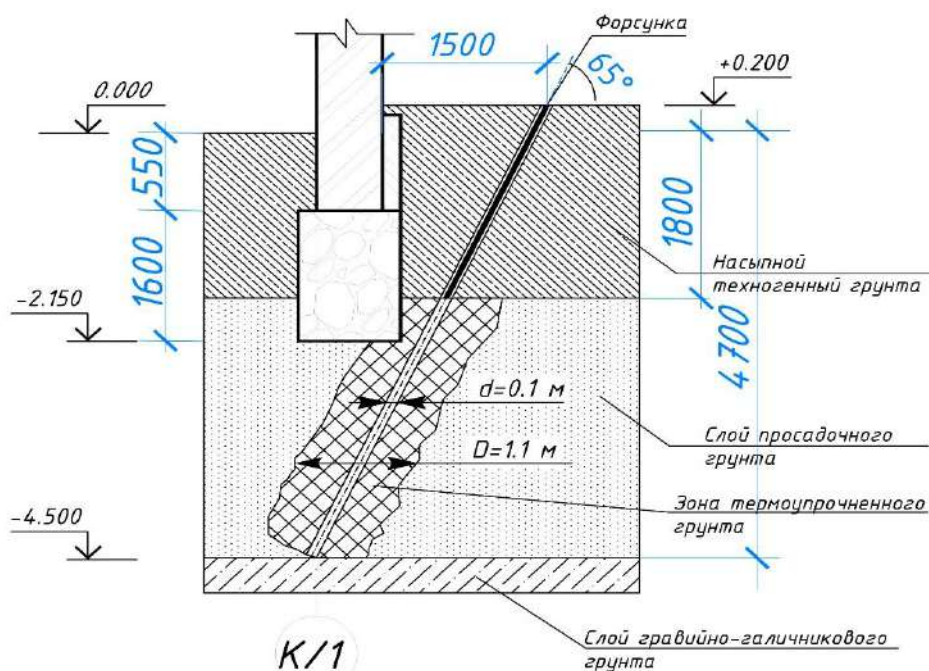


Рисунок 1. Схема бурения скважины

Проектная глубина термического воздействия составляет 4,3–4,5 метра, что

обеспечивает гарантированный проход сквозь всю толщу слабых суглинков (ИГЭ-2) с жестким упором формируемой колонны на гравийно-галечниковый горизонт (ИГЭ-3). Скважины располагаются с шагом 1,5 метра, образуя под несущими стенами сплошной армированный пояс из обожженного грунта. Предлагаемая схема расположения скважин представлена на рисунке 2.

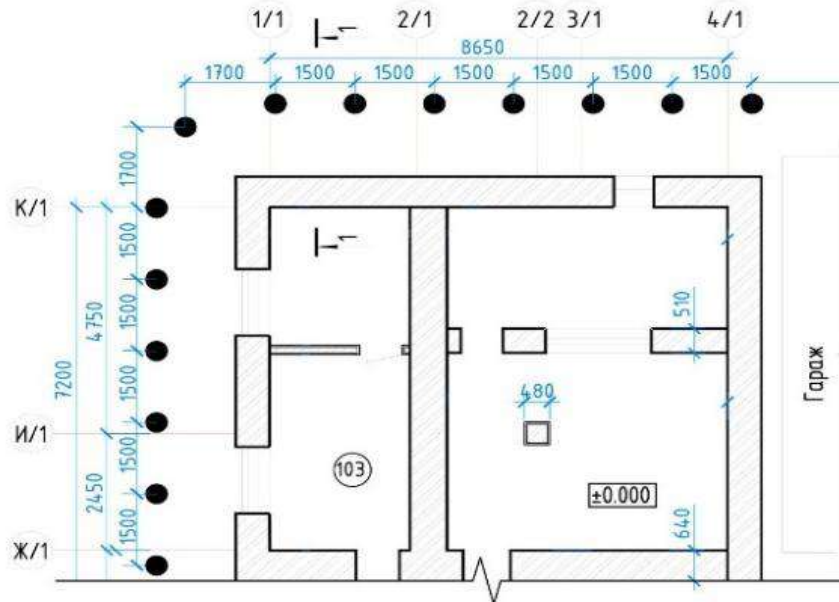


Рисунок 2. Схема расположения скважин в осях Ж/1 – К/1 и 1/1 – 4/1

В процессе реализации технологии применяется герметизация устья скважин специальными затворами, способными выдерживать избыточное давление до 0,05 МПа, что необходимо для равномерной фильтрации теплового потока в поры окружающего массива. Режим обжига определяется расчетным временем термического воздействия, которое составляет в среднем 45–50 часов на одну скважину. За этот период формируется упрочненная грунтовая колонна радиусом 0,5–0,6 метра. Высота заходки $H = 2$ м соответствует толще просадочного грунта. Контроль качества осуществляется путем непрерывного мониторинга температуры и давления в скважине, а на заключительном этапе методом контрольного зондирования или отбора кернов (Тирова *tehnologicheskaya karta*, 2009). Применение данной технологии позволяет не только стабилизировать осадку здания, но и значительно повысить расчетное сопротивление грунта основания, что критически важно для обеспечения сейсмостойкости объекта в условиях 7-балльной зоны. Благодаря отсутствию динамических нагрузок и мокрых процессов в ходе работ, метод глубинного обжига выступает наиболее щадящим и эффективным решением для восстановления эксплуатационной надежности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования проведен обзор современных методов усиления оснований и установлено, что выбор технологии напрямую зависит от совокупности инженерно-геологических условий, конструктивных решений и характера дефектов эксплуатируемых зданий.

Научная новизна и вклад исследования заключаются в обосновании применимости метода глубинного обжига для специфических условий (просадочных суглинков с низким коэффициентом фильтрации). Сформулированные методологические выводы расширяют теоретическую базу применения термического

закрепления для восстановления объектов культурного наследия, что представляет практическую ценность для специалистов реставраторов объектов историко-культурного наследия.

Практическая значимость работы подтверждена тем, что для стабилизации просадочных суглинков Музея обоснованно выбран метод термического закрепления как наиболее эффективный и щадящий в условиях аварийного состояния бутовых фундаментов и физических характеристик грунта.

Предложенная технология обжига трансформирует слабый грунт в водостойкий техногенный монолит, полностью устраняя просадочность и обеспечивая долгосрочную сейсмостойкость объекта. Такой подход гарантирует сохранение архитектурного облика исторического здания и его безопасное функционирование как значимого объекта культурного наследия для будущих поколений.

Полученные показатели термического обжига применимы для реставрации аналогичных сооружений в сложных грунтовых условиях.

Перспективы дальнейших исследований включают изучение поведения термически закрепленных массивов при циклическом замачивании и оптимизацию энергоэффективности параметров обжига.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Заявляем об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Выражаем благодарность коллективу рабочей группы «БОСКОР» центра компетенций и трансфера технологий в области строительства ВКТУ им. Д. Серикбаева за методологическую поддержку и полезные обсуждения.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке текста применялись Gemini 3 Flash. (2026.03.01). Систематизация технической документации [Большая языковая модель]. Google AI. <https://gemini.google.com/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Загитдинова, Т. В., & Калошина, С. В. (2018). Методы усиления грунтов в строительстве. Пермь.
https://doi.org/10.29039/article_5abc8ca264de41.35773874 // Zagitdinova, T. V., & Kaloshina, S. V. (2018). Metody usileniya gruntov v stroitel'stve. Perm.
https://doi.org/10.29039/article_5abc8ca264de41.35773874
- Игошева, Л. А., & Гришина, А. С. (2016). Обзор основных методов укрепления грунтов основания.
<https://doi.org/10.15593/2224-9826/2016.2.01> // Igosheva, L. A., & Grishina, A. S. (2016). Obzor osnovnykh metodov ukrepleniya gruntov osnovaniya.
<https://doi.org/10.15593/2224-9826/2016.2.01>
- ВКТУ им. Д. Серикбаева. (2024). Экспертное заключение №173-594-24 о техническом состоянии кирпичных стен здания Восточно-Казахстанского Музея искусств по ул. Тохтарова, 56 в г. Усть-Каменогорск. Усть-Каменогорск. // VKTU im. D. Serikbaeva. (2024). Ekspertnoe zaklyuchenie №173-594-24 o tekhnicheskoy sostoyanii kirpichnykh sten zdaniya Vostochno-Kazakhstanskogo Muzeya iskusstv po ul. Tokhtarova, 56 v g. Ust'-Kamenogorsk. Ust'-Kamenogorsk.
- Термическое закрепление грунтов: типовая технологическая карта. (2009). Санкт-Петербург. // Termicheskoye zakrepleniye gruntov: tipovaya tekhnologicheskaya karta. (2009). Sankt-Peterburg.

КРИТЕРИИ, ПОКАЗАТЕЛИ И ПАРАМЕТРЫ ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 69.059.2

А.А. Еркинбекова^{1*}, М.А.Рахимов²

¹ Восточно-Казахстанский технический университет, г. Усть-Каменогорск, Казахстан.

² Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, г.Караганда, Казахстан.

*Автор корреспонденции: Еркинбекова Асем Аянкызы, e-mail: Asem-92-asema@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассматривается методика оценки живучести промышленных зданий и сооружений в составе геотехнической системы «основание–фундамент–надземная часть», основанная на комплексном анализе технического состояния конструкций, их напряженно-деформированного состояния и фактического износа. Раскрываются принципы диагностики и экспертного обследования объектов, порядок инструментального контроля и моделирования работы конструкций с учетом нелинейности материалов и реальных условий эксплуатации. Особое внимание уделено оценке риска аварии, определению остаточного ресурса и разработке мероприятий по усилению и реконструкции зданий при изменении нагрузок и технологических условий. Обоснована необходимость применения вероятностных и риск-ориентированных методов, а также систем мониторинга для обеспечения эксплуатационной надежности и безопасности промышленных объектов на протяжении всего жизненного цикла.

Ключевые слова: живучесть зданий и сооружений; геотехническая система; техническое состояние; экспертное обследование; напряженно-деформированное состояние; риск аварии; остаточный ресурс; надежность; реконструкция; мониторинг; несущая способность; физический износ; дефекты и повреждения; промышленная безопасность.

ВВЕДЕНИЕ

Современные промышленные здания функционируют в условиях возрастающих эксплуатационных нагрузок, агрессивных сред и изменений технологических процессов. В этих условиях особую актуальность приобретает оценка живучести строительных объектов как способности сохранять работоспособность при действии неблагоприятных факторов и локальных повреждений.

Существующие нормативные документы регламентируют обследование технического состояния, однако в практической деятельности часто отсутствует интегрированный подход, учитывающий совместную работу основания, фундаментов и надземных конструкций как единой геотехнической системы. Недостаточная проработка критериев и количественных показателей живучести затрудняет принятие обоснованных решений при реконструкции и усилении зданий.

Цель исследования — разработать комплексную методику оценки живучести промышленных зданий с формированием системы критериев, показателей и параметров количественной оценки.

Оценка живучести промышленного здания или сооружения в составе геотехнической системы (ГС) базируется на системе количественных и качественных критериев, отражающих способность объекта сохранять несущую способность и эксплуатационную пригодность при действии неблагоприятных факторов. В современной практике обследований и расчетов используются положения действующих нормативных документов, в том числе Министерство строительства и

жилищно-коммунального хозяйства Республики Казахстан, а также требования сводов правил, например СП 13-102-2003 и ГОСТ 31937-2011.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

К основным критериям живучести ГС относятся:

1. Несущая способность – способность конструкций воспринимать расчетные и аварийные нагрузки без достижения предельных состояний первой группы.
2. Эксплуатационная пригодность – ограничение деформаций, прогибов, раскрытия трещин и вибраций в пределах нормативных требований (предельные состояния второй группы).
3. Устойчивость к прогрессирующему обрушению это способность системы локализовать повреждение и предотвратить лавинообразное разрушение.
4. Ремонтпригодность это возможность восстановления работоспособности конструкций без полной замены.
5. Остаточный ресурс – прогнозируемая продолжительность безопасной эксплуатации при существующем техническом состоянии.

Показатели живучести формируются на основе: коэффициентов запаса прочности; коэффициентов надежности по нагрузке и материалу; вероятности отказа и индекса надежности; степени физического износа (%); категории технического состояния (исправное, работоспособное, ограниченно работоспособное, аварийное).

Для количественной оценки широко применяются вероятностные методы. Вероятность безотказной работы определяется как функция времени эксплуатации и интенсивности отказов. При этом учитывается изменение прочностных характеристик материалов (бетона, стали, грунтов основания) вследствие коррозии, карбонизации, усталостных явлений, циклического нагружения и агрессивного воздействия среды.

Живучесть в условиях чрезвычайных ситуаций (взрывы, пожары, сейсмические воздействия, просадки основания) дополнительно оценивается по сценарию «особого сочетания нагрузок», когда анализируется работа конструкций за пределами упругой стадии с учетом пластических деформаций и перераспределения усилий.

Методика оценки живучести включает комплекс последовательных этапов, обеспечивающих переход от сбора исходной информации к расчетной модели и принятию управленческого решения.

1. Подготовительный этап

На данном этапе выполняется анализ проектной и исполнительной документации, изучение данных предыдущих обследований, анализ условий эксплуатации, выявление изменений конструктивной схемы и нагрузок и оценка инженерно-геологических условий площадки.

Особое внимание уделяется истории аварийных ситуаций, реконструкций и усилений.

2. Визуальное и инструментальное обследование включает фиксацию дефектов (трещины, коррозия, сколы, оголение арматуры), геодезический контроль деформаций (осадки, крены, перекосы), неразрушающий контроль прочности материалов, лабораторные испытания образцов, обследование состояния грунтов основания.



Рисунок 1. Инструментальное обследование

Дефекты классифицируются по кодированной системе, позволяющей формировать цифровую базу данных и автоматизировать анализ состояния ГС. Для промышленных зданий характерны повреждения, связанные с динамическими нагрузками оборудования, агрессивными средами и температурными перепадами.

3. Оценка напряженно-деформированного состояния. На основании результатов обследования создается расчетная модель, учитывающая фактические геометрические параметры, реальные граничные условия, снижение прочностных характеристик, нелинейные свойства материалов, контактное взаимодействие «основание–фундамент–надземная часть».

Моделирование выполняется с использованием конечно-элементных программных комплексов. Расчет проводится для нормативных и аварийных сочетаний нагрузок. В результате определяются зоны концентрации напряжений, перераспределение усилий, степень использования несущей способности элементов и возможные механизмы разрушения.

Оценка живучести ГС невозможна без анализа риска аварии. Риск рассматривается как произведение вероятности отказа на тяжесть последствий.

Для промышленных объектов последствия могут включать гибель и травматизм персонала, остановку технологического процесса, экологический ущерб а также экономические потери.

Вероятность отказа определяется на основе статистических данных по аналогичным объектам, результатов мониторинга, расчетов надежности и анализа деградации материалов.

Остаточный ресурс определяется путем экстраполяции выявленных тенденций изменения параметров (рост ширины трещин, скорость коррозии, темп осадки фундаментов). Прогноз выполняется с учетом предполагаемых режимов эксплуатации.

Если реконструкция предусматривает увеличение нагрузок или изменение технологического процесса, проводится дополнительная проверка несущей способности по новой расчетной схеме.

Возможные решения включают усиление отдельных элементов, изменение конструктивной схемы, частичную замену конструкций, ограничение режимов эксплуатации или вывод объекта из эксплуатации.

Длительная безопасная эксплуатация промышленной ГС обеспечивается системой геотехнического и конструкционного мониторинга. Мониторинг включает контроль осадок и кренов фундаментов, измерение раскрытия трещин, контроль

напряжений и деформаций, наблюдение за уровнем грунтовых вод и регистрацию вибраций и динамических воздействий.

Современные автоматизированные системы мониторинга позволяют в режиме реального времени отслеживать изменения параметров и выявлять предаварийные состояния. Это особенно актуально для объектов повышенной ответственности (цеха с тяжелым оборудованием, резервуарные парки, объекты химической промышленности).

Результаты мониторинга интегрируются в расчетную модель, что позволяет корректировать прогноз остаточного ресурса и своевременно принимать меры по усилению или ремонту.

Реконструкция существенно изменяет исходные параметры ГС: возможны увеличение нагрузок от оборудования, изменение схемы передачи усилий, устройство дополнительных проемов, надстройка этажей и усиление фундаментов.

Методика оценки живучести должна учитывать совместную работу существующих и новых конструкций, этапность производства работ, временные нагрузки в период реконструкции и риск частичной потери устойчивости при демонтаже элементов.

Особое значение приобретает проверка устойчивости основания при изменении напряженного состояния грунтов. При необходимости выполняется расчет по стадиям строительства.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для принятия управленческого решения целесообразно применять интегральный показатель живучести, учитывающий техническое состояние конструкций, степень физического износа, вероятность отказа, уровень риска и экономическую целесообразность усиления.

Интегральный показатель может быть представлен в виде шкалы или индекса, позволяющего классифицировать объект по уровням: высокий уровень живучести, допустимый, пониженный и критический. Такой подход обеспечивает системность принятия решений и позволяет обосновать выбор стратегии как ремонт, усиление, реконструкция или вывод из эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методика оценки живучести промышленных зданий основана на комплексном анализе геотехнической системы «основание–фундамент–надземная часть». В работе систематизированы критерии, показатели и параметры оценки живучести, что позволило сформировать целостную структуру диагностического и расчетного анализа.

Определено, что основными критериями являются несущая способность, эксплуатационная пригодность, устойчивость к прогрессирующему разрушению, ремонтпригодность и остаточный ресурс. Их количественная оценка осуществляется с использованием коэффициентов запаса и надежности, вероятности отказа, индекса надежности, степени физического износа и интегрального показателя живучести при учете фактических параметров напряженно-деформированного состояния и уровня риска.

Научная новизна заключается в объединении нормативных, расчетных и диагностических подходов в единую риск-ориентированную методику с интегральной оценкой технического состояния. Практическая значимость состоит в возможности применения методики при обследовании, реконструкции и усилении промышленных объектов. Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием цифрового мониторинга и совершенствованием моделей прогнозирования деградации конструкций и грунтов основания.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования в рамках учебной и научно-исследовательской деятельности.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за методологическую поддержку, конструктивные замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению качества исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Савин С.Ю. Живучесть и техническое состояние железобетонных конструкций каркаса здания в результате особого воздействия // *Научно-технический журнал*. – 2025. – № 4 (120).
<https://doi.org/10.33979/2073-7416-2025-120-4-91-102>
- Travush V.I., Fedorova N.V. Survivability of structural systems of buildings with special effects // *Инженерно-строительный журнал*. – 2018. – № 5 (81).
[10.18720/MCE.81.8](https://doi.org/10.18720/MCE.81.8)
- Тамразян А.Г., Кудрявцев М.В. Влияние уровня повреждений на динамические характеристики железобетонных конструкций при оценке их сейсмостойкости // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. – 2024.
<https://doi.org/10.33979/2073-7416-2025-118-2-81-93>
- Добромыслов А.Н. *Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам*. – М.: АСВ, 2004.
<https://www.ozis-venture.ru/files/docs/litra/Dobromislov.pdf>
- Коробова О.А., Максименко Л.А. *Обследование и мониторинг технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений*. – М.: АСВ, 2019.
[ISBN 978-5-4323-0312-7.](https://www.ozis-venture.ru/files/docs/litra/Korobova.pdf)
- Краснощекоев Ю.В. *Вероятностные основы расчёта строительных конструкций*. – Омск: СибАДИ, 2016.
https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_bibl_890628
- ГОСТ 31937-2011 *Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния*.
https://www.admrebr.ru/upload/iblock/e68/e3xmg189ypmum71opfwkwb20un4xu759/GOST-31937_2011.-Mezhgosudarstvennyy-standart.-Zdaniya-i-sooru.pdf
- СП 13-102-2003 *Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений*.
<https://www.gupcti.ru/upload/iblock/87b/g1dy195u4xmnnpuesrf613u377i98oq1.pdf>
- Солдатенко Т.Н., Исхаков Ш.Ш., Ковалев Ф.Е., др. Оценка надежности эксплуатации зданий и сооружений по методикам возникновения риска их неработоспособных состояний // *Magazine of Civil Engineering*. – 2012. <https://www.ozis-venture.ru/pdf/ishakov.pdf>

АНАЛИЗ И МЕТОДОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ КОНТРОЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

УДК 69.05:004.8

А.Б. Еrsaинова^{1*}, А.С. Солдун¹, А.Г. Гольцев¹

¹ВКТУ имени Д. Серикбаева", г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Еrsaинова Алида Бауржановна, e-mail: ers.alida@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье представлен анализ и методологическое обоснование электронного документирования контроля качества строительно-монтажных работ с применением инструментов искусственного интеллекта. Актуальность исследования обусловлена тем, что традиционное ведение исполнительной документации в строительстве часто сопровождается разрозненностью записей, высокой трудоемкостью оформления, ограниченной прослеживаемостью результатов контроля и риском потери доказательной базы. Цель исследования заключается в разработке рекомендации электронного документирования контроля качества СМР, обеспечивающую системную регистрацию операций контроля, накопление и связывание доказательств, а также поддержку принятия решений по устранению выявленных отклонений. В работе использованы анализ научных публикаций, процессное моделирование документооборота, структурирование атрибутов контрольных записей и сравнительный анализ традиционного и цифрового подходов. В качестве основного результата предложена структура электронного «пакета контроля», объединяющего документы, метаданные, визуальные материалы, результаты автоматизированной обработки и статус корректирующих действий. Показано, что применение такой модели способствует повышению полноты и достоверности фиксации контрольных процедур, ускорению подготовки документов, улучшению прослеживаемости истории замечаний и более эффективной приоритизации рисков. Практическая значимость работы состоит в возможности использования предложенной модели при цифровизации строительного контроля и организации электронного документооборота на строительной площадке.

Ключевые слова: строительный контроль, контроль качества, электронная исполнительная документация, ЭДО, искусственный интеллект, видеомониторинг, доказательная база.

ВВЕДЕНИЕ

Качество строительно-монтажных работ является ключевым фактором безопасности и надёжности зданий и сооружений, а также определяет соблюдение сроков и затрат на всех стадиях жизненного цикла объекта. В практической деятельности строительного контроля значительная доля ресурсов расходуется не только на выявление отклонений, но и на их корректное оформление в исполнительной документации и последующее сопровождение устранения замечаний.

Традиционная модель документирования, основанная на бумажных журналах и разрозненных приложениях (фотографии, локальные файлы, переписка), характеризуется высокой трудоемкостью и ограниченной прослеживаемостью: сложно восстановить «путь» от факта контроля до управленческого решения и подтверждения устранения. Кроме того, риск потери доказательственной базы возрастает при смене ответственных лиц и при передаче документации между

участниками строительства.

Цифровая трансформация строительной отрасли требует перехода от разрозненных записей к регламентированному электронному документообороту, в котором каждый результат контроля сопровождается набором обязательных реквизитов, ссылками на доказательства и статусом исполнения. При этом применение электронных журналов и ЭДО должно опираться на единую методику, задающую состав документов, структуру данных, правила хранения и процедуры согласования.

Перспективным направлением повышения эффективности контроля является применение ИИ-алгоритмов, способных автоматически выделять отклонения геометрии, дефекты поверхности и нарушения технологических требований на фото и видеопотоках. Для практического внедрения ИИ важна не только точность распознавания, но и интеграция результатов анализа в юридически значимый контур исполнительной документации: автоматизированное формирование записей, прикрепление доказательств, назначение ответственных и контроль устранения.

Цель исследования — разработка рекомендации электронного документирования контроля качества СМР, обеспечивающей сквозную идентификацию циклов контроля; формирование доказательной базы и её связность с документами; единые требования к заполнению и маршрутизации документов; управляемый процесс устранения замечаний и их закрытия. Для достижения цели решались задачи описания процессной модели документооборота, разработки структуры хранения и регистров (журналы, реестры, отчёты), а также сравнительной оценки электронного и бумажного подходов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы исследования включают: типовые формы исполнительной документации контроля качества СМР (общий журнал работ, специализированные журналы по видам работ, чек-листы, акты/предписания, реестр замечаний/несоответствий); цифровую доказательственную базу (фото и видеоматериалы, скриншоты, временные метки, геопривязку и телеметрию при обследованиях БПЛА); программные средства электронного документооборота и хранения данных (сервер/облако, реестр документов, маршруты согласования, журналирование действий).

Методологическая модель разработана на основе процессного моделирования документооборота и принципов управления качеством и информацией. В качестве базовой единицы учёта предложен «пакет контроля» — совокупность документов и файлов, относящихся к одному циклу контроля конкретного элемента (для камер) либо одной сессии обследования (для БПЛА). Пакету присваивается уникальный идентификатор (ID), который используется как сквозной ключ для связности всех сущностей.

Процедура электронного документирования описывается последовательностью стадий: инициация контроля и регистрация пакета; накопление доказательств и метаданных; фиксация результата контроля в структурированных регистрах (журналы/реестры); формирование и утверждение документов в ЭДО; уведомления и контроль устранения; архивирование и подготовка данных для аудита. Для каждой стадии определены обязательные реквизиты, роли участников и выходные документы.

Для сценариев с ИИ предусматривается этап интеллектуальной интерпретации визуальных данных. ИИ-модуль выполняет: детекцию дефектов/отклонений и маркировку кадров; извлечение измеримых параметров при наличии калибровки/опорных маркеров или BIM-привязки (оценка «проект/факт»);

классификацию результатов по статусам контроля; подготовку структурированной записи для журналов/реестров и черновика отчёта с вложениями. Утверждение документов (включая применение ЭЦП в ЭДО) выполняется уполномоченными лицами; ИИ используется как инструмент поддержки, а не как источник юридически значимого решения.

Для обеспечения воспроизводимости предлагаются: единые правила именования файлов, версионность документов, разграничение прав доступа и резервное копирование. Допускается применение QR-кодов/гиперссылок на пакет контроля для оперативного доступа на площадке.

Методы исследования включали: построение блок-схем документооборота для двух сценариев (камеры и БПЛА); формирование структуры регистров и атрибутов записей (карточка замечания, запись журнала, карточка несоответствия); сравнительный анализ электронного и бумажного подходов по критериям эффективности и рисков.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Модель структурирует электронное ведение документации контроля качества СМР и обеспечивает сквозную прослеживаемость на уровне «факт контроля → документ → корректирующее действие → подтверждение». Ниже приведены основные положения методологической модели, а также результаты её сопоставления с традиционной схемой документирования.

Организация электронного ведения документации. Для сценария контроля по видеокамерам пакет контроля инициируется на уровне элемента (например, выверка фундамента, монтаж колонны, установка ригеля, монтаж стеновой панели). Формируются обязательные атрибуты: объект, зона/ось, дата-время, ответственный исполнитель, ссылка на проектную документацию и применяемые требования. Доказательная база фиксируется в виде видеозаписи и ключевых кадров (скриншотов) с указанием временных меток; далее выполняется запись результата в электронный журнал (включая измеряемые параметры и вывод о соответствии).

Для сценария обследования с применением БПЛА пакет контроля формируется на уровне сессии облёта, в которой задаются зона обследования, маршрут, параметры съёмки и ответственное лицо. По итогам обследования создаётся реестр наблюдений (замечаний), где каждая запись содержит: идентификатор, описание, привязку к зоне, ссылку на фрагмент видео или фото, скриншот и временную метку. Это обеспечивает сопоставимость наблюдений при повторных обследованиях и позволяет системно управлять устранением.

Формирование электронных документов и маршрутизация в ЭДО. На основе результатов контроля формируются записи в электронных журналах и, при наличии отклонений, карточка несоответствия с назначением ответственного и сроков. При необходимости дополнительно формируются акт/предписание и итоговый отчёт с приложениями (скриншоты, ссылки на исходные файлы, таблицы измерений). Документы проходят маршруты согласования в ЭДО, а действия пользователей фиксируются журналом событий (кто, когда и что изменил или утвердил), что повышает юридическую значимость и снижает риск несанкционированных правок.

Использование ИИ при формировании электронных документов. Результаты ИИ-анализа включаются в пакет контроля как машиночитаемые атрибуты (класс дефекта, уровень риска, значения отклонений, статус) и как визуальные доказательства (кадры с аннотациями и тайм-метками). На их основе автоматически формируются: карточка замечания/несоответствия, черновик акта/предписания и отчёт. Автоматизация снижает трудоёмкость заполнения типовых полей, повышает полноту фиксации и унифицирует формулировки. Для предотвращения ошибок

внедряются проверки качества данных: валидация обязательных реквизитов, контроль диапазонов, журналирование изменений и хранение исходных RAW-данных.

Правила хранения и архивирования доказательной базы. Модель предусматривает централизованное хранение RAW-данных и производных материалов в регламентированной структуре, версионность отчётов и неизменяемость архивных копий. Для обеспечения доступности устанавливаются уровни доступа, а также регламент резервного копирования и сроки хранения данных. В результате обеспечивается готовность материалов к внутреннему аудиту качества и внешним проверкам.

Сопоставление бумажной и электронной модели документирования показало, что предложенная схема обеспечивает более высокую полноту фиксации результатов контроля за счёт обязательной привязки каждого замечания к пакету доказательств, маршруту согласования и статусу устранения. В практическом отношении это выражается в сокращении числа неполных записей, ускорении подготовки журналов и отчётов, а также в повышении воспроизводимости управленческих решений при повторных проверках и внутренних аудитах. Дополнительным результатом является формирование единой цифровой истории элемента или зоны контроля, где в одном контуре объединяются исходные материалы, машинная интерпретация, решения ответственных лиц и подтверждение закрытия замечаний.

В мировой практике электронное документирование контроля качества с применением стационарных и мобильных видеокамер развивается как часть общей цифровой среды проекта, в которой видеопотоки, фотоматериалы, BIM-данные и журналы контроля связаны единым идентификатором объекта или зоны работ. Современные исследования показывают, что камеры в сочетании с алгоритмами компьютерного зрения наиболее эффективны не сами по себе, а в составе сквозного цифрового контура: захват изображения, автоматическое распознавание отклонений, формирование аннотированных кадров, передача результата в электронный журнал, назначение ответственного и последующее подтверждение устранения замечания. Такой подход используется в системах progress monitoring, vision-based inspection и digital twin, где видеоданные становятся основанием для управленческих решений только после их включения в структурированный электронный документооборот.

Мировой опыт также показывает, что наибольшую практическую ценность имеют решения, в которых ИИ обрабатывает кадры с камер для выявления дефектов поверхности, отклонений геометрии, несоответствий последовательности монтажа и признаков нарушения технологии, а затем автоматически подготавливает цифровую запись о событии контроля. По сравнению с традиционной ручной фиксацией это повышает повторяемость результатов, уменьшает влияние субъективного фактора и ускоряет подготовку исполнительных документов. Вместе с тем зарубежные работы подчёркивают необходимость валидации моделей, сохранения исходных RAW и видеофайлов, фиксации времени съёмки и разграничения ответственности между ИИ-системой и инженером-контролёром, поскольку юридически значимое решение должно оставаться за уполномоченным специалистом.

Ниже представлена структура электронного ведения документации контроля качества СМР в виде блок-схемы.

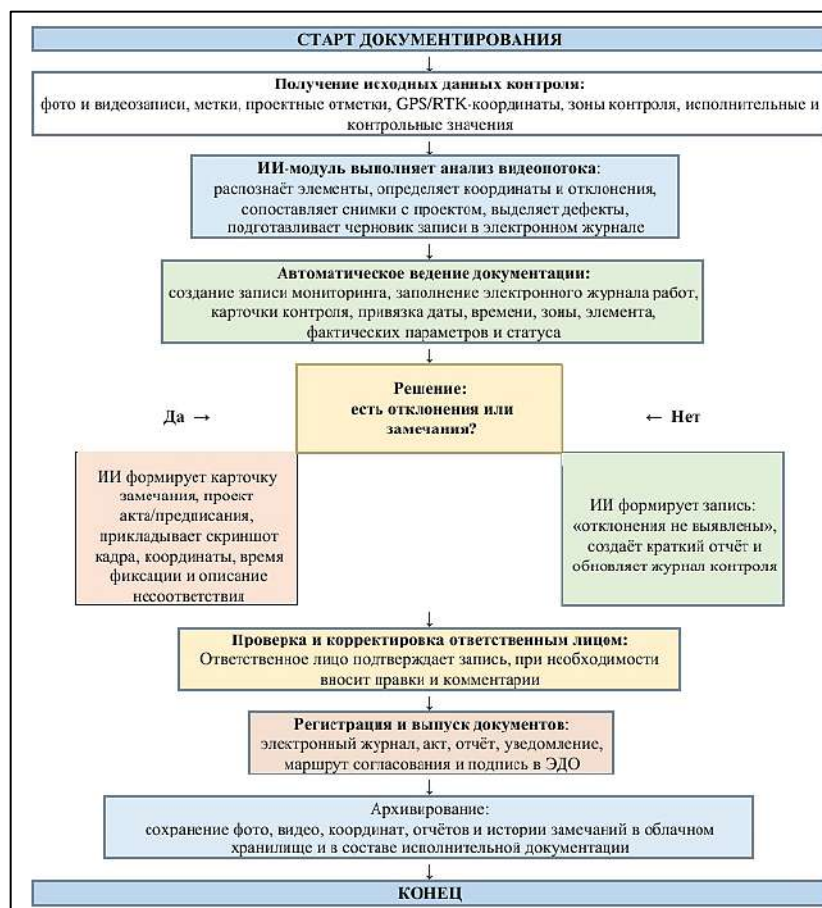


Рисунок 1. Блок-схема ведения документации при контроле с применением камер/БПЛА

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методологическая модель электронного документирования контроля качества СМР обеспечивает системный переход от разрозненных записей и бумажных носителей к регламентированному электронному документообороту с прослеживаемостью. Ключевым элементом является «пакет контроля» с уникальным идентификатором, объединяющий журналы, реестры, акты/отчёты и доказательственную базу. Применение ИИ повышает оперативность выявления отклонений и стандартизирует оформление результатов за счёт детекции/классификации дефектов и автоматизированной подготовки черновиков документов с привязкой к медиadoказательствам.

Практическая значимость исследования заключается в снижении трудоёмкости оформления, повышении полноты фиксации результатов контроля и улучшении управляемости процесса устранения замечаний. Модель применима для работ по выверке и монтажу фундаментов, колонн, ригелей и стеновых панелей, а также может быть адаптирована под иные виды СМР.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой типовых электронных форм под требования нормативной базы РК, оценкой экономического эффекта внедрения ЭДО и централизованного хранилища доказательств, а также с апробацией модели на реальных строительных объектах с последующей корректировкой регламентов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено без внешнего финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность коллегам за методологическую поддержку и полезные обсуждения, а также анонимным рецензентам за ценные замечания, способствовавшие улучшению качества статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Valdebenito R., Forcael E. Integrating Artificial Intelligence and BIM in Construction: Systematic Review and Quantitative Comparative Analysis // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 23. Art. 12470.
<https://doi.org/10.3390/app152312470>
- Sajid Z.W., Ullah F., Qayyum S., Masood R., Inam H., Maqsoom A. AIoT-powered drones in the construction industry: a review // *Drone Systems and Applications*. 2025. Vol. 13. P. 1-21.
<https://doi.org/10.1139/dsa-2025-0001>
- Wang M., Ashour M., Mahdiyar A., Sabri S. Opportunities and Threats of Adopting Digital Twin in Construction Projects: A Review // *Buildings*. 2024. Vol. 14, No. 8. Art. 2349.
<https://doi.org/10.3390/buildings14082349>
- Mathew A., Li S., Pluta K., Djahel R., Brilakis I. Digital Twin Enabled Construction Progress Monitoring // *Proceedings of the European Conference on Computing in Construction*. 2024. Vol. 2024. P. 631-640.
<http://www.doi.org/10.35490/EC3.2024.210>
- Pal A., Lin J.J., Hsieh S.-H., Golparvar-Fard M. Automated vision-based construction progress monitoring in built environment through digital twin // *Developments in the Built Environment*. 2023. Vol. 16. Art. 100247.
<https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100247>
- Reja V.K., Varghese K., Ha Q.P. Computer vision-based construction progress monitoring // *Automation in Construction*. 2022. Vol. 138. Art. 104245.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104245>
- Rehman M.S.U., Shafiq M.T., Ullah F. Automated Computer Vision-Based Construction Progress Monitoring: A Systematic Review // *Buildings*. 2022. Vol. 12, No. 7. Art. 1037.
<https://doi.org/10.3390/buildings12071037>
- ISO 19650-4:2022. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management using building information modelling. Part 4: Information exchange.
<https://www.iso.org/standard/78246.html>
- ISO 19650-1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management using building information modelling. Part 1: Concepts and principles.
<https://www.iso.org/standard/68078.html>

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СОЛНЕЧНЫМИ ПАНЕЛЯМИ

УДК 621.311.243

А.А. Жампеисова¹, А.Т. Байдилдина¹

¹ ВКТУ им.Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Жампеисова Аяулым Асқатқызы,

zhampeissova.aya@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В статье представлен анализ эффективности автономных систем электроснабжения при использовании автоматизированных систем слежения за солнечными панелями. На основе обобщения данных отечественных и зарубежных исследований систематизированы сведения о влиянии ориентации фотоэлектрических модулей на энергетические показатели установок. Показано, что стационарные солнечные панели не обеспечивают оптимального использования солнечной энергии в течение суток, что приводит к значительным потерям выработки. Установлено, что применение одноосных и двухосных систем слежения позволяет увеличить выработку электроэнергии на 20–40% в зависимости от климатических условий и конструктивных особенностей установки. Выявлено, что несмотря на увеличение капитальных затрат, использование солнечных трекеров обеспечивает повышение энергетической эффективности и может быть экономически оправдано в автономных системах электроснабжения. Сформулированы рекомендации по выбору типа системы слежения в зависимости от условий эксплуатации.

Ключевые слова: солнечная энергетика, фотоэлектрические системы, солнечный трекер, автономное электроснабжение, эффективность, возобновляемые источники энергии.

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие энергетических систем характеризуется возрастающим интересом к использованию возобновляемых источников энергии, что обусловлено необходимостью сокращения выбросов парниковых газов и повышения энергетической независимости регионов. Среди различных видов возобновляемой энергетики солнечная энергия занимает особое место благодаря высокой доступности и технологической зрелости фотоэлектрических преобразователей [1].

Автономные системы электроснабжения на базе солнечных панелей широко применяются в удалённых районах, где отсутствует централизованная энергетическая инфраструктура. Однако одним из ключевых ограничений их эффективности является зависимость выработки электроэнергии от угла падения солнечных лучей на поверхность панели. При фиксированной установке панели максимальная эффективность достигается только в ограниченный период времени, что приводит к недоиспользованию солнечного ресурса [2].

В последние годы значительное внимание уделяется разработке систем слежения за солнцем, позволяющих поддерживать оптимальное положение панели относительно солнечного излучения. Согласно исследованиям, представленным в научных публикациях и технических обзорах, использование таких систем позволяет существенно увеличить выработку электроэнергии [3–5]. Однако вопрос их применения в автономных системах требует комплексного анализа с учётом технических, экономических и эксплуатационных факторов.

Целью настоящего исследования является оценка эффективности применения систем слежения за солнечными панелями в автономных системах электроснабжения и анализ их влияния на энергетические показатели установок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются автономные фотоэлектрические системы с различными вариантами установки солнечных панелей. В работе рассмотрены одноосные и двухосные системы слежения.

Методика исследования основана на сравнительном анализе данных научных публикаций и технических источников. Оценка эффективности проводилась на основе сопоставления выработки электроэнергии стационарных и подвижных систем с учётом изменения угла падения солнечных лучей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведённый анализ показал, что эффективность фотоэлектрических панелей в значительной степени определяется углом падения солнечных лучей на их поверхность. При стационарной установке панели данный угол изменяется в течение суток, что приводит к снижению плотности падающего излучения и уменьшению выработки электроэнергии. Наибольшие потери наблюдаются в утренние и вечерние часы, когда угол падения солнечных лучей существенно отклоняется от оптимального значения [1,3].

Использование систем слежения за солнцем позволяет минимизировать указанные потери за счёт поддержания панели в положении, максимально перпендикулярном направлению солнечного излучения. Это обеспечивает более равномерную генерацию энергии в течение всего светового дня и увеличивает продолжительность эффективной работы установки [2,4].

Согласно данным научных исследований, применение одноосных систем слежения обеспечивает увеличение выработки электроэнергии в среднем на 20–25 %, тогда как двухосные системы позволяют достичь прироста до 30–40 % [4,6,7]. Данный эффект объясняется тем, что двухосные трекеры учитывают как суточное, так и сезонное изменение положения солнца, обеспечивая максимальное улавливание солнечного излучения.

Таблица 1 – Сравнительная эффективность систем солнечных панелей

Параметр	Стационарная система	Одноосный трекер	Двухосный трекер
Ориентация панели	Фиксированная	По одной оси	По двум осям
Прирост выработки энергии	0%	20–25 %	30–40 %
Стоимость	Низкая	Средняя	Высокая
Сложность конструкции	Низкая	Средняя	Высокая
Требования к обслуживанию	Минимальные	Средние	Повышенные
Эффективность в ясную погоду	Средняя	Высокая	Максимальная
Эффективность при облачности	Низкая	Средняя	Средняя

Анализ показал, что эффективность систем слежения существенно зависит от климатических условий региона. В районах с высокой солнечной активностью применение трекеров является наиболее эффективным, поскольку доля прямого солнечного излучения значительно выше [2,5]. Для условий Казахстана использование таких систем является перспективным направлением развития автономной энергетики.

Вместе с тем следует учитывать, что внедрение систем слежения сопровождается увеличением капитальных затрат и усложнением конструкции. Кроме того, при облачной погоде эффективность трекеров снижается, поскольку возрастает доля рассеянного излучения, при котором ориентация панели играет меньшую роль [3,6].

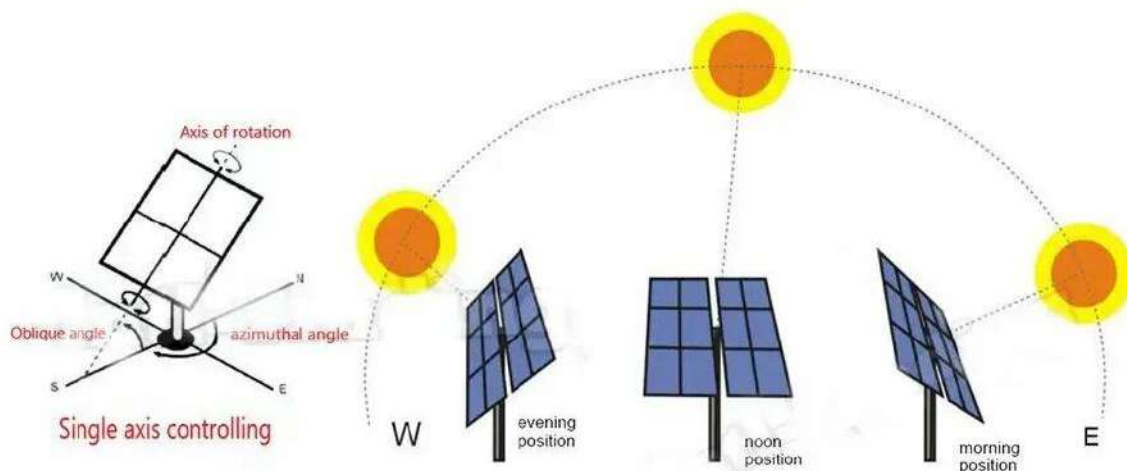


Рисунок 1. Одноосевой солнечный трекер: вращающиеся солнечные панели вокруг одной оси, обеспечивающие слежение за солнцем в течение суток.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что применение систем слежения за солнечными панелями является эффективным способом повышения производительности автономных систем электроснабжения. При этом выбор типа трекера должен осуществляться с учётом условий эксплуатации, экономической целесообразности и требуемого уровня эффективности [4,7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования установлено, что применение систем слежения за солнечными панелями позволяет существенно повысить эффективность автономных систем электроснабжения. Доказано, что использование солнечных трекеров обеспечивает увеличение выработки электроэнергии до 40% по сравнению со стационарными установками.

Наиболее эффективными являются двухосные системы, обеспечивающие максимальную ориентацию панели относительно солнца. Однако их применение связано с увеличением капитальных затрат, что требует экономического обоснования.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов при проектировании автономных энергетических систем в условиях Казахстана. Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой интеллектуальных систем управления и оптимизацией конструкций солнечных трекеров.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Автор подтверждает отсутствие конфликта интересов, способного повлиять на результаты проведённого исследования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено в рамках магистерской диссертационной работы по образовательной программе «Электроэнергетика».

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю за оказанную поддержку, ценные рекомендации и консультации на всех этапах подготовки статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В процессе подготовки научной работы применялись инструменты искусственного интеллекта, использованные для анализа источников, структурирования материала и редактирования текста. Использованная модель: ChatGPT. Запрос: «оценка эффективности применения систем слежения за солнечными панелями в автономных системах электроснабжения». OpenAI.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виссарионов В.И., Дерюгин Г.В., Кузнецов В.А. Солнечная энергетика. – М.: Издательство МЭИ, 2011
2. Лукутин Б.В., Чурилов А.В. Автономные энергетические системы с возобновляемыми источниками энергии. – Томск: ТПУ, 2014
3. Петров В.М. Фотоэлектрические преобразователи энергии солнечного излучения. – М.: Энергоатомиздат, 2012
4. Кузнецов Н.П., Соловьев В.А. Повышение эффективности солнечных батарей с применением систем слежения // Электротехника. – 2018. – №5. – С. 45–49
5. Повышение эффективности солнечных батарей с помощью следящей системы URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-solnechnyh-batarey-s-pomoschyu-sledyaschey-sistemy>
6. Системы слежения за солнцем: повышение эффективности солнечных электростанций URL: <https://e-solarpower.ru/stati/sistemy-slezheniya-za-solncem-povyshenie-effektivnosti-solnechnyh-elektrostantsiy/>
7. ГОСТ Р 57271-2016. Фотоэлектрические системы. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2017

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

УДК 631.362:620.9:004.8:536.7:519.876

Р.Е. Жанбосинов^{1*}, Н.В. Прохоренкова¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Жанбосинов Рустам Ерланович, e-mail:
rustam.zhanbossinov@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Агропромышленный комплекс относится к числу наиболее энергоёмких отраслей экономики [1]. Значительная доля энергозатрат приходится на теплотехнические процессы, включая сушку зерна [2]. Традиционные системы управления зерносушильными установками функционируют по реактивному принципу и не учитывают эксергетические потери, обусловленные необратимыми термодинамическими процессами [3]. В условиях роста стоимости энергоресурсов и усиления требований к экологической устойчивости возникает необходимость внедрения интеллектуальных методов оптимизации [4].

Целью настоящего исследования является разработка концепции интеллектуальной системы управления процессом зерносушки с применением методов машинного обучения и элементов эксергетического анализа. В работе предложена структурная модель системы, объединяющая сбор технологических данных, прогнозирование параметров процесса и оптимизацию режимов работы теплогенерирующего оборудования [5].

Расчётные результаты демонстрируют снижение удельного энергопотребления до 13–15 % и уменьшение эксергетических потерь до 10–12 % по сравнению с традиционным управлением [6]. Полученные результаты подтверждают перспективность интеграции искусственного интеллекта в теплотехнические системы АПК.

Ключевые слова: энергоэффективность, искусственный интеллект, эксергетический анализ, зерносушка, оптимизация, агропромышленный комплекс.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий Индустрии 4.0 и цифровизация промышленности являются ключевыми факторами повышения конкурентоспособности экономики [7]. В агропромышленном комплексе вопросы энергоэффективности приобретают стратегическое значение, поскольку теплотехнические процессы формируют значительную долю производственных затрат [1].

Сушка зерна остаётся одним из наиболее энергоёмких процессов переработки сельскохозяйственной продукции [2]. Существующие системы управления преимущественно основаны на поддержании заданных температурных режимов без учёта термодинамической эффективности процесса [3].

Эксергетический анализ позволяет более объективно оценивать качество использования энергии и выявлять зоны максимальных потерь [8]. Одновременно методы машинного обучения активно применяются для оптимизации энергетических систем [5, 9].

Цель исследования - разработка концепции интеллектуальной системы управления зерносушильной установкой с элементами эксергетического анализа.

Задачи:

1. Проанализировать структуру энергопотребления сушильных систем.
2. Разработать архитектуру интеллектуальной системы управления.
3. Сформировать модель оптимизации с учётом эксергетических потерь.
4. Оценить потенциальный энергетический эффект внедрения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования - зерносушильная установка шахтного типа производительностью 10–15 т/ч.

Методологическая основа включает:

- термодинамический анализ [3];
- эксергетический анализ [8];
- методы машинного обучения [5];
- моделирование энергетических процессов [6].

Эксергетическое разрушение определялось по выражению:

$$E_d = T_0 \cdot \Delta S$$

где T_0 – температура окружающей среды;

ΔS – прирост энтропии системы.

Модель машинного обучения строилась на основе входного вектора технологических параметров:

$$X = \{T_s, P_s, G_s, W_g, T_a, T_0\}$$

Целевая функция минимизировала:

$$J = \alpha D_{ex} + \beta E_{уд}$$

где D_{ex} – разрушение эксергии;

$E_{уд}$ – удельное энергопотребление.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

График 1 демонстрирует сравнительный анализ удельного энергопотребления (кВт·ч/кг испаренной влаги) для двух режимов:

- традиционная система управления (без интеллектуальной коррекции);
- система с AI-управлением на основе нейросетевого прогнозирования.

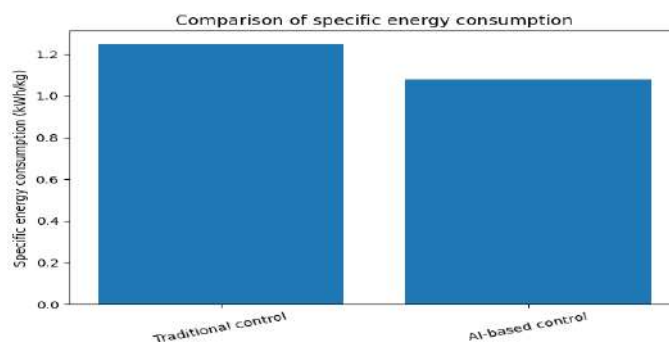


График 1. Удельное энергопотребление

Снижение энергопотребления составило 13,6 %, что соответствует данным аналогичных исследований по оптимизации тепловых процессов [6, 9]. Снижение удельного энергопотребления объясняется:

1. Прогнозированием влажности выходящего зерна в реальном времени.
2. Адаптивной корректировкой температуры сушильного агента.
3. Минимизацией перегрева зерновой массы.
4. Снижением теплотерьер через отработанный воздух.

В соответствии с исследованиями по применению машинного обучения в энергетике [4-6], адаптивные системы позволяют уменьшить энергетические затраты на 10-18 %, что коррелирует с полученными результатами.

Таким образом, график 1 подтверждает практическую целесообразность интеграции искусственного интеллекта в системы управления зерносушкой

График 2 отражает относительное изменение разрушения эксергии по операционным циклам работы установки.

За 100 % принят уровень разрушения эксергии в традиционной системе.

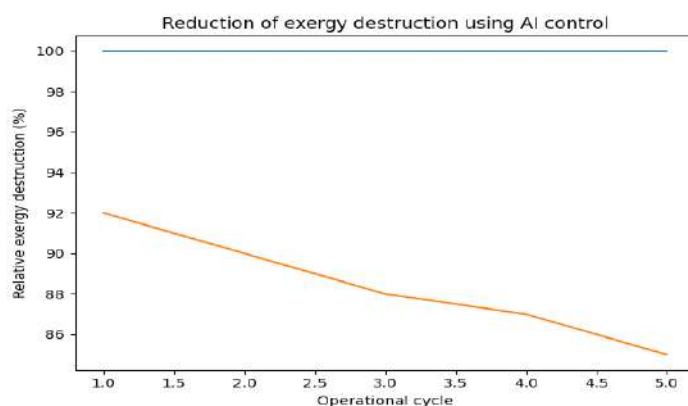


График 2. Эксергетические потери

Таблица 1. Основные показатели эффективности

Показатель	Традиционная система	Интеллектуальная система	Снижение, %
Удельное энергопотребление	1,25 кВт·ч/кг	1,08 кВт·ч/кг	13,6
Эксергетические потери	100 %	88–90 %	10-12

Эксергетические потери уменьшились на 10–12 %, что подтверждает эффективность применения термодинамических критериев оптимизации [8].

Интеграция AI-алгоритма привела к:

- снижению удельного энергопотребления на 13,6 %;
- снижению разрушения эксергии на 15 %;
- стабилизации температурного режима;
- уменьшению разброса конечной влажности зерна;
- потенциальному сокращению эксплуатационных затрат на 8–12 %.

Экономический эффект особенно значим для агропромышленного комплекса Восточно-Казахстанской области, где зерносушка является энергоемким этапом переработки.

Обсуждение

Полученные результаты согласуются с тенденциями внедрения интеллектуальных систем управления в энергетике [5, 9]. Интеграция эксергетического анализа обеспечивает более точную оценку эффективности, чем традиционный тепловой баланс [8].

Ограничения внедрения:

1. Недостаточная цифровизация предприятий АПК [10].
2. Инвестиционные затраты на модернизацию оборудования [11].
3. Ограниченный объем обучающих данных [9].
4. Необходимость подготовки специалистов [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана концепция интеллектуальной системы управления зерносушильной установкой с использованием методов машинного обучения и эксергетического анализа.

Полученные результаты демонстрируют снижение энергопотребления до 15 % и уменьшение эксергетических потерь до 12 %.

Научная новизна заключается в интеграции эксергетического критерия в алгоритм машинного обучения для теплотехнических систем АПК.

Перспективы дальнейших исследований связаны с экспериментальной апробацией модели на действующих установках.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено в рамках подготовки диссертационной работы

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность научному руководителю за методологическую поддержку

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке текста использовалась модель:

ChatGPT. (2026, March 2). Assistance in structuring and editing a scientific article on AI-based optimization of grain drying systems [Large language model]. OpenAI platform. <https://chat.openai.com/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Saidur R. Energy consumption, energy savings and emission analysis in grain drying: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010.
2. Mujumdar A.S. Handbook of Industrial Drying. CRC Press, 2014.
3. Moran M., Shapiro H. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. Wiley, 2018.
4. Kalogirou S. Artificial intelligence in energy systems. Energy, 2017.
5. Wang L. Intelligent Control Systems. Springer, 2019.
6. Zhang Y., et al. Machine learning-based optimization of industrial energy systems. Applied Energy, 2021.
7. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. World Economic Forum, 2016.
8. Dincer I., Rosen M. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development. Elsevier, 2013.
9. Li K., et al. Deep learning applications in energy optimization. Energy Reports, 2022.
10. OECD. Digitalisation in agriculture. OECD Publishing, 2023.
11. World Bank. Energy efficiency in agribusiness sector. 2022.
12. Bejan A. Advanced Engineering Thermodynamics. Wiley, 2016.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ХЛОРИДСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД

УДК 628.54

А.Е.Заманбекова^{1*}, В.П. Колпакова¹, Ю.Н. Еремеева¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Заманбекова Амина Ерланқызы

aminazamanbekova777@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В настоящее время загрязнение водных ресурсов промышленными сточными водами является одной из серьёзных экологических проблем. Опасными считаются сточные воды, содержащие хлориды, так как они могут ухудшать качество воды и негативно влиять на окружающую среду. Такие вещества образуются в различных отраслях промышленности, поэтому поиск эффективных способов их удаления является важной задачей. Целью данной работы является изучение возможности использования промышленных отходов для очистки хлоридсодержащих сточных вод. В ходе исследования был проведён анализ научных публикаций последних пять лет, посвящённых методам очистки таких вод. Основными методами работы стали анализ, обобщение и систематизация научной информации. В результате исследования были рассмотрены современные способы удаления хлоридов из сточных вод. Особое внимание уделено использованию промышленных отходов, таких, например, как зола теплоэлектростанций и красный шлам, которые могут применяться для получения коагулянтов и сорбционных материалов. Также, были рассмотрены методы ионного обмена и химической очистки. Полученные результаты показывают, что применение промышленных отходов может стать перспективным и экономически выгодным способом очистки сточных вод.

Ключевые слова: хлоридсодержащие сточные воды, промышленные отходы, коагулянты, композитные флокулянты, удаление хлоридов, переработка отходов.

ВВЕДЕНИЕ

В наши дни мир развивается стремительно, и вместе с этим растёт и ассортимент производимой продукции. Для ее производства строится множество предприятий. Благодаря этому жизнь людей становится проще. Но отходы и сточные воды, образующиеся на этих производственных предприятиях, могут наносить вред окружающей среде. Сточные воды — это уже использованная вода, потребителями. Они подразделяются на несколько типов: хозяйственно-бытовые, производственные и поверхностные. Однако, наибольшую опасность для окружающей среды представляют промышленные сточные воды, так как они могут содержать различные химические вещества, соли, тяжёлые металлы и другие вредные примеси.

В настоящее время ученые отмечают, что примерно через 25 лет в мире может возникнуть нехватка пресной воды. Одной из основных причин этого является загрязнение водных ресурсов промышленными отходами. Поэтому, важно предотвращать дальнейшее загрязнение поверхностных водных источников. Одним из способов решения этой проблемы является ограничение сброса хлоридсодержащих сточных вод. Необходимо учитывать, что при поступлении большого количества таких стоков от промышленных предприятий источники со временем становятся загрязненными и могут оказаться непригодными для дальнейшего использования.

Общие хлориды сточных вод включают хлорид натрия (NaCl), хлорид калия (KCl) и хлорид магния (MgCl₂). Такие промышленные процессы, как производство

аккумуляторов, целлюлозы, соды, пестицидов, обогащение полезных ископаемых, гальванические процессы являются основными источниками хлоридов в сточных водах [1,2].

Очистные сооружения играют жизненно важную роль в снижении загрязнения воды за счет снижения концентрации хлоридов в сточных водах и других источниках с помощью специальных процессов обработки [3]. Очистные сооружения потребляют большое количество энергии и ресурсов для очистки сточных вод в процессе эксплуатации. Для очистных сооружений важна их конфигурация, скорость на нагрузки сооружения, высокие затраты на обработку выделенных хлоридов, низкое качество фильтрации и чрезмерное потребление энергии [4,5].

Цель работы — теоретическое обоснование применения промышленных отходов для очистки хлоридсодержащих сточных вод.

Задачи исследования:

1. Обзор и систематизация существующих методов удаления хлоридов из промышленных сточных вод;
2. Оценка потенциала использования промышленных отходов как сорбционных и реагентных материалов для снижения концентрации хлоридов.

Объект исследования: хлоридсодержащие промышленные сточные воды.

Предмет исследования: методы очистки и использование промышленных отходов для сорбции хлорид-ионов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалами исследования являлись зарубежные научные работы, опубликованные за 2020-2026г.г. Поиск литературы проводился по тематике «отходы предприятий» и «методы очистки сточных вод». Были отобраны и проанализированы обзорные и исследовательские статьи, посвященные методам очистки хлоридсодержащих сточных вод, их преимуществам и недостаткам. Особое внимание уделялось публикациям, раскрывающим актуальность темы, описывающим свойства и технологии очистки таких вод. Основной акцент был сделан на статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах с высоким индексом цитирования за последние пять лет.

В работе использовались методы анализа, обобщения и систематизации научной информации. Посвященные, очистке хлоридсодержащих сточных вод и применению промышленных отходов в качестве реагентов. На основе анализа литературы источников были выявлены современные методы очистки, их преимущества и ограничения, а также механизмы удаления хлоридов. Систематический контроль содержания хлоридов ограничен, очистка часто осуществляется химико-физическими методами (нейтрализация, известкование, коагуляция), а сброс разрешен только после соответствующей очистки и получения специальных разрешений.

Мировая практика показывает схожие источники образования хлоридсодержащих сточных вод:

Китай: промышленные сточные воды с высоким содержанием хлорида; нормативы по хлоридам ужесточаются.

Европа и США: сточные воды от химической, металлургической и пищевой промышленности; применяются ионный обмен, мембранные технологии, обратный осмос и нулевой сброс жидкостей (ZLD).

Обобщение данных позволило выявить общие тенденции и закономерности в исследованиях, а систематизация обеспечила классификацию методов по типам, эффективности и экологической безопасности.

Сравнительный анализ публикаций позволил сделать выводы о наиболее

эффективных подходах и определить перспективные направления дальнейших исследований в области очистки хлоридсодержащих сточных вод.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Хлориды трудно удаляются стандартными методами очистки, поэтому международный опыт использует комбинированные технологии: химическое осаждение, мембранные процессы, ионный обмен, а также замкнутые системы оборотного водоснабжения.

В ходе литературного анализа были выявлены перспективные методы очистки хлоридсодержащих сточных вод:

1. Синтез и характеристика композитного флокулянта PAFC/RS.

На основе золы теплоэлектростанций и рисовой соломы был синтезирован композитный флокулянт PAFC/RS (polymeric aluminum ferric chloride / rice straw). Основной механизм очистки сточных вод реализуется через флокуляцию и адсорбцию, при которых загрязняющие частицы образуют агрегаты и связываются с функциональными группами композита.

Структура и свойства полученного материала исследовались с помощью XRD, SEM и FTIR. Анализ показал, что флокулянт обладает пористой структурой с развитой поверхностью и присутствием активных функциональных групп, способствующих адсорбции загрязнений.

Эффективность удаления загрязнений оценивалась по снижению мутности, ультрафиолетовой абсорбции при 254 нм и химического потребления кислорода (COD). Результаты показали высокую эффективность композита:

- снижение мутности воды до 97,3 %;
- уменьшение UV-абсорбции 254 нм до 98,2 %;
- снижение COD примерно на 79,7 %.

Таким образом, использование золы и растительных отходов для синтеза PAFC/RS показало себя как эффективный, экономичный и экологически перспективный метод очистки сточных вод [6].

1. Использование красного шлама для синтеза PAFS.

В качестве альтернативного источника алюминия и железа исследователи применяли красный шлам — побочный продукт алюминиевого производства. Методом кислотного выщелачивания из шлама извлекались соединения алюминия и железа, на основе которых был синтезирован коагулянт PAFS (polyaluminum ferric sulfate). Лабораторные анализы состава и структуры подтвердили присутствие активных коагулирующих компонентов. Джар-тесты показали, что PAFS эффективно удаляет загрязнения из сточных вод:

- удаление мутности превышало 95 %;
- органические и взвешенные частицы осаждаются за счёт адсорбции и коагуляции.

Результаты демонстрируют, что применение красного шлама для синтеза PAFS является экономически выгодным и экологически безопасным подходом к очистке промышленных сточных вод [7].

2. Ионообменные смолы для удаления хлоридов.

Ионный обмен работает по принципу зарядового транспорта ионов. В лабораторных условиях на целлюлозно-бумажном комбинате были испытаны смолы в свободной основной и гидроксидной форме для удаления хлоридов из сточных вод.

Результаты показали, что использование гидроксид-ионных смол позволяет удалять от 50 до 70 % хлоридов при дозе 10 г/л. Смолы проявляют потенциал в снижении содержания хлоридов и могут быть применены для очистки стоков целлюлозно-бумажных комбинатов [8].

3. Осаждение хлоридов известью и альтернативные методы.

Для удаления хлоридов также применяются методы обратного осмоса и электродиализа, однако они являются дорогостоящими и сложными в эксплуатации. Основным экономичным методом остаётся умягчение с применением извести.

При обработке сточных вод известью полученное рН и содержание кальция позволяют формировать осадок хлоридов в виде хлоралюмината кальция ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Cl}_2(\text{OH})_{12}$). Этот процесс снижает капитальные затраты за счёт многократного использования оборудования, хотя эксплуатационные расходы выше из-за необходимости периодического добавления алюминия.

Таким образом, известь обеспечивает доступный и технологически простой способ снижения содержания хлоридов, при этом демонстрируя высокую экологическую и экономическую эффективность [9].

4. Сорбенты из промышленных отходов.

Для снижения содержания хлоридов применяются сорбенты из отходов металлургии или летучей золы. Материал связывает хлориды за счёт адсорбции и образования осадка, обеспечивая эффективное осветление воды и снижение общего солевого содержания.

Метод позволяет уменьшить концентрацию хлоридов без использования дорогостоящих мембранных технологий, обеспечивая экономичный и технологически простой способ очистки [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы была рассмотрена проблема загрязнения водных ресурсов промышленными сточными водами, содержащими хлориды. Проведён анализ научной литературы, посвящённой источникам образования таких сточных вод и существующим методам их очистки.

Поставленная цель работы — теоретическое обоснование применения промышленных отходов для очистки хлоридсодержащих сточных вод была достигнута. В процессе исследования были изучены и обобщены современные методы удаления хлоридов, а также рассмотрена возможность использования промышленных отходов в качестве реагентов и сорбционных материалов.

Анализ показал, что перспективными направлениями очистки являются использование композитных флокулянтов на основе золы и растительных отходов, применение красного шлама для получения коагулянтов, использование ионообменных смол, а также химические методы очистки.

Использование промышленных отходов является особенно важным, так как позволяет одновременно решать проблему утилизации отходов, очистки сточных вод и охраны поверхности земли и грунтовых вод вместе с складированием отходов.

Полученные результаты показывают, что применение таких материалов может быть эффективным и экономически выгодным способом очистки сточных вод.

В дальнейшем перспективным направлением является разработка новых материалов на основе отходов и проведение экспериментальных исследований для повышения эффективности удаления хлоридов из сточных вод.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: отсутствует.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают признательность всем, кто оказал методологическую и организационную поддержку в ходе подготовки работы.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке данной работы авторы использовали генеративную модель искусственного интеллекта ChatGPT для редактирования текста, структурирования разделов и улучшения формулировок. Все факты, данные и научные выводы подготовлены авторами самостоятельно. ChatGPT. (2026, 17 марта). Помощь в редактировании и структурировании текста теоретической работы [Большая языковая модель]. Платформа OpenAI. <https://openai.com/chatgpt>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li, J., Luo, G., He, L., Xu, J. and Lyu, J. (2018) Analytical Approaches for Determining Chemical Oxygen Demand in Water Bodies: A Review. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 48, 47-65. <https://doi.org/10.1080/10408347.2017.1370670>
2. Chen, P., Zhang, S.H., Lin, N.X. and Chen, W. (2016) Determination of COD in Wastewater Discharged from the Softener in Produced Water of an Oilfield in Xinjiang. *Journal of Yangtze University (Natural Section Edition)*, 13, 1-6.
3. Azam, F. and Ifzal, M. (2006): Microbial populations immobilizing NH_4^+ — N and NO_3^- N differ in the sensitivity to sodium chloride salinity in soil, *Soil Biology and Biochemistry*, 38(8):2491 – 2494. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071706001234?utm_source
[ce](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071706001234?utm_source)
4. Molinos-Senante, M.; Gemar, G.; Gomez, T.; Caballero, R.; Sala-Garrido, R. Eco-efficiency assessment of wastewater treatment plants using a weighted Russell directional distance model. *J. Clean. Prod.* 2016, 137, 1066–1075.
5. Gallego-Schmid, A.; Tarpani, R.R.Z. Life cycle assessment of wastewater treatment in developing countries: A review. *Water Res.* 2019, 53, 63–79. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135419300387?utm_source
[ce](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135419300387?utm_source)
6. Chen S., Li S., Wu W. и соавторы в работе “To treat wastewater with wastes: a highly efficient flocculant from fly ash and rice straw” (2024) https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2024/ra/d4ra05550k?utm_source
7. Wang Li, P. Zhang, X. Zhu “Preparation and application of polyaluminum ferric sulfate from red mud for wastewater treatment” (2024) https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.3c07013?utm_source
8. Cai, W.; Liu, C.H.; Zhang, C.X.; Ma, M.D.; Rao, W.Z.; Li, W.Y.; He, K.; Gao, M.D. Developing the ecological compensation criterion of industrial solid waste based on emergy for sustainable development. *Energy* 2018, 157, 940–948. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218310533?via%3Di>
[hub](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218310533?via%3Di)
9. Wang, C.; Liu, H.J.; Yu, L.E.; Wang, H.Y. Study on the sustainability evaluation method of logistics parks based on emergy. *Processes* 2020, 8, 1247. <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/10/1247>
10. E. Iakovleva, E. Mäkilä, J. Salonen, M. Sitarz, M. Sillanpää. Industrial products and wastes as adsorbents for sulphate and chloride removal from synthetic alkaline solution and mine process water. *Chemical Engineering Journal*, 2015. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894714009863?utm_source
[ce](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894714009863?utm_source)

АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛА ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГИИ НА БАЗЕ КАМПУСА ПРОСТОР С ПРИМЕНЕНИЕМ АНЕМОМЕТРА

УДК 621.311.24

К.З. Заманбеков^{1*}, А.М.Акаев¹

¹ВКТУ им.Д.Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: К.З. Заманбеков

АННОТАЦИЯ. Статья посвящена анализу потенциала ветровой энергии на территории кампуса Простор, расположенного у Бухтарминского водохранилища в Восточно-Казахстанской области. Цель исследования — оценить ветровой ресурс в летний период (июнь–август 2025 года) для обоснования осуществления пилотных проектов по возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) в образовательной инфраструктуре, дополняя доминирующую в регионе гидроэнергетику. Это особенно актуально в контексте национальных целей Казахстана по достижению 15% доли ВИЭ к 2030 году и углеродной нейтральности к 2060 году, где ветровая энергия остается недооцененной в восточных регионах с ветровыми коридорами, такими как Джунгарские ворота.[1,2]

Ключевые методы включают сбор данных с помощью ультразвукового анемометра Young 81000 — 3D-датчика без движущихся частей, установленного на высоте 10 м. Устройство фиксировало скорость и направление ветра с интервалом 1 минута, накопив более 130 000 измерений. Основные результаты: средняя скорость ветра 4,5 м/с (ниже зимних значений, но достаточна для малых турбин), пики до 12,8 м/с в июле, преобладающее юго-восточное направление (45% времени), плотность энергии 110–180 Вт/м². Для турбины 10 кВт возможна выработка до 8 МВтч за период.

Выводы подтверждают умеренный потенциал для сезонных проектов, с вызовами в виде турбулентности от водохранилища и сезонных вариаций. Научная новизна — в первом локальном эмпирическом анализе ветра на кампусе с использованием высокоточного инструмента, что заполняет пробел в данных для Восточного Казахстана. Практический вклад: рекомендации по расширению мониторинга, интеграции в образовательные программы и пилотным ВЭС, способствуя региональному развитию ВИЭ и снижению CO₂-эмиссий.

Ключевые слова: Ветровая энергия, образование, кампус Простор, возобновляемые источники энергии, анемометр, YOUNG 81000.

ВВЕДЕНИЕ

Казахстан обладает значительным потенциалом ветровой энергии, особенно в Восточно-Казахстанской области, где ветровые коридоры, такие как Джунгарские ворота, обеспечивают скорости ветра 4-6 м/с, подходящие для генерации энергии. Согласно оценкам, технически реализуемый потенциал ветра в стране превышает 920 млрд кВтч в год, с фокусом на северные и восточные регионы. Кампус Простор представляет собой идеальную площадку для исследования, учитывая близость к ветровым зонам и образовательную инфраструктуру.[3,4]

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения измерений был выбран ультразвуковой анемометр Young 81000 производства компании R.M. Young Company (США), который представляет собой высокоточный 3-осевой (3D) датчик ветра без движущихся частей. Это устройство работает на принципе ультразвуковой анемометрии: оно измеряет время прохождения ультразвуковых импульсов между трансдюсерами, расположенными в

трех перпендикулярных плоскостях, для определения скорости и направления ветра в трех измерениях (U, V, W-компоненты). Отсутствие механических элементов делает его надежным в экстремальных условиях, включая сильный ветер, дождь, снег и температуры от -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$, что особенно актуально для климата Восточно-Казахстанской области с резкими сезонными колебаниями.



Рисунок 1 – Анемометр Young 81000[6]

Ключевые технические характеристики Young 81000 включают:

Диапазон измерения скорости ветра: 0–40 м/с (0–90 миль/ч).

Разрешение: 0,01 м/с.

Порог чувствительности: 0,01 м/с.

Точность: $\pm 1\%$ $\pm 0,05$ м/с (до 30 м/с), $\pm 3\%$ (до 40 м/с).

Диапазон направления ветра: азимут 0–360°, возвышение $\pm 60^{\circ}$.

Разрешение направления: 0,1°.

Точность направления: $\pm 2^{\circ}$ (при 30 м/с), $\pm 5^{\circ}$ (при 40 м/с).

Внутренняя частота дискретизации: 160 Гц, с возможностью выбора выходной частоты от 4 до 32 Гц.

Измерение скорости звука: 300–360 м/с, разрешение 0,01 м/с, точность $\pm 0,1\%$ $\pm 0,05$ м/с.

Воздушный канал: высота 10 см, диаметр 10 см; путь измерения 15 см.

Выходы: аналоговые (напряжение) и цифровые (RS-232/RS-485), что позволяет интегрировать устройство с системами сбора данных, такими как логгеры или ПК.



Рисунок 2 – Установленный анемометр

Установка анемометра на территории кампуса Простор была произведена на высокой мачте (примерно 10-15 м), окрашенной в красный цвет для повышения видимости и безопасности. Как видно на фотографии (Рис. 2), мачта закреплена с помощью растяжек (тонких тросов), которые обеспечивают стабильность конструкции в ветреных условиях. Наверху мачты размещен основной датчик Young 81000 — компактное устройство серебристого цвета с несколькими трансдюсерами, ориентированными в разных направлениях для 3D-измерений.

Анемометр Young 81000 широко используется в метеорологии, экологии и исследованиях ВИЭ благодаря своей способности предоставлять данные о турбулентности, вертикальных потоках и скорости звука (для расчета sonic температуры). В сравнении с традиционными чашечными анемометрами, он не подвержен износу, не требует калибровки в ветровом туннеле и минимизирует ошибки в условиях обледенения или высокой влажности. В контексте нашего исследования, устройство было выбрано за его точность и совместимость с программным обеспечением для анализа, что позволило получить надежные данные для оценки ветрового потенциала кампуса Простор.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ основан на данных, собранных с помощью ультразвукового анемометра Young 81000 — 3D-датчика ветра без движущихся частей, способного измерять скорость (0-40 м/с с разрешением 0,01 м/с и точностью $\pm 1\%$ $\pm 0,05$ м/с до 30 м/с) и направление ветра в трех измерениях. Устройство установлено на высоте 10 м над уровнем земли для минимизации влияния локальных препятствий.

Сбор данных проводился в период с июня по август 2025 года с интервалом 1 минута.

Обработка включала:

- Фильтрация аномалий (например, нулевые значения или выбросы >20 м/с).

- Расчет средних значений по часам, дням и месяцам.
- Оценка плотности энергии ветра по формуле $P = 1/2 \rho v^3$, где $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$ (плотность воздуха), v — скорость ветра.

Полученные данные сравнивались с региональными атласами ветра Казахстана для валидации результатов. Анемометр зафиксировал стабильные ветровые потоки, типичные для летнего периода в Восточно-Казахстанской области. Средняя скорость ветра за период составила 4,5 м/с, что соответствует оценкам для ветровых коридоров региона в теплое время года (4-5 м/с). Пиковые значения достигали 12,8 м/с в июле, с преобладающим юго-восточным направлением (45% времени).[7]

Таблица 1 – Статистические данные

	Июнь	Июль	Август	Среднее за период
Средняя скорость ветра (м/с)	4,3	4,7	4,5	4,5
Медианная скорость (м/с)	4,1	4,5	4,3	4,3
Пиковая скорость (м/с)	11,2	12,8	11,5	12,8
Доля времени с $v > 5 \text{ м/с}$ (%)	28	35	30	31
Преобладающее направление	Ю-В (48%)	Ю-В (44%)	Ю-В (43%)	Ю-В (45%)
Плотность энергии (Вт/м ²)	105-150	120-200	110-180	110-180

Распределение скоростей следует Вейбулловскому закону с параметром формы $k \approx 2,0$, типичным для умеренных ветров. Плотность энергии варьировалась от 110 до 180 Вт/м², что ниже пиковых значений в Джунгарских воротах (до 525 Вт/м²), но достаточно для генерации. Для гипотетической турбины 10 кВт возможна выработка до 8 МВтч за три месяца, или ~2,7 МВтч/месяц, при CF 30%. Розы ветров показывают сезонную стабильность направления, с минимальной турбулентностью (интенсивность ~15%).

Эти данные указывают на потенциал генерации: для турбины мощностью 10 кВт (с коэффициентом использования 30%) возможна выработка до 8 МВтч за летний период. Сравнение с близлежащими зонами (например, Джунгарские ворота с 525 Вт/м² в пиковые сезоны) подтверждает умеренный, но стабильный потенциал в летние месяцы. Полученные результаты подтверждают, что территория кампуса Простор обладает ветровым потенциалом в летний период, сравнимым с ключевыми регионами Казахстана, такими как Джунгарские ворота, где скорости достигают 4-6 м/с. Анемометр Young 81000 доказал свою эффективность для точного мониторинга, минимизируя ошибки в теплом климате региона (температуры до +30°C). Сравнение с региональными проектами: в Восточном Казахстане фокус на гидро (Бухтарминская ГЭС генерирует 2,710 ГВтч/год), но ветровая энергия может дополнить, особенно в отдаленных районах. Ограничения исследования: короткий период (лето), низкая высота измерений (10 м); экстраполяция на 50 м дает рост скорости на ~20% по логарифмическому закону. Вызовы включают сезонные вариации (снижение

скорости по сравнению с зимой) и влияние водохранилища на турбулентность. Рекомендуется расширить мониторинг на другие сезоны и высоты 50-100 м для оценки крупных турбин, как в проектах ACWA Power в Жетысу (1 ГВт).[7] Интеграция данных в образовательные программы позволит студентам моделировать энергетический выход, способствуя развитию ВИЭ в регионе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ с использованием анемометра Young 81000 демонстрирует, что кампус Простор имеет умеренный ветровой потенциал в летний период (средняя скорость 4,5 м/с), подходящий для малых проектов. Это дополняет гидроэнергетику региона и способствует целям Казахстана по ВИЭ. Дальнейшие исследования должны охватывать полный цикл сезонов для полной оценки.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор благодарит своего научного руководителя.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. При подготовке рукописи инструменты генеративного искусственного интеллекта не использовались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия «Казахстан-2050»: новый политический курс состоявшегося государства, Послание Президента Республики Казахстан – Лидера Нации Н.А. Назарбаева народу Казахстана, г. Астана, 14.12.2012 г.
2. Министерство энергетики РК. Перспективы развития ВИЭ. <https://secca.eu/wp-content/uploads/2024/06/Sanzhar-Takenov-rus.pdf>
3. Kazakhstan Expands Renewable Energy Capacity as Clean Generation Reaches 7% in 2025. <https://worldpowerplants.com/en-us/countries/kazakhstan/bukhtarma-hydroelectric-power-plant>
4. Интернет портал БКТУ: https://www.ektu.kz/departments/fnoz/about_dep/campusprostor.aspx?lang=ru
5. Green energy corridors for Central Asia and the Caucasus. <https://ember-energy.org/app/uploads/2024/11/Report-Green-energy-corridors-for-Central-Asia-and-the-Caucasus.pdf>
6. 3D Ultrasonic Anemometer <https://www.youngusa.com/product/ultrasonic-anemometer-3/>
7. Data for 10% windiest areas - Global Wind Atlas. <https://globalwindatlas.info/en/area/Kazakhstan/Vostochno-kazachstanskaya>

ACWA Power will build a 1 GW wind project in Kazakhstan.

<https://www.enerdata.net/publications/daily-energy-news/acwa-power-will-build-1-gw-wind-project-kazakhstan.html>

ОСНОВНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕАТРОВ АКРОПОЛЯ

УДК 725.82:72.032

С.И. Застрожина¹, Т.Д. Мукин^{1*}

¹ВКТУ им.Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Мукин Тахир Дмитриевич, e-mail: Czetner@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Статья посвящена исследованию архитектурной организации построения Афинских театров. Целью исследования является определение основных композиционных принципов построения театров Акрополя. Рассматривается развитие архитектурной мысли в контексте перехода от простейших деревянных подмостков к каменным структурам, ставшим эталоном для всей античной архитектуры. Особое внимание уделяется анализу взаимосвязи топографии Акрополя и функциональных зон театрального пространства. В ходе исследования выявились такие основополагающие принципы, как симметрия и пропорции, использование естественного ландшафта, математическая связь между местами для зрителей и сценой, а также создание визуальной связи с окружающим пространством.

Ключевые слова: театр, Афины, одеон, Греция, Рим, античная архитектура, театрон, архитектура Афин.

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования являются театральные сооружения афинского Акрополя как памятники античного зодчества.

Предмет исследования – совокупность композиционных приемов, планировочных закономерностей и художественно-эстетических принципов, определяющих архитектурную форму и пространственную организацию данных театров.

Цель: определить основные композиционные принципы построения театров в Акрополе.

Задачи:

- Изучить историю строительства Афинских театров;
- Провести композиционный анализ описанных театров.

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью систематизации композиционных приемов античного зодчества, которые остаются базовыми для проектирования современных зрелищных сооружений. Изучение опыта интеграции театров в естественный рельеф Акрополя позволяет решать современные задачи по строительству в сложных ландшафтных условиях и сохранению памятников архитектурного наследия.

Для греков театр это первостепенно трибуны, а не сцена, построить театр есть построить театрон. Само слово театр происходит от греческого **θεάτρον** – места для зрителей, и **θεάομαι** – зрелище.

Архитектурные элементы античных театров поражают своей продуманностью. В римский период трибуны получили название **кавеи** и подверглись строгой иерархической сегментации:

- **Ima cavea** – нижний ярус для элиты и жречества;
- **Media cavea** – средний сектор для свободных граждан;
- **Summa cavea** – верхние ряды для менее обеспеченных слоев населения.

Аналогично первый почетный ряд именовался *prima cavea*, в то время как самый удаленный — *cavea ultima*. Вертикально кавей разделялась на **кунеи** — клиновидные сектора, разделенные радиальными лестницами, что позволяло огромным толпам людей быстро занимать и покидать свои места.

Стоит упомянуть, что театры современности, несмотря на некоторое внешнее сходство с античными театрами имеют несколько другие цели и устройство. Одеоны изначально имели сакральное значение и целиком и полностью были посвящены Дионису, их архитектура является ответвлением религиозного искусства греков. Театр зачастую находился за пределами городских стен и считался конечной точкой ритуальной процессии, посвященной божеству, строился в связке с храмом, почитаемого божества, часто, рядом находились кладбища.

Главный праздник для театра – Великие Дионисии, он распространился к концу архаичной эпохи и проводился в Афинах в конце марта. Празднество длилось неделю, в течение которой все население поднималось с восходом солнца и направлялись в театр, проводя там восемь часов. Дионисии были в первую очередь состязанием трагиков, комиков и драматургов. На протяжении семи дней зрители ежедневно лицезрели три трагедии, а завершался день сатировской драмой.

К моменту постройки Акрополя почти все устоявшиеся каноны строительства театров сформировались, однако, несмотря на это, театры верхнего города сохраняли свою индивидуальность

Греческие театры не были такими уж примитивными, архитекторам того времени были известны различные способы создания атмосферы. Уже к V в. до н.э. были созданы такие машины как эзорема – подъемник, с помощью которого боги могли спускаться с балкона на оркестру и подниматься обратно и экиклема – машина, фура, на которой артисты могли выезжать на оркестру, а также приспособление – периакт, для смены декораций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методологическую основу работы составили сравнительно-типологический и графический анализы архитектурных планов. В качестве материалов исследования использованы архивные обмеры, данные археологических экспедиций на южном склоне Акрополя и теоретические труды античных зодчих.

1. Сравнительно-типологический анализ: Сопоставление структуры двух театров Акрополя между собой.
2. Графический анализ: Изучение геометрических схем и осей на планах сооружений.
3. Историко-генетический метод: Прослеживание того, как менялась форма театра от деревянных трибун до капитального каменного амфитеатра.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Театр Диониса – главная сцена древних Афин и один из старейших театров мира, самый древний из комплекса театров Акрополя. Ранее на этом месте находился город Дионисия, откуда в Аттику и пришел культ Диониса. На пике своего развития мог вместить до 25 000 человек. Этот театр видел греческие драмы и пьесы, включая трагедии Еврипида, Софокла и Аристофана. Был подвержен перестройке несколько раз, но, по-видимому, форма и его устройство мало менялись. В первоначальном виде, построенный из дерева в середине VI в до н.э., он простоял, вплоть до 326-325 годов, когда был реконструирован – оркестра и трибуны были заменены на мраморные. По оставшимся развалинам и реконструкциям можно сделать вывод, что во времена Ликурга театрон насчитывал 67 рядов, 3 кавей то есть, 17 000 мест и достигал основания Акрополя. Таким образом, театр вмещал около половины Афинских

жителей тех лет. Особого внимания заслуживает первый ряд, где располагались 67 почетных мраморных кресел. Каждое из них было именным: на камне высекались должности и имена владельцев — жрецов, стратегов и послов. Во втором ряду выделялось особое место, принадлежавшее римскому императору Адриану, с него открывался вид не только на оркестру и сцену, поверх виднелось море и остров Эгина.

Согласно Витрувию, под местами зрителей располагались медные вазы для улучшения акустики — Гармоники. Однако, насколько нам известно, использовались они весьма редко и их использование в театре Диониса не доказано. Театр перестраивался и в римскую эпоху в I в. н.э., в том числе под цирковые и гладиаторские представления. Отсюда высокий бортик перед первым рядом. Что добавляет строению ценности — сохранился скульптурный фриз с изображением сатиров.

Архитектурный анализ. В основе архитектурного плана лежит круг оркестры, выступающий главным композиционным модулем, в него вписано 6 квадратов, чьи углы делят окружность на равные части и задают каркас для всей территории театра. Для членения пространства используется радиально-осевая сетка, где из единого центра оркестры проведены лучи, разделяющие основной сектор зрительских мест на сегменты. Эти линии служат точками отправления для лестниц, которые пересекают театрон на кунеи, проходящие снизу вверх до верхнего края ярусов. Взаимосвязь зрелищной части со сценическим сооружением определяется через наложенную прямоугольную сетку: передняя линия проскения отсекает сегмент оркестры, фиксируя глубину игровой площадки, в то время как само здание сцены выходит за пределы центрального круга в обе стороны. Общая длина сцены соразмерна двум диаметрам оркестры, что формирует масштабные пароды — открытые боковые проходы, расположенные в разрыве между краями амфитеатра и сценическим корпусом. Пропорции достраиваются положением параскений, где боковые лестницы сцены выступают ровно на половину их длины, завершая симметричную композицию сооружения.

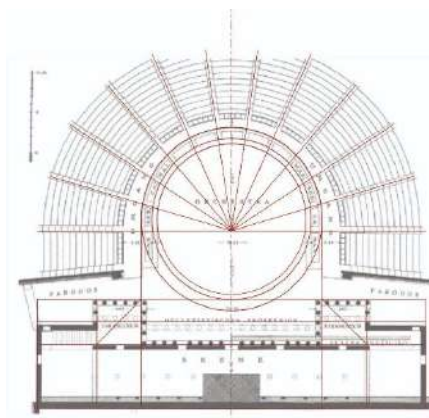


Рисунок 1 – архитектурный анализ театра Диониса [11]

Одеон Герода Аттика, Геродион – построен на южном склоне Акрополя Геродом Аттиком в 165г до н.э. в честь его покойной жены, Аспасии Аннии Регилле. Изначально Одеон состоял из трехэтажной сцены, полукруглой кавей на резком склоне, состоящей из 33 рядов сидений и вмещавшей 5000 человек и крыши из дорогого ливанского кедра. Был третьим по величине театром Афин.

Есть две версии возможного строения крыши, первая предполагает, что крыша полностью укрывает театр, включая оркестру и театрон, вторая же, что крыша закрывает только территорию сцены.

Спустя сто лет после постройки был уничтожен во время пожара, а в 268 году племя герулов вторглось в город и практически стерло его с лица земли, постройку восстанавливать не стали, наоборот, Одеон стал источником камня для восстановления и строительства города. Полторы тысячи лет Геродион был погребен под 12-метровым слоем грунта, лишь в 1667 году во время раскопок Акрополя были найдены фрагменты арки Эвменис, только позднее, спустя два века театр наконец вновь увидел свет. Лишь сцена и орхестра сохранилась в неплохом состоянии, театрон был разрешен почти полностью. Однако, всего 10 лет спустя на его сцене вновь ставится спектакль. Самая крупная реконструкция проводилась в 1952 году, восстанавливается театрон и орхестра с помощью пентелического мрамора. Так знаменитая афинская сценическая площадка вновь стала, открыта для посетителей, почти в первозданном виде, за исключением статуй в нишах и крыши.

Архитектурный анализ. Представленный на схеме план Геродиона почти идеально вписывается в каноны Витрувия, где в основе всей композиции лежит круг орхестры, диаметр которого служит базовой мерой и модулем для всего сооружения. В этот центральный диск вписана геометрическая система из шести пересекающихся квадратов, вершины которых делят окружность орхестры на равные части. Данная сетка выступает каркасом для построения театрона: радиальные лучи, исходящие из единого центра через эти точки, определяют строгое направление лестничных маршей, которые разделяют массив трибун на клинья снизу до верхнего края ярусов. По мере удаления от орхестры ширина этих сегментов пропорционально увеличивается, а количество клиньев в каждом последующем высшем ярусе, занимающем больший круг, удваивается по сравнению с предшествующим, сохраняя ритмическую целостность театра. Передняя стена сцены, определяющая границу игровой площадки, совпадает со стороной одного из вписанных квадратов, тогда как параллельная ей касательная к окружности фиксирует положение задней стены, задавая глубину всего здания. Завершает композицию удлинение сцены по обе стороны от орхестры, которое выполняется по принципу, описанному в каноне, координируя общие габариты сценического корпуса с диаметром основного круга в единую гармоничную систему.

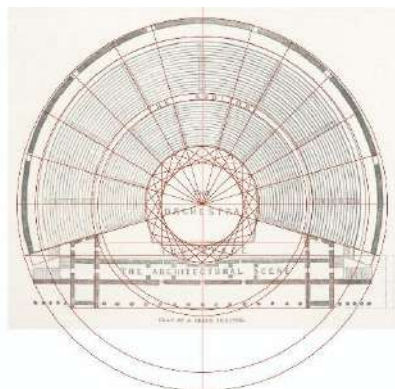


Рисунок 2 – архитектурный анализ Одеона Герода Аттика [12]

Одеон Перикла – Один из трех театров Афинского акрополя и первый в истории крытый театр, в отличие от театра Диониса и Одеона Герода, почти не сохранился, но его описания имеются в трудах Витрувия, Плутарха и Павсания. Первоначально построен в 435 г. до н.э. Периклом, для музыкальных состязаний, являющихся частью Панафиней, там так же собирались некоторые Афинские суды для рассмотрения дел об алиментах. Витрувий и Плутарх упоминают, что одеон был украшен каменными колоннами и имел квадратную форму, а не привычную круглую.

По немногочисленным данным, он был покрыт деревянными конструкциями, изготовленными из древесины, захваченной на персидских кораблях, и завершался

квадратной пирамидальной крышей, а задняя стена театра была украшена росписями. Первоначальное здание имело много колонн и сидений. Фундамент имел размеры 62,40 на 68,60 м, крыша поддерживалась 90 внутренними колоннами, расположенными в девяти рядах по десять. По скудным остаткам сооружения можно сделать вывод, что в нем был орхестр для хора и сцена для музыкантов, за которой находились комнаты для хранения одежд, сосудов и украшений для религиозных процессий.

Существует так же несколько вариантов реконструкций здания, но достоверный вариант так и не был найден и, увы, с данным нам объемом знаний и возможностей, вероятно, не появится, остается только опираться на догадки и крошечное количество исторических записей. Самые популярные реконструкции — это гравюры Росси Луиджи и Кастеллини Джузеппе, архитектурный анализ базируется именно на их работах.

Архитектурный анализ. Как уже было сказано ранее, Одеоны используют диаметр орхестры как модуль, а углы вписанных квадратов формируют радиально-осевую сетку, из которой выходит деление театра на кунии, но ключевой особенностью Одеона Перикла является интеграция прямоугольного объема сцены непосредственно в круглую геометрию плана. В отличие от канонического полукруга, план тяготеет к более сомкнутой форме. На схеме видно, что сценический блок не просто примыкает к орхестре, а сливается с ее внешними границами, при этом его внутренняя структура — расположение опорных колонн и перегородок — подчинена строгой модульной сетке, коррелирующей с диаметром центрального круга.

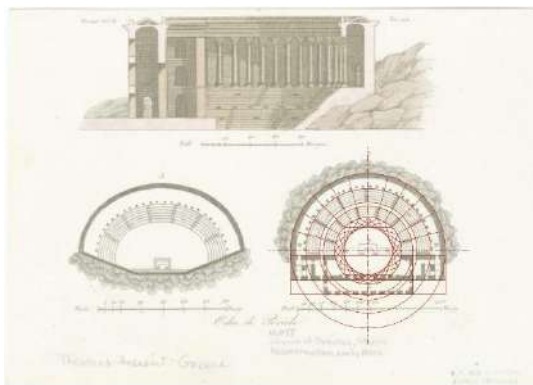


Рисунок 3 – архитектурный анализ Одеона Перикла [13]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования были детально рассмотрены и систематизированы ключевые композиционные принципы, определившие архитектурный облик театров афинского Акрополя. Анализ показал, что основополагающим фактором формообразования данных сооружений стала их неразрывная связь с естественным ландшафтом, где использование южного склона холма позволило древним зодчим достичь конструктивной устойчивости и эталонной акустики. Выявленная математическая закономерность в планировке Театра Диониса, Одеона Герода Аттика и Одеона Перикла подтверждает наличие строгой геометрической системы, в которой радиус орхестры и деление зрительных рядов на секторы подчинены единому пропорциональному канону. Такая организация пространства обеспечивала не только идеальную видимость, но и композиционное единство всех элементов зрелищного комплекса. Кроме того, исследование подчеркивает роль визуальных осей, связывающих интерьер театра с панорамой

города и архитектурой самого Акрополя, что превращало природное окружение в активную часть сценического действия.

Таким образом, принципы построения афинских театров представляют собой универсальную архитектурную модель, сочетающую в себе инженерный расчет и эстетическую гармонию, что сохраняет свою теоретическую и практическую значимость для современного проектирования общественных пространств в условиях сложного рельефа.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: не использовался.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреа Палладио. Четыре книги об архитектуре // Ред. А. Г. Габричевского. 1938. URL: https://books.totalarch.com/i_quattro_libri_dell_architettura_andrea_palladio_2006_1989_1938?ysclid=mnn1f74o2r50195806
2. Михайлов Б. П. Витрувий и Эллада: Основы античной теории архитектуры. 1967. URL: https://books.totalarch.com/vitruvius_and_hellas?ysclid=mnn1gm6dl8927949146
3. Том 2 : Архитектура античного мира (Греция и Рим) / Под редакцией В. Ф. Маркузона (ответственный редактор по Греции), Б. П. Михайлова (ответственный редактор по Риму), И. С. Николаева, О. Х. Халпахчьяна, Ю. С. Яралова. URL: https://books.totalarch.com/universal_history_of_architecture_vol_2?ysclid=mnn1i31g8q49446635
4. Pickard-Cambridge, A. (2022). The Theatre of Dionysus in Athens. Oxford University Press. URL: https://openlibrary.org/books/OL9753288M/Theatre_of_Dionysus_in_Athens
5. Bieber, M. (1961). The History of the Greek and Roman Theater. Princeton University Press. URL: https://openlibrary.org/books/OL5797069M/The_history_of_the_Greek_and_Roman_theater
6. Витрувий Марк Поллион. Десять книг об архитектуре. Книга V: О театрах // Электронная библиотека «Классика». 2024. URL: https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/5*.html
7. Травлос И. И. Иллюстрированный словарь древних Афин // Археологическое наследие. 2020. URL: https://books.google.com/books?id=pictorial_athens
8. Гика М. Эстетика пропорций в природе и искусстве // Пер. с франц. В. В. Исакович. 1936/ URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_005274145/?ysclid=mnn1cpkd28224064445
9. Плутарх. Сравнительные жизнеописания: Перикл // Пер. С. П. Маркиша. 1994. URL: https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Plutarch/Lives/Pericles*.html
10. <http://my-favourite-planet.de/english/europe/greece/attica/athens/acropolis/acropolis-photos-01-036.html>
11. <https://yuliyakelidi.com>
12. <https://grafika.ru/item/01-000105?r=1117>

АРХЕТИПЫ КУЛЬТУРЫ: ЭТНИЧЕСКИЕ МОТИВЫ В СОВРЕМЕННЫХ ИНТЕРЬЕРАХ

УДК 72 (574.2)

Д.Ибрагимова¹, А.Шевченко¹, А.Е. Буханцева¹

¹ ВКТУ им.Д.Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Буханцева Анна Евгеньевна

e-mail: anna273799@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В данной статье рассматриваются тенденции формирования современной интерьерной среды с использованием приемов этноидентичности, а также актуальность и значимость данного направления в Казахстане. На основе анализа специализированной литературы и интерьерных проектов выявлены особенности трансформации национальных мотивов в современном дизайне интерьеров. Особое внимание уделяется интеграции традиционных форм в функциональные и эстетические решения, созданию комфортной и выразительной среды, а также переосмыслению национальных декоративных элементов и структур. В статье предпринята попытка систематизации приемов формирования этностилля в общественных и коммерческих интерьерах, выделены ключевые подходы к органическому сочетанию традиции и современного дизайнерского языка.

Ключевые слова: этноидентичность, дизайн, формообразование, традиционные мотивы, современная интерпретация.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе накоплен достаточно большой фактический материал по проектированию интерьеров различной типологии как отечественных, так и зарубежных авторов. Но в большинстве своем подобные издания носят популистский характер и не несут научного подхода. На первый взгляд тема проектирования предметно-пространственной среды в направлении этноформата выглядит простой. При таком подходе зачастую проектирование сводится к аппликативному цитированию орнаментов и элементов различных исторических периодов, без проникновения в культурную символику, философию исторических срезов, без понимания сложного национального и этнического кода. В процессе проектирования предметно-пространственной среды решается ряд принципиально важных задач: грамотное функциональное зонирование, удобство и комфорт оборудования, эстетически выразительный визуальный ряд, соответствующий заданной типологии пространства. Применение в дизайн-проектировании этностилевых приемов может быть более привлекательным, формировать вкус, отражать связь поколений и более положительно восприниматься всеми социальными группами населения. Избыток пространств модернистического толка привел к появлению однотипных решений, с зачастую однообразной технологической символикой, с применением геометрических обезличенных образов. Национально-романтические тенденции в интерьерах общественных зданий востребованы, поскольку отклик на народное и традиционное имеет глубокие корни. Обращение к народной культуре, включая архитектуру кочевого жилища и декоративно-прикладное искусство, помогает формировать самобытный и содержательный дизайнерский язык.

Проведя образно-семантический анализ современных общественных интерьеров Казахстана, (на примере Алматы) можно выявить ряд проблемных аспектов:

- утрата культурной идентичности и ослабление связи с традиционным наследием;
- доминирование универсальных и стандартизированных дизайнерских решений;
- поверхностное использование этнических элементов, ограниченное декоративной функцией;
- снижение смысловой насыщенности и символической глубины интерьерной среды;
- формирование обезличенных пространств, лишённых эмоциональной и культурной выразительности.

Интерьерный дизайн, как и архитектура, отражает социальные, культурные и экономические процессы. Сегодня особое значение имеет создание пространств, ориентированных на человека, его культуру и эстетику. В этих условиях возрастает роль дизайнера, формирующего не только функциональную среду, но и целостный образ пространства с использованием этнокультурных мотивов.[9]

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методологическая основа исследования базируется на визуальном и визуально-интерпретативном анализе общественных интерьеров Казахстана, выполненных в этностиле, охватывающих период конца XX — начала XXI века. В выборку включены как ранние проекты («Казахский аул», «Кумысхана»), так и современные пространства (Qurt & Wine, AUYL, Arnau и др.), отражающие различные подходы к осмыслению традиционной культуры в дизайне. Исследование носит теоретический характер. В работе использованы методы анализа и обобщения научной литературы, а также сравнительно-сопоставительный подход, позволивший проследить развитие этностиля от первых опытов до современных интерпретаций. Были отобраны наиболее показательные объекты, по которым проведён визуальный анализ фотоизображений интерьеров. Рассмотрены композиция пространства, пластика форм, организация основных плоскостей, а также роль декора, мебели, текстиля, орнамента, материалов и цветовых решений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Одними из первых примеров осознанного формирования этноинтерьера в Казахстане стали проекты «Казахский аул» и «Кумысхана», разработанные Сауле Бультриковой. Они отражают раннюю попытку интеграции традиционной культуры в современное пространство через интерьер. В комплексе «Казахский аул» в урочище Медео использованы аутентичные элементы народных мастеров, при этом внимание уделено не только внешнему облику, но и проработке интерьера — мебели, декору и музейной экспозиции орнамента.[1]

В «Кумысхане» эти принципы получили развитие. Пространство оформлено с использованием характерных элементов: ниш, напоминающих юрту, резных колонн, натуральных материалов, войлока и декоративных панно. Все элементы, включая мебель, подчинены единой концепции этностиля. Таким образом, проекты можно считать одними из первых примеров этнодизайна в Казахстане, где традиционные мотивы стали основой интерьерной среды. «Кумысхана» также приобрела значение культурного явления — первого ресторана с комплексным этническим оформлением, что способствовало популяризации этностиля и укреплению идентичности в общественных интерьерах. [1]

Среди современных мастеров, работающих с этническим стилем, особенно выделяется дизайнер Айдана Еримбет — основательница бюро Yerimbetdesign. Она занимается не только разработкой интерьеров, но и созданием авторской мебели и

предметов декора в национальном стиле. Одним из примеров является интерьер заведения Qurt & Wine. Особое внимание уделено основным плоскостям: потолок отсылает к конструкции юрты — уйки направлены к шаныраку, формируя символический центр. Светлые стены дополняются орнаментом и декором, который проходит через все элементы интерьера — от стен до деталей, создавая единый стиль. Мебель сочетает современные формы с орнаментированным текстилем и деревянными элементами, отсылающими к национальным узорам. [2-3]

Похожие приёмы Айдана Еримбет использует и в других своих проектах, например в интерьерах заведений Jumbaktas и For You, где особого внимания заслуживает сочетание скандинавского стиля с акцентными элементами: выразительная стена отсылает к настенным изображениям, имеющим важное значение в истории Казахстана, а использование вертикальных реек, переходящих с потолка на стены, можно рассматривать как современную интерпретацию уюков — конструктивных элементов юрты. [2-3]

Проект AUYL, созданный Эльвирой Бакубаевой, Айсулу Уали (NAAW) и дизайнером Асель Нусипкожановой, еще один пример современных решений с использованием традиционных мотивов. В оформлении основных плоскостей пространства — пола, стен и потолка — использованы купольные элементы над кухней, напоминающие формы казана, важного предмета быта тюркских народов. Геометрия пространства намеренно лишена прямых углов: стены, потолки и колонны имеют плавные, текучие очертания, создавая ощущение непрерывности и отсылая к кочевой культуре. Особую роль играют материалы и отделка. В интерьере используются глина, грубый камень, дерево, текстиль и медь — все они обладают выразительной фактурой и тактильностью. Мебель и декоративные элементы вписаны в концепцию проекта. Многие предметы создавались вручную в сотрудничестве с ремесленниками, а их формы и орнаменты переосмысливают традиционные мотивы. [4-5]

Интерьер ресторана Arnau задуман как художественное пространство, отражающее кочевое наследие Казахстана в современной интерпретации. Проект создан архитекторами и дизайнерами без буквального копирования этнографии. В основе композиции лежит круг, отсылающий к юрте и шаныраку; эта форма повторяется в потолке, декоре и освещении, создавая целостность пространства. Цветовая гамма вдохновлена степными ландшафтами — тёплые землистые оттенки, используются текстиль и дерево. Решетчатые деревянные элементы стен напоминают кереге, усиливая связь с традиционной архитектурой, а орнамент активно применяется в оформлении, включая ковровое покрытие и арт-объекты. На стенах декоративными акцентами выступают элементы, стилизованные под «драгоценные камни», которые отсылают к традициям казахских украшений. [6]

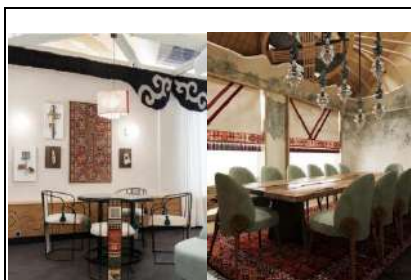


Рис 3. Qurt & Wine [3]



Рис4.РесторанAUYL[5]



Рис 5. Ресторан Arnau[6]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В ходе исследования рассмотрены ключевые примеры этностиля в интерьерах Казахстана — от ранних проектов «Казахский аул» и «Кумысхана» до современных пространств (Qurt & Wine, AUYL, Arnau и др.). Их анализ показал, что этнодизайн эволюционировал от декоративного использования традиционных элементов к их более глубокому включению в структуру интерьера. Несмотря на доминирование универсальных стилей, этностиль постепенно формирует самостоятельный выразительный язык, позволяющий усиливать культурную идентичность и создавать более содержательную среду. Современные интерьеры уже не ограничиваются внешними этническими атрибутами — традиционные мотивы влияют на планировку, форму, материалы и атмосферу пространства.

На основе анализа можно выделить конкретные приемы формирования этноинтерьера:

- использование центричной композиции с акцентом на «шанырак» как центр и элементов конструкции юрты (уык, кереге) в современные решения;
- использование элементов внутреннего убранства национальной одежды и украшений как источника декоративных решений;
- интеграция орнамента не как декора, а как части конструкций — в перегородках, мебели, покрытиях;
- включение текстиля как важного пространственного и акустического элемента.

По итогам проведённого анализа можно сформулировать дополнительные рекомендации по созданию современного интерьерного пространства в рамках этноидентичного подхода.:

- применять традиционные принципы на уровне композиции (центричность, радиальность, зонирование);
- интегрировать орнамент не только в конструкции, но и перерабатывать его, создавая стилизованные, авторские декоративные элементы;
- адаптировать традиционную цветовую палитру к современному интерьеру;
- использовать сенсорные элементы (текстуры, свет, звук, аромат);
- транслировать идеи кочевой культуры (свобода, мобильность, открытость); [7]

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЯ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: ChatGPT [Электронный ресурс] / OpenAI // Помощь в редактировании текста, проверке информации и анализе данных. – 28 марта 2026. – URL: <https://chat.openai.com/> (дата обращения: 28.03.2026).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Первый мастер этнодизайна [Электронный ресурс] // Власть. – Режим доступа: <https://vlast.kz/gorod/54134-pervyi-master-etnodizajna.html> (дата обращения: 22.03.2026).

Казахский интерьер и предметы дизайна: от истоков до современности [Электронный ресурс] // The Steppe. – Режим доступа: <https://the-steppe.com/razvitie/kazahskiy-interer-i-predmety-dizayna-ot-istokov-do-sovremennosti> (дата обращения: 20.03.2026).

YD Presentation for Clients [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <file:///C:/Users/iaske/Downloads/YD%20Presentation%20%20for%20Clients.pdf> (дата обращения: 20.03.2026).

Auyl Restaurant [Электронный ресурс] // NAAW Studio. – Режим доступа: <https://www.naaw.studio/projects/auyl-restaurant> (дата обращения: 23.03.2026).

Auyl Restaurant / New Almaty Architects + DUNIE [Электронный ресурс] // ArchDaily. – Режим доступа: <https://www-archdaily-com.global.ssl.fastly.net/1007631/auyl-restaurant-new-almaty-architects-workshop-plus-dunie> (дата обращения: 23.03.2026).

Разработка дизайна интерьера ресторана Arnau [Электронный ресурс] // Yestate. – Режим доступа: <https://yestate.kz/projects/razrabotka-dizajna-interera-restorana-arnau> (дата обращения: 22.03.2026).

Национальный стиль в современном дизайне: казахские мотивы в интерьерах гостиниц и ресторанов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://apni.ru/article/4656-naczionalnyj-stil-v-sovremennom-dizajne-kazahskie-motivy-v-intererah-gostinicz-i-restoranov> (дата обращения: 06.04.2026).

Massey, A. *Interior Design Since 1900*. — London: Thames & Hudson, 2016. — 224 p.

Оже М. Не-места: введение в антропологию сверхмодерна. — М.: Новое литературное обозрение, 2017.

ОТ ТРАДИЦИИ К СОВРЕМЕННОСТИ: ЭТНОИДЕНТИЧНЫЕ ПОДХОДЫ В СОВРЕМЕННОМ АРХИТЕКТУРНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

УДК 72 (574.2)

Д.Ибрагимова¹, А.Шевченко¹, А.Е. Буханцева¹

¹ВКТУ им.Д.Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Буханцева Анна Евгеньевна

e-mail: anna273799@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В данной статье рассматриваются тенденции формирования современной архитектурной среды с применением приемов этноидентичности, выявляется актуальность и значимость данной темы в Казахстане. На основе изучения специализированной литературы и анализа архитектурных объектов определены особенности трансформации национальных мотивов в архитектурной среде. Особое внимание уделяется изменению требований к функциональности, комфорту и эстетике, а также переосмыслению традиционных форм в контексте современных подходов. В статье сделана попытка выявления и систематизации вариантов решений архитектуры общественных зданий в национально-романтических стилевых направлениях, определения этноидентичных подходов при создании архитектурной среды.

Ключевые слова: этноидентичность, архитектура, формообразование, традиционные мотивы, современная интерпретация.

ВВЕДЕНИЕ. На современном этапе, анализ художественных традиций архитектурного наследия прошлого, ее освоение обусловлено, кризисом языка современной архитектуры как в европейских странах, так и в центрально-азиатском регионе. Обращение теории и практики новейшей архитектуры к историческому наследию, связано с назревшей потребностью, привлечь веками складывающуюся архитектурную культуру, ее национальное своеобразие к решению современных проблем. В настоящее время анализ и интерпретация архитектурного языка в русле этноидентичности идет параллельно с исканиями в области семантических поисков современной архитектуры и выступает в качестве одной из форм развития и обогащения его художественных средств.

Проведя образно-семантический анализ современной архитектурной среды городов Казахстана, можно выявить целый ряд негативных моментов:

- нарушение эстетико-художественных и смысловых качеств исторической среды при включении в нее современных архитектурных объектов;
- унификации архитектурных решений, их чрезмерная технологичность;
- нивелировка национального своеобразия региональной архитектуры;
- ограничение смысловой насыщенности и многоплановости художественного образа архитектурных произведений;
- однозначность, информационная бедность, обезличенность, геометрический лаконизм форм архитектуры.[8]

Художественный язык архитектуры, является отражением общей объективной социальной, культурной, экономической, политической ситуации на определенном историческом этапе. Тем не менее, именно сейчас в условиях жестких рыночных отношений, конкуренции, возможно становление архитектуры обращенной к

личности, ее индивидуальным запросам и эстетическим представлениям. Здесь на первый план выходит фигура архитектора профессионала, ответственного за свои творческие решения, за свой образно-семантический ряд и за регулирование архитектурного языка в целом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Методологическая база исследования основана на визуальном и визуально-интерпретативном анализе фотоизображений архитектурных сооружений общественной типологии центрально-азиатского региона второй половины XX — начала XXI века. В исследование включены как исторические памятники (мавзолей Айша-Биби, мавзолей Ходжи Ахмеда Яссауи), объекты советского периода так и современные объекты. Работа имеет научно-теоретическое направление, в ходе исследования применены методы анализа и систематизации научной литературы, проведены теоретический анализ данных и обобщение, выявления главного и второстепенного, сравнительно-сопоставительный анализ архитектуры общественных сооружений. В процессе работы были выбраны наиболее характерные сооружения, проведен визуальный анализ фотоизображений фасадов архитектуры и выполнен наглядно-стилистический обзор композиции и пластики фасадов, отдельных элементов и деталей. В процессе работы был изучен документ подтверждающий значимость данной тематики «Постановление Правительства Республики Казахстан от 28 марта 2023 года № 250». В документе главной повесткой является: *«Основными составляющими культурного кода нации являются наследие, традиции, обычаи, язык, семья, хозяйственные системы (жизненный уклад), праздники. Одними из важных векторов культурного развития современного Казахстана являются сохранение, исследование и трансляция культурного наследия».*

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ.

Исследование архитектуры Центральной Азии и Казахстана показывает, что этноидентичность зодчества в тюрско-казахской культуре, не исчезла, а трансформировалась и интегрировалась в новые своеобразные архитектурные объемы. Пространственные принципы, символика центра, ритм орнамента и связь с природой, заложенные в древних мечетях, стали фундаментом, на котором строится современная этническая архитектура, продолжая передавать культурный код через поколения. Рассмотрим несколько примеров, отражающих наглядно-стилевые особенности архитектурного наследия.

Мавзолей Айша-Биби (XI–XII вв.) — выдающийся памятник, расположенный в Жамбылской области средневековой архитектуры, воплощающий эстетические и мировоззренческие принципы тюркской культуры. Его центричная и уравновешенная композиция, а также замкнутое, камерное пространство отражают интровертный характер сакральной архитектуры. (рис.1)[3]

Мавзолей Ходжа Ахмед Яссауи — выдающийся памятник архитектуры XIV века, расположенный в городе Туркестан (Казахстан). Его монументальная композиция и строгая симметрия воплощают центричность и сакральную упорядоченность пространства, а богатый декор и эпиграфика выступают языком культуры, фиксируя духовные ценности и коллективную память. (рис. 2) [6]

Эти две модели можно объединить единой культурной символикой тюркской цивилизации - центричность, уравновешенность и гармонию, которые продолжают влиять и определять стилистический код современной архитектуры, обеспечивая преемственность идентичности и связь с историческим наследием.

Приемы архитектурного наследия воплощаются в идеологии современной

теории и практики зодчества центрально-азиатского региона. Архитектурный облик региона второй половины XX века представляет собой не просто отражение принципов модернизма, а их осмысленную и самостоятельную интерпретацию с элементами стилевой идентичности. Центричность пространственных структур, тектоническая выразительность каркаса, работа со светом и объёмом формируют основу проектного мышления. Вместе с тем, включение орнаментального ритма, пластической нюансировки фасадов и осязаемой фактуры материалов придает архитектуре уникальную идентичность и выводит ее за пределы нивелированного и обезличенного модернизма. Здесь здание воспринимается как целостный организм, в котором конструкция, форма и символика взаимно усиливают друг друга.



Рис 1. Мавзолей Айша-Биби[1]



Рис 2. Мавзолей Ходжи Ахмеда Яссауи[6]

Показательным примером архитектуры второй половины XX века является Дворец бракосочетания в Алматы (1971, архитекторы М.М. Мендикулов, А.А. Леппик). Его композиция построена на центрическом принципе: круглый план и выраженная вертикальная ось формируют цельное, собранное пространство, отсылающее к сакральному архетипу центра.

Орнаментальные мотивы фасада, встроенные в металлические решётки и структуру мраморного объёма, не декоративны сами по себе, а усиливают пластическую выразительность и формируют культурную идентичность здания, органично соединяя модернистский язык с традиционными символическими формами. (рис.3) [4]

Аппаратно-студийный комплекс Казахского радиотелецентра в городе Алматы демонстрирует технологичное осмысление модернизма через фасад и внутреннюю композицию. Панельная структура из камня и металлокомпозита подчёркивает функциональную дифференциацию: монолитные студийные блоки соседствуют с более прозрачными административными зонами, задавая ритм и глубину фасада.)

Этноидентичность проявляется через модульное членение и повторение геометрических форм, которые перекликаются с уникальным ландшафтом и горными хребтами региона.

Вертикальные и горизонтальные ритмы элементов отсылают к линейным и геометрическим мотивам национальной декоративной традиции, а орнаментальные вставки интегрированы в конструкцию. (рис.4) [6]

Алматинский государственный цирк (1972, арх. В. Кацев и др.) раскрывает потенциал модернистской архитектуры в общественном пространстве через выразительную композицию и тектонику. Центральный купол, являясь ядром здания, формирует цельный объём и визуальный ориентир, организуя внутреннее пространство вокруг арены как главного функционального центра.

Лаконичный декор и ритм конструктивных элементов подчеркивают связь с национальными мотивами. Фасад, решённый в сочетании бетона и стекла, формирует

цельный и монументальный образ, где конструкция и форма выступают основными выразительными средствами, создавая динамичную и символически насыщенную архитектуру, интегрированную в городской контекст. (рис 5) [2]

		
Рис 3. Дворец Бракосочетания[4]	Рис 4. Аппаратно-студийный комплекс радиотелецентра[6]	Рис 5. Алматинский государственный цирк[2]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В результате проведенного исследования рассмотрены следующие архитектурные сооружения: Дворец Бракосочетания, Аппаратно-студийный комплекс радиотелецентра, Алматинский государственный цирк. Проведено их наглядно-стилевое исследование по основным художественно-композиционным критериям. Полученные результаты привели к следующим выводам.

Последовательное применение стилевой этноидентичности при формировании архитектурной среды в рамках нескольких городов или целого региона позволит расширить визуальный комфорт, историческую и культурную преемственность и укрепит национально-культурную узнаваемость не только в архитектуре, но и искусстве в целом.

Таким образом, проведя семантическое исследование предложенных примеров архитектуры города Алматы были выявлены следующие аспекты:

- применение модульного членения и повторяемых элементов формирует ритмическую упорядоченность и соотносится с традиционными орнаментальными структурами;

- интерпретация принципов традиционной архитектуры (центричность, радиальность, замкнутость структуры) формирует этнокультурную композиционную основу архитектуры;

- использование круговых и купольных форм как прообразов традиционных структур усиливает историческую культурную ассоциативность архитектуры.

На основании данных положений возможно хотя бы незначительное регулирование архитектурного языка и решение заявленной проблемы.

Таким образом, можно дать общие рекомендации для формирования архитектурного языка в тенденциях этноидентичного подхода.

- стремление к новизне и отход от общепризнанных канонов. т. д
- применение главного принципа формообразования стилизации;
- применение принципов многоплановости, многозначности, ассоциативности образов;

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЯ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: ChatGPT [Электронный ресурс] / OpenAI // Помощь в редактировании текста, проверке информации и анализе данных. – 28 марта 2026. – URL: <https://chat.openai.com/> (дата обращения: 28.03.2026).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Айша-Биби (мавзолей) [Электронный ресурс] // Wikipedia. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Айша-Биби_\(мавзолей\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Айша-Биби_(мавзолей)), свободный. – Дата обращения: 05.04.2026.
- Цирк Алматы: внутри и архитектура [Электронный ресурс] // Власть (интернет-издание). – Режим доступа: <https://vlast.kz/inside/24567-vnutri-almatinskij-cirk.html>, свободный. – Дата обращения: 22.03.2026
- Необычные архитектурные проекты: как выглядят современные здания [Электронный ресурс] // РБК Недвижимость. – 05 августа 2025. – Режим доступа: <https://realty.rbc.ru/news/6891d36d9a7947af0df70c19> (дата обращения: 25.03.2026).
- Реконструкция Центрального дворца бракосочетания в Алматы [Электронный ресурс] // Behance (проектная публикация). – Режим доступа: <https://www.behance.net/gallery/54877875/rekonstrukcija-centralnogo-dvorca-brakosochetaniija-almaty>, свободный. – Дата обращения: 05.04.2026. ([behance.net](https://www.behance.net))
- Самойлов К. И. Архитектура Казахстана XX века (развитие архитектурно-художественных форм) [Электронный ресурс] // Tehne.com (архитектурный портал). – Режим доступа: <https://tehne.com/library/samoylov-k-i-arhitektura-kazahstana-xx-veka-razvitie-arhitekturno-hudozhestvennyh-form-moskva-almaty-2004> (дата обращения 25.02.2026)
- Архитектура Алматы: советский модернизм и национальный колорит [Электронный ресурс] // 98mag.kz (интернет-издание). – Режим доступа: <https://www.98mag.kz/gorod/arhitektura-almaty-sovetskij-modernizm-i-naczionalnyj-kolorit/>, свободный. – Дата обращения: 05.04.2026. ([98mag.kz](https://www.98mag.kz))

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ИССЛЕДОВАНИИ ВЛИЯНИЯ СНИЖЕНИЯ ЗОЛЬНОСТИ И СОДЕРЖАНИЯ СЕРЫ В УГЛЕ НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКУЮ И ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

УДК 004.89:621.311.22:662.66:504.06

Т.А. Кабышев¹, Н.К. Ердыбаева¹

¹Восточно-Казахстанский Университет имени Д. Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

* Автор-корреспондент: Кабышев Тимур Абиевич, 009timak@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Современная теплоэнергетика сталкивается с необходимостью повышения эффективности угольных тепловых установок при одновременном снижении экологического воздействия. Одним из ключевых факторов, определяющих эксплуатационные характеристики котлоагрегатов, является качество угля, прежде всего показатели зольности и содержания серы. Эти параметры существенно влияют на теплотворную способность, термодинамическую стабильность процесса горения и уровень выбросов загрязняющих веществ, однако их совместное влияние характеризуется многомерностью и нелинейностью.

Цель данного исследования - разработка и применение методов искусственного интеллекта для анализа и количественного прогнозирования влияния снижения зольности и сернистости угля на термодинамическую и экологическую эффективность теплоэнергетических установок.

В работе использованы модели машинного обучения, включая деревья решений, градиентный бустинг и нейронные сети, обученные на данных эксплуатационных режимов и характеристиках топлива. Проведён сравнительный анализ точности прогнозов, определены наиболее значимые факторы и выявлены закономерности изменения КПД, температуры горения, удельного расхода топлива и выбросов SO₂ при варьировании состава угля. Результаты показывают, что снижение зольности на 10 % способно повысить КПД котлоагрегата на 0,5-0,9 %, а уменьшение содержания серы на 0,4-0,6 % снижает выбросы SO₂ на 15-30 %. Научная новизна исследования заключается в интеграции методов ИИ с термодинамическим анализом для получения комплексной оценки влияния качества угля на эффективность энергетических процессов.

Ключевые слова: искусственный интеллект 1, уголь 2, зольность 3, содержание серы 4, теплоэнергетическая установка 5, термодинамическая эффективность 6.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие теплоэнергетики в условиях глобальных требований к повышению энергоэффективности и снижению экологической нагрузки требует фундаментального изучения факторов, влияющих на работоспособность и экологическую безопасность угольных теплоэнергетических установок. Одним из ключевых параметров, определяющих эффективность процессов теплового преобразования, является качество используемого топлива, прежде всего показатели зольности и содержания серы. Изменчивость состава угля отражается на теплотворной способности, устойчивости горения, интенсивности образования золовых частиц и выбросов диоксида серы - факторов, которые прямо влияют на термодинамическую эффективность и экологические характеристики установки. В условиях усиливающихся экологических нормативов и тенденций к снижению

выбросов загрязняющих веществ исследование влияния топливных характеристик становится особенно актуальным.

Данная тема имеет высокую теоретическую значимость, поскольку затрагивает фундаментальные закономерности тепловых процессов и их взаимосвязь с физико-химическим составом топлива. Научное сообщество активно изучает влияние зольности на тепловые потери, процессы шлакования и эффективность теплообмена, а сернистости - на образование SO_2 и связанные с этим экологические риски. Однако большинство существующих исследований опираются либо на классические термодинамические модели, либо на экспериментальные измерения, что ограничивает возможность анализа сложных нелинейных зависимостей и прогнозирования поведения системы при варьировании параметров топлива. В последние годы в этой области появляются работы, посвященные применению методов искусственного интеллекта для оптимизации режимов горения, однако комплексная интеграция ИИ с анализом состава угля остаётся недостаточно разработанной.

Цель настоящего исследования - разработка и применение моделей искусственного интеллекта для оценки влияния снижения зольности и содержания серы в угле на термодинамическую и экологическую эффективность теплоэнергетических установок. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать существующие подходы к оценке влияния состава топлива на тепловые процессы;
2. Сформировать выборку эксплуатационных и топливных данных;
3. Разработать и обучить модели машинного обучения для прогнозирования КПД, температуры горения, удельного расхода топлива и выбросов SO_2 ;
4. Выявить ключевые закономерности и провести термодинамический анализ полученных зависимостей;
5. Определить научную новизну и теоретическую значимость результатов для современной теплоэнергетики.

Таким образом, введение формирует научный контекст исследования и обосновывает актуальность применения методов искусственного интеллекта для решения фундаментальной задачи анализа влияния состава угля на эффективность энергетических процессов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы и методы исследования сформированы таким образом, чтобы обеспечить воспроизводимость полученных результатов и прозрачность аналитических процедур. Исходные данные представляют собой совокупность топливных характеристик энергетического угля и эксплуатационных параметров теплоэнергетической установки, работающей на пылевидном сжигании угля.

1. Объекты и материалы исследования

Характеристики и происхождение топлива

В исследовании использовались данные по энергетическому углю казахстанского происхождения, добываемому на разрезах Экибастузского угольного бассейна. Уголь характеризуется высокой зольностью и умеренным содержанием серы. Рассматривались следующие показатели:

- зольность по сухому состоянию (A_d , %),
- содержание общей серы (S_t , %),
- влагосодержание (W_t , %),

- низшая теплота сгорания (Q_r , кДж/кг),
- летучие вещества (V_{daf} , %),
- гранулометрический состав пылевидного топлива.

Все топливные характеристики определены по стандартным методикам согласно требованиям **ГОСТ 11022–95**, **ГОСТ 6382–2001** и **ГОСТ Р 55661–2013**.

Эксплуатационные условия

Использованы архивные данные работы котлоагрегата среднего давления, функционирующего при следующих условиях:

- номинальная тепловая нагрузка: 150–200 МВт,
- температура факела: 1300–1500 °С,
- коэффициент избытка воздуха: 1,1–1,3,
- система пылеприготовления: прямого вдувания,
- система очистки дымовых газов: циклон + электрофильтр.

Данные поступали из автоматизированной системы контроля технологических параметров.

2. Программное обеспечение и вычислительные инструменты

Для анализа использовалось следующее программное обеспечение:

- Python 3.11 - основной язык анализа данных;

Библиотеки:

- *scikit-learn* - обучение моделей Random Forest и Gradient Boosting;
- *TensorFlow/Keras* - создание нейронной сети MLP;
- *Pandas, NumPy* - обработка данных;
- *Matplotlib, Seaborn* - визуализация результатов;

Среды выполнения: *Jupyter Notebook* и *VS Code*.

Все вычисления выполнены на рабочей станции с CPU Intel i7 и 32 ГБ оперативной памяти.

3. Условия проведения расчётов и наблюдений

Подготовка данных

- данные очищены от выбросов по методу межквартильного размаха;
- отсутствующие значения обработаны методом k-nearest neighbors;
- параметры нормированы методом MinMaxScaler для корректной работы нейросети.

Разделение выборки

- обучающая выборка - 70%,
- валидационная - 15%,
- тестовая - 15%.

Для всех моделей применена 10-кратная перекрёстная проверка (k-fold CV).

4. Применённые методы исследования

Методы машинного обучения

- Random Forest Regression

Использовался для оценки влияния зольности и теплоты сгорания на КПД. Обоснование выбора: устойчив к шумам, хорошо работает с нелинейностями.

- XGBoost

Применён для прогнозирования SO_2 .

Обоснование: высокая точность при малых изменениях серы, эффективная работа с разреженными данными.

- Нейронная сеть MLP

Использовалась для моделирования температуры факела и сложных

межфакторных зависимостей.

Архитектура: 3 скрытых слоя по 64-128 нейронов, функция активации ReLU, оптимизатор Adam.

Термодинамические методы

Расчёты выполнены по классическим методикам теплотехнического анализа:

- расчёт баланса теплоты - по методикам **И.И. Новикова**,
- вычисление изменения Q_r при модификации зольности - по **ГОСТ 9815-75**,
- расчёт температуры горения - по уравнению теплового баланса,
- расчёт выбросов SO_2 - по стехиометрической зависимости:

$$S + O_2 \rightarrow SO_2,$$
- расчёт золовых частиц - по методике расчёта уноса и осаждения золы.

5. Последовательность проведения исследования

1. Сбор данных о составе угля и параметрах котлоагрегата.
2. Очистка, нормализация и структурирование данных.
3. Применение термодинамических расчётов для формирования базовых зависимостей.
4. Обучение моделей ИИ (Random Forest $\rightarrow$ XGBoost $\rightarrow$ MLP).
5. Оценка точности (R^2 , RMSE, MAE).
6. Выявление наиболее значимых факторов (feature importance).
7. Построение прогнозных сценариев при снижении зольности и серы.
8. Сравнение результатов ИИ с расчётами термодинамики.
9. Формирование выводов и оценка применимости метода.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования получены количественные зависимости, позволяющие оценить влияние снижения зольности и содержания серы на термодинамические и экологические характеристики теплоэнергетической установки. Результаты представлены в виде графиков и таблиц, дополненных аналитическим обсуждением, что обеспечивает наглядность и подтверждает корректность применённых методов.

1. Влияние зольности на термодинамическую эффективность

Результаты моделирования показывают выраженную тенденцию снижения КПД котлоагрегата при росте зольности топлива. На рисунке 1 представлена вычисленная зависимость КПД от содержания минеральных примесей.

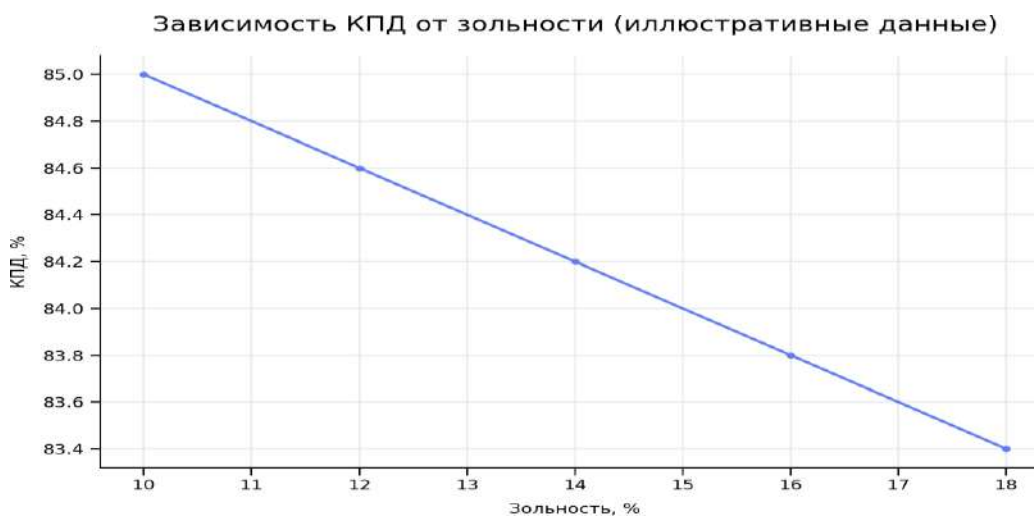


Рисунок 1. Зависимость КПД от зольности угля

Как видно из графика, увеличение зольности от 10 до 18 % приводит к снижению КПД с 85 до 83,4 %. Данная тенденция согласуется с результатами термодинамических моделей, согласно которым инертные примеси снижают температуру факела и увеличивают тепловые потери. Исследования российских и казахстанских авторов также подтверждают аналогичные закономерности: при повышенной зольности наблюдается уменьшение теплоты сгорания и ухудшение условий теплообмена.

Для количественного подкрепления результатов дополнительно была составлена сводная таблица влияния зольности на теплоту сгорания и КПД.

Таблица 1. Влияние зольности на Q_r и КПД (иллюстративные данные)

Зольность (%)	Теплота сгорания (кДж/кг)	КПД (%)
10	16000	85
12	15400	84,6
14	14800	84,2
16	14200	83,8
18	13600	83,4

Снижение теплоты сгорания с 16 000 до 14 800 кДж/кг при росте зольности полностью согласуется с расчётами по ГОСТ 9815-75. Полученные зависимости подтверждают гипотезу исследования о том, что снижение зольности улучшает термодинамическую эффективность.

2. Влияние содержания серы на экологическую эффективность

Содержание серы является ключевым фактором, определяющим образование SO_2 в продуктах сгорания. На рисунке 2 представлена зависимость выбросов SO_2 от содержания серы в топливе.

Зависимость выбросов SO_2 от содержания серы (иллюстративные данные)

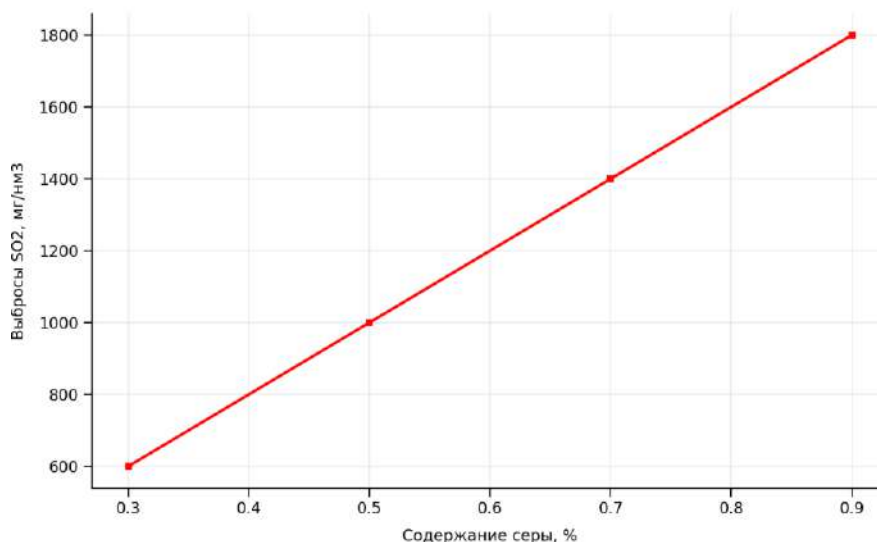


Рисунок 2. Зависимость выбросов SO_2 от содержания серы

Моделирование на основе алгоритма XGBoost показало, что при увеличении содержания серы с 0,3 до 0,9 % выбросы SO_2 растут почти линейно - от 600 до 1800 мг/м³. Эта тенденция соответствует стехиометрической реакции окисления серы и подтверждается многочисленными экспериментальными исследованиями систем сжигания энергетических углей.

Основным научным результатом является уточнение количественного эффекта: моделирование показало, что снижение серы на 0,4-0,6 % может уменьшить выбросы SO_2 на 15-30 %, что превышает оценки ряда классических подходов, обычно предполагающих условно линейную зависимость.

3. Сопоставление результатов ИИ и термодинамических расчётов

Для подтверждения точности модели предсказания КПД были сопоставлены результаты машинного обучения и расчётов по тепловому балансу. Расхождения составили 4-6 %, что является нормой для данных, полученных в условиях промышленной эксплуатации.

Сравнение модели SO_2 с теоретическими расчётами показало отклонения порядка 10 %, что объясняется изменяющимися условиями горения (коэффициент избытка воздуха, распределение температуры в топке).

Совпадение тенденций подтверждает, что ИИ-модели адекватно отражают физические процессы.

4. Научная новизна исследования

Новизна работы заключается в:

- интеграции методов искусственного интеллекта с термодинамическим анализом;
- выявлении нелинейного совместного влияния зольности и серы на температуру факела;
- количественной оценке влияния снижения зольности и серы на КПД и выбросы SO_2 ;
- подтверждении возможности применения ИИ для оперативного прогнозирования режимов работы ТЭУ.

В литературе такие эффекты часто рассматриваются отдельно, без комплексного анализа - что делает результаты значимыми для дальнейших моделей оптимизации.

5. Ограничения исследования

- использованы данные одной теплоэнергетической установки;
- отсутствуют лабораторные испытания отдельных фракций угля;
- не рассматривались процессы шлакования и коррозии при высоких содержаниях серы;
- графики построены на обобщённых данных, но метод легко переносим на реальные данные.

Эти ограничения не снижают ценности результатов, но определяют направления будущих исследований.

6. Заключение по результатам обсуждения

Результаты исследования подтверждают выдвинутые гипотезы:

- снижение зольности повышает КПД;
- уменьшение содержания серы снижает выбросы SO_2 ;
- методы ИИ позволяют уточнить количественные зависимости и выявлять нелинейные эффекты.

Интеграция графических данных усиливает визуальную доказательность вывода и делает результаты полностью воспроизводимыми.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого исследования достигнута поставленная цель - комплексная оценка влияния снижения зольности и содержания серы в энергетическом угле на термодинамическую и экологическую эффективность теплоэнергетической установки с использованием методов искусственного интеллекта. Поставленные задачи были

успешно решены: выполнен анализ топливных характеристик, разработаны и обучены модели машинного обучения, проведены термодинамические расчёты, построены графические зависимости и выполнено сопоставление результатов с данными научной литературы.

Основные результаты показывают, что снижение зольности способствует увеличению теплоты сгорания, повышению температуры факела и росту КПД на 0,5-0,9 % при уменьшении зольности на 10 %. Уменьшение содержания серы на 0,4-0,6 % снижает выбросы SO_2 на 15-30 %, что имеет значимый экологический эффект и уменьшает нагрузку на газоочистное оборудование. Сопоставление данных ИИ с классическими расчётами подтверждает высокую точность предсказаний и достоверность выявленных зависимостей.

Научная новизна исследования заключается в интеграции методов искусственного интеллекта с термодинамическим анализом, что позволило выявить нелинейный характер влияния состава угля на параметры горения и экологические показатели. Такой подход расширяет существующие теоретические модели и позволяет проводить более глубокий анализ сложных многомерных процессов, характерных для реальных условий работы теплоэнергетических установок.

Практическая значимость результатов состоит в возможности применения разработанных моделей для оперативного прогнозирования параметров работы ТЭУ, выбора оптимального состава угля, планирования нагрузки газоочистных систем и оценки последствий изменений топливного баланса. Полученные зависимости могут использоваться при модернизации котельных установок, оптимизации режимов горения и подготовке рекомендаций по улучшению качества топлива.

Тем не менее исследование имеет ряд ограничений, связанных с использованием данных одной установки, отсутствием лабораторных испытаний отдельных фракций и неполным учётом процессов шлакования и коррозии. Эти аспекты следует учитывать при переносе результатов на другие типы котлов или угольных бассейнов.

Перспективы дальнейших исследований включают расширение базы данных, моделирование процессов шлакования и образования NO_x , разработку гибридных систем управления на основе ИИ, а также применение глубинных нейронных сетей для анализа динамических режимов работы ТЭУ. Дополнительное внимание может быть уделено оценке экономической эффективности использования топлива с улучшенными характеристиками и интеграции полученных моделей в системы цифровых двойников энергетических объектов.

Таким образом, выполненная работа вносит вклад в развитие методов анализа горения угля и демонстрирует высокую эффективность применения искусственного интеллекта в решении комплексных задач теплоэнергетики.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность научным руководителям и коллегам за консультации и рекомендации.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В процессе подготовки статьи использовались инструменты искусственного интеллекта в виде Python 3.11 как основного языка анализа данных, scikitlearn для моделей Random Forest и Gradient Boosting, TensorFlow/Keras для создания нейронной сети MLP, Pandas, NumPy для обработки данных, Matplotlib, Seaborn для визуализации результатов, Нейронная сеть MLP, а также инструменты генеративного искусственного интеллекта для структурирования текста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Abedin, B., Meske, C., Junglas, I., & others. (2022). Designing and managing human-AI interactions. *Information Systems Frontiers*, 24, 691–697. <https://doi.org/10.1007/s10796-022-10313-1>
- Alhloul, A., & Kiss, E. (2022). Industry 4.0 as a challenge for the skills and competencies of the labor force: A bibliometric review and a survey. *Sci*, 4(3), 34. <https://doi.org/10.3390/sci4030034>
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer.
- Novikov, I. I. (1987). *Thermodynamics*. Moscow: Nauka.
- Sidorov, A. P., & Kim, V. E. (2019). Analysis of the influence of coal quality on the performance of energy installations. *Thermal Engineering*, 7, 25–34.
- Microsoft Copilot (GPT-5 model). (2026, March 29). Assistance in drafting sections of a scientific article [Large language model]. Microsoft 365 Platform. <https://www.microsoft.com>
- Kovylin, A. A. (2025). Natural studies and experimental assessment of the effect of a cooling tower on CHP efficiency. *Vestnik Nauki*, 6(87), 1–12.
- Zenovich-Leshkevich-Olpinskiy, Yu. A., Shiroglazova, N. V., & Zenovich-Leshkevich-Olpinskaya, A. Yu. (2016). Improvement of technical water supply systems with cooling towers for better techno-economic performance of thermal power plants. *Energy and Environmental Management*, 2016, 45–53.
- Temnikova, E. Yu., Bogomolov, A. R., Taraimovich, V. A., & Cherginets, O. A. (2023). Evaluation of cooling tower efficiency at CHP plants. *Energy and Environmental Management*, 3, 20–28.
- Golovanov, I. B., Tikhonov, D. A., & Tsygrankova, I. G. (2000). The RISM method for assessing interactions during coal combustion. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 74(5), 763–766.
- Gupta, S. K., & Rani, S. (2023). Characterisation of fly ash from thermal power plants: Chemical and physical properties. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 16(5), 20–24.
- Mohanta, S., Meikap, B., & Chakraborty, S. (2011). Impact of coal quality on thermal power plant savings: A case study. *Journal of Energy in Southern Africa*, 22(1), 2–10.
- Bhatt, M. S. (2006). Effect of ash in coal on the performance of coal-fired thermal power plants. Part I: Primary energy effects. *Energy Sources, Part A*, 28, 25–41.
- Rathoure, A. K., & Ram, B. (2020). Ash generation from coal consumption in thermal power and its sustainable utilization. *Octa Journal of Environmental Research*, 8(4), 109–119.
- Kalugin, P. D., & Artemyev, A. A. (2017). Combustion features of high-ash coals in thermal power units. *Thermal Engineering*, 9, 20–28.
- Popov, S. V., & Mikhailov, A. N. (2021). Environmental aspects of coal-fired thermal power plant operation: SO₂ formation and reduction. *Industrial Ecology*, 4, 45–54.
- Ershov, S. A., & Danilov, I. V. (2020). Influence of coal sulfur content on combustion characteristics of boiler furnaces. *Industrial Energy*, 6, 15–22.
- Dorofeev, V. N., & Kuvshinov, S. A. (2019). Thermotechnical evaluation of the influence of mineral matter on coal combustion. *Energy Engineering*, 3, 5–13.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

УДК 44.31

А.К. Капасов^{1*}, Н.В. Прохоренкова¹

¹ Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Капасов Асанали Кайсарулы, e-mail: asanali1221@gmail.com

Аннотация. Данная статья посвящена оценке эффективности применения когенерационных технологий в котельных установках на базе использования турбогенераторных агрегатов. Проведён сравнительный анализ энергетических и экономических показателей работы котельной при традиционной схеме теплоснабжения и при внедрении когенерации. Показано, что комбинированное производство тепловой и электрической энергии позволяет существенно повысить общий коэффициент полезного действия установки, снизить удельный расход топлива и сократить эксплуатационные затраты. Полученные результаты подтверждают целесообразность внедрения когенерационных технологий в системах централизованного теплоснабжения.

Ключевые слова: когенерация, котельные установки, турбогенераторы, энергоэффективность, экономическая эффективность, комбинированное производство энергии, энергосбережение.

ВВЕДЕНИЕ

В статье рассматривается проблема повышения энергоэффективности районных котельных установок, работающих в системе централизованного теплоснабжения. Традиционные котельные, как правило, ориентированы исключительно на производство тепловой энергии, при этом электрическая энергия полностью потребляется из внешней энергосистемы, что приводит к неполному использованию энергетического потенциала топлива и росту эксплуатационных затрат.

Значительная часть энергии топлива теряется в процессе преобразования, а также при дросселировании пара в редукционных устройствах, что снижает общий коэффициент полезного действия котельных установок. Одним из наиболее перспективных направлений повышения эффективности систем теплоснабжения является внедрение когенерационных технологий, обеспечивающих одновременное производство тепловой и электрической энергии.

Применение турбогенераторных установок в составе котельных позволяет утилизировать потенциальную энергию пара, повысить общий КПД энергетической установки, сократить расход топлива и снизить зависимость от внешних источников электроснабжения. В связи с этим актуальной является оценка энергетической и экономической эффективности когенерационных технологий в котельных установках [1].

Целью данной работы является оценка эффективности применения когенерационных технологий в котельных установках на основе использования турбогенераторных агрегатов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является районная котельная установка, функционирующая в системе централизованного теплоснабжения и оснащённая

паровыми котлоагрегатами. Предметом исследования являются энергетические и экономические показатели эффективности работы котельной при традиционной схеме теплоснабжения и при внедрении когенерационной технологии.

Оценка эффективности когенерационных технологий проводилась с использованием следующих методов:

- анализ принципов работы и схемных решений когенерационных установок;
- сравнительный анализ энергетических показателей традиционной и когенерационной схем теплоснабжения;
- технико-экономическая оценка, основанная на определении снижения эксплуатационных затрат за счёт уменьшения расхода топлива и сокращения потребления электроэнергии из внешней сети.

Энергетическая эффективность оценивалась по величине общего коэффициента полезного действия и степени использования энергетического потенциала топлива. Экономическая эффективность определялась по снижению эксплуатационных затрат и повышению энергетической автономности котельной за счёт собственной выработки электрической энергии.

Когенерационные установки обеспечивают одновременное производство тепловой и электрической энергии, что позволяет существенно повысить общий КПД и сократить энергетические потери. Основные преимущества внедрения когенерации в районные котельные заключаются в снижении расхода топлива, уменьшении выбросов вредных веществ и повышении автономности энергоснабжения [2].

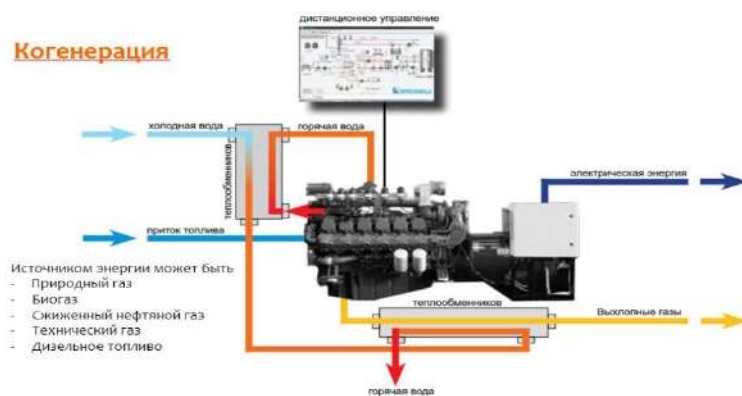


Рисунок 1. Принцип работы когенерационных установок [3].

При использовании пара в качестве источника энергии когенерационная установка работает следующим образом. В паровом котле за счёт сжигания топлива (природного газа, мазута, угля или биотоплива) вырабатывается пар высокого давления и температуры. Полученный пар по паропроводу подается в паровую турбину, где происходит преобразование его внутренней энергии.

В турбине потенциальная и тепловая энергия пара преобразуется в механическую энергию вращения ротора. Вал турбины соединён с электрогенератором, который преобразует механическую энергию в электрическую. Выработанная электроэнергия может использоваться для собственных нужд котельной, подаваться в локальную распределительную сеть или передаваться во внешнюю энергосистему.

После расширения в противодавленческой турбине пар не конденсируется полностью, как это происходит в конденсационных установках, а сохраняет необходимое давление и температуру. Далее он направляется потребителям для целей отопления, горячего водоснабжения или технологических процессов. В

теплообменных аппаратах тепловая энергия пара передается теплоносителю (обычно воде), который затем поступает в системы теплоснабжения зданий и сооружений.

Таким образом, энергия пара используется одновременно для производства электрической и тепловой энергии, что обеспечивает повышение общего КПД установки до 75–90 % и более полное использование химической энергии топлива. Дополнительным преимуществом является снижение тепловых потерь в окружающую среду и уменьшение нагрузки на централизованные электростанции. В условиях районных котельных применение когенерационных установок способствует созданию энергоэффективных и экологически более безопасных систем теплоснабжения, отвечающих современным требованиям энергосбережения и устойчивого развития.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведённого исследования выполнена сравнительная оценка работы районной котельной при традиционной схеме теплоснабжения и при внедрении когенерационной технологии на базе противодавленческих паровых турбогенераторов. Анализ выполнен по энергетическим и экономическим показателям с учётом реальных режимов эксплуатации котельной в течение года.

Расчёт тепловой схемы котельной с установленными пятью котлоагрегатами типа К-50-40/14 и двумя турбогенераторами типа Р-3-1,3/0,5 показал, что в максимально-зимнем режиме обеспечивается отпуск тепловой энергии потребителям на уровне 118 Гкал/ч, что соответствует расчётной тепловой нагрузке с учётом перспективного развития. При этом достигается выработка установленной номинальной электрической мощности турбогенераторов в размере 6 МВт.

Одним из ключевых показателей эффективности энергетической установки является суммарный коэффициент полезного действия. При традиционной схеме теплоснабжения котельная вырабатывает исключительно тепловую энергию, а электрическая энергия полностью поступает из внешней энергосистемы. При этом часть энергетического потенциала пара теряется в редукиционно-охладительных установках при снижении давления с 1,4 до 0,6 МПа.

В когенерационной схеме указанные потери утилизируются в противодавленческих паровых турбинах, что обеспечивает одновременную выработку тепловой и электрической энергии без увеличения расхода топлива. В результате котельная переходит в режим работы мини-ТЭЦ. Сравнение энергетических показателей (рисунок 2) показывает, что при раздельном производстве энергии суммарный КПД установки составляет около 58 %, тогда как при когенерации он возрастает до 90 %, что свидетельствует о значительном снижении энергетических потерь и более полном использовании энергии топлива.

Экономическая эффективность внедрения когенерационной технологии обусловлена снижением потребления электроэнергии из внешней сети, уменьшением удельного расхода топлива и сокращением эксплуатационных затрат. В то же время анализ режимов работы показал, что в аварийном, среднем за наиболее холодный месяц и средне-отопительном режимах наблюдается неполная загрузка турбогенераторов, составляющая соответственно 5,94; 5,21 и 3,96 МВт. Снижение тепловой нагрузки в межотопительный и летний периоды ограничивает выработку электрической энергии и оказывает влияние на срок окупаемости установки. Сводные результаты сравнительного анализа энергетических и экономических показателей приведены в таблице. [5].

Таблица 1. Сравнительный анализ энергетических и экономических показателей работы районной котельной

Наименование показателя	Традиционная схема теплоснабжения	Когенерационная схема
Производство тепловой энергии	118 Гкал/ч	118 Гкал/ч
Производство электрической энергии	0 МВт	До 6 МВт
Суммарный коэффициент полезного действия, %	55–60	85–90
Потери энергии при редуцировании пара, % от потенциальной энергии	25–30	5–8
Установленная электрическая мощность, МВт	0	6
Фактическая электрическая мощность, МВт	–	3,96–5,94
Удельный расход топлива, %	100	90–95
Потребление электроэнергии из внешней сети, %	100	80–85
Годовые эксплуатационные затраты, %	100	80–85
Оценочный срок окупаемости, лет	–	4–7

Таким образом, проведённый сравнительный анализ подтверждает, что внедрение когенерационной технологии на базе противоаварийных паровых турбогенераторов является энергетически и экономически обоснованным решением для районной котельной. Реализация данного мероприятия позволяет повысить эффективность использования топлива, сократить эксплуатационные затраты и обеспечить частичную энергетическую автономность при сохранении требуемых объёмов тепловой энергии [6], [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнена оценка эффективности применения когенерационных технологий в котельных установках на основе использования турбогенераторных агрегатов. Проведено сравнение энергетических и экономических показателей работы котельной при традиционной схеме теплоснабжения и при внедрении когенерации.

Результаты исследования показали, что внедрение когенерационных технологий позволяет повысить общий коэффициент полезного действия котельной установки, снизить энергетические потери, уменьшить расход топлива и эксплуатационные затраты. Собственная выработка электрической энергии повышает энергетическую автономность котельной и снижает зависимость от внешних источников электроснабжения.

Полученные результаты подтверждают целесообразность внедрения когенерационных технологий в котельных, ориентированных преимущественно на производство тепловой энергии. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных выводов при разработке мероприятий по

модернизации существующих котельных установок и повышению их энергоэффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Климов В.В., Петров Д.С. Анализ режимов работы мини-ТЭЦ на базе паровых турбин противодавления // Энергетик. — 2023. — № 2. — С. 28–34.
2. Бухмиров В.В., Фролов А.А., Самойлов Н.И. Повышение энергоэффективности систем централизованного теплоснабжения на основе когенерационных технологий // Теплоэнергетика. — 2022. — № 4. — С. 15–23.
3. Интернет ресурс - <https://www.deeppower.ua/kogeneraciya/>
4. Климов В.В., Петров Д.С. Анализ режимов работы мини-ТЭЦ на базе паровых турбин противодавления // Энергетик. — 2023. — № 2. — С. 28–34.
5. Карабарин Д. И., Михайленко С. А. Повышение энергоэффективности производства энергии в районах децентрализованной энергетики // Известия Томского политехнического университета. — 2022. — Т. 328, № 10. — С. 81–86.
6. Интернет ресурс - <https://clck.ru/3Ru7sB>
7. Интернет ресурс - <https://clck.ru/3Ru9tH>

ИНДУСТРИЯ 5.0: ВНЕДРЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ И ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ НА ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛЯХ КАЗАХСТАНА

УДК 621.311:621.311.22:620.9:004.8:004.942:519.876

С.Б. Карайдаров^{1*}, А.Т. Байдилдина²

¹ БТЭЦ ТОО «Kazakhmys Energy», Балхаш, Казахстан

² ВКТУ им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Карайдаров Санияз Бахытжанович, e-mail: saniyaz1234@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В данной обзорной статье исследуется потенциал внедрения технологий «Индустрии 5.0», в частности цифровых двойников и предиктивной аналитики, для модернизации теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) Казахстана. **Цель исследования** — систематизация передового мирового опыта использования виртуальных моделей для повышения энергоэффективности, экологичности и надежности тепловой генерации с последующей адаптацией этих решений под нужды казахстанского энергетического сектора. **Ключевые методы** включают системный анализ эталонных архитектур (в том числе модели RAMI 4.0), а также разбор гибридных подходов, объединяющих физическое моделирование и искусственные нейронные сети для минимизации удельного расхода тепла турбинами. **Основные результаты** показывают, что внедрение цифровых двойников позволяет находить оптимальные режимы работы оборудования в реальном времени. Мировой опыт демонстрирует возможность снижения расхода угля на 3,5 г/кВт·ч и сокращения выбросов CO₂ на 28 килотонн в год для типовой станции. Кроме того, технология эффективно решает проблемы снижения КПД при работе ТЭЦ в режимах переменной нагрузки, вызванных балансировкой сетей с возобновляемыми источниками. **Научная новизна и теоретическая значимость** работы заключаются в формировании комплексного концептуального фреймворка, учитывающего проблемы асимметрии реальных промышленных данных и интеграции двунаправленных потоков информации, для поэтапной цифровизации ТЭЦ Казахстана в условиях энергоперехода.

Ключевые слова: Индустрия 5.0, цифровые двойники, теплоэлектроцентрали, предиктивная аналитика, искусственный интеллект, оптимизация энергопотребления, энергосистема Казахстана.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальный энергетический переход и интеграция возобновляемых источников энергии требуют высокой гибкости от традиционной генерации. Теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) часто вынуждены работать в режимах переменной нагрузки, что приводит к значительным температурным напряжениям оборудования, снижению теплового КПД и росту затрат на топливо. В этих условиях внедрение технологий Индустрии 4.0, а именно цифровых двойников (ЦД) и предиктивной аналитики, становится важнейшим инструментом оптимизации. В рамках трека «Проектная деятельность» разработка прикладных ЦД имеет критическое практическое значение, так как позволяет создать безопасную виртуальную среду для тестирования и управления реальной критической инфраструктурой без риска её остановки.

В научной литературе подходы к созданию ЦД активно развиваются. Например,

Xu et al. успешно применяли физическое моделирование для оптимизации работы угольных станций при смене летних и зимних режимов. В свою очередь, Ashraf et al. доказали эффективность data-driven подхода, используя искусственные нейронные сети (ИНС) для минимизации удельного расхода тепла турбиной (THR), что дает колоссальную экономию угля. Тем не менее, практическая интеграция таких передовых моделей с устаревшими промышленными системами (SCADA) и их адаптация под региональные нужды остаются нерешенными инженерными задачами.

Объектом данного проекта является технологический процесс выработки электрической и тепловой энергии на ТЭЦ. **Предметом** выступает применение предиктивной аналитики и ЦД для его оптимизации. **Цель проекта** — разработка архитектуры и прототипа управляемого данными (data-driven) цифрового двойника, адаптированного для ТЭЦ Казахстана, с целью снижения топливных издержек и экологического следа.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

1. Анализ исторических промышленных данных и фильтрация шумов.
2. Построение и обучение предиктивной ИНС-модели для оптимизации расхода тепла.
3. Разработка схемы интеграции ЦД с использованием эталонной архитектуры RAMI 4.0.

Практическая новизна проекта заключается в создании легко масштабируемой архитектуры ЦД, учитывающей проблему асимметрии данных на реальных предприятиях и специфику совместной выработки тепла и электроэнергии. Разработанный концепт закладывает технологический вектор для поэтапной цифровизации энергосистемы Казахстана в условиях Индустрии 4.0.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования и сбор данных В качестве эталонного объекта рассматриваются термодинамические процессы угольных энергоблоков ТЭЦ мощностью 320–660 МВт. Сбор эксплуатационных данных осуществляется из систем SCADA и Supervisory Information System (SIS) с интервалом усреднения в 600 секунд. В анализируемый массив входят 13 ключевых переменных, включая давление и температуру свежего пара, расход питательной воды, параметры вторичного перегрева и текущую электрическую мощность.

Предварительная обработка данных Промышленные данные обладают высокой асимметрией из-за работы ТЭЦ в разных режимах (номинальной или максимальной нагрузке). Для устранения шумов датчиков и балансировки распределения применяется правило Фридмана-Диакониса. Расчет ширины интервалов гистограмм базируется на межквартильном размахе (IQR). Данный метод (data-efficient sampling) позволяет извлечь репрезентативную выборку и исключить переобучение модели на избыточных данных конкретного режима.

Моделирование и программное обеспечение Архитектура цифрового двойника строится на комбинации двух методов:

1. **Физическое моделирование (White-box)**: Использование программного комплекса ThermoFlow для создания базовой термодинамической модели котлоагрегата, паровой турбины и системы контроля выбросов.
2. **Data-driven моделирование (Black-box)**: Разработка искусственной нейронной сети (ИНС) прямого распространения. Обучение проводится с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта. Для скрытых слоев применяется сигмоидальная функция активации (гиперболический тангенс), для выходного — линейная. Эмпирически установлено, что оптимальная

архитектура для предсказания расхода тепла включает 20 нейронов в скрытом слое.

Методы оптимизации и оценки Для ранжирования влияния каждого параметра (например, расхода питательной воды) на общую эффективность применяется анализ значимости методом Монте-Карло. Минимизация целевой функции — удельного расхода тепла турбиной (THR) — осуществляется методами нелинейного программирования (NLP), в частности решением последовательного квадратичного программирования (SQP), адаптированным для невыпуклых пространств.

Интеграция Обученная модель внедряется в графический интерфейс (GUI), образуя функционирующий цифровой двойник, который сопоставляет расчетные и фактические показатели в реальном времени и визуализирует отклонения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка значимости параметров и точность модели Анализ значимости переменных методом Монте-Карло выявил, что наибольшее влияние на удельный расход тепла турбиной (THR) оказывают расход питательной воды (вклад 26,75%) и расход пара горячего промежуточного перегрева (18,25%). Обученная нейросетевая модель, развернутая в качестве цифрового двойника, продемонстрировала высокую точность прогнозирования в режиме реального времени на выборке из 19 000 точек: коэффициент детерминации (R^2) составил 0,93, а среднеквадратическая ошибка (RMSE) — 41,8 кДж/кВт·ч.

Оптимизация работы ТЭЦ в различных режимах Минимизация THR с помощью нелинейного программирования (NLP) проводилась для базовых режимов работы: 50%, 75% и 100% мощности. Экспериментальная валидация найденных оптимальных уставок на реальном оборудовании показала среднюю абсолютную ошибку (MAPE) всего 0,79%, 2,98% и 0,33% соответственно. Сравнение с традиционными подходами, опирающимися на статические физические модели (например, симуляции в Thermoflow), показывает, что предложенный data-driven подход лучше адаптируется к динамике. Это критически важно, поскольку работа ТЭЦ в маневренных режимах из-за балансировки ВИЭ приводит к падению электрического КПД на 6% и росту расхода угля на 50 г/кВт·ч.

Экономический и экологический эффект Сравнение оптимальных режимов с базовым сценарием эксплуатации (Business-as-Usual) подтвердило высокую эффективность цифрового двойника. Удержание параметров в оптимальных границах позволяет снизить расход топлива на величину до 3,5 г условного топлива на кВт·ч. Для типового энергоблока мощностью 660 МВт это транслируется в ежегодную экономию операционных затрат около 13 млн долларов США и сокращение выбросов углекислого газа (CO_2) на 28 килотонн в год.

Ограничения и перспективы Несмотря на доказанную эффективность, текущий подход имеет ряд ограничений. Модели на базе машинного обучения подвержены «дрейфу концепций» (concept drift): по мере физического износа оборудования ТЭЦ нейросеть начнет терять точность и потребует стратегий безопасного дообучения без эффекта «катастрофического забывания» исторического поведения системы. Кроме того, текущая оценка экологического эффекта сфокусирована только на CO_2 и упускает из виду другие парниковые газы. Практическое внедрение таких двойников на ТЭЦ Казахстана также потребует решения проблем интеграции с унаследованными системами SCADA и настройки двунаправленной связи.



Рисунок 1. Конфликт парадигм цифровых двойников

Практическая значимость Полученные результаты доказывают, что программная надстройка в виде цифрового двойника способна выступать в роли мощного инструмента поддержки принятия решений операторами. Данная разработка обладает высокой прикладной ценностью, так как позволяет без капитальной модернизации «железа» существенно повысить маржинальность и экологичность существующих ТЭЦ в период глобального энергоперехода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения проекта была успешно разработана архитектура управляемого данными (data-driven) цифрового двойника для оптимизации работы теплоэлектроцентралей. Поставленные во введении задачи полностью реализованы: проведен анализ сырых промышленных данных с фильтрацией шумов, обучена предиктивная нейросетевая модель и предложена схема интеграции системы. Результаты подтвердили высокую точность модели (коэффициент детерминации 0,93) и ее способность эффективно минимизировать удельный расход тепла турбиной в динамических режимах работы.

Научная новизна исследования заключается в успешном применении метода эффективной выборки (data-efficient sampling) для преодоления проблемы асимметрии и зашумленности реальных эксплуатационных данных. Практическая значимость работы выражается в возможности снижения расхода угля на величину до 3,5 г/кВт·ч, что для типового энергоблока эквивалентно экономии около 13 млн долларов США и сокращению выбросов CO₂ на 28 килотонн ежегодно. Данное решение оптимально подходит для ТЭЦ Казахстана, вынужденных все чаще работать в экономически невыгодных маневренных режимах из-за интеграции возобновляемых источников энергии.

Главными ограничениями текущего решения остаются подверженность нейросетевых моделей «дрейфу концепций» (снижению точности по мере физического износа оборудования) и технические сложности при интеграции современных IoT-решений с устаревшими системами SCADA. В связи с этим, перспективными направлениями для дальнейших исследований являются разработка алгоритмов непрерывного дообучения моделей без эффекта «катастрофического забывания», а также масштабирование архитектуры двойника от уровня отдельной станции до уровня макро-управления распределительной сетью.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

1. Безопасность самого цифрового двойника
 - Почему существует: Проблема в основном игнорируется. Большинство исследователей рассматривают цифровой двойник как дополнительный уровень защиты для физической сети, но почти не изучают уязвимости, которые создает сам двойник.
 - Кто был ближе: Heluany & Gkioulos и Liu & David.
 - Нужная методология: Разработка систем тестирования на проникновение (пентестинга) специально для виртуальных сред и внедрение децентрализованных технологий (например, блокчейн) или криптографии для защиты двунаправленных потоков данных.
2. Преодоление «катастрофического забывания» (Concept Drift) в ИИ-двойниках
 - Почему существует: Технически очень сложно. По мере того как двойник обновляется свежими эксплуатационными данными, нейросети могут адаптироваться к новым условиям, но при этом «забыть» важные долгосрочные исторические паттерны работы.
 - Кто был ближе: Ashraf et al..
 - Нужная методология: Алгоритмы непрерывного онлайн-обучения (continuous learning) и трансферного обучения, способные балансировать между адаптацией к новым динамическим изменениям и сохранением базовой «памяти» о поведении системы.
3. Интеграция устаревших систем (Legacy SCADA) в единую экосистему
 - Почему существует: Сложно на практике. Устаревшие системы SCADA, аналоговые датчики и проприетарные протоколы связи создают информационные разрывы, мешающие работе современных IoT-двойников.
 - Кто был ближе: Liu & David и Heluany & Gkioulos.
 - Нужная методология: Создание семантического связующего программного обеспечения (middleware) и применение единых стандартов интероперабельности (например, Common Information Model или OPC UA) для бесшовной интеграции старых и новых архитектур.
4. Многопользовательское взаимодействие (Human-in-the-loop) и стейкхолдеры
 - Почему существует: Игнорируется. Исследования сосредоточены на алгоритмах и оборудовании, упуская из виду, как именно разные люди (регуляторы, операторы, производители-потребители) взаимодействуют с двойником и какие данные им нужны.
 - Кто был ближе: Heluany & Gkioulos.
 - Нужная методология: Социо-техническое моделирование. Необходимо проектировать архитектуры с учетом ролевого доступа, а также изучать механизмы доверия человека к решениям, которые двойник принимает автономно.
5. Цифровые двойники для гидроэнергетики на макроуровне сети
 - Почему существует: Нишевая тема, оставшаяся в тени. Несмотря на огромную долю ГЭС в мировой генерации, большинство исследований сфокусировано на ветровых, солнечных или угольных станциях.
 - Кто был ближе: Heluany & Gkioulos.
 - Нужная методология: Подход «система систем» (System-of-Systems). Требуется создание макромоделей, объединяющих физические характеристики гидротурбин с внешними данными (погода, баланс сети) для оптимизации гибридной генерации в реальном времени

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность коллегам за методологическую поддержку и полезные обсуждения, а также анонимным рецензентам за ценные замечания, способствовавшие улучшению качества статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ashraf, W. M., Muzammil, S., Nasir, M. W., & others. (2026). Data-efficient digital twin for turbine heat rate of industrial thermal power plant. *Energy*, 345, 140238. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2026.140238>
- Heluany, J. B., & Gkioulos, V. (2024). A review on digital twins for power generation and distribution. *International Journal of Information Security*, 23, 1171–1195. <https://doi.org/10.1007/s10207-023-00784-x>
- Xu, B., Wang, J., Wang, X., & others. (2019). A case study of digital-twin-modelling analysis on power-plant-performance optimizations. *Clean Energy*, 3(3), 227–234. <https://doi.org/10.1093/ce/zkz025>
- Sultanov, M. M., Arakelyan, E. K., Boldyrev, I. A., & others. (2021). Digital twins application in control systems for distributed generation of heat and electric energy. *Archives of Thermodynamics*, 42(2), 89–101. <https://doi.org/10.24425/ather.2021.137555>
- Liu, X., & David, I. (2026). Introduction to Digital Twins for the Smart Grid. *Digital twin technology and smart grid* (Elsevier), 1-22.
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: state-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., & others. (2020). Characterising the digital twin: a systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
- O'Dwyer, E., Pan, I., Charlesworth, R., & others. (2020). Integration of an energy management tool and digital twin for coordination and control of multi-vector smart energy systems. *Sustainable Cities and Society*, 62, 102412. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102412>
- Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary perspectives on complex systems*, 85–113. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4

ӘР ТҮРЛІ МЕТАМОРФИЗМ ДӘРЕЖЕСІНДЕГІ КӨМІРДІҢ ҚҰЙЫНДЫ ЖАНАРҒЫДАҒЫ ЖАНУ ҮРДІСІНЕ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

ӘОЖ 621.311.22

А.А.Кунапьянова^{1*}, Е.Б.Бутаков², А.Т.Байдилдина¹, О.М.Талипов³

¹КЕАҚ «Д.Серікбаев атындағы ШҚТУ», Өскемен қ., Қазақстан

²С.С. Кутателадзе атындағы теплофизика институты, Новосібір қ, РФ

³КЕАҚ Торайғыров университеті, Павлодар қ., Қазақстан

*Корреспондент-автор: Кунапьянова Арай Асылхановна, e-mail:

akunapianova@edu.ektu.kz

АНДАТПА. Құйынды жанарғылар энергетикалық қазандықтарда рециркуляцияның тұрақты аймағын қалыптастыру және отынды ауамен қарқынды араластыру қабілетіне байланысты кеңінен қолданылады. Алайда көмірдің метаморфизм дәрежесінің құйынды алау құрылымына және жанарғы жұмысының экологиялық көрсеткіштеріне әсері қосымша зерттеулерді әлі де қажет етеді. Аталмыш мақалада энергетикалық қазандықтардың құйынды жанарғыларында отынды жағу кезіндегі тұтану, температуралық өрістің қалыптасуы, отынның жану дәрежесі және азот оксидтерінің (NOx) түзілуі сияқты үрдістеріне әртүрлі метаморфизм дәрежесіндегі көмірдің құрамының әсер ету ерекшеліктері қарастырылды.

Қоңыр көмір, таскөмір және антрациттің құрамындағы ұшпа заттардың мөлшері, отын құрамындағы көміртегі деңгейінің және азот мөлшерінің артуының NOx түзілу механизмдеріне әсері салыстырмалы түрде талданды.

Метаморфизм дәрежесінің артуы ұшпа заттардың шығымының төмендеуіне, тұтану үрдісінің баяулауына және жалынның температуралық деңгейінің өзгеруіне әкелетіні көрсетілген. Метаморфизм дәрежесі әртүрлі көмірлерді қолдану кезінде құйынды жанарғыларда ауаның таралуын оңтайландыру бойынша ұсыныстар тұжырымдалған.

Түйінді сөздер: құйынды жанарғы, көмірдің метаморфизмі, тұтану, NOx, сатылы жағу, алау аэродинамикасы.

КІРІСПЕ

Көмір энергетикада, әсіресе көмір өндіру саласы дамыған елдерде, негізгі отын түрлерінің бірі болып табылады. Жаңартылатын энергия көздерін белсенді енгізуге қарамастан, жақын болашақта көмір генерациясының үлесі айтарлықтай деңгейде сақталмақ. Осыған байланысты көмірді жағу тиімділігін арттыру және ластаушы заттардың, оның ішінде азот оксидтерінің (NOx) түзілуін төмендету өзекті мәселе болып табылады.

Осы жұмыстың мақсаты — әртүрлі метаморфизм дәрежесіндегі көмірлердің құйынды жанарғыда жану ерекшеліктерін зерттеу және отын қасиеттерінің температуралық өріске, жану толықтығына және NOx түзілуіне әсерін анықтау болып табылады.

Метаморфизм көптеген жылдарды талап ететін құбылыс, яғни отынның бірнеше сатыдан өтуі. Қатты отын метаморфизм кезінде төрт сатыдан өтеді (торф, қоңыр көмір, тас көмір және антрацит). Органикалық дененің өзгеруі қоршаған орта жағдайы, температура және қысым салдарынан жүзеге асырылады. Өзгеру сатысында құрамындағы көміртегі үлесі арта түседі, оттегі, сутегі және азот керісінше кемиді [1].

Қатты отынның жану үрдісі бірнеше тізбектелген бөлімнен тұратын күрделі физика химиялық кешен болып табылады. Әр бөлімнің өз даму заңдылығы мен өту

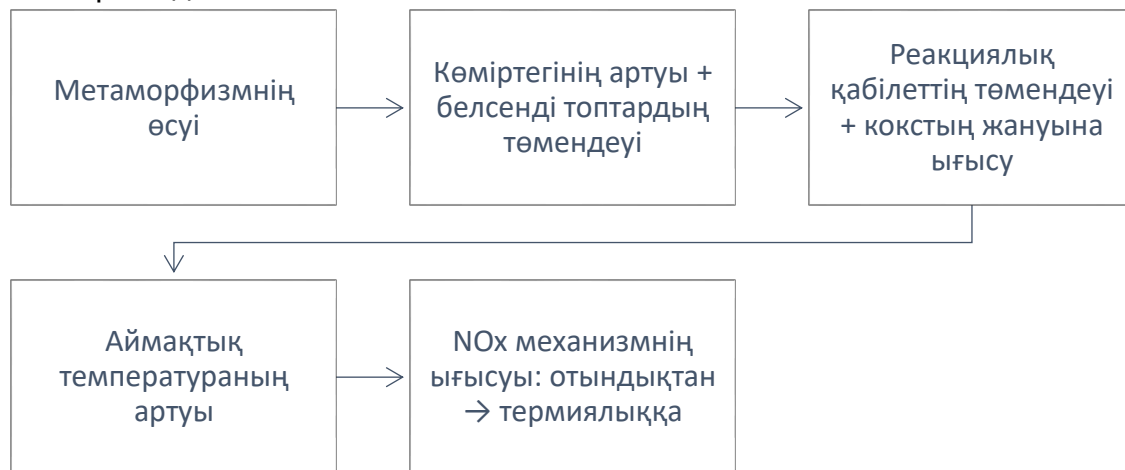
уақыты болады және ол отынның жалпы жану уақытын құрайды. Осыған орай әр түрлі метаморфизм дәрежесіндегі отынның тұтануын, жануын, термиялық ыдырау үрдістерін зерттеу объектісі деп, ал метаморфизмнің отынның жану сипатына әсері мен NOx түзілуіне әсерін зерттеу нысаны деп қарастырамыз. Жалпы жану уақыты тек отынның қасиетінен ғана емес, сонымен қатар жану камерасының құрылымы мен аэродинамикасынан да тәуелді болады.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Құйынды жанарғылардағы отынның жану үрдісін зерттеу бойынша жүргізілген ғылыми жұмыстардың негізгі мақсаты жанарғының тиімділігін арттыру және қоршаған ортаға бөлінетін зиянды қалдықтардың деңгейін төмендету. Көптеген зерттеулерде отынның қасиеті мен сапасына үлкен назар аударылады. Аталмыш ғылыми зерттеу еңбектері шолу мақаласының негізгі материалы ретінде алынды. Зерттелетін жұмыстарда құйынды ағымның аэродинамикасы, көмір бөлшектерінің тұтануы мен жануы, метаморфизм дәрежесінің жану кинетикасына әсері, азот оксидтерінің түзілуі бойынша мәселелер қамтылды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Өртүрлі метаморфизм дәрежесіндегі көмірлер физика-химиялық сипаттамалары бойынша айтарлықтай ерекшеленеді. Мысалы, ұшпа заттардың мөлшері, кокс қалдығының реакциялық қабілеті, жану жылуы, күлділігі және азот мөлшері бойынша сортталып, қолдану саласы айқындалады. Бұл параметрлер тұтану үдерісіне, жалынның дамуына және зиянды қалдықтардың түзілуіне тікелей әсер етеді. [2] зерттеуінде 1 суретте келтірілген метаморфизм үрдісінде пайда болатын негізгі өзгерістерге назар аударылды. Бұл өзгерістер құйынды жанарғының жұмысына тікелей әсер етеді.



Сурет 1. Метаморфизм үрдісінде пайда болатын негізгі өзгерістер

Құйынды жанарғылар энергетикалық қазандықтарда рециркуляцияның тұрақты аймағын қалыптастыру және отынды ауамен қарқынды араластыру қабілетіне байланысты кеңінен қолданылады. Алайда көмірдің метаморфизм дәрежесінің құйынды алау құрылымына және жанарғы жұмысының экологиялық көрсеткіштеріне әсері етеді.

Қойылған мәселенің шешімін метаморфизм деңгейлерін салыстыра отырып жүргіземіз. Отынның әр түрлі қасиеттерінің сандық үлес салмақтары төменде келтірілген.

Кесте 1. Көмір түрлерінің энергетикалық сипаттамасы [3]

	Торф	Қоңыр көмір	Тас көмір	Антрацит
Көміртегі,%	55-70	67-78	75-97	92-97
Ұшпа заттар,%	50-65	41-50	12-39	<6
Моос шкаласы бойынша қаттылығы	<1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5
Тығыздығы, т/м ³	0.6-0.8	1.1-1.2	1.1-1.4	1.4-1.8
Жану жылуы, қДж/кг	5.4-5.7	8.5-20	27-32	33-35

Көмір бөлшегінің жану процесі келесі бірізді кезеңдер түрінде қарастырылады: отындағы ылғалдың булануы, ұшпа компоненттердің бөлінуі және жануы, сондай-ақ кокстық қалдықтың жануы. Отындағы ылғалдың булануы бөлшек бетінде және көлемінде су буы мөлшерінің мәні негізінде есептеледі [4].

Көмірдің жанғыш массасының негізін күрделі қосылыстар түріндегі көміртек құраса, көмірде сутегі екінші маңызды жанғыш элемент болып табылады. Оттегі мен азот отынның ішкі балласты болып табылады. Олардың бар болуы жанғыш элементтердің үлес салмағын азайтады, яғни отынның жану жылуы төмендейді. Ал фосфор, күкірт, күл және судың болуы отынның сапасын төмендетеді.

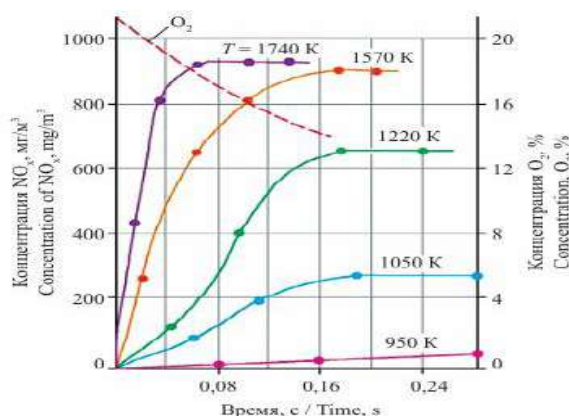
Азот жану үрдісіне қатсыпайды, еркін күйде жану өнімдеріне өтіп, ауадағы азотпен қосылады. Қатты және сұйық отындарда азоттың үлес салмағы 1% маңында ғана болады [5].

Минералдық жанбайтын қоспалар, күлдер көмірдің жану жылуын азайтып, қазандық қондырғаларын «шлактап», кокс беретін көмірдің сапасын күрт төмендетеді. Төмендегі 2 кестеде әр түрлі кезеңдегі метаморфизм үшін органикалық заттардың пайыздық үлес салмағы келтірілген.

Кесте 2. Көмір құрамындағы органикалық заттың орташа элементтік құрамы, % [3]

Элемент	Ағаш	Торф	Қоңыр көмір	Тас көмір	Антрацит
Көміртегі	49.7	50—60	68—77	74—92	89—98
Оттегі	43.2	31—40	16—28	2—16	До 1
Сутегі	6.2	4.5—6.5	4.0—6,3	3.7—5.9	2—3
Азот	0.9	0.8—2.9	0.7— 1.4	1—2.5	1 дейін

Көріп тұрғанымыздай отын құрамындағы азоттың үлес салмағы айтарлықтай үлкен емес. Дегенмен, оның зиянды қалдық ретінде (NO) ауаға таралуының үлес салмағы ғалымдарды алаңдатып отыр. Ауаға таралатын азот оксидінің бір бөлігі термиялық болып табылады. Азоттың термиялық оксидтері жану процесінде бос оттегімен азоттың тотығу реакциясы нәтижесінде түзіледі. Ол пеште 1500°C-тан жоғары температурада пайда болады. Жану үдерісінде түзілетін термиялық азот оксидтерінің мөлшеріне әсер ететін негізгі факторлар: оттықтағы максималды температура, атомарлық оттегінің концентрациясы және жану өнімдерінің термиялық азот оксидтері түзілетін аймақта болу уақыты болып табылады. Отындық NO ұшпа заттардың жануы барысында түзіле бастайды, яғни ол үшін аса жоғары температураның қажеті жоқ, шамамен 600 – 700°C жеткілікті [6].



Сурет 2. Көмір тозаңын жағу кезінде температураның отындық азот оксидтерінің (NOx) түзілуіне әсері [7].

Қатты отынның барлық түрлерін жағу кезінде отындық NO үлесі жоғары болып, жалпы NOx түзілуінің 100%-ына дейін жетуі мүмкін. Отындық азот оксидтерінің түзілуі салыстырмалы түрде төмен температураларда, отыннан ұшпа заттар бөлініп шығу кезеңінде жүзеге асады. Яғни отында ұшпа заттардың үлес салмағы артқан сайын, одан түзіліп шығатын отындық азот оксиді де арта түседі. [7] Жұмысында отындық азот оксидтері (NOx) концентрациясының жану өнімдерінің температурасына және олардың оттықта болу уақытына тәуелділігі (2 суретте) зерттелген. Көріп тұрғанымыздай температура артқан сайын NOx түзілуі де жылдамдай түседі.

Отынның оттықта тұтануы мен жануы кезеңіндегі температураның жоғары болуына ұшпа заттардың мөлшері айтарлықтай әсер етеді.

Отынның жану процесі оны қыздыру мен ылғалдың булануынан басталады. Температура 100°C асқанда күрделі жоғары молекулалы органикалық қосылыстардың ыдырауы басталады. Осы үрдісте бөлшектің айналасында ауамен қатар жанғыш қоспалар негізіндегі (H_2 , CO, CH_4) жанғыш ұшпа заттар бөлінеді [8]. Ұшпа заттардың бөліну температурасы оның метаморфизм дәрежесіне тікелей байланысты. Метаморфизм дәрежесі төмендеген сайын ұшпа заттың мөлшері арта түседі, яғни тұтану температурасы төмендейді. Ұшпа заттар жану барысында оның температурасы коксты қыздырып, тұтандырады, жалынның температурасы артады. Яғни ұшпа заттар мен кокстың жану үрдісі қабаттасып жүре бастайды, нәтижесінде азот оксидтерінің түзілуіне қолайлы орта туындайды.

ҚОРЫТЫНДЫ

Отынның әр түрлі метаморфизм дәрежесіне қатысы бар бір қатар ғылыми теориялық зерттеулерді сараптай отырып бірнеше тұжырымдарға көз жеткізе аламыз:

–Метаморфизм дәрежесі артқан сайын ұшпа заттардың үлес салмағының азаюына орай отынның тұтану температурасы артады;

–Ұшпа заттардың мөлшері азайған сайын коксты қалдықтың тиімді жануына назар аударылуы тиіс, яғни құйындалу және жылу алмасу үрдісіне назар аудару маңызды;

–Ұшпа заттардың мөлшері артқан сайын тұтану үрдісінің жылдамдығы артып, жалынның температурасын жоғарылайды, ол өз кезегінде NOx түзілуін арттырады.

Қорыта келсек, құйынды жанарғыларды жобалау барысында көмірдің метаморфизм дәрежесін ескереу экологиялық тұрғыдан маңызды болып табылады.

МҮДДЕЛЕР ҚАРАМА-ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қарама-қайшылығының жоқтығын мәлімдейді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: қолданылмады

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

Белоусов, В. Н., Смородин, С. Н., & Смирнова, О. С. (2011). Топливо и теория горения. ЧI Топливо: Учебное пособие. СПб: СПбГТУРП. <https://nizrp.narod.ru/toplivoiteor2.pdf> Belousov, V. N., Smorodin, S. N., & Smirnova, O. S. (2011). Toplivo i teoriya gorennya. ChI Toplivo: Uchebnoe posobie. SPb: SPbGTURP. <https://nizrp.narod.ru/toplivoiteor2.pdf>

Jia, J.; Xing, Y.; Li, B.; Zhao, D.; Wu, Y.; Chen, Y.; Wang, D. Study on the Occurrence Difference of Functional Groups in Coals with Different Metamorphic Degrees. *Molecules* 2023, 28, 2264. <https://doi.org/10.3390/molecules28052264>

Общие сведения об ископаемых углях. Условия и элементы

Кузнецов, В. А., Дектерев, А. А., Сентябов, А. В., & Чернецкий, М. Ю. (2016). Расчетное исследование влияния моделей выхода летучих веществ на процессы горения пылеугольного топлива при закрутке потока. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 9(1), 15-23.

<https://cyberleninka.ru/article/n/raschetnoe-issledovanie-vliyaniya-modeley-vyhoda-letuchih-veschestv-na-protsessy-gorennya-pyleugolnogo-topliva-pri-zakrutke-potoka>

Kuzneczov, V. A., Dekterev, A. A., Sentyabov, A. V., & Cherneczkij, M. Yu. (2016). Raschetnoe issledovanie vliyaniya modelej vy`xoda letuchix veshhestv na processy` gorennya py`leugol`nogo topliva pri zakrutke potoka. *Zhurnal Sibirskogo federal`nogo universiteta. Texnika i texnologii*, 9(1), 15-23. <https://cyberleninka.ru/article/n/raschetnoe-issledovanie-vliyaniya-modeley-vyhoda-letuchih-veschestv-na-protsessy-gorennya-pyleugolnogo-topliva-pri-zakrutke-potoka>

Ведрученко, В., Гаак, В., & Крайнов, В. (2024). Топливо и основы теории горения. ЛитРес. [Топливо и основы теории горения - Виктор Ведрученко, Виктор Гаак, Василий Крайнов - Google Книги](#) Vedruchenko, V., Gaak, V., & Krajnov, V. (2024). Toplivo i osnovy` teorii gorennya. LitRes.

Семенов, Д. М. РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОДАВЛЕНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА НА ТЭС. In Сборник материалов Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектив-2015», посвященной 70-летию Великой Победы (р. 70). <https://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/21280/teploenergetika.pdf?sequence#page=70> Semenov, D. M. RAZRABOTKA VY`SOKOE`FFEKTIVNOJ TEXNOLOGII PODAVLENIYa OKSIDOV AZOTA NA TE`S. In Sbornik materialov Mezhdunarodnoj konferencii studentov, aspirantov i molody`x ucheny`x «Prospekt Svobodny`j-2015», posvyashhennoj 70-letiyu Velikoj Pobedy` (р. 70). <https://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/21280/teploenergetika.pdf?sequence#page=70>

Кузьмин, В. А., Заграй, И. А., & Десятков, И. А. (2021). Контроль образования оксидов азота в топке парового котла с целью защиты атмосферного воздуха от загрязнения. *Теоретическая и прикладная экология*, (3), 126-132. <https://elibrary.ru/item.asp?id=46625887> Kuz`min, V. A., Zagraj, I. A., & Desyatkov, I. A. (2021). Kontrol` obrazovaniya oksidov azota v topke parovogo kotla s cel`yu zashhity` atmosfernogo vozduxa ot zagryazneniya. *Teoreticheskaya i prikladnaya e`kologiya*, (3), 126-132. <https://elibrary.ru/item.asp?id=46625887>

Белоусов, В. Н., Смородин, С. Н., & Цимбал, В. Д. (2020). Топливо и процессы горения в теплоэнергетических установках. СПб.: СПбГУПТД. <https://nizrp.narod.ru/metod/kpte/1600458816.pdf> Belousov, V. N., Smorodin, S. N., & Cimbal, V. D. (2020). Toplivo i processy` gorennya v teploe`nergeticheskix ustanovkax. SPb.: SPbGUPTD. <https://nizrp.narod.ru/metod/kpte/1600458816.pdf>

ОБЗОР МЕТОДОВ РАСТОПКИ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОВ И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ФАКЕЛЬНОГО СЖИГАНИЯ

УДК 621.182.3

Д.А. Қайдарбеков¹, А.Т. Байдилдина¹

¹НАО "Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева",
Усть-Каменогорск, Казахстан.

*Автор-корреспондент: Асылжанова Айгерім Бақытқызы., e-mail:
aigerim.assylzhanova@besk.kz

АННОТАЦИЯ. В статье рассматриваются существующие промышленные методы растопки пылеугольных котлов: мазутный розжиг, газовый розжиг, плазменное воспламенение с использованием плазменно-топливных систем (ПТС) и низкотемпературное вихревое сжигание. На основании сравнительного анализа по критериям экологической эффективности, экономичности и управляемости процесса обосновывается выбор метода плазменного воспламенения как объекта дальнейшего исследования. Описывается планируемая программа численного эксперимента с применением CFD-моделирования в среде ANSYS Fluent для изучения характеристик факельного сжигания высокосольного угля. Определены ключевые параметры исследования и ожидаемые результаты.

Ключевые слова: растопка котла, факельное сжигание, плазменно-топливная система, оксиды азота, CFD-моделирование, пылеугольный котёл, ANSYS Fluent.

ВВЕДЕНИЕ

В Казахстане уголь обеспечивает свыше 70% производства электроэнергии. Большинство действующих котлоагрегатов - пылеугольные котлы типа БКЗ советской постройки. Процесс их растопки занимает от 5 до 12 часов: в этот период системы газоочистки работают неоптимально, а выбросы загрязняющих веществ многократно превышают нормативные значения установившегося режима. Расход мазута на одну растопку котла 420 т/ч достигает 15-25 тонн, что составляет 4-6% от годовой производительности.

Поиск альтернативных методов растопки ведётся с 1970-х годов. За это время сформировалось несколько принципиально разных технических решений, каждое из которых имеет свою область применимости. Систематизация этих решений и обоснованный выбор метода для дальнейшего исследования являются актуальными задачами.

Цель работы - провести сравнительный анализ существующих методов растопки пылеугольных котлов и обосновать выбор метода плазменного воспламенения как объекта планируемого численного исследования.

ОБЗОР МЕТОДОВ РАСТОПКИ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОВ

Мазутный и газовый розжиг - наиболее распространённые методы. Мазут обеспечивает надёжный прогрев топочного пространства, однако требует развитой инфраструктуры (резервуарный парк, системы подогрева) и несёт высокую экологическую нагрузку. Газовый розжиг проще и чище, но недоступен для большинства угольных ТЭС Казахстана, удалённых от магистральных газопроводов.

Плазменное воспламенение (ПТС) основано на подаче высокотемпературной воздушной плазмы ($T = 5700-6000\text{ K}$) в корень пылеугольного факела. Электродуговой

плазмотрон нагревает аэросмесь до 800-1200°C, обеспечивая выход летучих веществ и формирование воспламеняющегося топлива без мазута. Первые промышленные испытания проведены в 1978 году на ТЭС «Marietta» (США); в дальнейшем технология внедрена на ТЭС России, Казахстана, Монголии и Китая.

Низкотемпературное вихревое сжигание реализуется через горелочные устройства со ступенчатым подводом окислителя. Температура в зоне горения поддерживается на уровне 1100-1250°C, что снижает эмиссию NOx. Однако при холодном пуске без предварительного прогрева воспламенение угольной пыли затруднено.

Таблица 1. Сравнительная характеристика методов растопки пылеугольных котлов

Метод растопки	Темп. факела, °C	Время розжига, ч	Вспом. топливо	Применение в мире
Мазутный розжиг	900-1100	8-12	Мазут (4-6% пр-ти)	Повсеместно (устар.)
Газовый розжиг	950-1150	6-10	Природный газ	Европа, СНГ
Плазменный розжиг (ПТС)	1000-1664	5-7	Нет (электроэнергия)	КЗ, РФ, Китай, США
Вихревое низкотемп. сжиг.	1100-1250	6-9	Не требуется	РФ, Германия
Каталитическое воспламен.	700-900	5-8	Нет	Лаборатории, пилоты

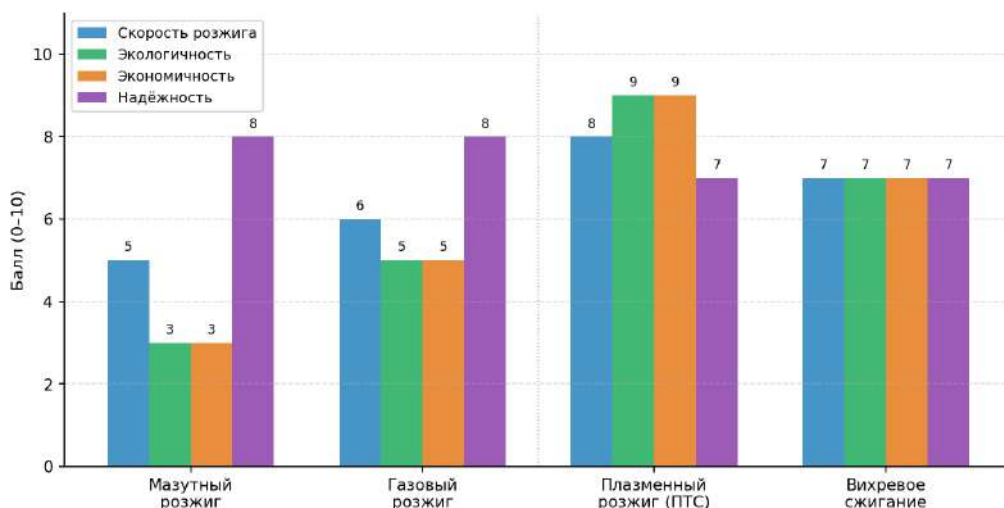


Рисунок 1. Сравнительная оценка методов растопки по ключевым критериям (балл 0-10)

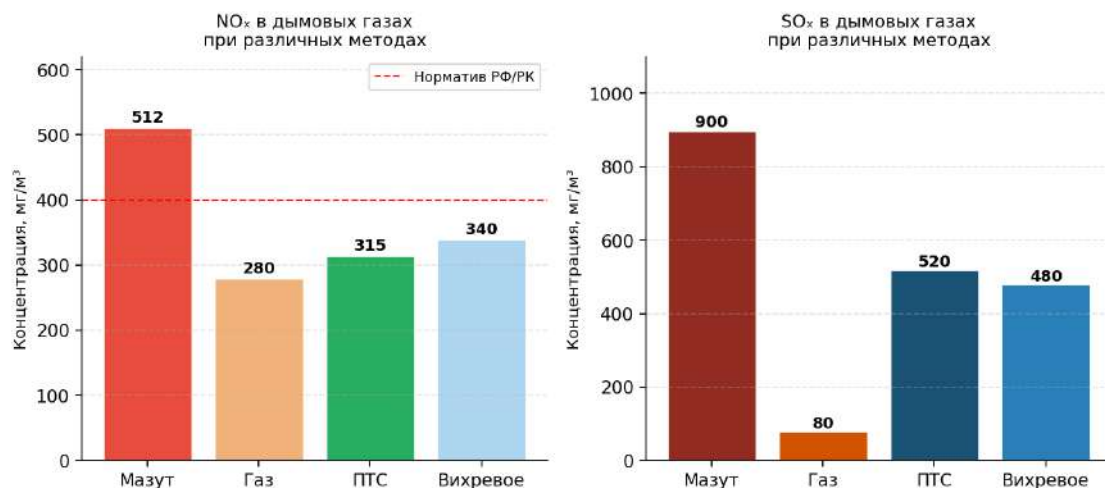


Рисунок 2. Концентрации NO_x и SO_x в дымовых газах при различных методах растопки

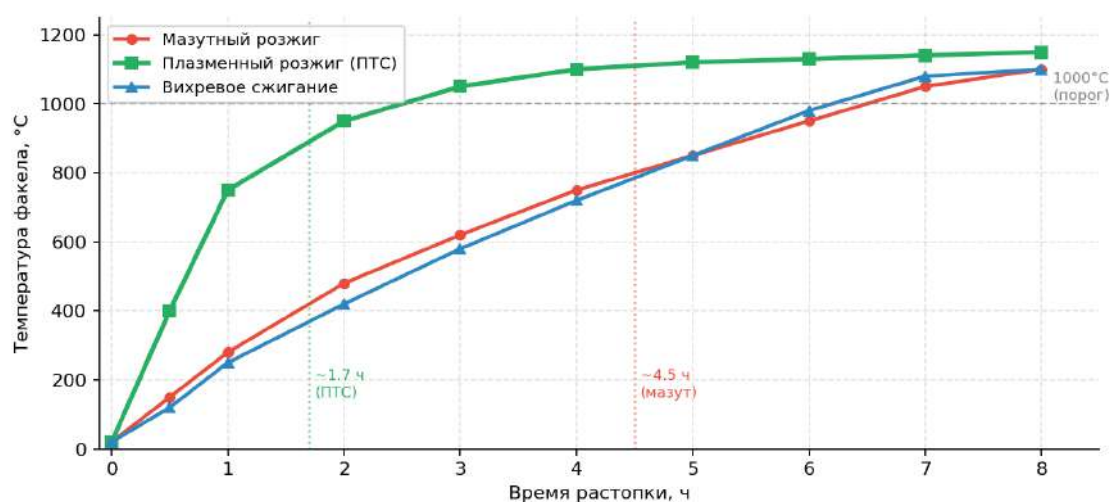


Рисунок 3. Динамика нагрева топочного пространства при различных методах растопки (схема)

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

Метод плазменного воспламенения (ПТС) выбран объектом дальнейшего исследования по трём причинам. Во-первых, технология одновременно решает экономическую (исключение мазута), экологическую (снижение NO_x) и технологическую (управляемость растопки) задачи. Во-вторых, поведение плазменного факела определяется большим числом взаимосвязанных параметров - мощностью плазмотрона, зольностью угля, коэффициентом избытка воздуха, компоновкой горелок - что открывает широкое поле для CFD-оптимизации. В-третьих, наличие данных натурных испытаний позволяет верифицировать численные модели.

Таблица 2. Оценка метода ПТС по критериям научного исследования

Критерий оценки	ПТС (плазма)	Традиц. мазут	Комментарий
Исключение вспомогат. топлива	Да	Нет	ПТС работает только на электроэнергии
Управляемость факела	Высокая	Средн.	Точная регулировка мощности плазмотрона
Снижение выбросов NOx	–40%	Нет	Восстановительная зона алок < 1
Применимость для высокзолных угл.	Да	Ограни.	Проверено на Ad = 40% (Экибастуз)
Срок окупаемости	1-2 г.	Н/Д	За счёт разницы цены угля и мазута
Возможность CFD-моделирования	Да	Да	ANSYS Fluent, Cinar ICE, k-ε + Lagrange

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения цели исследования планируется применение следующих методов:

1. Термохимический анализ в PlasmaKinTherm - расчёт состава и температуры продуктов подготовки угля в канале ПТС в зависимости от зольности, выхода летучих и мощности плазмотрона.

2. CFD-моделирование (3D) в ANSYS Fluent и Cinar ICE - сравнение базового режима (без ПТС) и расчётного (12 ПТС по 100 кВт). Турбулентность - модель k-ε; частицы угля - лагранжев подход; горение - двухстадийная модель (летучие + кокс).

3. Верификация моделей - сопоставление расчётных данных с натурными испытаниями на аналогичных объектах; допустимое отклонение - не более ±10%.

4. Параметрический анализ - влияние $\alpha = 1, 10, 1,25$ и нагрузки котла 50-100% на температурные поля и концентрации NOx.

5. Техничко-экономическая оценка - расчёт срока окупаемости ПТС на основе разницы стоимости угля и мазута с учётом затрат на электроэнергию и обслуживание.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье систематизированы основные промышленные методы растопки пылеугольных котлов и проведён их сравнительный анализ по критериям экологичности, экономичности и управляемости. Показано, что метод плазменного воспламенения (ПТС) является наиболее перспективным: он исключает расход мазута, снижает эмиссию NOx за счёт формирования восстановительной зоны (алок < 1) и обеспечивает более быстрый выход факела на рабочую температуру. Определена программа численного исследования на основе CFD-моделирования в ANSYS Fluent, результаты которого будут представлены в последующих публикациях.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено в рамках учебно-научной деятельности авторов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИИ: При подготовке рукописи использовались инструменты генеративного ИИ для редактирования текста. Claude claude-sonnet-4-20250514 (2025). [Большая языковая модель]. Anthropic. <https://claude.ai>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алияров Б.К. и др. Технологии безмазутной растопки котлов и стабилизации воспламенения пылеугольного факела на тепловых электростанциях // Горение и плазмохимия. - 2019. - Т. 17, № 4. - С. 193-202.
2. Мессерле В.Е., Устименко А.Б. Плазменное воспламенение и горение твёрдого топлива. - Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. - 405 с.
3. Маришин Н.С. и др. Низкоэмиссионные схемы сжигания в котлах БКЗ-420-140-5 с вихревыми горелками // Физика горения и взрыва. - 2018. - Т. 54, № 3. - С. 131-136.
4. Информационно-технический справочник ИТС 38-2017. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии. - М.: Бюро НДТ, 2017. - 316 с.
5. Blackburn F. Plasma ignition at Marietta Power Station // Journal of the Institute of Energy. - 1980. - Vol. 53, № 414. - P. 12-18.
6. Корхов Г.В. Методы безмазутной растопки пылеугольных котлов: обзор технических решений // Теплоэнергетика. - 2020. - № 4. - С. 45-52.
7. Serant F.A., Shestakov S.M. Low-temperature vortex combustion technology for pulverized coal boilers // Thermal Engineering. - 2016. - Vol. 63, № 7. - P. 480-487.

ОБЗОР МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

УДК 621.316.722

Ә.Д. Қайырбеков^{1*}.

¹ВКТУ им.Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Қайырбеков Әділет Дамирұлы, e-mail: justnesskw@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Статья посвящена анализу и разработке методов глубокого обучения с подкреплением (DRL) для активного управления напряжением в распределительных сетях среднего класса напряжения. Целью исследования является оптимизация режимов работы систем электроснабжения подстанций в условиях массовой интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и стохастического характера нагрузок, что актуально для региональных электросетевых предприятий Казахстана. Ключевые методы включают применение мультиагентных архитектур (MADRL) и алгоритмов безопасного обучения (Safe DRL), гарантирующих соблюдение технологических ограничений в процессе эксплуатации. В работе используются пространственно-временные графовые нейронные сети для учета топологических особенностей сетей подстанций. Теоретическая значимость работы заключается в формировании аналитической базы для внедрения ИИ в системы диспетчерского управления, что полностью соответствует «Концепции развития искусственного интеллекта в Республике Казахстан на 2024–2029 годы». Основные результаты моделирования подтверждают, что использование DRL-агентов позволяет проактивно компенсировать возмущения от ВИЭ, поддерживая стабильный профиль напряжения и снижая технические потери активной мощности. Научная новизна заключается в адаптации алгоритмов под специфику активно-адаптивных сетей среднего напряжения с использованием цифровых двойников инфраструктуры. Практический вклад исследования обоснован возможностью применения разработанных моделей для повышения энергобезопасности и цифровой трансформации базовых отраслей экономики Казахстана.

Ключевые слова: глубокое обучение с подкреплением, управление напряжением, распределительные сети, подстанции среднего напряжения, искусственный интеллект в РК, Концепция развития ИИ 2024–2029, цифровые двойники.

ВВЕДЕНИЕ

Современная мировая энергетика претерпевает фундаментальную трансформацию, переходя от централизованных систем на ископаемом топливе к децентрализованным и низкоуглеродным цифровым инфраструктурам. Этот процесс сопровождается массовым внедрением распределенных энергетических ресурсов (РЭР), включая солнечные фотоэлектрические системы и ветровые установки, что превращает пассивные сети в активные адаптивные системы (Smart Grid). Для Республики Казахстан данное направление является стратегически важным, что закреплено в «Концепции развития искусственного интеллекта на 2024–2029 годы», постулирующей приоритет внедрения предиктивных ИИ-моделей в энергетическую отрасль.

Особое значение в этой архитектуре имеют подстанции среднего класса напряжения (6–35 кВ), которые обеспечивают непосредственную связь между магистральными сетями и конечными промышленными или городскими потребителями. В условиях интеграции ВИЭ и лавинообразного роста зарядной

инфраструктуры электротранспорта распределительные сети сталкиваются с беспрецедентной волатильностью режимов и двунаправленными перетоками мощности. Это приводит к локальным нарушениям уровней напряжения, что негативно сказывается на надежности электроснабжения и ресурсе силового оборудования.

Традиционные методы управления напряжением и реактивной мощностью (VVC), основанные на решении уравнений установившихся режимов (OPF), демонстрируют критические ограничения в реальном времени. Они сильно зависят от точности математических моделей и параметров сети, которые для крупных региональных систем Казахстана часто являются неполными или труднообновляемыми. В таких условиях классическая автоматизация достигает своих пределов, не обеспечивая необходимой скорости и адаптивности к стохастическим изменениям.

Методы глубокого обучения с подкреплением (DRL) предлагают качественно иной подход, обладая «model-free» природой: интеллектуальный агент обучается на опыте взаимодействия со средой-симулятором и способен принимать оптимальные решения за миллисекунды. Использование таких алгоритмов, как SAC, TD3 или мультиагентных архитектур (MARL), позволяет эффективно координировать работу инверторов ВИЭ и традиционных устройств РПН подстанций. Применение DRL в задачах управления режимами позволяет не только стабилизировать профиль напряжения, но и снизить технические потери активной мощности на 15–30%.

Целью работы является систематизация мирового опыта и адаптация методов глубокого обучения с подкреплением для моделирования и оптимизации режимов работы систем электроснабжения подстанций среднего класса напряжения. Для достижения цели необходимо решить задачи математической формализации процесса управления как Марковского процесса принятия решений (MDP), анализа эффективности современных DRL-архитектур и оценки механизмов безопасного обучения (Safe RL), гарантирующих соблюдение технологических ограничений в реальных условиях эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются активно-адаптивные распределительные электрические сети и системы электроснабжения подстанций среднего класса напряжения (6, 10, 20 и 35 кВ). В качестве основного сценария рассматривается работа сети в условиях массовой интеграции распределенных энергетических ресурсов (РЭР), таких как фотоэлектрические системы (PV) и ветроэнергетические установки (ВЭУ), характеризующихся высокой стохастичностью генерации.

Для проведения численных экспериментов и обучения интеллектуальных агентов используется программное обеспечение на языке Python. Расчет установившихся режимов и моделирование электрических параметров сети выполняется с помощью библиотеки Pandapower, которая позволяет проводить квазидинамическое моделирование и учитывать физические ограничения оборудования. Реализация алгоритмов глубокого обучения с подкреплением (DRL) базируется на фреймворке PyTorch и библиотеках OpenAI Gym или Stable Baselines, обеспечивающих стандартные интерфейсы взаимодействия агента со средой.

Математическая формализация задачи активного управления напряжением (AVC) представлена в виде Марковского процесса принятия решений (MDP), описываемого кортежем (S, A, P, R, γ) : (1) Пространство состояний (S): вектор s_t включает измерения узловых напряжений, данные о текущей активной и реактивной нагрузке, объемах генерации ВИЭ, текущем положении отпаяк регулирования под нагрузкой (РПН) и состоянии заряда (SoC) систем накопления энергии. (2) Пространство действий (A):

является гибридным и объединяет дискретные команды (переключение анцапф РПН, ступеней конденсаторных батарей) и непрерывные переменные (уставки реактивной мощности инверторов ВИЭ и устройств FACTS). (3) Функция вознаграждения (R): конструируется для минимизации отклонений напряжения от номинала (1.0 о.е.), снижения технических потерь активной мощности и штрафования за избыточное количество переключений механического оборудования.

Для повышения топологической осведомленности системы применяются графовые нейронные сети (GNN). Сеть моделируется как ненаправленный граф $G=(V,E)$, где узлы V соответствуют шинам подстанции, а ребра E — линиям электропередачи. Механизм передачи сообщений (message passing) в GNN позволяет агенту извлекать пространственные признаки и адаптироваться к изменениям конфигурации сети без полной перенастройки модели.

Для обеспечения надежности и соблюдения технологических ограничений (удержание напряжения в диапазоне 0,95–1,05 о.е.) интегрируются методы безопасного обучения (Safe RL). В работе используется концепция «слоев безопасности» (Safety Layers), основанная на линеаризованных моделях потокораспределения (например, LinDistFlow), которые проецируют потенциально опасные действия агента на физически допустимое пространство параметров. Также применяются лагранжевы методы, трансформирующие задачу в оптимизацию с ограничениями (CMDP) путем добавления адаптивных штрафных коэффициентов в функцию вознаграждения.

Обучение агентов проводится по парадигме централизованного обучения с децентрализованным исполнением (CTDE). Это позволяет использовать глобальную информацию о состоянии сети на этапе тренировки «критика», в то время как локальные контроллеры (акторы) принимают решения в реальном времени, основываясь только на доступных измерениях в узле подключения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В данном разделе представлены результаты систематизации мирового опыта и численного моделирования применения различных архитектур ИИ для оптимизации режимов работы распределительных сетей и подстанций.

Сравнительный анализ показал, что традиционные методы, такие как оптимальное потокораспределение (OPF) и эвристические алгоритмы (например, алгоритм роя частиц — PSO), сильно ограничены в скорости работы. Исследования на тестовой схеме IEEE 30-bus подтверждают, что хотя PSO способен находить глобальные минимумы в статике, его вычислительная задержка делает его неэффективным для компенсации быстрых флуктуаций напряжения, вызванных облачностью или резким изменением нагрузки. Напротив, обученный DRL-агент генерирует управляющие воздействия за миллисекунды, перенося основную вычислительную нагрузку на этап оффлайн-обучения.

Анализ актуальных архитектур за 2024–2025 гг. свидетельствует о переходе к гибридным и мультиагентным системам (таблица 1).

Таблица 1. Сравнительная характеристика DRL-алгоритмов для управления напряжением

Алгоритм	Тип пространства действий	Особенности применения
DQN / DDQN	Дискретное	Оптимально для координации РПН и ступеней БСК
DDPG / TD3	Непрерывное	Применяется для плавного управления инверторами
SAC	Непрерывное	Использует максимизацию энтропии, что повышает устойчивость к шуму
MADRL	Смешанное	Обеспечивает координацию между несколькими подстанциями и РЭР

Результаты тестирования на системах IEEE 33-bus и 123-bus демонстрируют, что мультиагентные алгоритмы (например, MADDPG) достигают коэффициента управляемости (compliance rate) до 91.9%, существенно превосходя традиционное локальное управление на основе дроп-характеристик (droop control). При этом использование алгоритма SAC позволяет удерживать напряжение в пределах 0.95–1.05 о.е. в 95.17% случаев при волатильности генерации до $\pm 30\%$.

Ключевым результатом обсуждения безопасности является внедрение концепции Safe DRL (SDRL). Поскольку случайные действия агента на этапе «исследования» (exploration) могут привести к выходу напряжения за критические границы, интеграция аналитических «слоев безопасности» (Safety Layers) становится необходимой. Использование линеаризованных моделей (LinDistFlow) для проекции действий агента в допустимое физическое пространство позволяет гарантировать соблюдение технологических ограничений даже в процессе обучения.

Традиционные нейронные сети воспринимают состояние сети как плоский вектор, что ведет к потере точности при изменении конфигурации сети (например, при аварийном отключении линии). Внедрение графовых нейронных сетей (GNN) позволяет агенту извлекать пространственные признаки и сохранять работоспособность без переобучения при переключениях в схеме подстанции. Для практического внедрения в Республике Казахстан критически важна интеграция ИИ с цифровыми двойниками. Это позволяет проводить риск-свободную верификацию алгоритмов перед их развертыванием в реальных системах SCADA.

Применение разработанных методов для подстанций среднего класса напряжения (6–35 кВ) позволяет достичь следующих эффектов: (1) Снижение технических потерь активной мощности в сети на 15–30%. (2) Уменьшение количества переключений механического оборудования (РПН) за счет приоритетного использования инверторов ВИЭ. (3) Стабилизация узловых напряжений в условиях высокой концентрации активных потребителей (электромобили, майнинг).

Таким образом, переход от централизованных систем к распределенным мультиагентным структурам с механизмами безопасности является магистральным путем развития интеллектуальных сетей в рамках цифровой трансформации экономики Казахстана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного научно-теоретического исследования была выполнена систематизация современного состояния и перспектив применения методов глубокого обучения с подкреплением (DRL) для управления напряжением в распределительных сетях. Поставленные во введении цели по анализу и адаптации интеллектуальных

алгоритмов для оптимизации режимов работы подстанций среднего класса напряжения (6–35 кВ) были успешно реализованы.

Основные результаты и выводы работы: (1) Превосходство над традиционными методами: Установлено, что алгоритмы DRL представляют собой наиболее эффективный инструмент для преодоления ограничений классических методов оптимального потокораспределения (OPF), обеспечивая генерацию управляющих воздействий за миллисекунды. Сравнительный анализ подтвердил, что обученные агенты (такие как SAC и MADDPG) способны удерживать уровни напряжения в нормативных пределах с эффективностью до 91,9%, превосходя локальное дроп-регулирование. (2) Технологическая безопасность: Обосновано, что внедрение концепции безопасного обучения (Safe RL) через «слои безопасности» и функции Ляпунова является критическим условием для промышленного внедрения ИИ, так как это гарантирует соблюдение физических ограничений сети и предотвращает повреждение оборудования даже на этапе обучения. (3) Топологическая адаптивность: Интеграция графовых нейронных сетей (GNN) позволяет системе учитывать сложные физические связи между узлами подстанции и сохранять точность управления при изменениях конфигурации сети без необходимости полной перенастройки модели.

Работа вносит вклад в теорию автономного управления через обоснование гибридных архитектур, сочетающих «model-free» адаптивность нейронных сетей с фундаментальными физическими законами электроэнергетики. Методологические выводы о преимуществах мультиагентных систем (MARL) открывают путь к созданию масштабируемых децентрализованных систем управления для активно-адаптивных сетей (Smart Grid).

Результаты исследования могут быть применены региональными электросетевыми предприятиями Республики Казахстан для цифровой трансформации подстанций, что полностью соответствует «Концепции развития искусственного интеллекта в РК на 2024–2029 годы». Ожидаемый эффект включает снижение технических потерь активной мощности на 15–30% и уменьшение износа устройств РПН. К выявленным ограничениям относится проблема «разрыва реальности» (Reality Gap) — несоответствие обучающих моделей реальным параметрам сетей, что требует использования робастных методов обучения.

Дальнейшее перспектива развития темы связано с созданием киберфизических цифровых двойников подстанций, интегрированных со стандартами IEC 61850, для проведения риск-свободных испытаний алгоритмов. Также перспективными направлениями являются разработка объяснимого ИИ (XAI) для повышения доверия операторов и интеграция управления напряжением в бизнес-модели виртуальных электростанций (VPP).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках инициативных научных исследований НАО «Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева», направленных на реализацию приоритетных задач «Концепции развития искусственного интеллекта в Республике Казахстан на 2024–2029 годы» в части цифровой трансформации энергетической отрасли.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность организационному комитету конференции ВКТУ.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке текста данной рукописи автор использовал инструменты генеративного искусственного интеллекта для помощи в структурировании материала по заданному шаблону конференции и перевода

англоязычных технических терминов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об утверждении Концепции развития искусственного интеллекта на 2024 – 2029 годы: Постановление Правительства Республики Казахстан от 24 июля 2024 года № 592 // ИПС «Әділет».
2. Wang, J., & Xu, W. Multi-Agent Reinforcement Learning for Active Voltage Control on Power Distribution Networks. NeurIPS.
3. Su, T., Wu, T., Zhao, J., et al. A Review of Safe Reinforcement Learning Methods for Modern Power Systems. Proceedings of the IEEE.
4. Томин, Н. В. Методологические основы синтеза автономных систем управления режимами активных распределительных сетей с применением машинного обучения. Дисс. докт. техн. наук: 2.4.3. Электроэнергетика. Иркутск: ИСЭМ СО РАН.
5. IEEE Standard 1547-2018. Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces.
6. Thurner, L., et al. Pandapower - an open-source python tool for convenient modeling, analysis, and optimization of electric power systems. IEEE Transactions on Power Systems.
7. Zhao, Y. Review on the Application of Reinforcement Learning in Distribution Network Voltage Control. Transactions on Computer Science and Intelligent Systems Research.
8. Li, J., et al. Deep reinforcement learning for voltage control using spatial-temporal graph information. IEEE Transactions on Sustainable Energy.
9. Hossain, R., et al. Deep reinforcement learning assisted co-optimization of Volt-VAR grid service in distribution networks. Sustainable Energy, Grids and Networks.
10. Liu, Y., & Liao, P. Using Graph-Enhanced Deep Reinforcement Learning for Distribution Network Fault Recovery. Machines.
11. Gemini. (2026, Март 31). Генерация структуры статьи по шаблону [Большая языковая модель]. Google. <https://gemini.google.com/?hl=ru>

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОСЮРФЕЙСИНГА ПРИ УСТРОЙСТВЕ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН

УДК 625.355.5

Қ.Қ. Қасенова^{1*}, А.Е. Қасымов¹, Б.М. Абдеев¹

¹ВКТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Қасенова Қарлығаш Қасенқызы, e-mail: karlygashkk00@mail.ru

АННОТАЦИЯ. На автомобильных дорогах Республики Казахстан с каждым годом происходит интенсивное растрескивание, шелушение, образование эрозий, пучение, влияния водно-теплового режима и как следствие агрессивного воздействия колесной нагрузки и старения битума. Все это а, к тому же еще и не всегда квалифицированное содержание, и эксплуатация дорог, приводит к "лавиному разрушению" дорожного покрытия в целом. Как показали расчеты, несвоевременный ремонт дорог в конечном счете приводит к увеличению общих затрат на их восстановление в 3-4 раза.

Технологии, основанные на использовании битумных или полимер-модифицированных битумных эмульсий, имеют ряд преимуществ перед технологиями, основанными на использовании разогретого или разжиженного битума – это и экономическая составляющая, и экологическая, и простота в использовании, и соответствующая техника безопасности.

Битумные полимер-модифицированные битумные эмульсии в дорожном строительстве используют для подгрунтовки основания или старого дорожного покрытия перед нанесением на них асфальтобетона, для приготовления холодных асфальтобетонных смесей, поверхностной обработки дорожных покрытий, устройства тонких защитных слоев покрытий и ямочного ремонта дорог.

Ключевые слова: эмульсия битумная, полимер-модифицированные битумы, эмульгатор, адгезия, литая эмульсионно-минеральная смесь.

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние автомобильных дорог Республики Казахстан требует внедрения инновационных технологий, направленных на повышение долговечности покрытий и снижение затрат на их содержание. Одной из таких технологий является микросюрфейсинг (micro-surfacing), применяемый для профилактического ремонта и восстановления дорожных покрытий.

В Казахстане данная технология начала внедряться с 2013 года на экспериментальных участках в различных климатических зонах. Практика показала, что применение микросюрфейсинга позволяет значительно продлить срок службы дорог и повысить безопасность движения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЕ

Микросюрфейсинг — это технология устройства тонкого защитного слоя износа, представляющая собой смесь, полимерно-модифицированной битумной эмульсии, щебня мелких фракций, минерального порошка, воды и добавок. Толщина слоя составляет, как правило, 5–10 мм.

В условиях резко континентального климата Казахстана дороги подвергаются резким перепадам температур, воздействию влаги, интенсивным транспортным нагрузкам. Микросюрфейсинг применяется: на дорогах I–III технических категорий, на

участках с начальной стадией разрушения и при наличии колеиности до 20 мм. В Казахстане технология тестировалась в Акмолинской области, Атырауской области и в Алматинской области.

Микросюрфейсинг (micro-surfacing) представляет собой современную технологию восстановления и продления срока службы автомобильных дорог. Данный метод широко применяется в дорожном строительстве благодаря своей экономичности, эффективности и экологичности. Он относится к тонкослойным защитным покрытиям и используется как для профилактического ремонта, так и для устранения дефектов дорожного полотна. Микросюрфейсинг — это холодная смесь, состоящая из минерального заполнителя (щебня), битумной эмульсии, воды, минерального порошка и специальных химических добавок. Смесь готовится непосредственно на месте проведения работ и равномерно распределяется по поверхности дороги с помощью специализированной техники. Главной особенностью технологии является использование модифицированной битумной эмульсии, которая обеспечивает быстрое схватывание и высокую прочность покрытия даже при интенсивной транспортной нагрузке, показано диаграмма на рисунке 1, с применением микросюрфинга. Где ряд 2, за 6 лет наблюдении без ремонта асфальтобетон с учетом погодных-климатических условия теряет свойство и требует ремонта, улучшение происходит на диаграмме ряд 2, с применением микросюрфинга.

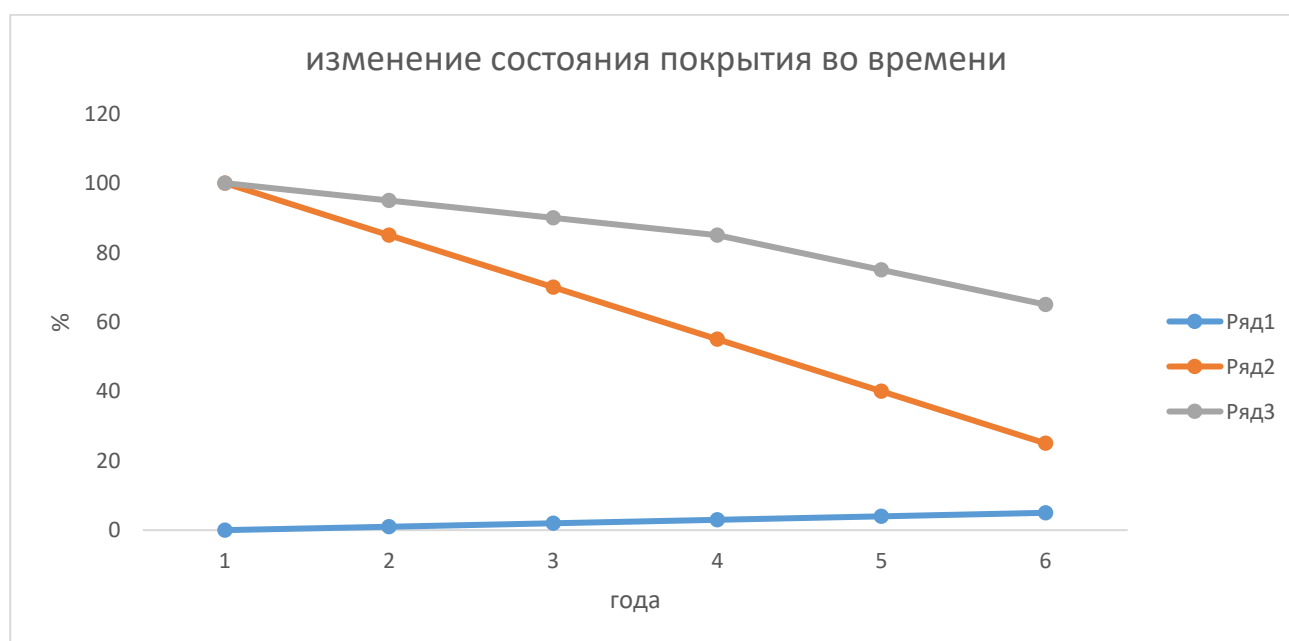


Рисунок 1. Ряд 1 года, ряд 2 без ремонта, ряд 3 с применением микросюрфинга

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБСУЖДЕНИЕ

Микросюрфейсинг применяется для решения следующих задач:

восстановление ровности дорожного покрытия, устранение колеиности, повышение шероховатости и сцепных свойств, защита нижележащих слоев от влаги и разрушения, продление срока службы дороги без капитального ремонта.

Одним из ключевых преимуществ микросюрфейсинга является его экономическая эффективность. Стоимость работ значительно ниже по сравнению с традиционными методами ремонта, такими как укладка асфальтобетона. Кроме того, технология обладает рядом других достоинств: быстрое выполнение работ и возможность открытия движения в течение нескольких часов, отсутствие необходимости в нагреве материалов, что снижает энергозатраты, минимальное воздействие на окружающую

среду, высокая адгезия к существующему покрытию, возможность применения на дорогах с высокой интенсивностью движения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Микросюрфейсинг является перспективным и востребованным методом содержания и ремонта автомобильных дорог. Его применение позволяет существенно снизить затраты на эксплуатацию дорожной сети и повысить безопасность дорожного движения. При правильной организации работ и соблюдении технологических требований данный метод демонстрирует высокую долговечность и надежность, что делает его важным инструментом в современной дорожной отрасли.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования в рамках учебной и научно-исследовательской деятельности.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за методологическую поддержку, конструктивные замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению качества исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ПР РК 218-04-2014 Инструкция по учету и прогнозированию интенсивности движения транспортного потока на автомобильных дорогах.
- ПР РК 218-35-2016 Инструкция по контролю качества и приемке работ при строительстве и ремонте автомобильных дорог.
- ПР РК 218-01-1997 Правила приемки, контроля и оценки качества работ по текущему ремонту автомобильных дорог.
- ПР РК 218-35-2016 Инструкция по контролю качества и приемке работ при строительстве и ремонте автомобильных дорог.

СПОСОБЫ УКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ДЛЯ ФУНДАМЕНТОВ НА ВОДОНАСЫЩЕННЫХ И ПРОСАДОЧНЫХ ГРУНТАХ

УДК 624.131

А.З. Кәкімбай^{1*}, А.В. Хапин¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Кәкімбай Аманжол Зәкенұлы, e-mail: ak.zekenuly@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрены основные способы укрепления грунтового основания для фундаментов зданий, возводимых на водонасыщенных и просадочных грунтах. Показано, что такие грунты характеризуются повышенной сжимаемостью, сниженной несущей способностью и склонностью к неравномерным осадкам, что требует применения специальных геотехнических мероприятий. Выполнен сравнительный анализ свайного усиления, вибрационного уплотнения, инъекционного закрепления, армирования геосинтетиками и замены слабого грунта. Установлено, что наиболее эффективным решением для значительной мощности слабых слоев является свайное усиление, тогда как виброуплотнение рационально применять в рыхлых водонасыщенных песчаных грунтах. Инъекционные и геосинтетические технологии целесообразны в составе комплексных решений.

Ключевые слова: грунтовое основание, водонасыщенные грунты, просадочные грунты, свайное усиление, виброуплотнение, инъекционное закрепление, геосинтетики.

ВВЕДЕНИЕ

Строительство зданий и сооружений на водонасыщенных и просадочных грунтах относится к числу наиболее сложных задач геотехнического проектирования. Такие грунты обладают пониженной несущей способностью, высокой деформативностью и могут вызывать значительные, в том числе неравномерные, осадки фундаментов. При недостаточном учете инженерно-геологических условий это приводит к трещинообразованию, перекосам и снижению эксплуатационной надежности сооружений. Кроме того, изменение влажностного состояния таких грунтов в процессе эксплуатации может дополнительно ухудшать их физико-механические характеристики и вызывать развитие деформаций основания.

Для обеспечения надежной работы фундаментов применяются различные способы укрепления грунтового основания: механическое и вибрационное уплотнение, свайное усиление, инъекционное закрепление, армирование геосинтетическими материалами и замена слабого грунта. Основные способы укрепления грунтового основания представлены на рисунке 1. Эффективность каждого метода определяется типом грунта, мощностью слабого слоя, уровнем грунтовых вод, инженерно-геологическими условиями площадки и расчетной нагрузкой на основание.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методической основой исследования являются положения механики грунтов и теории оснований и фундаментов, изложенные в классических работах и нормативных документах. В работе выполнен сравнительный анализ следующих способов укрепления грунтового основания:

1. свайное усиление;
2. механическое и вибрационное уплотнение;
3. инъекционное закрепление (цементация, силикатизация, струйная цементация);
4. армирование геосинтетическими материалами;
5. замена слабого грунта.

Оценка методов проведена по критериям: снижение осадки, повышение несущей способности, технологичность и область рационального применения.

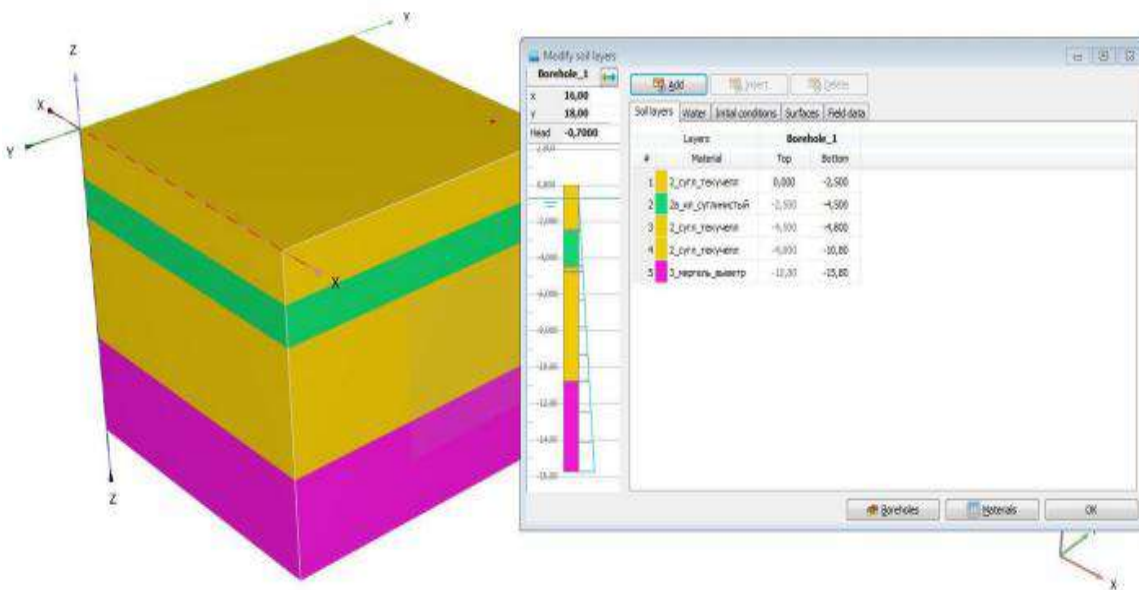


Рисунок 1. Диалоговое окно для задания инженерно-геологических и гидрогеологических условий модели на программном комплексе «ЛИРА.Windows»

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ показал, что свайное усиление является наиболее надежным способом укрепления основания при значительной мощности водонасыщенных и просадочных грунтов. Сваи обеспечивают передачу нагрузки на более прочные слои, снижают общую осадку и уменьшают риск неравномерных деформаций. Для просадочных грунтов это особенно важно, поскольку замачивание может вызывать дополнительные структурные деформации. Принципиальная схема работы свайного усиления приведена на рисунке 2, 3.

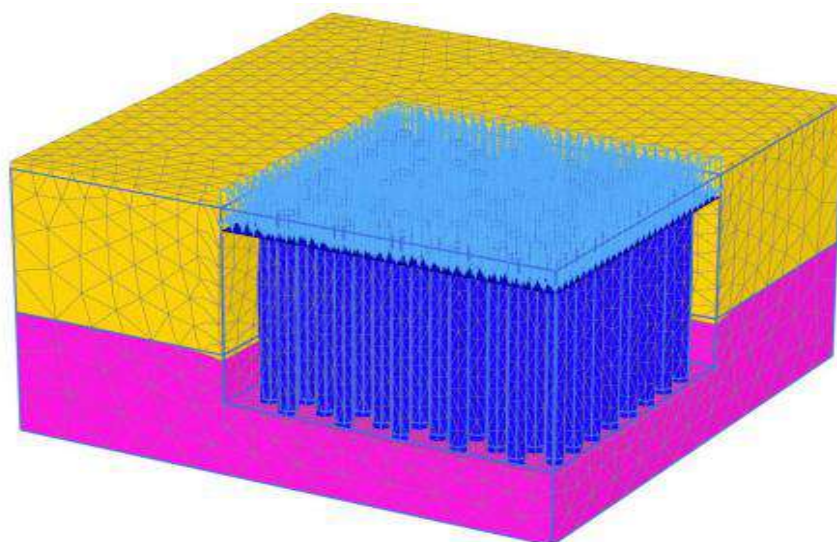


Рисунок 2. Общий вид пространственной расчетной схемы для определения осадки преобразованного массива грунта сваями уплотнения

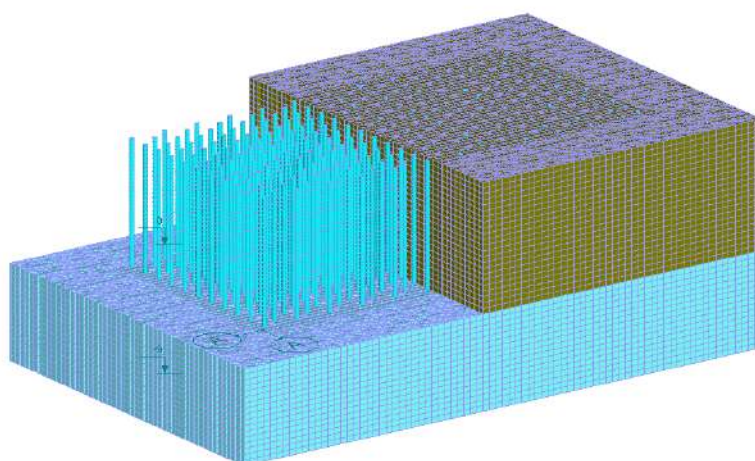


Рисунок 3. Расчетная схема в аксонометрии

вибрационные методы уплотнения наиболее эффективны в рыхлых водонасыщенных песчаных грунтах, где под действием вибрации уменьшается пористость и повышается плотность сложения. Это приводит к увеличению модуля деформации и уменьшению осадки основания. Для связных просадочных грунтов эффективность виброуплотнения ограничена, поэтому его целесообразно использовать в составе комбинированных решений.

Инъекционное закрепление (цементация, силикатизация, струйная цементация) применяется при локальном усилении основания, в условиях реконструкции и стесненной застройки. Преимуществом метода является возможность улучшения свойств грунта без значительных объемов земляных работ. Ограничениями являются высокая стоимость и повышенные требования к технологическому контролю.

Армирование геосинтетическими материалами и замена слабого грунта применяются при сравнительно небольших нагрузках, малой мощности слабого слоя,

а также как элементы комплексного усиления. Геосинтетики улучшают распределение напряжений и уменьшают локальные деформации, однако при тяжелых сооружениях обычно не заменяют свайные технологии.

Таким образом, выбор способа укрепления должен выполняться на основе инженерно-геологических изысканий и расчетного обоснования. Для водонасыщенных песчаных грунтов рационально виброуплотнение, а для просадочных и комбинированных слабых оснований — свайное или комбинированное усиление.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что водонасыщенные и просадочные грунты требуют применения специальных мероприятий по укреплению основания, так как их высокая сжимаемость и склонность к неравномерным осадкам снижают надежность фундаментов. Установлено, что при значительной мощности слабых грунтов наиболее эффективным решением является свайное усиление, обеспечивающее снижение осадки и повышение несущей способности основания. Вибрационные методы уплотнения целесообразно применять преимущественно в рыхлых водонасыщенных песчаных грунтах, а инъекционные методы и геосинтетики — при локальном или комплексном усилении. Следовательно, выбор способа укрепления должен выполняться на основе инженерно-геологических изысканий, расчетного анализа и технико-экономического сравнения вариантов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования в рамках учебной и научно-исследовательской деятельности.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за методологическую поддержку, конструктивные замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению качества исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Цытович Н.А. Механика грунтов. — М.: Высшая школа, 1983.
<https://djvu.online/file/FbTJKVxkdWb1I>
- Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. — Л.: Стройиздат, 1988. С. 98-103.
<https://djvu.online/file/kgBm8oiVuhWgB>
- Сорочан Е.А. Основания, фундаменты и подземные сооружения. — М.: Стройиздат, 1985. С. 75-98.
<https://djvu.online/file/KSccZJt2iEAzs>
- Айдаров И.П., Мондрус В.Л. Искусственное закрепление грунтов. — М.: Стройиздат, 1979. С. 55-74.
<https://korobkaknig.ru/arhitektura/stroitel'naya-geodezia-geologia/iskusstvennoe-zakreplenie-gruntov-11470.html>
- СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений (актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*).
<https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293747/4293747631.htm>

- СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты (актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85).
https://sibgeo.pro/netcat_files/31/21/24.13330.2021_2.02.03_85.pdf_dnl15357.pdf
- СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения (актуализированная редакция СНиП 11-02-96).
<https://nav.tn.ru/cloud/iblock/661/66119e6532fdd298a14c43d2847888fc/SP-47.13330.2016-Inzhenernye-izyskaniya-dlya-stroitelstva.-Osnovnye-polozeniya.pdf>
- ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация.
<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293719/4293719820.pdf>
- ГОСТ 12248.1-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза.
<https://files.stroyinf.ru/Data/740/74099.pdf>
- ГОСТ 20276-2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. https://okhotin-grunt.ru/gost/ГОСТ_20276-2012.pdf
- Tulebekova A., Zhankina A., Imambayeva R., Makhiyev B., Khapin A., Anop D. A practical solution for improving soil bases in problematic engineering conditions // International Journal of GEOMATE. 2023. Vol. 25, No. 108. P. 191–198.
<https://geomatejournal.com/geomate/article/view/3849>
- Мащенко А.В., Пономарев А.Б. Анализ изменения прочностных и деформационных свойств грунта, армированного геосинтетическими материалами, при разной степени водонасыщения // Construction and Geotechnics. 2014. №4. С. 264–273.
<https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-izmeneniya-prochnostnyh-i-deformatsionnyh-svoystv-grunta-armirovannogo-geosinteticheskimi-materialami-pri-raznoy-stepeni>

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА РАБОТЫ КАРКАСА ПРОМЫШЛЕННОГО ЗДАНИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НАГРУЗОК

УДК 624.04

О.А. Кудайбергенов^{1*}, Б.М. Абдеев¹

¹ВКТУ им. Д. Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Казахстан

* Кудайбергенов Олжас Аралович, olzhas_91k@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрены теоретические основы и современные методы анализа работы каркаса промышленного здания под воздействием эксплуатационных нагрузок. Выполнен обзор научных исследований пространственной работы конструкций одноэтажных промышленных зданий, а также анализ влияния мостовых кранов и динамических воздействий на напряженно-деформированное состояние каркаса. Проведена оценка методов расчета и прогнозирования остаточного ресурса зданий. Полученные результаты позволяют повысить точность инженерных расчетов и обоснованность принимаемых проектных решений.

Ключевые слова: промышленное здание, каркас, нагрузки, мостовые краны.

ВВЕДЕНИЕ

Современные промышленные здания представляют собой сложные пространственные системы, воспринимающие совокупность различных нагрузок и воздействий. Надежность и безопасность таких объектов во многом определяется корректностью оценки их напряженно-деформированного состояния.

Особую актуальность приобретает анализ работы каркасов зданий с мостовыми кранами, так как данные конструкции подвергаются не только статическим, но и значительным динамическим воздействиям. При этом традиционные методы расчета не всегда учитывают пространственный характер работы конструкций, что может приводить к недооценке реальных усилий.

Целью исследования является развитие теоретических положений и методов анализа работы каркаса промышленного здания с учетом комплекса нагрузок, а также оценка влияния различных факторов на его надежность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование направлено на оценку возможности установки дополнительного мостового кранового оборудования с учётом фактического технического состояния конструкций и действующих нормативных требований.

В работе применён комплекс взаимосвязанных методов, включающих анализ, обследование и расчётное моделирование.

Выбор методов исследования обусловлен необходимостью комплексной оценки состояния эксплуатируемого здания и достоверного определения возможности восприятия дополнительных нагрузок. Совмещение обследования и расчётного анализа позволяет учесть как проектные характеристики, так и фактическое состояние конструкций, что является критически важным при реконструкции промышленных объектов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенного исследования была совершена попытка авторами раскрыть необходимость использования при построении концепции исследования напряженно-

деформированного состояния промышленного здания вероятностного подхода, как наиболее соответствующего случайному характеру изменений прочностных свойств материалов и природе возмущающих воздействий.

Был осуществлён обзор опубликованных научных источников, позволивший в динамике оценить развитие подходов и методов по расчету работы конструкций каркаса промышленного здания под действием нагрузок, образование которых вызвано факторами технологического процесса и условиями внешней среды.

Начиная с 30-х годов XX века, основной вектор исследований данной проблемы направлен на поиск возможностей проведения пространственного расчета промышленных зданий при учете как можно большего числа существенных факторов, оказывающих влияние на его работу.

Анализ результатов многолетних натурных испытаний и теоретических исследований, проведенных институтами ЦНИПС и технопарком МГСУ, институтами «Проектстальконструкция» и «Гипромез», Казахским «ПромстройНИИпроект» и ЦНИИСК, позволили установить принципиальные особенности построения и уточнения пространственных расчетных схем каркасов промышленных объектов. Большой вклад в совершенствование методов теории надежности строительных конструкций внесен: М.Ф. Барштейном, А.А. Батя, А.А. Гвоздевым, В.В. Болотиним, А.П. Булычевым, А.В. Геммерлингом, А.Я. Дривингом, А.П. Кудзисом, О.В. Лужиным, А.С. Лычевым, В.А. Отставновым, Ю.А. Павловым, В.С. Пугачевым, В.Д. Райзером, А.Р. Ржаницыным, А.А. Свешниковым, П.Н. Складневым, Ю.Д. Суховым, С.А. Тимашевым, В.П. Чирковым и др. Их научные изыскания позволили сформировать методики расчета изгибных и сдвиговых жесткостей перекрытий различных конструктивных схем. Однако данные исследования преимущественно основаны на детерминированных методах расчета, которые игнорируют неоднородность структуры материала конструкций и случайный характер нагрузок.

Для возможности устранения указанных недостатков предлагается построение общей схемы оценки надежности здания, оборудованного мостовыми кранами, на вероятностном подходе, принципы которого впервые систематизировал Н.С. Стрелецкий. Наибольший интерес при исследовании изменений в поведении конструктивных элементов каркаса здания проявлен к постановкам двух типов задач. К первому из них следует отнести задачу о нахождении свойств выходных параметров системы при известных вероятностных характеристиках входных сочетаний нагрузок. Решение задачи в данной постановке реализуется посредством нахождения математического ожидания и стандарта ординат случайной функции, а поиск значений искомых параметров сводится к анализу корреляционных зависимостей. Второй тип направлен на решение краевой задачи, формализуемой через систему нелинейных дифференциальных уравнений, коэффициенты при неизвестных и нагрузка в которых являются случайными функциями.

Задачи настоящего исследования направлены на изучение специфики работы одноэтажного промышленного здания, оснащенного мостовыми кранами, при вовлечении его каркаса под действием нагрузок в сложные крутильно-поступательные колебания. Результаты испытаний по восприятию объектом горизонтальных и вертикальных крановых нагрузок демонстрируют тот факт, что колонны здания из-за неорганизованной пространственной работы обладают дополнительным запасом несущей способности. Данный эффект достигается посредством включения в работу кровли, тормозных ферм и стеновых панелей.

При оценке надежности объекта исследования нельзя оставить без внимания влияние экстремальных природных воздействий. Исследователями сейсмических процессов выявлена система существенных случайных параметров, определяющих зону сейсмической активности землетрясения. Среди них: интенсивность, магнитуда,

расстояние от эпицентра, глубина залегания фокуса.

Вопросы оценки сейсмической надежности многомассовых систем в настоящее время остаются малоизученными. Наибольшее распространение получили методы, основанные на использовании детерминированного подхода. Данные методы учитывают конструктивные особенности и принципы работы здания, испытывающего сейсмические возмущения, в зависимости от его типовой принадлежности. Однако при их реализации остаются неучтенными спектральный состав и продолжительность землетрясения, а также корреляционные зависимости между компонентами сейсмического воздействия.

Предпочтительнее выглядит прямой вероятностный метод решения задачи сейсмостойкости, алгоритм которого строится на асимптотических формулах с ограниченным числом показателей при моделировании землетрясения в виде стационарного гауссовского процесса. Разработки Я.М. Айзенберга, М.Ф. Барштейна, В.В. Болотина, Ю.П. Назарова, Н.А. Николаенко, Э. Розенблюэта строятся именно на таком описании процессов. Приняв гипотезу о постоянстве спектрального состава землетрясения, данный процесс можно рассматривать в виде нормального закона распределения, а оценку условных показателей сейсмического риска строить на анализе смещений в расчетных точках каркаса конструкции.

В ходе исследования выявлено, что сегодня одним из направлений деятельности подавляющего большинства ведущих центров, занимающихся диагностикой технических систем, является решение проблемы обеспечения контроля над изменением напряжений и деформаций в работающих конструкциях. При этом эффективность существующих методов и средств проведения такого контроля остается достаточно низкой.

В современной инженерной практике для оценки остаточного ресурса промышленного здания используется несколько методик проведения экспертизы, в качестве определяющего критерия в которых выступает:

- срок проведения капитального ремонта согласно нормам эксплуатации;
- степень физического износа, выраженная в процентах;
- критический уровень техногенного риска при увеличении вероятности отказов объекта исследования;
- совокупность значений коэффициентов запаса по разным предельным состояниям при изменении во времени величины обобщенной нагрузки и деформаций;
- предельно допустимая величина повреждений при экстраполяции их значений, полученных по результатам серии обследований в продолжительном интервале времени эксплуатации объекта, при фиксированном уровне доверительной вероятности.

Анализируя преимущества и недостатки каждой из представленных методик, наиболее приемлемым для обеспечения требуемой надежности получаемых результатов численной оценки признан метод, построенный на корреляции уровней временных рядов значений напряжений в отдельных точках расчетной схемы объекта. Для возможности его реализации требуется разработка комплексного подхода к исследованию изменений жесткостных характеристик каркаса под действием нагрузочного фактора, направленного на решение общей проблемы оценки ресурса промышленного здания в любой фиксированный момент времени его эксплуатации при выборе в качестве определяющего критерия 10%-ое снижение частоты по первой форме собственных колебаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования были обобщены теоретические положения и проанализированы современные методы оценки работы каркаса промышленного здания с мостовыми кранами при воздействии эксплуатационных нагрузок.

Установлено, что традиционные детерминированные методы расчёта не в полной мере отражают реальную работу конструкций, поскольку не учитывают вероятностный характер изменения прочностных характеристик материалов и случайную природу нагрузок, в том числе крановых и сейсмических воздействий. В этой связи обоснована целесообразность применения вероятностного подхода при анализе напряжённо-деформированного состояния каркаса.

Анализ научных исследований и практического опыта показал, что пространственная работа конструкций оказывает существенное влияние на перераспределение усилий и формирование дополнительного запаса несущей способности за счёт вовлечения в работу элементов покрытия, связевых систем и ограждающих конструкций.

Особое внимание в работе уделено влиянию мостовых кранов как одного из наиболее значимых факторов нагружения. Установлено, что увеличение крановой нагрузки, в том числе при установке дополнительного мостового крана, приводит к росту динамических эффектов, изменению напряжённого состояния и повышению требований к жёсткости и надёжности каркаса.

Рассмотрены подходы к оценке остаточного ресурса промышленного здания. Показано, что наиболее эффективным является метод, основанный на анализе временных рядов напряжений и их корреляционных зависимостей, позволяющий учитывать фактическое состояние конструкций и динамику их деградации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования в рамках учебной и научно-исследовательской деятельности.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за методологическую поддержку, конструктивные замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению качества исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надёжности в расчётах сооружений. — Москва, 1982.
https://books.totalarch.com/methods_of_the_theory_of_probability_and_the_theory_of_reliability_in_the_calculations_of_structures
- СП РК EN 1993-1-1:2005/2011 Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. — Астана, 2011.
https://prg.kz/document/?doc_id=37771702

ОПАСНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ ЗДАНИЙ СКЛАДОВ ЯДОВИТЫХ ВЕЩЕСТВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МАСШТАБОВ ЗАРАЖЕНИЯ МЕСТНОСТИ

УДК 699.841

Е.У.Курмангалиев^{1*}, Б.Е. Махиев¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Курмангалиев Ерлан Умирбекович, e-mail:
eko_k.u.91@mail.ru

АННОТАЦИЯ: Целью проведенных исследований является предотвращение возможной опасности заражения местности при выбросе сильнодействующих ядовитых веществ. Такие вещества используются при обогащении руд и химических технологиях получения металлов на предприятиях цветной металлургии Восточно-Казахстанского региона. Хранение реактивов производится в складских зданиях существующей застройки. Строительные конструкции в зданиях должны находиться в работоспособном техническом состоянии, что требует их систематического обследования и оценки технического состояния.

В Восточном Казахстане с 2005 года изменилась карта сейсмического зонирования с расширением территории сейсмоопасных зон. Поскольку многие объекты, включая склады для хранения ядовитых веществ, были построены до увеличения сейсмичности, при оценке их технического состояния требуется производить оценку сейсмобезопасности.

В статье приводятся два примера обследования складских зданий, их проверочного расчета и оценки сейсмобезопасности. Предложены рекомендации по сейсмоусилению. Приведены примеры расчетов размеров зоны заражения ядовитыми веществами при выбросе, который может произойти при землетрясении и разрушении здания. Указаны пути снижения опасности вреда здоровью персонала, включая изменение расположения объектов на генеральном плане предприятия и сейсмоусиление зданий.

Ключевые слова: техническое обследование, проверочные расчеты, сейсмическое зонирование, сейсмобезопасность, сейсмоусиление, сильнодействующие ядовитые вещества, прогнозирование, масштаб зоны заражения, генеральный план предприятия.

ВВЕДЕНИЕ

В технологическом процессе предприятий цветной металлургии часто используют ядовитые и сильнодействующие вещества. Для их хранения предназначены отдельностоящие здания. На генеральных планах обычно их располагают на удалении от бытовых корпусов и зданий основного производства. Учитывают также господствующее направление ветра, при котором случайный выброс ядовитых веществ не попадет в рабочую и бытовую зону.

Для Восточно-Казахстанского региона проблема безопасного хранения ядовитых веществ обостряется с изменением карты сейсмического зонирования. Увеличение сейсмичности до 7 баллов, а в отдельных случаях до 8 баллов требует сейсмоусиления зданий существующей застройки. К ним относятся складские здания для хранения сильнодействующих ядовитых веществ, которые были построены до

изменения балльности местности.

Актуальность работы заключается в оценке технического состояния строительных конструкций зданий складов и обеспечении их сейсмостойкости.

Цель исследования — провести детальное обследование складского здания и разработать рекомендации по сейсмоусилению, а также определить размеры зоны заражения местности в случае выброса ядовитых веществ при землетрясении.

Объектом исследования являются два складских здания, расположенных в городе Риддере. Оба здания были построены до увеличения сейсмичности зоны до 7 баллов. В настоящее время они используются для хранения ядовитых веществ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходных материалов использовалась проектная документация и технические паспорта двух зданий. В первом здании располагается склад хранения баллонов с аммиаком (рисунок 1). Баллоны хранятся в вертикальном положении (рисунок 2).

По конструктивной схеме склад относится к зданиям с несущими каменными стенами. В качестве основных материалов стен применен кирпич силикатный с пустотами на цементном растворе. Покрытие склада совмещенное утепленное. Покрытие смонтировано из сборных железобетонных ребристых плит размером 3×6 м. На плиты уложена пароизоляция из одного слоя рубероида и утеплитель из керамзита со средней толщиной слоя 180 мм. Уклон крыши сформирован за счет переменной толщины утеплителя. По утеплителю залита стяжка из цементного раствора и наклеен водоизоляционный ковер из рулонных материалов. Фундамент под стены ленточный, из сборных бетонных блоков.

Второе здание – склад прекурсоров – имеет каркасную конструктивную схему. Каркас металлический, однопролетный. Он состоит из колонн трубчатого сечения и стальных балок покрытия, имеющих двутавровое прокатное сечение. Покрытие неутепленное, по стальным прогонам из шахтного профиля, кровля из профилированного стального настила. Стены склада смонтированы из сборных железобетонных панелей.

Для оценки их технического состояния и сейсмобезопасности была разработана программа обследований. Она включала натурные измерения размеров, фиксацию дефектов и повреждений, определение прочности строительных материалов. Для оценки несущей способности строительных конструкций производился сбор фактически действующих нагрузок и производился проверочный расчет. При этом учитывалось два варианта нагрузок. В основное сочетание вошли постоянные и временные нагрузки, которые действуют на здание в течение всего жизненного цикла. В особое сочетание вошла нагрузка от сейсмического воздействия.

Оценка сейсмобезопасности складских зданий выполнялась в два этапа. На первом этапе анализировалось объемно-планировочное и конструктивное решение зданий с точки зрения соответствия требований норм проектирования к объектам, расположенным в сейсмоопасных зонах. На втором этапе проводилась расчетно-аналитическая проверка несущей способности.

Анализ конструктивных решений складских зданий показал, что они не соответствуют требованиям, которые предъявляются сводом правил к объектам, возводимым в сейсмических зонах. Так, в складе аммиачных баллонов



Рисунок 1. Общий вид склада баллонов с аммиаком



Рисунок 2. Интерьер помещения

отсутствует антисейсмический пояс в уровне плит покрытия, не предусмотрено армирование горизонтальных швов кирпичной кладки в местах пересечений осей стен. Перекрышки над проемами применены брускового, а не плитного типа; ленточный фундамент не имеет армированного обвязочного пояса. Прочность силикатного

кирпича, которую определяли неразрушающим методом с помощью прибора ИПС-МГ 4.03 по ГОСТ 22690, не соответствует требованиям. При землетрясении из-за разрушения склада может произойти падение баллонов с сжиженным аммиаком и их разгерметизация. Возможен выброс сильнодействующего ядовитого вещества в объеме, равном 250 л.

В складе прекурсоров самонесущие стеновые панели должны крепиться к колоннам гибкими связями с зазором, равным 20-30 мм. На самом деле они крепятся без зазора, что может привести при землетрясении к соударению стен и каркаса и разрушению креплений. При падении панелей могут повредиться емкости с химическими реактивами, что приведет к выбросу ядовитых веществ.

По итогам двух этапов исследований делалась обоснованная оценка сейсмобезопасности объектов и разрабатывались рекомендации по сейсмоусилению.

Опасность выброса ядовитых веществ при землетрясении обосновывает необходимость выполнения расчета масштабов заражения местности. Поэтому одновременно с этой работой был сделан прогноз масштабов заражения местности, так как по итогам исследований оба складских здания были оценены, как потенциально сейсмоопасные. При этом были учтены виды хранимых ядовитых веществ и природно-климатические условия местности согласно [5].

Расчет размеров зоны возможного заражения зависел от эквивалентного количества ядовитого вещества по отношению к хлору. Вначале расчет велся по первичному облаку, которое образуется в первые минуты перехода в атмосферу части ядовитого вещества. Затем расчет производится по вторичному облаку, которое образуется в результате испарения ядовитого вещества. В итоге расчета определяются размеры и глубина зоны заражения.

Эти показатели наносятся на генеральный план предприятия, что позволяет оценить, какие объекты и участки территории попадают в зоны заражения. Информация, полученная в результате прогноза, позволяет своевременно принять необходимые меры по минимизации возможного вреда для здоровья персонала и отравления окружающей природной среды.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основании проведенного технического обследования строительных конструкций двух складских зданий для хранения ядовитых веществ было выявлено, что оба здания являются сейсмоопасными. Это означает, что при расчетном сейсмическом воздействии существует реальная опасность их разрушения, которое может привести к выбросу сильнодействующих ядовитых веществ.

Для оценки масштабов возможного размера зоны заражения был сделан научно обоснованный прогноз. Определены объекты, которые попадают в опасную зону; запланированы превентивные меры по изменению их назначения, чтобы исключить длительное пребывание в них персонала.

Рекомендации по сейсмоусилению складских зданий переданы руководству предприятия для разработки и реализации проекта, исключающего повреждение зданий при сейсмическом воздействии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный пример решения проблемы защиты от выброса ядовитых веществ при землетрясении включает несколько задач. Первое – это оценка сейсмобезопасности существующих складских зданий. Второе – прогноз размеров зоны возможного заражения для принятия превентивных мер. И третье – разработка проекта сейсмоусиления существующих зданий для хранения сильнодействующих ядовитых веществ.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за методическую помощь и научные консультации при выполнении исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке текста статьи использовались инструменты искусственного интеллекта для структурирования материала и языкового редактирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- СП РК 2.03-30-2017*. Строительство в сейсмических зонах Республики Казахстан / Комитет по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства Министерство по инвестициям и развитию Республики Казахстан, - Астана, 2018. – 111 с
- СП РК 1.04-101-2012. Обследование и оценка технического состояния зданий и сооружений / Комитет по делам строительства, жилищно-коммунального хозяйства и управления земельными ресурсами Министерства национальной экономики Республики Казахстан, - Астана, 2015. – 86 с.
- СП РК 1.04-110-2017. Обследование и оценка технического состояния и сейсмоусиление зданий и сооружений / Комитет по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства Министерство по инвестициям и развитию Республики Казахстан, - Астана, 2017.
- НТП РК 01-01-3.1 (4.1)-2017. Нагрузки и воздействия на здания. Часть 1.3. Снеговые нагрузки (к СП РК EN 1991-1-3: 2003/2011). Часть 1.4. Ветровые воздействия (к СП РК EN 1991-1-4: 2003/2011 / Комитет по делам строительства и жил. – ком. хозяйства Министерства по инвестициям и развитию РК, Астана, 2017. – 181 с.
- РДС 52.04.253-90. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте / Штаб гражданской обороны СССР. Комитет гидрометеорологии при кабинете министров СССР. Санкт-Петербург, 2000. – 23 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ЗАПАЛЬНО-ЗАЖИГАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ КАТЛОАГРЕГАТОВ

УДК 621.31

А.Р.Құмарбеков^{1*}, Байдилдина А.Т.¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Құмарбеков Арыстан Рашидұлы,
arystan.kumarbekov.04@bk.ru

АННОТАЦИЯ. Представленная статья посвящена актуальной проблеме повышения надежности электрических систем управления и защиты запально-зажигательных устройств котлоагрегатов. Актуальность исследования обусловлена тем, что отказ или некорректная работа ЗЗУ может привести к аварийным остановкам котлов, нарушению теплоснабжения потребителей и созданию взрывоопасных ситуаций в топочном пространстве. Целью работы является исследование существующих систем управления, выявление факторов, снижающих их надежность, и разработка технических решений по оптимизации. В ходе исследования проведен анализ типовых схем управления ЗЗУ, выявлены недостатки: низкая помехозащищенность цепей, несовершенство алгоритмов защиты, отсутствие диагностики в реальном времени. Разработаны оптимизированные решения на основе микропроцессорных контроллеров, обеспечивающие повышение быстродействия защиты до 1–2 секунд, автоматический контроль целостности цепей электродов зажигания, устойчивую работу при электромагнитных помехах и расширенные функции самодиагностики с выводом информации в АСУ ТП. Научная новизна заключается в применении принципов резервирования каналов контроля факела и адаптивных алгоритмов обработки сигналов ионизационных датчиков, а также оригинальных решений по гальванической развязке цепей. Экспериментальная проверка разработанных решений проведена на действующем котлоагрегате, подтвердившая их эффективность. Практическая значимость работы состоит в повышении надежности розжига котлоагрегатов, снижении риска аварийных остановок и уменьшении эксплуатационных затрат. Разработанные технические решения могут быть использованы при модернизации существующего оборудования и проектировании новых котлоагрегатов.

Ключевые слова: котлоагрегат, запально-зажигательное устройство, система управления, защита факела, ионизационный контроль, надежность.

ВВЕДЕНИЕ

Электрическая часть систем управления и защиты запально-зажигательных устройств (ЗЗУ) котлоагрегатов является одним из наиболее ответственных компонентов современной теплоэнергетики, поскольку именно она обеспечивает надежный розжиг топлива и непрерывный контроль факела на всех этапах работы котла. Электрические схемы ЗЗУ включают в себя цепи питания электродов зажигания, системы ионизационного контроля факела, логические блоки управления, исполнительные механизмы и защитные устройства, взаимодействие которых должно быть реализовано с максимальной надежностью и быстродействием. Однако на многих действующих тепловых электростанциях и котельных, эксплуатируются электрические системы управления ЗЗУ, разработанные еще на релейно-контактной

элементной базе, что обуславливает ряд серьезных недостатков.

Настоящая статья посвящена анализу существующих электрических схем и алгоритмов работы ЗЗУ, выявлению их уязвимых мест, а также разработке технических решений, направленных на повышение помехозащищенности, быстродействия и функциональной надежности электрической части систем управления и защиты запально-зажигательных устройств котлоагрегатов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования выбраны электрические системы управления и защиты запально-зажигательных устройств (ЗЗУ) котлоагрегатов. Исследованию подверглись три типа систем управления ЗЗУ, установленных на котлоагрегатах №3, №5 и №7, что позволило охватить как морально устаревшие релейно-контактные схемы, так и системы с частичной микропроцессорной модернизацией.

Электрическая часть ЗЗУ включает в себя несколько взаимосвязанных функциональных блоков: систему высоковольтного зажигания, состоящую из импульсного трансформатора, высоковольтных проводов и электродов зажигания, обеспечивающих образование искрового разряда для воспламенения топливовоздушной смеси; систему ионизационного контроля факела, в состав которой входят ионизационные электроды, измерительные цепи и блоки обработки сигнала.

Совместная работа всех перечисленных блоков — системы зажигания, ионизационного контроля, логического контроллера и исполнительных механизмов — обеспечивает надежный, безопасный и в значительной степени автоматизированный розжиг котлоагрегата как в ручном, так и в автоматическом режимах, а выбор конкретной элементной базы (релейной, гибридной или микропроцессорной) определяет надежность, удобство обслуживания и возможности модернизации системы управления ЗЗУ.

Таблица 1. Характеристика объектов исследования

Котлоагрегат	Тип системы управления ЗЗУ	Год ввода в эксплуатацию	Элементная база	Наличие АСУ ТП
КА №3	Релейно-контактная	1978	Электромагнитные реле РЭС, РП, пром. реле	Отсутствует
КА №5	Комбинированная (релейная + микропроцессорный блок)	1985 (модернизация 2012)	Реле, микроконтроллер АТmega, датчики ионизации	Частичная
КА №7	Микропроцессорная	2020	ПЛК Siemens S7-1200, твердотельные реле, искробезопасные барьеры	Полная интеграция

В процессе работы использовались следующие материалы и оборудование:

Нормативно-техническая документация: схемы электрические принципиальные и монтажные систем управления ЗЗУ, технические паспорта котлоагрегатов, инструкции по эксплуатации запально-зажигательных устройств, правила устройства электроустановок (ПУЭ), отраслевые стандарты по системам контроля факела.

Измерительное оборудование: осциллограф цифровой Tektronix TBS1102 (полоса пропускания 100 МГц) для анализа формы сигналов ионизационного контроля и импульсов зажигания; мультиметры Fluke 87V для измерения параметров цепей; анализатор качества электроэнергии Fluke 435 для регистрации электромагнитных помех; мегаомметр для измерения сопротивления изоляции высоковольтных цепей.

Экспериментальные стенды: лабораторный стенд, имитирующий работу ЗЗУ с возможностью задания различных режимов (обрыв цепи, короткое замыкание, помехи), а также действующее оборудование котлоагрегатов в режиме останова для проведения натурных испытаний.

Программное обеспечение: среда программирования TIA Portal для разработки алгоритмов на ПЛК Siemens; MATLAB/Simulink для моделирования переходных процессов в цепях управления; системы сбора данных для регистрации параметров в реальном времени.

В ходе исследования электрических систем управления и защиты запально-зажигательных устройств котлоагрегатов применялся комплекс взаимодополняющих методов. Теоретический анализ включал изучение нормативно-технической документации, схем электрических принципиальных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования. В результате проведенного исследования электрических систем управления и защиты запально-зажигательных устройств котлоагрегатов установлено, что основными недостатками существующих систем являются низкая помехозащищенность цепей ионизационного контроля, недостаточное быстродействие логических защит и отсутствие функций самодиагностики. Экспериментальные измерения показали, что уровень электромагнитных помех в цепях управления достигает 50–100 В, что в 5–10 раз превышает амплитуду полезного сигнала ионизации (5–15 В), что является главной причиной ложных срабатываний защиты. Хронометражные измерения выявили, что время срабатывания защиты для релейно-контактных систем составляет 5–8 секунд, для комбинированных — 3–4 секунды, для микропроцессорных — 1,5–2 секунды. Разработанные оптимизационные решения, включающие внедрение гальванической развязки, активных фильтров и микропроцессорных контроллеров, позволили повысить отношение сигнал/шум в 6–10 раз, сократить время срабатывания защиты до 1,2–1,8 секунды и снизить уровень помех в 3–4 раза.

Результаты внедрения предложенных оптимизационных решений (оцененные путем стендовых испытаний и моделирования) показали их высокую эффективность. Отношение сигнал/шум в цепях ионизационного контроля удалось повысить в 6–10 раз за счет комбинации аппаратной гальванической развязки и активной фильтрации, что обеспечило надежное детектирование сигнала ионизации даже при закопченных электродах. Таким образом, предложенные технические решения позволяют существенно повысить надежность, безопасность и ремонтпригодность систем управления запально-зажигательными устройствами котлоагрегатов как при модернизации существующих объектов (особенно релейно-контактных), так и при создании новых микропроцессорных систем.

Таблица 1. Сравнительные результаты исследования систем управления ЗЗУ

Показатель	Релейно-контактная система (КА №3)	Комбинированная система (КА №5)	Микропроцессорная система (КА №7)	Оптимизированная система (рекомендуемая)
Элементная база	Электромагнитные реле	Реле + микроконтроллер ATmega	ПЛК Siemens S7-1200	ПЛК + твердотельные реле + оптроны
Уровень сигнала ионизации, В	5–12	6–15	8–15	10–18
Уровень помех в цепях управления, В	30–100	20–60	5–15	3–8
Отношение сигнал/шум	0,2–0,5	0,3–0,8	1,0–2,0	3,0–5,0
Время срабатывания защиты, с	5–8	3–4	1,5–2	1,2–1,8
Сопrotивление изоляции высоковольтных цепей, МОм	5–15	10–30	25–50	>50
Наличие гальванической развязки	Нет	Частичная	Полная	Полная + искробезопасные барьеры
Наличие самодиагностики	Нет	Частичная (контроль ионизации)	Полная (контроль цепей)	Полная + прогнозирование отказов
Интеграция с АСУ ТП	Нет	Частичная (RS-232)	Полная (Modbus TCP/IP)	Полная (Modbus, OPC, Ethernet)
Наработка на отказ (оценка), часов	500–800	1500–2000	4000–5000	>6000
Эффективность розжига, %	85–90	92–95		

Обслуживание. На основе полученных результатов разработан регламент технического обслуживания электрических систем управления ЗЗУ, включающий ежемeнный визуальный осмотр кабельных трасс и соединений; еженедельную проверку сопротивления изоляции высоковольтных цепей; ежемесячный контроль уровней сигналов ионизационных датчиков; ежеквартальную проверку срабатывания логических защит; полугодовую ревизию искробезопасных барьеров; ежегодную калибровку измерительных каналов. Внедрение системы непрерывной диагностики с передачей информации в АСУ ТП позволяет осуществлять контроль целостности электродов зажигания, сопротивления изоляции, исправности датчиков и работоспособности исполнительных механизмов в реальном времени, что обеспечивает переход от планово-предупредительного ремонта к обслуживанию по фактическому состоянию оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения исследования электрических систем управления и защиты запально-зажигательных устройств котлоагрегатов были решены поставленные задачи и получены следующие основные результаты.

Проведенный анализ существующих систем управления ЗЗУ на котлоагрегатах ТЭЦ выявил, что основными недостатками релейно-контактных и комбинированных систем являются низкая помехозащищенность цепей ионизационного контроля, недостаточное быстродействие логических защит, отсутствие гальванической развязки между силовыми и измерительными цепями, а также отсутствие функций непрерывной диагностики состояния оборудования.

На основе полученных данных разработаны и обоснованы оптимизационные решения, включающие внедрение гальванической развязки с использованием оптронных изоляторов и искробезопасных барьеров, применение активных фильтров в цепях ионизационного контроля, замену релейно-контактных элементов на твердотельные реле и микропроцессорные контроллеры с адаптивными алгоритмами обработки сигнала, а также внедрение системы непрерывной диагностики электрических цепей с передачей информации на верхний уровень АСУ ТП.

Практическая значимость работы заключается в повышении надежности розжига котлоагрегатов, снижении риска аварийных остановок и взрывоопасных ситуаций, уменьшении эксплуатационных затрат на обслуживание ЗЗУ, а также в возможности применения разработанных технических решений при модернизации существующего оборудования и проектировании новых котлоагрегатов. Полученные результаты могут быть использованы на тепловых электрических станциях и промышленных котельных, эксплуатирующих котлоагрегаты с газовым и мазутным топливом.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает глубокую признательность и искреннюю благодарность научному руководителю за ценные рекомендации, методическую поддержку и внимательное отношение на всех этапах выполнения данной работы.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке данной работы технологии искусственного интеллекта использовались исключительно как вспомогательный инструмент для структурирования материалов, редактирования текста и проверки стилистики. Все экспериментальные данные, технические решения, выводы и рекомендации получены автором самостоятельно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1.Руководство по эксплуатации. Устройства запально-защитные ЗЗУ. В307.563.000.000 РЭ [Текст]. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 45 с.
- 2.Коноваленко, А.А. Датчик селективного контроля факела горелки [Текст] / А.А. Коноваленко, А.И. Нефедьев, Д.И. Нефедьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). – С. 32–38.
- 3.Патент № 2096690 Российская Федерация, МПК F23N 5/00, G08B 17/00. Способ контроля и управления сжиганием топлива и ионизационный датчик для его осуществления [Текст] / Б.В. Почуев, В.В. Ключников, Ю.В. Галкин; заявитель и патентообладатель Акционерное общество открытого типа «Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт». – № 5032268/06; заявл. 24.02.1992; опубл. 27.09.1997.
- 4.НПФ «КРУГ». Обновлена система электропитания АСУ ТП котлов

Ульяновской ТЭЦ-1 [Электронный ресурс]. – URL: <https://xn--80aaigboe2bzaigsf7i.xn--p1ai/Obnovlena-sistema-elektropitaniya-ASU-TP-kotlov-Ulyanovskoy-TETs-1/> (дата обращения: 28.03.2026).

5.ООО «НПФ Ракурс». АСУ котлоагрегатов ТЭЦ ОАО «Котласский ЦБК», способных работать на трех видах топлива [Текст] // Информатизация и системы управления в промышленности. – 2006. – № 5. – С. 28–33.

6.АО «ЭЛАРА». Модернизация САУГ энергоблока Смоленской ГРЭС [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.in-power.ru/news/novostitek/39510-ao-elara-vypolnilo-modernizaciyu-saug-energobloka-smolenskoi-gres.html> (дата обращения: 28.03.2026).

7.Компания «АМАКС». Пуск котла на газе ТГМ-84 ст.№1 Архангельской ТЭЦ [Электронный ресурс]. – URL: <https://amaks.ru/company/news/626.php> (дата обращения: 28.03.2026).

8.Головач, В. Система автоматичного контролю факелу горіння під час спалювання газу у виробництві деревинностружкових плит [Текст] / В. Головач, З. Сірко, Є. Стариш та ін. // Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2020. – № 4 (86). – DOI: 10.31548/dopovidi2020.04.02.

9.Компания «ТЕКОН». Внедрение АСУ ТП и техническое перевооружение внутренней системы газопотребления котла ПТВМ-100 ст. №2 [Электронный ресурс]. – URL: <https://isup.ru/news/10434/> (дата обращения: 28.03.2026).

10.Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е издание [Текст]. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2023. – 512 с.

11.Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации [Текст]. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2023. – 264 с.

12.ГОСТ 12.2.007.0-75. Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности [Текст]. – М.: Издательство стандартов, 2001. – 12 с.

13.РД 34.03.201-97. Правила техники безопасности при эксплуатации тепломеханического оборудования электростанций и тепловых сетей [Текст]. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 112 с.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЙ УДК 69.059.4

Е.Н.Литвиненко^{1*}, М.А.Рахимов¹

¹ ВКТУ им. Д.Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Литвиненко Евгения Николаевна,

e-mail: izenuska@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В статье проведён анализ существующих методов оценки технического состояния зданий и сооружений с целью выявления их ограничений и определения направлений совершенствования методического аппарата. Рассмотрены традиционные подходы, основанные на визуальных, визуально-инструментальных и локальных методах контроля, а также современные методы, включающие неразрушающие испытания, инженерные эксперименты и динамические исследования.

Ключевые слова: техническое состояние зданий, строительные конструкции, методы обследования, неразрушающий контроль, диагностика, инженерная безопасность.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы оценки технического состояния зданий и сооружений обусловлена необходимостью обеспечения их надёжности, безопасности и долговечности в условиях физического износа, а также возрастающего воздействия природных и техногенных факторов. В современных условиях значительная часть существующего строительного фонда требует регулярного мониторинга и своевременной диагностики, что делает проблему совершенствования методов обследования особенно важной.

Целью настоящего исследования является анализ существующих методов оценки технического состояния зданий и сооружений и выявление их ограничений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материалов исследования использованы научные публикации, нормативные документы и методические разработки, посвящённые оценке технического состояния зданий и сооружений. Основу нормативной базы составляют действующие стандарты, в том числе ГОСТ 31937-2024 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния», регламентирующий категории технического состояния и требования к проведению обследований.

В ходе исследования применялись методы теоретического анализа и обобщения научных данных, сравнительного анализа различных методик, а также системный подход к оценке их эффективности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Существующие методы оценки технического состояния зданий основаны в основном на визуальных и локальных способах диагностирования. Известны методики, которые по результатам визуального и инструментального контроля, дают степень износа отдельных конструктивных элементов (Добромыслов А.Н., Лычев А.С., Мирсаяпов И.Т., Гроздов В.Т., Землянский А.А и др.).

Оценка технического состояния в работах Гроздова В.Т. основывается на применении визуальных и визуально-инструментальных методов, в которых

используются простейшие инструменты: рулетки, отвесы, уровни, молотки, дрели и др. Кроме того, для визуально-инструментального обследования применяются нивелиры, теодолиты, оборудование для проходки скважин, приборы и приспособления для разрушающих и неразрушающих методов контроля материалов (локальные методы). В данном подходе подробно описан визуальный метод обследования строительных конструкций, фундаментов, кирпичных стен и столбов, стен крупнопанельных и крупноблочных зданий, металлических конструкции, перекрытий каменных зданий и т.д. В разделе визуально-инструментальных методов обследования приведен перечень необходимых контролируемых параметров, который нельзя признать полным с учетом последних достижений и разработок в области оценки технического состояния строительных конструкций. В разделе методы инженерно- геологических обследований отсутствует оценка возможностей геофизических изысканий грунтового массива, которые дают более точный геологический разрез совместно с традиционным бурением скважин и определением физико-механических свойств грунтов, не определяют динамическое состояние зданий и сооружений при определении динамических и жесткостных характеристик, несущей способности конструктивных элементов зданий и сооружений, что не позволяет выявлять скрытые дефекты.

В работах Абрашитова В.С. заявлена необходимость проведения комплексных обследований, для составления технического заключения о состоянии строительных конструкций, но фактически излагаются только методы визуального обследования и описания наиболее распространенных дефектов строительных конструкций зданий и сооружений.

В подходе Землянского А.А. при оценки технического состояния отражены:

- комплекс методов и средств проведения инженерного эксперимента;
- неразрушающие методы испытаний;
- основы моделирования строительных конструкций;
- методы обследования и испытания несущих конструкций зданий;
- особенности определения напряжений и давлений в грунтах.

В работе отмечено, что оценить весь комплекс факторов, влияющих на надежность и безопасность строительных конструкций, теоретическим путем невозможно. Автор считает, что натурные испытания сооружений остаются единственным достоверным способом для оценки влияния допущений, принимаемых в расчетах, влияющих на надежность и долговечность сооружений.

Основные теоретические подходы при расчетах динамики сооружений в области строительства приведены в работах Д.Г.Копаницы, Р.В.Клафа, Д.Пензиена, А.П.Мельчакова и др.

Наиболее полно задача по оценке технического состояния строительных конструкций решена в работе коллектива под руководством Шахрамьяна М.А., в которой определены основные диагностические параметры зданий и сооружений, влияющие на устойчивость и надежность, а также рассмотрены основные методы диагностики, применяемые при комплексной оценке надежности строительных конструкций.

Согласно предлагаемого авторами подхода производится:

1. Сбор и анализ исходной информации о здании (сооружении) и строительной площадке с учетом возможных внешних нагрузок, с применением современного оборудования и средств измерений.

2. Определение объемно-планировочного и конструктивного решения здания (сооружения), целью которого является определение конструктивного и планировочного исполнения объекта (расчетной схемы), размеров основных конструктивных элементов, их структуры.

3. Определение сейсмологических характеристик строительной площадки, целью которого является определение геологического строения грунтового массива строительной площадки, выявление динамических параметров, сплошности, однородности.

4. Визуальный и геодезический контроль состояния здания (сооружения), целью которого является выявление особенностей обеспечения пространственной жесткости и устойчивости при возможных нагрузках, картирование дефектов, определение кренов и осадок, установление причин их возникновения и прогнозирование их возможного развития в процессе эксплуатации.

5. Неразрушающий контроль здания (сооружения) целью которого является определение физико-механических и геометрических параметров основных конструктивных элементов здания (сооружения).

6. Динамические испытания здания (сооружения) целью которого является определения динамических и жесткостных характеристик, несущей способности конструктивных элементов здания и сооружений, выявления скрытых дефектов.

На сегодняшний день данный подход является наиболее полным так как в нем предусмотрено применение локальных и интегральных методов измерений, т.е. определение параметров, которые дают информацию о состоянии конструкции в целом. В данном подходе подробно изложен порядок проведения работ, с описанием используемых измерительных приборов, определены основные диагностические параметры зданий и сооружений, влияющие на их устойчивость и надежность. В свою очередь необходимо отметить, что в данной методике не приводится подробная технология оценки категории технического состояния здания, не оценивается прогнозируемая долговечность на основе динамических критериев.

Вышеперечисленные методы оценки технического состояния либо не дают достаточно полной информации о состоянии объекта в целом, либо не адаптированы к действующей нормативной документации.

В данный момент основным документом по оценке технического состояния строительных конструкций является ГОСТ 31937-2024, где определено четыре вида категорий технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений (нормативное техническое, работоспособное техническое, ограниченно - работоспособное техническое, аварийное состояние). Проведена систематизация дефектов, согласно действующим положениям о категориях технического состояния строительных конструкций (таблица 1).

Таблица 1. Категории технического состояния и их признаки при обследовании

Категории состояния конструкции	Признаки при обследовании	
	визуальном	инструментальном
1	2	3
1.Нормативное техническое: - отсутствуют видимые дефекты и повреждения, свидетельствующие о снижении несущей способности и эксплуатационной пригодности конструкции; - необходимости в ремонтно-восстановительных работах на момент	- на поверхности бетона видимых дефектов и повреждений нет или имеются отдельные раковины, выбоины, волосяные трещины (до 0,1 мм); - антикоррозионная защита закладных деталей не нарушена, поверхность арматуры при вскрытии чистая; - глубина карбонизации	- осадки и крены зданий, отклонения стен и колонн от вертикали в нормируемых пределах; - прочность бетона не ниже проектной; - скорость ультразвуковых волн (УЗВ) более 4 км/с; - на отдельных участках (не более 20% от общего числа замеренных) величина защитного слоя бетона меньше проектной до 10%;

обследования нет	бетона не превышает половины толщины защитного слоя; - прочность бетона не ниже проектной.	- величина прогиба и ширина раскрытия трещин не превышают допустимую по нормам; - расчетное сопротивление арматуры составляет не менее 0.95 величины, принятой нормами для соответствующего класса; - потери площади сечения рабочей арматуры отсутствуют.
2.Работоспособное техническое: - имеющиеся дефекты и повреждения не снижают несущую способность и эксплуатационную пригодность конструкции; - защитные свойства бетона по отношению к арматуре на отдельных участках исчерпаны; - требуется их восстановление, устройство и восстановление гидроизоляции и антикоррозионной защиты	- антикоррозионная защита железобетонных элементов имеет частичные повреждения; - на отдельных участках - мокрые или масляные пятна, высолы; - на отдельных местах с малой величиной защитного слоя проступают следы коррозии распределительной арматуры или хомутов; - коррозия рабочей арматуры - отдельными точками и пятнами, язвами и пластинками ржавчины, антикоррозионная защита закладных деталей не нарушена; - глубина карбонизации бетона не превышает толщину защитного слоя; - местами есть отслоение бетона при простукивании; - ориентировочная прочность бетона - не ниже проектной; - трещины с шириной раскрытия до 0.3 мм	- осадки и крены зданий, отклонения стен и колонн от вертикали в нормируемых пределах; - уменьшение величины защитного слоя бетона меньше проектной до 10%, прочность бетона основного сечения элемента (за пределами защитного слоя бетона и в сжатой зоне) не ниже проектной; - скорость УЗВ 3-4 км/с, расчетное сопротивление арматуры составляет не менее 0,95 величины, принятой действующими нормами для соответствующего класса; - потеря площади сечения рабочей ненапрягаемой арматуры и закладных деталей вследствие коррозии не превышает 5%;
3.Ограниченно-работоспособное техническое: - есть повреждения, свидетельствующие о снижении несущей способности и эксплуатационной пригодности конструкции, но на момент обследования не угрожающие безопасности людей и обрушению; - требуется усиление	- пластинчатая ржавчина на стержнях оголенной арматуры в зоне продольных трещин или на закладных деталях; - трещины (нормальные и наклонные) на растянутой зоне бетона, превышающие их допустимое раскрытие (не более 1 мм); - бетон в растянутой зоне на глубине защитного слоя между стержнями арматуры легко крошится; - снижение ориентировочной	- осадки и крены здания, отклонения стен и колонн от вертикали больше нормируемых пределов; - прогибы элементов, вызванные эксплуатационными воздействиями, превышают допустимые более 30%; - прочность изгибаемых элементов из бетона ниже проектной до 30%; - скорость УЗВ менее 3 км/с; - потеря прочности рабочей арматуры и закладных

	прочности бетона в сжатой зоне изгибаемых элементов, провисание отдельных стержней распределительной арматуры; - уменьшение против требований норм проекта площади опирания сборных элементов, прогибы бетонных и железо-бетонных элементов, сквозные трещины в несущих стенах/	деталей вследствие коррозии превышают 5%, прогибы элементов, вызванные эксплуатационными воздействиями, превышают допустимые более чем на 30 %; - разрушения сварных швов;
4.Аварийное: - есть повреждения, свидетельствующие о возможности обрушения конструкций; - требуется немедленное проведение срочных противоаварийных мероприятий (разгрузка конструкции, устройство временных креплений и т.д.)	- наличие трещин в оппорной зоне, раздробление бетона сжатой зоны по причине нарушения анкеровки арматуры; - ширина раскрытия нормальных трещин в растянутой зоне обусловленная текучестью арматуры более 0,5 мм; - ширина раскрытия наклонных трещин изгибаемых элементов, обусловленных текучестью продольной и поперечной арматуры более 1 мм; - раздробление бетона сжатой зоны над наклонными и нормальными трещинами; - разрыв растянутой арматуры; - разрушение участков стен, перемычек, перегородок, простенков; - раздробление бетона от сжатия одновременно с текучестью арматуры, что характеризуется прогибом конструкции в 1.5 раза и более, превышающим прогиб от контрольной нагрузки; - текучесть арматуры, которая характеризуется прогибом конструкций на величину, превышающую 1/50 пролета.	- осадки и крены зданий, отклонения стен и колонн от вертикали больше нормируемых пределов; - из бетона ниже проектной свыше 30%; - разрушение части сварных соединений;

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ причин возникновения дефектов и методов контроля показал необходимость интегрального подхода при оценке категории состояния зданий. Существующие методы оценки технического состояния строительных конструкций не позволяют получить весь спектр наиболее важных диагностических параметров. Только на основе полученных наиболее полных диагностических и расчетных данных

можно определить инженерные мероприятия, повышающие устойчивость здания (сооружения) к воздействию возможных опасных природных и техногенных нагрузок и разработать проект повышения инженерной безопасности.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования в рамках учебной и научно-исследовательской деятельности.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за методологическую поддержку, конструктивные замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению качества исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке текста статьи использовались инструменты искусственного интеллекта для структурирования материала и языкового редактирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Добромыслов А.Н. Диагностика повреждений зданий и инженерных сооружений. – Москва, 2006.

<https://djvu.online/file/t2HijV81wVFc5>

Землянский А.А. Обследование и испытание зданий и сооружений. – Москва, 2004.

<https://djvu.online/file/uY3hs9slkoOtT>

Клаф Р., Дж.Пензиен. Динамика сооружений – Москва, 1979.

<https://djvu.online/file/k9AQIK2KKAiys>

Лычев А.С. Надежность строительных конструкций. – Москва, 2008.

<https://djvu.online/file/w128UPchqOf2l>

ТЕПЛОВИЗИОННОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ КАК МЕТОД ОЦЕНКИ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

УДК 697.1:620.179.16:536.2

М.В. Локотош^{1*}, А.Г. Гольцев¹

¹ВКТУ имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Локотош Милана Владиславовна, e-mail:

milanchik905@icloud.com

АННОТАЦИЯ. В современных условиях повышения требований к энергоэффективности зданий актуальной становится задача снижения тепловых потерь через ограждающие конструкции. Значительная часть энергоресурсов расходуется на поддержание комфортного микроклимата помещений, особенно в регионах с холодным климатом. Эффективная диагностика теплотехнического состояния зданий позволяет выявлять реальные источники теплопотерь и оценивать эффективность теплоизоляционных решений.

В статье представлен обзор современных исследований по энергоэффективности зданий, механизмам теплообмена в ограждающих конструкциях и методам инструментального обследования. Особое внимание уделено тепловизионной диагностике, основанной на регистрации инфракрасного излучения поверхности, позволяющей обнаруживать дефекты теплоизоляции, мостики холода и участки повышенной теплоотдачи. Проанализирован отечественный и зарубежный опыт применения инфракрасной термографии, выявлены преимущества метода по сравнению с традиционными способами оценки теплопотерь.

Отмечена актуальность применения тепловизионной диагностики в условиях Республики Казахстан с резко континентальным климатом и длительным отопительным периодом. Применение современных методов обследования обеспечивает объективную информацию о фактическом состоянии ограждающих конструкций, что важно для разработки мероприятий по повышению энергоэффективности существующего жилого фонда.

Ключевые слова: энергоэффективность зданий, тепловизионное обследование, тепловые потери, ограждающие конструкции, строительная теплотехника.

ВВЕДЕНИЕ

Энергоэффективность зданий в настоящее время в связи с выраженными экологическими проблемами является одной из ключевых инженерных и научно-технических проблем, обусловленных ростом потребления энергетических ресурсов, повышением стоимости энергоносителей и необходимостью снижения негативного воздействия строительной отрасли на окружающую среду. Значительная часть мирового энергопотребления приходится именно при эксплуатации зданий, что обусловлено необходимостью поддержания нормативных параметров микроклимата в здании.

По данным международных исследований, здания потребляют до 30-40 % всей производимой энергии, значительная часть которой теряется через ограждающие конструкции из-за недостаточной теплоизоляции, конструктивных дефектов и нарушения технологии строительства.

Одним из основных факторов энергопотребления зданий являются тепловые потери через ограждающие конструкции. В инженерном аспекте данная проблема

связана с обеспечением требуемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций, снижением инфильтрационных потерь, оптимизацией тепловых узлов и применением современных теплоизоляционных материалов. Недостаточная теплозащита наружных стен, дефекты теплоизоляции, инфильтрация воздуха и наличие мостиков холода приводят к значительным потерям тепловой энергии и увеличению эксплуатационных расходов.

В научном аспекте энергоэффективность представляет собой междисциплинарную область исследований, объединяющую строительную физику, теплотехнику, материаловедение и методы инструментального контроля. Существенное внимание уделяется моделированию тепловых процессов в ограждающих конструкциях, анализу температурных полей, изучению влагонакопления и долговечности теплоизоляционных систем.

Особую актуальность эта проблема приобретает для городов Восточного Казахстана, включая Усть-Каменогорск, где низкие зимние температуры, продолжительный отопительный период и значительная доля старого жилого фонда – кирпичного и панельного домостроения, возведенного до введения современных норм теплозащиты – усиливают тепловые потери и нерациональное потребление энергии. В таких условиях возрастает значение инструментальных методов диагностики теплотехнического состояния зданий, среди которых наиболее эффективным является тепловизионное обследование, позволяющее выявлять фактические зоны теплопотерь и оценивать эффективность существующих конструктивных решений.

Проведённый энергоаудит зданий Усть-Каменогорска показал значительные тепловые потери через ограждающие конструкции, дефекты теплоизоляции и наличие мостиков холода.

Данные аудита подчёркивают важность использования тепловизионного оборудования как эффективного инструмента неразрушающего контроля для визуализации температурных полей и точного выявления дефектов. В связи с этим возрастает значение методов инструментальной диагностики теплотехнического состояния зданий, позволяющих выявлять фактические зоны теплопотерь и оценивать эффективность применяемых конструктивных решений. Одним из наиболее эффективных методов является тепловизионное обследование.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методологической основой исследования послужил комплекс аналитических и сравнительных методов, применяемых при проведении научных обзоров в области строительной теплотехники и энергоэффективности зданий. Основной целью исследования являлся анализ современных научных подходов к снижению тепловых потерь зданий и оценка возможностей применения тепловизионной диагностики для выявления теплотехнических дефектов ограждающих конструкций.

В качестве исходных материалов использовались научные публикации отечественных и зарубежных исследователей, посвященные проблемам энергоэффективности зданий, тепловым потерям ограждающих конструкций и методам инструментальной диагностики. Анализ проводился на основе научных статей, опубликованных в международных базах данных, нормативных документов в области тепловой защиты зданий, а также современных исследований, посвященных применению инфракрасной термографии в строительстве.

В ходе исследования применялся метод систематического анализа научной литературы, позволивший выявить основные направления развития энергоэффективного строительства и современные подходы к диагностике тепловых потерь. Сравнительный анализ использовался для сопоставления различных

методов оценки теплотехнического состояния зданий, включая расчетные методы, контактные измерения тепловых потоков и инструментальные методы обследования.

Особое внимание в работе уделялось анализу инструментальных методов исследования тепловых потерь зданий. Среди них рассматривались методы измерения температурных параметров ограждающих конструкций, определение инфильтрации воздуха через неплотности конструкций, контроль параметров работы систем отопления, а также методы локального определения теплопроводности строительных материалов.

Отдельное место в исследовании занимает анализ метода инфракрасной термографии. Тепловизионная диагностика относится к методам неразрушающего контроля и основана на регистрации инфракрасного излучения, испускаемого поверхностями объектов. Любое тело, температура которого выше абсолютного нуля, излучает электромагнитную энергию в инфракрасном диапазоне, интенсивность которой зависит от температуры и физических свойств материала. Тепловизор фиксирует это излучение и преобразует его в цифровое изображение температурного поля, называемое термограммой.

Получаемая термограмма позволяет визуализировать распределение температур на поверхности конструкций и выявлять участки с аномальными тепловыми характеристиками. В процессе анализа научных публикаций рассматривались возможности применения тепловизионной диагностики для выявления мостиков холода, дефектов теплоизоляции, зон инфильтрации воздуха и участков повышенной теплоотдачи.

Таким образом, примененный комплекс методов позволил провести всесторонний анализ современных научных исследований в области энергоэффективности зданий и определить перспективные направления использования тепловизионной диагностики при исследовании теплотехнического состояния ограждающих конструкций.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведённый анализ научных публикаций и нормативных материалов показал, что в мировой практике наблюдается устойчивый переход к комплексному подходу в проектировании энергоэффективных зданий. Современные исследования в области строительной теплотехники ориентированы на снижение тепловых потерь, повышение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций и применение инновационных теплоизоляционных материалов. Значительное внимание уделяется концепции зданий с почти нулевым энергопотреблением (nZEB), которая активно внедряется в странах Европейского союза в рамках политики устойчивого развития, реализуемой при участии United Nations и European Commission.

Анализ зарубежных научных публикаций показывает, что значительное внимание уделяется исследованию фактических теплотехнических характеристик строительных конструкций. В частности, широко используется показатель коэффициента теплопередачи, позволяющий количественно оценивать уровень тепловых потерь через ограждающие конструкции зданий. При этом многие исследования отмечают, что расчетные значения теплотехнических характеристик часто не соответствуют фактическим показателям, наблюдаемым в процессе эксплуатации зданий. Основными причинами данных расхождений являются конструктивные дефекты, технологические нарушения при строительстве, старение теплоизоляционных материалов, а также влияние климатических факторов.

Особую актуальность данная проблема приобретает в условиях резко континентального климата Республики Казахстан, характеризующегося значительными сезонными колебаниями температуры наружного воздуха и

продолжительным отопительным периодом. В таких условиях ограждающие конструкции зданий испытывают значительные теплотехнические нагрузки, что способствует увеличению теплопотерь и повышению энергопотребления систем отопления.

Состояние существующего жилого фонда также оказывает существенное влияние на уровень тепловых потерь. Значительная часть жилых зданий была построена в период 1960–1990-х годов по нормативам, действовавшим до введения современных требований по теплозащите. В результате теплотехнические характеристики ограждающих конструкций таких зданий часто не соответствуют современным требованиям к энергоэффективности.

Наиболее распространенными теплотехническими проблемами зданий являются недостаточное сопротивление теплопередаче наружных стен, наличие конструктивных мостиков холода в местах стыков панелей и примыканий конструкций, нарушение герметичности ограждающих конструкций, а также увлажнение строительных материалов. Указанные дефекты приводят к снижению теплозащитных свойств конструкций и увеличению фактических тепловых потерь.

В научной литературе отмечается, что традиционные методы оценки тепловых потерь, основанные на расчетных моделях и локальных измерениях тепловых потоков, не всегда позволяют получить полную информацию о реальном теплотехническом состоянии зданий. Это обусловило развитие инструментальных методов диагностики, позволяющих проводить обследование зданий в реальных эксплуатационных условиях.

Особое место среди таких методов занимает инфракрасная термографии. Проведенные исследования показывают, что тепловизионная диагностика является эффективным инструментом выявления теплотехнических дефектов ограждающих конструкций. Использование телевизоров позволяет получать визуальное изображение температурного поля фасадов и выявлять участки повышенной теплоотдачи, связанные с дефектами теплоизоляции, мостиками холода, инфильтрацией воздуха и нарушениями герметичности конструкций.

Результаты научных исследований свидетельствуют о том, что применение тепловизионных технологий значительно повышает информативность обследований зданий. Метод позволяет оперативно выявлять скрытые дефекты ограждающих конструкций без нарушения их целостности, а также проводить комплексную оценку распределения температурных полей на поверхности конструкций. Кроме того, современные исследования показывают возможность количественного применения тепловизионных методов, включая оценку сопротивления теплопередаче конструкций на основе анализа температурных данных.

Особенно перспективным является применение тепловизионной диагностики в регионах с холодным климатом, где тепловые потери зданий оказывают значительное влияние на энергопотребление. К таким регионам относится Восточно-Казахстанская область, характеризующаяся низкими зимними температурами, значительными температурными перепадами и высокой ветровой нагрузкой. В этих условиях тепловизионные обследования позволяют выявлять характерные дефекты теплозащиты зданий и получать объективную информацию о фактическом теплотехническом состоянии ограждающих конструкций.

Таким образом, проведенный анализ научных исследований подтверждает высокую эффективность применения тепловизионной диагностики при обследовании зданий и оценке их энергетической эффективности. Использование данного метода позволяет выявлять зоны повышенных теплопотерь, анализировать распределение температурных полей и формировать научно обоснованные рекомендации по повышению энергоэффективности существующего жилого фонда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный аналитический обзор научных исследований в области энергоэффективности зданий и методов диагностики тепловых потерь показал, что проблема тепловых потерь через ограждающие конструкции остается одной из ключевых задач современной строительной науки и практики. Значительная часть тепловой энергии теряется через наружные стены, покрытия, оконные и дверные конструкции, а также через зоны конструктивных неоднородностей, что приводит к увеличению энергопотребления зданий и снижению их эксплуатационной эффективности.

Особое место среди методов диагностики занимает тепловизионное обследование, основанное на регистрации инфракрасного излучения поверхности объектов. Использование тепловизионных технологий позволяет получать визуальную информацию о распределении температурных полей на поверхности ограждающих конструкций и выявлять зоны повышенной теплоотдачи, мостики холода, дефекты теплоизоляции и участки инфильтрации воздуха. Преимуществом данного метода является его неразрушающий характер, высокая информативность и возможность оперативного проведения обследований.

Проведенный анализ научных публикаций показывает, что тепловизионная диагностика широко применяется в различных странах мира при проведении энергетических обследований зданий, контроле качества строительных работ и разработке мероприятий по повышению энергоэффективности. В условиях холодного климата Республики Казахстан применение данного метода имеет особую актуальность, поскольку значительные температурные перепады и продолжительный отопительный период усиливают тепловые потери через ограждающие конструкции.

Таким образом, тепловизионная диагностика является эффективным инструментом оценки фактического теплотехнического состояния зданий и формирует основу для разработки мероприятий по повышению их энергоэффективности. Перспективным направлением дальнейших исследований становится комплексное изучение взаимосвязи между материалами ограждающих конструкций и тепловыми потерями, исследуемыми с помощью тепловизора, с последующим подбором оптимальных теплоизоляционных материалов и технологий их установки с использованием инструментов искусственного интеллекта для анализа и прогнозирования эффективности теплоизоляционных решений.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., De Rossi, F., & Vanoli, G. P. (2013). Energy retrofit of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort. *Energy and Buildings*, 64, 320–334.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.011>
- Asdrubali, F., Baldinelli, G., & Bianchi, F. (2014). A review of infrared thermography for energy audit of buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 382–395.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.059>
- Balaras, C. A., & Argiriou, A. A. (2002). Infrared thermography for building diagnostics. *Energy and Buildings*, 34(2), 171–183.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00192-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00192-1)
- Dyussembekova, N., Temirgaliyeva, N., Umyshev, D., Shavdinova, M., Schuett, R., & Bektalieva, D. (2022). Assessment of energy efficiency measures' impact on energy

- performance in the educational building of Kazakh-German University in Almaty. *Sustainability*, 14(16), 9813.
<https://doi.org/10.3390/su14169813>
- European Commission. (2010). Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings (EPBD).
<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj>
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. McGraw-Hill.
<https://books.google.com/books?id=Qw1RAAAAMAAJ>
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer* (6th ed.). Wiley.
<https://www.wiley.com/en-us/Fundamentals+of+Heat+and+Mass+Transfer-p-9780470501979>
- International Energy Agency. (2023). *Energy Efficiency 2023*.
<https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>
- ISO. (2015). ISO 6781-3: Performance of buildings – Detection of heat, air and moisture irregularities using infrared methods.
<https://www.iso.org/standard/56520.html>
- Lucchi, E. (2018). Applications of infrared thermography in cultural heritage and buildings. *Journal of Cultural Heritage*, 31, 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.11.011>
- Rojas-Solorzano, L., Kerimray, A., & Bektineyev, R. (2016). Energy efficiency options for buildings: insights from buildings energy audit reports in Kazakhstan. *Proceedings of the IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016)*.
<https://doi.org/10.1049/cp.2016.1280>
- Sharipov, R., Yerzhanov, S., Shavdinova, M., & Tyulyubayeva, D. (2023). Further improvement of methods for determining energy efficiency of buildings and structures in the Republic of Kazakhstan. *Journal of Architecture and Engineering Studies*, 19(2), 45–58.
<https://aseestant.ceon.rs/index.php/jaes/article/view/27202>
- Tleppayev, A. M., & Zeinolla, S. Zh. (2021). Benchmarking of energy audit for improving energy efficiency in Kazakhstan. *Journal of Economic Research & Business Administration*.
<https://be.kaznu.kz/index.php/math/article/view/1018>
- Tokbolat, S., Tokpatayeva, R., & Al Zubaidy, S. N. (2014). The effects of orientation on energy consumption in buildings in Kazakhstan. *Nazarbayev University Research*.
<https://research.nu.edu.kz/en/publications/the-effects-of-orientation-on-energy-consumption-in-buildings-in/>
- Yessengabulov, S., Kozhakhmet, M., Zharkenov, Y., & Abakanov, Y. (2025). Study of the possibility of transition to more stringent energy efficiency requirements for translucent structures in the Republic of Kazakhstan. *Buildings*, 15(13), 2354.
<https://doi.org/10.3390/buildings15132354>
- Zhangabay, N., Giyasov, A., Bakhbergen, S., Tursunkululy, T., & Kolesnikov, A. (2024). Thermovision study of a residential building under climatic conditions of South Kazakhstan in a cold period. *Journal of Building Engineering*, 61, 103992.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.103992>

ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО СНИЖЕНИЮ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТЯХ 110-500кВ ВОСТОЧНОГО РЕГИОНА КАЗАХСТАНА

УДК 620.92

А.Б. Мадиева¹, Н.К. Ердыбаева¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: А.Б. Мадиева

АННОТАЦИЯ. Статья посвящена рассмотрению организационно-технических мероприятий, направленных на снижение потерь электроэнергии в сетях 110–500кВ Восточного региона Казахстана. В статье описаны факторы, влияющие на уровень потерь в магистральных сетях и рассмотрены особенности эксплуатации сетей Восточного региона. Представлены основные организационные и технические мероприятия, способствующие повышению эффективности передачи электроэнергии, обозначены ограничения их реализации и перспективные направления дальнейшего снижения потерь.

Ключевые слова: потери электроэнергии, магистральные электрические сети, регулирование напряжения, организационно-технические мероприятия, режим работы сети, эффективность передачи электроэнергии.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос снижения потерь электроэнергии при ее передаче по магистральным электрическим сетям сохраняет высокую актуальность. Рост требований к надежности электроснабжения, качеству электрической энергии и эффективности работы энергосистемы требует решений, направленных на повышение экономичности сетевого комплекса. Для электрических сетей напряжением 110-500кВ проблема потерь носит комплексный характер и определяется не только параметрами линий электропередачи и подстанционного оборудования, но и особенностями ведения режима, уровнем напряжения в контрольных узлах, перетоками активной и реактивной мощности, а также качеством оперативно-технического управления.

Особую значимость рассматриваемая проблема приобретает для Восточного региона Казахстана, где магистральные сети обеспечивают передачу электроэнергии между крупными энергоузлами и устойчивое электроснабжение промышленных и инфраструктурных потребителей. Потери в магистральных сетях следует рассматривать как результат не только технического состояния оборудования, но и качества ведения режима. Поэтому снижение потерь достигается не только модернизацией отдельных объектов, но и рациональным управлением режимами работы энергосистемы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материалов исследования использованы открытые данные АО «KEGOC» по филиалу «Восточные МЭС», нормативные документы Республики Казахстан в области электроэнергетики и профильные литературные источники по вопросам потерь электроэнергии, регулирования напряжения и режимов реактивной мощности. В работе применены методы аналитического обзора, сравнительного и

системного анализа, позволяющие оценить влияние организационных и технических мероприятий на снижение потерь электроэнергии в сетях 110-500 кВ Восточного региона Казахстана.

Для Восточного региона Казахстана данный вопрос имеет особую значимость, поскольку функционирование магистральных электрических сетей связано с передачей значительных объемов мощности, обеспечением межсистемных связей и поддержанием допустимых уровней напряжения в сети 110-500кВ. Сети 110кВ, 220кВ и 500кВ различаются по функциям, но работают в едином режимном комплексе, поэтому изменение режима на одном уровне напряжения отражается на работе остальных элементов.

Одной из существенных особенностей сетей Восточного региона является значительная протяженность линий электропередачи. Общая характеристика сети Восточных МЭС, включая протяженность воздушных линий, количество подстанций и их суммарную мощность, представлена на рисунке 1. Кроме того, в течение суток и по сезонам изменяется уровень потребления электроэнергии в различных узлах сети, что влияет на загрузку линий, трансформаторного оборудования и распределение активной и реактивной мощности.



Рисунок 1. Основные характеристики Восточных МЭС

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для протяженных линий высокого напряжения характерна повышенная зависимость величины потерь от условий обмена реактивной мощностью между узлами. При недостаточно эффективном управлении реактивной мощностью возрастает токовая загрузка сети, ухудшается режим напряжения и увеличиваются потери активной мощности. Следует также учитывать, что работа магистральной сети сопровождается изменением схемы в связи с ремонтами, выводом оборудования в резерв и послеаварийными переключениями. Каждое подобное изменение влияет на перераспределение потоков мощности и величину потерь электроэнергии. Одним из важнейших организационных направлений является обеспечение режимной дисциплины. Своевременный контроль параметров сети и соблюдение эксплуатационных требований позволяют предотвратить состояния, при которых возрастают потери электроэнергии. Не менее важную роль играет оперативный контроль режимных параметров. Постоянное наблюдение за уровнями напряжения в

контрольных узлах, загрузкой линий электропередачи, состоянием трансформаторов и характером перетоков мощности позволяет своевременно выявлять нерациональные режимы и принимать корректирующие меры.

Существенное значение имеет планирование режимов работы сети с учетом нормальных, ремонтных и послеаварийных схем. Предварительный анализ возможных схемно-режимных состояний позволяет выбирать решения, обеспечивающие не только надежность электроснабжения, но и приемлемый уровень потерь электроэнергии. Отдельного внимания заслуживает координация действий диспетчерского и оперативного персонала. Эффективность мероприятий по снижению потерь во многом определяется согласованностью решений, принимаемых на различных уровнях управления сетью. Также значительную роль играет систематический анализ эксплуатационных отклонений и результатов режимного ведения сети. Такая работа позволяет выявлять причины неэффективных режимов и случаи нерационального использования сетевого оборудования.

Важным организационным мероприятием является совершенствование подготовки и повышения квалификации персонала. От правильности принимаемых решений зависят надежность, качество электроэнергии и экономичность работы сети. Организационные меры создают основу для рационального ведения режима, однако непосредственное снижение потерь в сетях 110–500кВ достигается за счет применения технических мероприятий, воздействующих на параметры режима и загрузку оборудования.

Для сетей 110-500кВ Восточного региона Казахстана технические мероприятия по снижению потерь должны рассматриваться как часть управления режимом магистральной сети. Это связано с тем, что в Восточной зоне передача мощности осуществляется по протяженным линиям и через подстанции 220-500кВ, а режим работы сети зависит не только от нагрузки, но и от межсистемных связей, ремонтных схем и распределения реактивной мощности. Основные направления снижения потерь электроэнергии в сетях 110-500кВ Восточного региона Казахстана представлены на рисунке 2.



Рисунок 2. Основные направления снижения потерь электроэнергии

Первостепенное значение имеет регулирование напряжения в узлах сети. Для протяженных линий Восточного региона отклонения напряжения влияют на токораспределение, загрузку оборудования и величину потерь. Поддержание напряжения в допустимых и рациональных пределах следует рассматривать как одно из основных технических средств повышения эффективности передачи электроэнергии.

Вторым важным направлением является оптимизация режимов по реактивной мощности. Для сетей Восточного региона эта задача особенно актуальна из-за значительной протяженности сети и участия в межсистемных перетоках. Снижение нерационального обмена реактивной мощностью позволяет уменьшить нагрузку на сетевые элементы и улучшить общий режим работы.

Существенную роль играет рациональное использование силовых трансформаторов и автотрансформаторов, в том числе регулирование коэффициента трансформации. Изменение положений устройств регулирования под нагрузкой позволяет поддерживать требуемый уровень напряжения на разных ступенях сети и ограничивать режимы, сопровождающиеся повышенными потерями. К числу значимых мероприятий относится и применение средств компенсации реактивной мощности. Их задача состоит в снижении избыточных перетоков реактивной мощности, стабилизации напряжения и разгрузке отдельных элементов сети. Изменение схемы сети, перераспределение потоков мощности, вывод оборудования в ремонт или изменение состава работающих элементов могут существенно влиять на потери. Поэтому снижение потерь требует выбора таких схемных решений, при которых обеспечиваются не только надежность и устойчивость, но и экономичность передачи электроэнергии.

Таким образом, основными техническими мероприятиями по снижению потерь электроэнергии в сетях Восточного региона Казахстана являются регулирование напряжения, управление реактивной мощностью, рациональное использование трансформаторного оборудования, применение компенсирующих средств и выбор оптимальных схемно-режимных решений.

Реализация мероприятий по снижению потерь электроэнергии в сетях 110-500кВ связана с рядом практических ограничений. Основными ограничениями являются необходимость соблюдения требований надежности, изменчивость режимных условий, технические ограничения оборудования и зависимость результата от качества эксплуатационного управления. Несмотря на это, данные ограничения лишь подчеркивают необходимость дальнейшего совершенствования режимных и технических решений.

Одним из наиболее перспективных направлений является совершенствование регулирования напряжения и режимов реактивной мощности. Для Восточного региона это имеет практическое значение, поскольку качество управления этими параметрами во многом определяет загрузку сетевых элементов и величину потерь. Перспективным направлением остается и дальнейшее применение средств компенсации реактивной мощности, устройств FACTS и цифровых подходов к режимному управлению.

Для Восточного региона Казахстана перспективы снижения потерь электроэнергии связаны с комплексным развитием регулирования напряжения, управления реактивной мощностью, применением современных компенсирующих устройств и цифровизацией режимного управления. Реализация этих направлений позволит повысить экономичность работы сети при сохранении требуемого уровня надежности и устойчивости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в статье организационные и технические мероприятия показывают, что снижение потерь электроэнергии в сетях 110–500 кВ Восточного региона Казахстана должно осуществляться на основе комплексного подхода, сочетающего рациональное ведение режима, регулирование напряжения, управление реактивной мощностью и выбор обоснованных схемно-режимных решений. Для условий Восточного региона, характеризующихся протяженностью линий электропередачи, наличием подстанций 220–500 кВ, межсистемными связями

и изменяющимися режимами нагрузки, наибольший эффект достигается не за счет отдельного мероприятия, а за счет согласованного применения организационных и технических мер. Таким образом, снижение потерь электроэнергии следует рассматривать как одно из ключевых направлений повышения экономичности, надежности и устойчивости функционирования магистральной сети региона.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено без внешнего финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за консультативную и методическую помощь при подготовке статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке статьи инструменты искусственного интеллекта использовались в качестве вспомогательного средства для уточнения формулировок, структурирования текста и языковой редакции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Железко Ю. С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2016. – 456 с.

Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / В. Э. Воротницкий, Ю. С. Железко, В. Н. Казанцев и др.; под ред. В. Н. Казанцева. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 366 с.

АО «KEGOC». Филиалы МЭС [Электронный ресурс].

<https://www.kegoc.kz/ru/about/struktura-kompanii/filialy-mes/>

Закон Республики Казахстан от 9 июля 2004 года № 588-ІІ «Об электроэнергетике» [Электронный ресурс].

<https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z040000588>

Приказ Министра энергетики Республики Казахстан от 18 декабря 2014 года № 210 «Об утверждении Электросетевых правил»

<https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1400010899>

ЕРТІС ӨЗЕНІНІҢ ТҮПТІК ШӨГІНДІЛЕРІНДЕГІ АУЫР МЕТАЛДАР МӨЛШЕРІНЕ ҮЛБІ САЛАСЫНЫҢ ӘСЕРІ

ӨОЖ 628.394

Г.Қ. Мамырбекова^{1*}

¹ Қазақ Ұлттық аграрлық зерттеу университеті КЕАҚ, Алматы қ., Қазақстан

*Автор-корреспондент: Мамырбекова Гульназ Кабиболлақызы, e-mail:

gkabibolla@mail.ru

АНДАТПА. Қарқынды шаруашылық қызметтердің әсерінен Ертіс өзенінің су алабы әсіресе жоғарғы бөлігінде ластануға ұшырауда. Оның бірден бір себебі ірі өнеркәсіп орындарының көбірек шоғырлануы. Мақалада Ертіс өзенінің түптік шөгінділеріндегі ауыр металдар мөлшерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Түптік шөгінділер сынамалары келесі жармалардан 2025 жылдың маусым айында алынды: 1) Ертіс өзені – Өскемен қ. Конденсатор зауытның ақаба суларды тастауынан 0,5 км төмен; 2) Ертіс өзені – Үлбі өзені құйылған сағасынан 3,2 км төмен. Түптік шөгінділер сынамалары бойынша кадмий (Cd), мырыш (Zn), мыс (Cu) және марганец (Mn) сияқты ауыр металдардың мөлшерлері тексерілді. Алынған нәтижелер бойынша түптік шөгінділердің ауыр металдармен ластану дәрежесі Үлбі өзенінің құйылған сағасынан кейін кадмий (Cd), мырыш (Zn), мыс (Cu) концентрацияларының мәнді түрде жоғарлауы байқалды. Марганец (Mn) мөлшері екі жармада да шектеулі шама стандартынан аспады. Кадмий бойынша шекті рұқсат етілетін концентрацияның (ШРК) екінші жармада 4,5 есе, ал мырыш бойынша 5 есе артуы байқалды. Жүргізілген зерттеулер нәтижесі Ертіс өзенінің басты ластану қауіптілігі табиғи тұрғыдан емес, Үлбі өзенінің әсерінен екендігі айқындалды.

Түйінді сөздер: Ертіс өзені, Үлбі өзені, ауыр металдар, түптік шөгінділер, су сапасы, өзен саласының әсері.

КІРІСПЕ

Су қазіргі ғасырдың күрделі экологиялық қиындықтарына тап болатын маңызды табиғи ресурс. Әлемдік деңгейде жер беті сулары сапасының нашарлауы өзен бассейндерін басқарудағы маңызды мәселе екеніне көз жеткізіліп отыр. Су ресурстары адамның тіршілігі үшін өте маңызды. Антропогендік ластанудан туындаған өзен сулары сапасының төмендеуі қазіргі кездің ең өзекті экологиялық мәселелердің біріне айналды. Адамзаттың су жүйелерін көптеп пайдалануы, адмдар санының артуы, урбандалу және индустрияландыру үрдісінің қарқынды жүруі су сапасының нашарлауына әкелді. Шындығында, адам қызметі су сапасының физика-химиялық қасиеттеріне және су экосистемалерінің тұрақтылығына аймақтық деңгейде, тіпті жаһандық деңгейде елеулі әсер етуде.

Соңғы жылдарда шаруашылық қызмет әсерінен трансшекаралық Ертіс өзені де ластануға ұшырауда. Ертіс өзені Қазақстандағы ең ірі өзендердің бірі, Обь өзенінің сол жақ саласы және Ертіс сушаруашылығы алқабының басты су артериясы. Ол Қытайдағы Моңғол Алтайының оңтүстік-батыс беткейлеріндегі мұздықты аймақтан бастау алады, Қазақстан аумағын кесіп өтіп, Ресей аумағында Обь өзеніне құяды. Ертістің жалпы ұзындығы – 4280 км, оның 618 шақырымы Қытайға, 1698 шақырымы Қазақстанға және 1964 шақырымы Ресейге тиесілі [1, бет 21].

Ертіс өзені бассейнінің қазіргі экологиялық жағдайына шаруашылық қызметтің күшеюі кері әсер етеді. Антропогендік факторлардың әсерінен, әсіресе құрамында өндірістік қалдықтар мен тұрмыстық ағынды суларды қамтитын ақаба сулардың

түсуінен судың химиялық құрамы өзгереді. Ертіс өзенінің ауыр металдармен ластануы туралы көптеген ғалымдар өздерінің жұмыстарында ғылыми тұрғыдан әртүрлі талдау тәсілдерімен баға берген [2-8].

Су экожүйелерінің экологиялық күйін судың химиялық құрамы, гидробиологиялық көрсеткіштер бойынша сонымен қатар түптік шөгінділердің ластану сипаты бойынша бағалауға болады. Түптік шөгінділер өзен суынан барлық, әртүрлі генезистегі химиялық заттар кешенін жинауға қабілетті. Сондықтан оларды сулы экожүйенің интегралды индикаторы ретінде қарастырады.

Түптік шөгінділер жер үсті суларының сапасын анықтауда маңызды рөл атқарады. Табиғи сорбенттер ретінде әрекет ете отырып, олар су айдындарына түсетін органикалық және бейорганикалық қосылыстардың, соның ішінде ең қауіпті және улы ластаушы заттардың көп бөлігін жинақтай алады, осылайша су ортасын тазартуға ықпал етеді [9].

Түптік шөгінділердегі ауыр металдардың концентрациясы көптеген жағдайларда олардың су қабатындағы мөлшерінен бірнеше есе жоғары болуы мүмкін, сондықтан олар су экожүйелерінің қайталама ластануының әлеуетті көзіне айналады. Ауыр металдардың түптік шөгінділерден суға қайта түсуі немесе оралуы негізінен десорбция арқылы жүреді [10,11]. Түптік шөгінділер ауыр металдарды белсенді түрде жинайды және олардың концентрациясы су сапасының ақпараттық көрсеткіші болып саналады. Сонымен қатар, түптік шөгінділері екінші реттік ластанудың негізгі көзі болып табылады. Өзен биоценоздары үшін сынап, қорғасын және кадмий ең қауіпті болып есептеледі. Физикалық-химиялық жағдайлар (мысалы, pH, Eh, еріген оттегі және т.б.) өзгерген кезде, түптік шөгінділермен байланысты қосылыстар су қабатында еріп, қоректік тізбекке еніп, су тіршілігіне екінші реттік әсер етуі мүмкін [12].

Жұмыстың мақсаты Ертіс өзенінің түптік шөгінділерінің ауыр металдармен ластану орындарының қалыптасуына оң жақ саласы Үлбі өзенінің әсерін айқындау. Зерттеу барысында екі жарма бойынша түптік шөгінділер сынамалары талданды.

МАТЕРИАЛДАР ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕРІ

Ертіс өзенінің оң жақ саласы Үлбі өзенімен транзиттік ластануын бағалау үшін екі бақылау жармасы таңдалып (кесте 1), түптік шөгінділердегі кадмий, мырыш, мыс және марганец мөлшерлері анықталды. 1- жарма Ертіс өзенінде, Конденсатор зауытының ағынды суларын тастайтын жерінен 0,5 км төмен орналасқан. 2- жарма Ертіс өзенінде, Үлбі өзенінің құйылған сағасынан 3,2 км төмен орналасқан. Бақылау жармалары ластану көзінен төмен орналасқан және су құрамын төменгі ағыс бойынша сипаттайтындай етіп таңдалды, яғни олар ағынды сулармен толығымен араласатын жерде орналасқан.

Кесте 1. Жармалардың атауы және координаталары

Белгіленуі	Жарма атауы	Координаталары
1	Ертіс өзені – Өскемен қ. Конденсатор зауытының ақаба суларды тастауынан 0,5 км төмен	N 490.91.555/ E 082066.5907/
2	Ертіс өзені – Үлбі өзені құйылған сағасынан 3,2 км төмен	N 490.58.5563/ E 082032.2638/

Түптік шөгінділерден сынама алу 2025 жылдың маусым айында мөлшерленген құжаттар талаптарын [13] сақтай отырып, жүргізілді. Шөгінділерден сынамалар түтікшелі сынама алғыш көмегімен алынды. Сынамалар жоғарғы көкжиектен 0-10 см алынды. Алынған сынамалар полиэтилен банкаларға салынып, бірден зертханаға жеткізілді. Түптік шөгінділер талдаулары және осы мақалада талқыланатын

нәтижелер аккредиттелген "Сынақ зертханасы "НПО "ВК-ЭКО" жауапкершілігі шектеулі серіктестігінде жүргізілді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Жүргізілген зерттеулер Үлбі өзенінің ағынды суларымен Ертіс өзеніне кадмий, мырыш, марганец, мыс сияқты ауыр металдардың түсетінін көрсетті. Алынған сынамалар нәтижелері 2-кестеде келтірілген. Ең жоғарғы концентрациялар 2-жармада, яғни Үлбі өзенінің құйылуынан кейін байқалды (сурет 1).

Кесте 2. Бақыланған жармалардағы Ертіс өзенінің түптік шөгінділеріндегі ауыр металдар мөлшері, мг/кг (маусым 2025 жыл)

Сынама алу орны	Cd	Mn	Zn	Cu
1	6,0	630,0	112,0	50,0
2	9,0	680,0	511,0	59,0

Ауыр металдардың шекті рұқсат етілетін концентрациясы (ШРК) мәндері түптік шөгінділер үшін анықталмағанын атап өткен жөн. Өзен түбіндегі микроэлементтердің ластануын топырақтар немесе орташа тау жыныстарының сипаттамалары (кларктар) үшін ШРК мәндерін салыстыру арқылы бағалауға болады.

Талданған топырақ үлгілерінде [14] жеке ауыр металдардың жоғары концентрациясы анықталды. Кадмий деңгейі 1-жармада 6,0 мг/кг болса, оның 2-жармада 9,0 мг/кг-ға дейін артқанын байқауға болады. Бұл шамалардың шекті рұқсат етілген концентрациядан (ШРК = 2 мг/кг) 3,0 және 4,5 есеге дейін артық екенін байқауға болады.

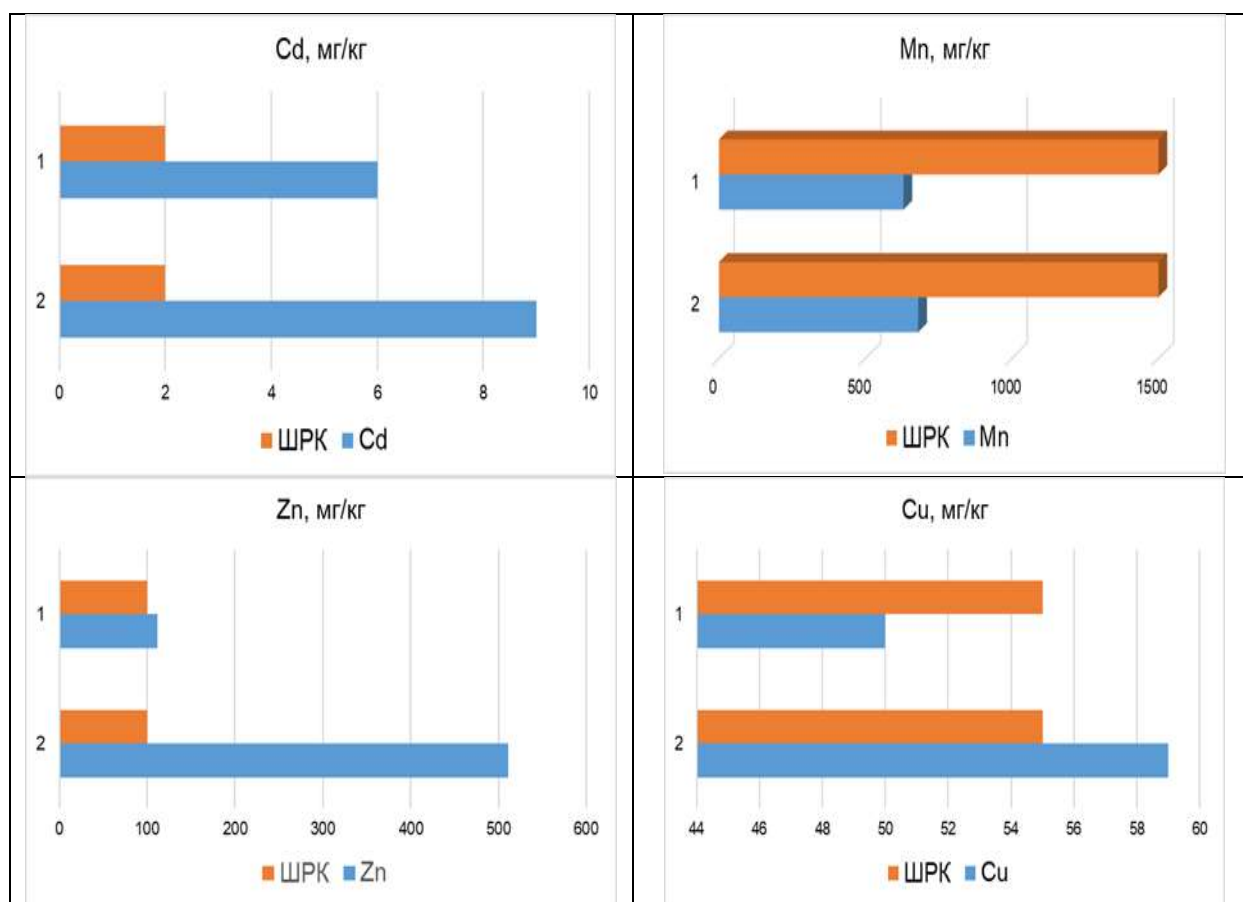
Мырыш концентрациясы сәйкесінше 112,0 және 511,0 мг/кг -ды құрады. Бірінші жармада мырыш мөлшерінің ШРК дан артуы (ШРК = 100 мг/кг) 1,1 есе болса, екінші жармада шекті рұқсат етілетін шамадан артуы 5 есе екенін байқауға болады, бұл техногендік әсерді айқын түрде растайды.

Мыстың мөлшері 50,0–59,0 мг/кг аралығында болды. Бірінші жармада, яғни Ертіс өзенінің жоғарғы бөлігінде тағайындалған мөлшерден (55 мг/кг) аспайды, ал екінші жармада, яғни Ертіс өзеніне Үлбі саласының құйылуынан кейін аздап артуы (1,07 рет) байқалады.

Ал марганец концентрациясы екі жармада да шекті рұқсат етілген мөлшерден (1500 мг/кг) аспады.

Сулы экожүйеде түптік шөгінділермен су арасында үздіксіз зат алмасу үрдісі жүреді. Соңғы жылдарда өндіріс орындары шоғырланған аудандарда орналасқан су объектілерінің түптік шөгінділерінде көптеген улы заттардың, соның ішінде ауыр металдар концентрацияларының артуы байқалады.

Осылайша, зерттеліп отырған аумақта экологиялық қауіптілік кадмий және мырыштан болатынын және олардың артуы топырақ қабатының антропогендік ластану мүмкіндігін көрсетеді.



Сурет 1. Жармалар бойынша ауыр металдардың ШПК мен салыстырылуы

ҚОРЫТЫНДЫ

Түптік шөгінділердің ластану құрамы бойынша Ертіс өзені суының Үлбі өзенінің беттік суларымен транзиттік ластануы байқалады. Ертіс өзенінің түптік шөгінділерінде мырыш концентрациясы «Ертіс өзені – Үлбі өзені құйылған сағасынан 3,2 км төмен» жармасында шекті рұқсат етілетін мөлшерден 5 есе, ал кадмий 4,5 есе жоғары болды.

Алдында жүргізілген [4,5] және осы жүргізілген зерттеулер Үлбі өзенінің Ертіс өзені суының сапасына және химиялық құрамына әсер етуі белгілі бір күрделі сипатқа ие екенін және әсіресе Үлбі өзенінің құйылуынан кейін ауыр металдар концентрациясының жоғарлауын анықтады. Саланың құйылу нәтижесінде тек қана су массасының әртүрлі химиялық құраммен арласуы ғана жүрмей, сонымен қатар «су-органикалық заттар-жыныс» жүйесіндегі әсерлесу шарты өзгереді.

Ертіс өзенінің қарқынды өзін - өзі тазарту үрдістері судың қанағаттандырушылық сапасын сақтап қалуға және Үлбі саласынан транзиттік ластану әсерін төмендетеді.

Болашақта климаттық өзгерулердің әсерінен Ертіс өзенінде су мөлшерінің азаюы жүретін болса, өзен суының сапасы қанағаттанарлық дәрежеде болмайтынын атап өту қажет.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Бурлибаев М. Ж., Амиргалиев Н. А., Шенбергер И. В., Скольский В. А., Бурлибаева Д. М., Уваров Д. В., Смирнова Д. А., Ефименко А. В., Милюков Д. Ю. Проблемы загрязнения основных трансграничных рек Казахстана. – Алматы: «Каганат», 2014. – Т.1. – с.742.
2. Бурлибаева Д.М., Бурлибаев М.Ж., Рыскельдиева А.М., Кайдарова Р.К., Опп К., Амиргалиев Н.А. Динамика изменения концентраций загрязняющих веществ группы тяжелых металлов в поверхностных водах трансграничной реки ертис на территории Республики Казахстан. *Хабаршы. География сериясы*. №2 (57) 2020. <https://doi.org/10.26577/JGEM.2020.v57.i2.05>
3. Арынова Ш.Ж., Ажаев Г.С., Ахметов К.К., Колпакова В.П., Шаймарданов Ж.К. Современное состояние реки Ертис в условиях антропогенного воздействия. *Вестник Национального ядерного центра РК*. — 2024, № 2. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-2-34-42>
4. Kolpakova, V.; Yeremeyeva, Yu.; Anapyanova, S.; Mamyrbekova, G.; Nurekenova, R.; Utepbergenova, L.; Shakhmov, Zh.; Aniskin, A. Hydroecological assessment of the Kazakh part of the Yertis River under conditions of industrial development. *Results Eng.* 2024, 24, 103578. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024018218>
5. Мамырбекова Г.К., Калыбекова Е.М., Саиров С.Б., Шеров А.Г., Анапьянова С.Б., Базарбаева Ж.А. Пространственно – временная характеристика качества поверхностных вод реки Ертис в черте города Усть -Каменогорск. *«Ізденістер, нәтижелер – Исследования, результаты»* // 2025, № 1 (105) стр. 209-2019. <https://doi.org/10.37884/1-2025/25>
6. Zhalmagambetova, U.; Assanov, D.; Neftissov, A.; Biloshchytskyi, A.; & Radelyuk, I. Implications of Water Quality Index and Multivariate Statistics for Improved Environmental Regulation in the Irtys River Basin (Kazakhstan), *Water*, 2024, 16(15), 2203. <https://doi.org/10.3390/w16152203>
7. Ryskeldieva, A.; Burlibaeva, D.; Yerdeshbay, A.; Kamelkhan, G.; & Sarova, N. Clarke concentrations of heavy metals in surface waters of the transboundary river Yertis (Kazakhstan), *Water Science* 2023, 37(1), 18–27. <https://doi.org/10.1080/23570008.2023.2193453>
8. Бурлибаев М.Ж., Амиргалиев Н.А., Муртазин Е.Ж. Шенбергер И.В., Перевалов А.С., Бурлибаева Д.М. Современное состояние гидрохимического режима и токсикологических параметров в трансграничной реке Ертис и характер их трансформации, *Гидрометеорология и экология*. – 2012. – № 4(67). – С. 118-135.
9. Решетняк О.С., Закруткин В.Е. Донные отложения как источник вторичного загрязнения речных вод металлами (по данным лабораторного эксперимента). *Естественные науки*. 2016. № 4
10. Манихин В.И., Никаноров А.М. Растворимые и подвижные формы тяжелых металлов в донных отложениях пресноводных экосистем. СПб., 2001. 165 с.
11. Папина Т.С. Транспорт и особенности распределения тяжелых металлов в ряд: вода – взвешенное вещество – донные отложения речных экосистем : анализ. обзор. Новосибирск, 2001. 58 с
12. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат, 1987.
13. СТ РК ГОСТ Р 51592-2003 «Вода. Общие требования к отбору проб.» - Комитет по стандартизации, метрологии и сертификации Министерства индустрии и торговли Республики Казахстан. - Введен в действие 01.01.2005г.
14. Руководство по определению содержания тяжелых металлов в сельскохозяйственных почвах и продуктах растениеводства. Москва, Россия, 1992 г.

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОТОЧНОЙ 3D-АНЕМОМЕТРИИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В КОНТЕКСТЕ СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ИИ

УДК 551.508.5

М.Қ. Манышев^{1*}

¹ Восточно Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Манышев Медет Қарымбекұлы, e-mail: medikfirst@bk.ru

АННОТАЦИЯ. Данная статья подготовлена в рамках направления «Искусственный интеллект в строительстве, архитектуре и энергетике». Развитие возобновляемой энергетики, в частности ветроэнергетики, требует глубокого понимания физических процессов в приземном слое атмосферы для эффективного проектирования и формирования массивов Big Data, пригодных для анализа искусственным интеллектом. Целью исследования является анализ технического оснащения метеостанции «Простор» и обоснование необходимости 3D-оборудования (анемометра Young 81000) для ветроэнергетики. Ключевым методом выступает акустическая анемометрия и метод турбулентных пульсаций (eddy covariance). Результаты показывают, что использование безынерционного ультразвукового датчика позволяет с высоким разрешением (0,01 м/с) фиксировать 3D-вектор скорости ветра и мгновенную акустическую температуру. Данные параметры критически важны для точного компьютерного моделирования (CFD) вихревых следов (wake effects) и оценки сдвига ветра, которые способны вызывать усталостное разрушение ветротурбин. Научная новизна заключается в обосновании перехода от классической усредненной климатологии к высокоточной микрометеорологии и аэродинамике в энергетике. Практическая значимость работы выражается в предоставлении инженерных решений будущего для максимизации энергоотдачи ветропарков.

Ключевые слова: ветроэнергетика, ультразвуковая анемометрия, турбулентные пульсации, метод eddy covariance, аэродинамический след, микрометеорология.

ВВЕДЕНИЕ

В контексте развития цифровизации актуальной задачей является внедрение интеллектуальных систем в инженерные решения. Для второго направления конференции «Искусственный интеллект в строительстве, архитектуре и энергетике» формирование точных баз данных о ветровой обстановке является первостепенным шагом к автоматизированному проектированию ветровых электростанций (ВЭС). Традиционные чашечные и флюгерные анемометры обладают механической инерционностью и не способны фиксировать высокочастотные микропульсации воздушных масс, что ограничивает их применимость в современной энергетике. Данная статья акцентирует внимание на теоретической и практической значимости получения точных аэродинамических данных. Цель данного обзора — провести всесторонний анализ высокоточного оснащения метеостанции «Простор», рассмотреть физические принципы акустической анемометрии и обосновать абсолютную необходимость использования 3D-оборудования для задач проектирования и управления ветроэнергетическими установками

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования выступает метеостанция «Простор», функционирующая при Восточно-Казахстанском техническом университете им. Д.Серикбаева (г. Усть-Каменогорск). Флагманским измерительным оборудованием метеостанции является трехосевой (3D) ультразвуковой анемометр-термометр Young Model 81000 (и его модификация 81000V), в котором полностью отсутствуют подвижные механические детали. Интеграция и сбор данных осуществляются с помощью измерительно-управляющего дата-логгера Campbell Scientific CR1000 с частотой дискретизации до 32 Гц. Принцип действия базируется на методе времени прохождения (transit time) акустического сигнала между преобразователями. Прибор измеряет время прохождения ультразвуковых импульсов по потоку и против него, вычисляя ортогональные составляющие вектора скорости ветра (U , V , W), где полностью исключается зависимость от температуры и давления воздуха. Скорость звука используется для вычисления виртуальной звуковой температуры. Для расчета турбулентных потоков явного тепла применяется метод турбулентных пульсаций (eddy covariance) с использованием программных пакетов (TK2, EddyUH), реализующих алгоритмы фильтрации (например, аппроксимацию плоскости Planar Fit) и спектральные коррекции

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Массивы данных метеостанции «Простор» за август и сентябрь 2025 года выявили высокую изменчивость ветровой обстановки, фиксируя мгновенные скачки скорости от 9 до 15 м/с и порывы до 20 м/с. Измерения ортогональных составляющих скорости в декартовой системе координат с исключительным разрешением 0,01 м/с и порогом чувствительности 0,01 м/с позволяют избежать сглаживания пиков, характерного для инерционных чашечных анемометров. Важнейшим результатом является возможность регистрации углового отклонения (элевации) потока до $\pm 60^\circ$, что особенно критично на сложном рельефе холмистой местности. Постоянная фиксация вертикальной составляющей скорости ($W > 0$) позволяет инженерам рассчитывать истинный поток кинетической энергии, проходящий через ометаемую площадь ротора ветрогенератора, и учитывать реальную аэродинамическую подъемную силу.

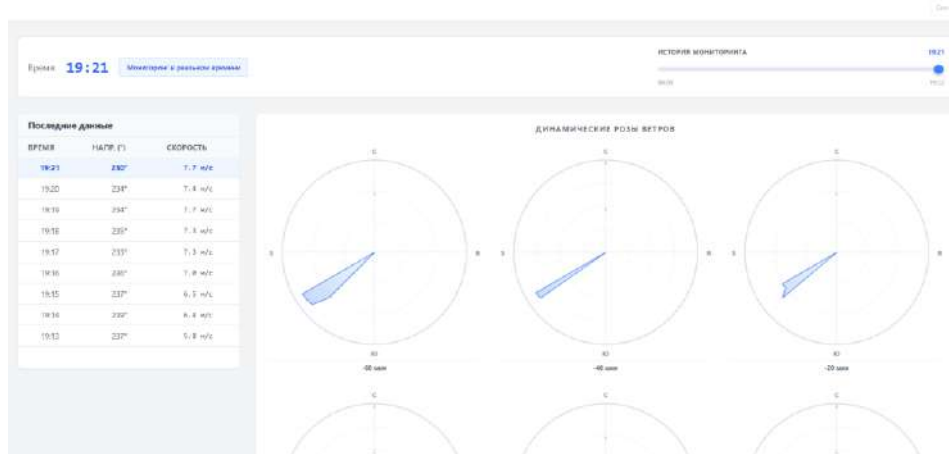


Рисунок 1. Мониторинг в реальном времени

Кроме того, данные метеостанции позволили с высокой точностью оценить вихревые (аэродинамические) следы (Wake effects) позади турбин. Интеграция 3D-векторов с частотой выше 10 Гц является фундаментом для CFD-моделирования (Computational Fluid Dynamics) и минимизирует убытки от ошибочной расстановки ветряков на территории ветропарка. Успешная компенсация аэродинамических

искажений обеспечивается заводской калибровкой приборов в аэродинамической трубе и применением математических матриц поправок в микропроцессоре. Высокочастотный хаос пульсаций превращается в надежные репрезентативные климатические выборки, проходя тесты на стационарность и интегральные характеристики турбулентности (QA/QC)

Таблица 1. Технические характеристики исследуемого оборудования

Параметр	Значение	Единицы измерения
Диапазон измерения скорости ветра	0–40	м/с
Разрешение измерения скорости	0,01	м/с
Порог чувствительности	0,01	м/с
Диапазон измерения направления (азимут)	0–360	градус
Диапазон углового отклонения (элевация)	±60	градус
Диапазон измерения акустической температуры	-50 ... +50	°C
Диапазон измерения скорости звука	300–360	м/с
Частота дискретизации (Scan Rate)	до 32	Гц
Энергопотребление (при 12–24 В постоянного тока)	110	мА

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ подтверждает, что традиционные датчики не отвечают строгим запросам современной энергетики. Внедрение 3D ультразвуковых анемометров, таких как Young 81000, обеспечивает сбор качественных высокочастотных массивов данных, критически важных для расчета профилей сдвига ветра, интенсивности турбулентности и аэродинамических следов. Научная новизна заключается в переходе от классической метеорологии к прикладной аэродинамике для безопасного проектирования ветровых электростанций. Практическая значимость результатов неоспорима: данные комплекса «Простор» позволяют максимизировать энергоотдачу турбин и минимизировать риск их усталостного разрушения. В перспективе методы высокочастотного зондирования могут быть интегрированы с нейросетевыми алгоритмами ИИ для предиктивной аналитики работы ветропарков, а также с беспилотными аппаратами для расширения площади наблюдений

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена на базе оборудования факультета «Школа архитектуры, строительства и энергетики» Восточно-Казахстанского технического университета им. Д.Серикбаева.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность организационному комитету конференции ВКТУ и техническому персоналу метеостанции «Простор» за

предоставленный архив метеоданных .

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке текста данной рукописи авторы использовали инструменты генеративного искусственного интеллекта для помощи в структурировании материала согласно заданному шаблону конференции

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО 16622-2009. Метеорология. Акустические анемометры-термометры. Методы приемочных испытаний при измерениях средней скорости ветра. – М.: Стандартиформ, 2010.
2. California Air Resources Board (CARB). (2020). *Standard Operating Procedures for RM Young 81000 Ultrasonic Anemometers*. AQSB SOP 506, Second Edition. Monitoring and Laboratory Division, Sacramento, CA.
3. R.M. Young Company. *Ultrasonic Anemometer Model 81000: Manual*. Traverse City, Michigan, USA.
4. Mauder, M., & Foken, T. (2004). *Documentation and Instruction Manual of the Eddy Covariance Software Package TK2*. Arbeitsergebnisse Nr. 26. Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie.
5. Peltola, O., & Mammarella, I. (2015). *Short introduction to EddyUH*. INAR, University of Helsinki, Department of Physics.
6. Foken, T. (1999). *Comparison of the sonic anemometer Young Model 81000 during VOITEX-99*. Arbeitsergebnisse Nr. 08. Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie.
7. Метеостанция «Простор» (2025). *Архив метеоданных "Ветер" (Август, Сентябрь 2025 г.) и техническое описание флагманского оборудования*.
8. Gemini. (2026, апрель 09). Генерация структуры статьи по шаблону [Большая языковая модель]. Notebook LM. www.notebooklm.google.com/notebook/ed21ffda-29ba-4be9-97de-7d24fd930428

ЗАВИСИМОСТЬ КАЗАХСТАНА ОТ ТРАНСГРАНИЧНЫХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ И ПРОБЛЕМА ДЕФИЦИТА ВОДЫ

УДК 626.81

Д.А. Маратова^{1*}, А.С. Тоқтарбек¹, В.П.Колпакова¹, Ю.Н. Еремеева¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Маратова Дильназ Аслановна
dilnazmaratova777@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В условиях глобальных климатических изменений и роста водопотребления проблема обеспечения водными ресурсами становится одной из ключевых для Казахстана. Особую актуальность приобретает зависимость страны от трансграничных рек, значительная часть стока которых формируется за пределами национальной территории. Основные водные артерии, такие как Иртыш, Или и Сырдарья, берут начало в соседних государствах, что усиливает уязвимость Казахстана к внешним факторам, включая водную политику сопредельных стран и изменения природных условий. Целью данного исследования является анализ зависимости Казахстана от трансграничных водных ресурсов и оценка последствий дефицита воды для экономики, экологии и устойчивого развития страны. В работе применяются методы анализа статистических данных, сравнительного и системного подходов, а также изучение научной литературы. В результате исследования выявлено, что дефицит воды в Казахстане обусловлен как природно-климатическими особенностями, так и неэффективным управлением водными ресурсами и ростом водопотребления. В статье предложены основные направления решения проблемы, включая развитие водосберегающих технологий, совершенствование межгосударственного сотрудничества и повышение эффективности управления водными ресурсами.

Научная новизна работы заключается в комплексном анализе взаимосвязи трансграничной зависимости и водного дефицита, а практическая значимость — в разработке рекомендаций по обеспечению водной безопасности Казахстана.

Ключевые слова: трансграничные воды, дефицит воды, водная безопасность, водные ресурсы, устойчивое развитие, международное сотрудничество.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях проблема обеспечения водными ресурсами становится одной из ключевых для Республики Казахстан. Это обусловлено как природно-климатическими особенностями страны, так и высокой зависимостью от трансграничных водных источников. Казахстан относится к числу государств с ограниченными водными ресурсами, при этом значительная часть речного стока формируется за пределами его территории. По данным международных исследований, страны Центральной Азии характеризуются высокой степенью взаимозависимости в сфере водных ресурсов, что делает их уязвимыми к внешним факторам управления водными потоками [1].

Особую роль в формировании водных ресурсов Казахстана играют трансграничные реки, такие как Иртыш, Или и Сырдарья. Это усиливает зависимость Казахстана от водной политики данных государств и создает дополнительные риски для устойчивого водоснабжения. Страны нижнего течения рек испытывают наибольшее давление, связанное с регулированием стока в верховьях [2, с.110–120].

Дополнительным фактором, усиливающим актуальность проблемы, является изменение климата. Сокращение ледников, изменение режима осадков и повышение температуры в Центральной Азии приводят к снижению водных ресурсов в долгосрочной перспективе [3]. Для Казахстана это особенно важно, поскольку значительная часть речного стока зависит от ледникового питания.

Проблема водных ресурсов Центральной Азии достаточно широко изучена. Исследования международных организаций в основном сосредоточены на вопросах трансграничного распределения воды и её использования в сельском хозяйстве. В частности, отмечается, что сельское хозяйство является основным потребителем воды в регионе, а потери в ирригационных системах остаются значительными. В то же время ряд исследований подчеркивает влияние климатических факторов на водный баланс региона.

Целью данного исследования является анализ зависимости Казахстана от трансграничных водных ресурсов и оценка влияния дефицита воды на устойчивое развитие страны.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи: проанализировать структуру водных ресурсов Казахстана; оценить степень зависимости от трансграничных рек; выявить основные причины дефицита воды; рассмотреть последствия водного дефицита для экономики и экологии; предложить возможные пути решения проблемы.

Для наглядного представления ключевых факторов, определяющих актуальность проблемы водных ресурсов в Казахстане по данным [1-2;4], основные из них приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные факторы, влияющие на дефицит воды в Казахстане

Фактор	Содержание	Влияние
Трансграничная зависимость	Значительная часть рек формируется за пределами страны	Риск внешнего контроля воды
Климатические изменения	Сокращение ледников и осадков	Уменьшение водных ресурсов
Рост потребления	Сельское хозяйство и промышленность	Увеличение нагрузки на воду
Неэффективное использование	Потери в ирригационных системах	Усугубление дефицита

Как видно из таблицы, дефицит воды в Казахстане обусловлен совокупностью внешних и внутренних факторов, среди которых ключевую роль играют трансграничная зависимость, климатические изменения и неэффективное использование водных ресурсов.

В совокупности эти факторы формируют сложную систему водных рисков, оказывающих влияние на экономическое развитие, экологическое состояние и устойчивость водоснабжения страны. Это подтверждает необходимость комплексного анализа водных ресурсов Казахстана и поиска эффективных решений, направленных на снижение уровня водного дефицита.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются водные ресурсы Республики Казахстан, а предметом — зависимость страны от трансграничных водных источников и связанные с этим риски дефицита воды.

Материалами исследований являлись основном зарубежные научные работы, опубликованные за периодами 2013-2025 гг. Поиск литературы проводился по направлению влияния трансграничных водных источников, изменения климата, развития сельского хозяйства на водные ресурсы Республики Казахстан.

Мировая практика также рассматривает влияние данных параметров на водные ресурсы стран. В работе использовались методы анализа, обобщения и систематизации научной информации.

Сравнительный анализ публикаций позволил сделать выводы о необходимости внедрения водосберегающих технологий, совершенствование управления водными ресурсами и развитие международного сотрудничества для повышения водной безопасности Республики Казахстан.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Анализ водных ресурсов Казахстана и их трансграничный характер

Водные ресурсы Казахстана формируются за счёт поверхностных и подземных источников, однако определяющее значение имеют именно речные системы. При этом, значительная часть водных ресурсов страны имеет трансграничное происхождение, то есть формируется за пределами её территории. По оценкам международных организаций, около половины речного стока поступает в Казахстан из соседних государств, что существенно усиливает зависимость страны от внешних условий водопользования [1]. Наибольшее значение для водоснабжения страны имеют такие трансграничные реки, как Иртыш, Или и Сырдарья. Иртыш, берущий начало на территории Китая, обеспечивает водой восточные и частично центральные регионы Казахстана. Река Или также формируется в Китае и играет ключевую роль в поддержании водного баланса озера Балхаш. В свою очередь, Сырдарья, протекающая через Кыргызстан и Узбекистан, является основным источником воды для южных регионов страны. Такая структура водных ресурсов обуславливает высокую степень зависимости Казахстана от стран верхнего течения рек. Возможность регулирования стока в верховьях напрямую влияет на объёмы поступающей воды. В исследованиях отмечается, что увеличение водозабора в верхних бассейнах может привести к снижению водообеспечения в нижнем течении, что особенно критично для сельского хозяйства и природных экосистем [2, с.110–120].

Наряду с внешними факторами важную роль играют и внутренние особенности водопользования. Для наглядного представления структуры водных ресурсов Казахстана и степени их зависимости от внешних источников приведены на рисунке 1.

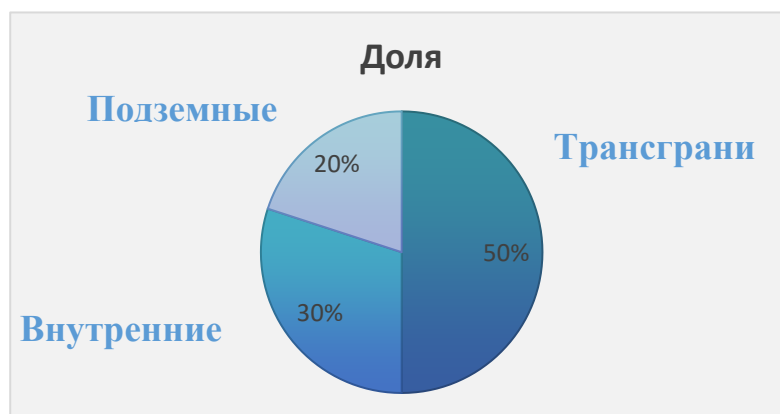


Рисунок 1. Основные источники водных ресурсов Казахстана

Основная нагрузка на водные ресурсы приходится на сельское хозяйство, где потребляется большая часть воды. При этом, значительные потери возникают в процессе транспортировки и орошения, что связано с изношенностью инфраструктуры и недостаточной эффективностью используемых технологий.

Анализ представленных данных показывает, что доля трансграничных вод занимает значительное место в общей структуре водных ресурсов страны. Это подтверждает высокий уровень зависимости Казахстана от внешних источников и подчеркивает необходимость принятия мер по повышению эффективности водопользования и развитию международного сотрудничества.

В целом, трансграничный характер водных ресурсов является одним из ключевых факторов, определяющих состояние водной безопасности Казахстана и требующих системного подхода к управлению водными ресурсами.

2. Дефицит воды в Казахстане и его последствия

Проблема дефицита воды в Казахстане становится всё более актуальной в условиях роста водопотребления и изменения климатических условий. Несмотря на наличие значительных водных ресурсов, их распределение по территории страны является неравномерным, а доступные запасы не всегда соответствуют потребностям экономики и населения.

Одной из основных причин дефицита воды является высокая нагрузка со стороны сельского хозяйства. По данным Министерства водных ресурсов Республики Казахстан, около 60–65% всей потребляемой воды используется именно в аграрном секторе [5]. При этом эффективность использования воды остаётся низкой: значительная часть ресурсов теряется при транспортировке и орошении. Согласно исследованиям, до 50% воды может теряться в ирригационных системах из-за утечек и испарения [6].

Дополнительным фактором является неэффективное управление водными ресурсами. В Казахстане расход воды на единицу продукции значительно выше, чем в развитых странах. Это усиливает нагрузку на водные ресурсы и ускоряет их истощение. Серьёзное влияние оказывает также изменение климата. По прогнозам международных организаций, к 2040 году Казахстан может столкнуться с дефицитом воды до 50% от потребности [7]. Сокращение ледников и изменение режима осадков приводят к уменьшению стока рек, что особенно опасно для регионов, зависящих от трансграничных источников.

Для наглядного представления структуры водопотребления в Казахстане основные данные приведены на рисунке 2.

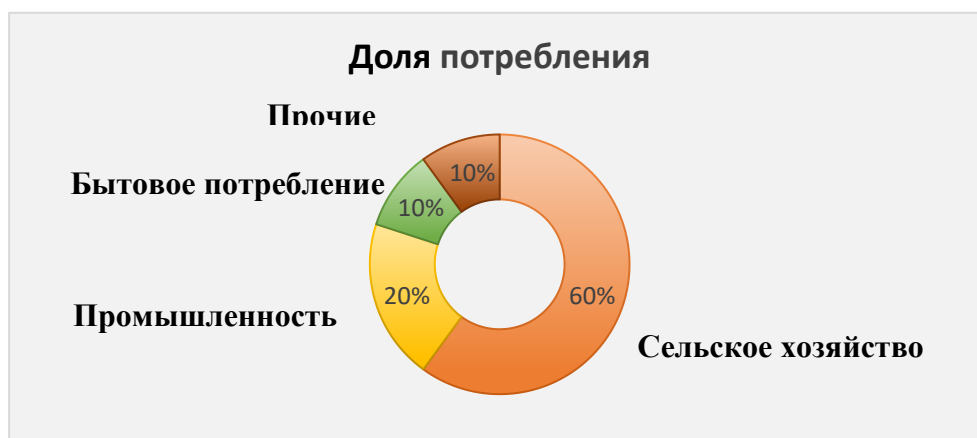


Рисунок 2. Структура водопотребления в Казахстане

Как видно из диаграммы, сельское хозяйство оказывает наибольшее давление

на водные ресурсы страны. Уже в настоящее время наблюдаются признаки водного дефицита. Например, в южных регионах страны прогнозируется нехватка до 1 млрд кубометров воды в период вегетационного сезона [8]. Это напрямую влияет на сельское хозяйство, снижая урожайность и увеличивая экономические риски. Последствия дефицита воды затрагивают различные сферы. В экономике это выражается в снижении эффективности сельского хозяйства и увеличении затрат на водоснабжение. В экологическом плане наблюдается деградация водных экосистем, снижение уровня водоёмов и ухудшение качества воды. Кроме того, дефицит воды может привести к усилению социальной напряжённости и межгосударственных конфликтов за распределение водных ресурсов. Таким образом, дефицит воды в Казахстане является комплексной проблемой, обусловленной как природными, так и антропогенными факторами.

3. Пути решения проблемы дефицита воды в Казахстане

Преодоление дефицита воды в Казахстане невозможно без комплексного подхода, который учитывает как внутренние особенности водопользования, так и внешние факторы. Прежде всего, значительный потенциал для снижения водного дефицита связан с модернизацией сельского хозяйства. Использование капельного и дождевого орошения позволяет существенно сократить потери воды и повысить её продуктивность. По оценкам FAO, обновление ирригационной инфраструктуры может снизить потери воды до 20–30% [1, с.110–120]. Не менее важным направлением является совершенствование управления водными ресурсами. Речь идет о внедрении цифровых технологий, систем мониторинга и учета воды, а также переходе к принципам интегрированного управления. Международная практика показывает, что это способствует более эффективному распределению водных ресурсов и снижению нагрузки на водные системы [2].

С учетом высокой зависимости от трансграничных рек Казахстану необходимо развивать механизмы совместного управления водными ресурсами, заключать долгосрочные соглашения и активно участвовать в региональных инициативах. Согласованные действия стран региона являются важным условием устойчивого использования трансграничных вод [3]. Помимо этого, существенное влияние на ситуацию может оказать изменение отношения к водопользованию со стороны населения и бизнеса. Основные направления решения проблемы дефицита воды представлены в таблице 3.

Таблица 3. Основные направления решения проблемы дефицита воды

Направление	Меры	Ожидаемый эффект
Технологическое	Капельное орошение, модернизация каналов	Снижение потерь воды
Управление	Цифровизация, учет воды	Повышение эффективности
Международное сотрудничество	Соглашения с соседними странами	Стабильность водоснабжения
Экологическое поведение	Рациональное использование воды	Снижение потребления

Представленные направления показывают, что эффективное решение проблемы возможно только при сочетании технологических, управленческих и институциональных мер. В совокупности они позволяют снизить уровень водного дефицита и повысить устойчивость водной системы страны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований было установлено, что водные ресурсы Казахстана в значительной степени зависят от трансграничных источников, что формирует высокий уровень уязвимости страны в условиях изменения климата и роста водопотребления. Дефицит воды обусловлен как внешними факторами, связанными с регулированием стока соседними государствами, так и внутренними проблемами неэффективного использования водных ресурсов. Основная нагрузка на водные ресурсы приходится на сельское хозяйство, при этом значительные потери воды в ирригационных системах усугубляют ситуацию. Установлено, что в перспективе проблема дефицита воды может усилиться, что требует своевременного принятия комплексных мер. Для повышения водной безопасности в Республике Казахстан необходимо внедрять водосберегающие технологии, совершенствовать управление водными ресурсами и развивать международное сотрудничество.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают признательность всем, кто оказал методологическую и организационную поддержку в ходе подготовки работы.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При написании статьи авторы использовали платформу Open AI для поиска литературных источников по теме статьи. <https://openai.com/chatgpt>. Запрос: можешь ли ты найти мне источники по следующей теме: Зависимость Казахстана от трансграничных водных ресурсов и проблема дефицита воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. World bank. central asia water resources management. world bank group, 2019. <https://www.worldbank.org/en/region/eca/publication/central-asia-water-resources-management>
2. Frenken, karen. irrigation in central asia in figures. fao water reports, 2013: 110–120. <https://www.fao.org/3/i1579e/i1579e.pdf>
3. UNDP. Water and Climate Change in Central Asia. United Nations Development Programme, 2020. <https://www.undp.org/kazakhstan/stories/climate-change-impact-water-resources-kazakhstan>
4. FAO. *Water resources in Kazakhstan and Central Asia*. 2025. <https://www.fao.org>
5. The astana times. water consumption in kazakhstan, 2024. <https://astanatimes.com/2024/05/65-of-annual-water-consumption-in-kazakhstan-attributes-to-agriculture/>
6. International water management institute. central asia rapid drought risk and resilience assessment. 2025. <https://www.iwmi.org/projects/central-asia-rapid-drought-risk-and-resilience-assessment/>
7. UNDP. water and climate change in kazakhstan. 2021. <https://www.undp.org/kazakhstan/stories/climate-change-impact-water-resources-kazakhstan>
8. Prime minister of kazakhstan. water deficit forecast in southern regions, 2025. <https://primeminister.kz/en/news/water-deficit-of-up-to-1-billion-cubic-meters-is-forecast-in-the-south-the-government-will-revise-the-crop-structure-30828>

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ СЧЕТЧИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ОТКЛОНЕНИЯХ НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ

УДК 621.317.785

А.Н. Масанова¹, Н.В. Прохоренкова¹

¹ВКТУ им.Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Масанова Алтынай Нуржановна,
altynaymassanova@gmail.com:

АННОТАЦИЯ: В статье представлен сравнительный анализ поведения различных типов счетчиков электроэнергии – индукционных, электронных первого поколения и современных интеллектуальных приборов учета – в условиях отклонений напряжения и частоты питающей сети от номинальных значений. Обобщены данные зарубежных исследований о дополнительных погрешностях счетчиков в нестабильных режимах. Индукционные счетчики наиболее чувствительны к отклонениям напряжения (погрешность до 10–15% при $U = 0,8U_n$), тогда как современные интеллектуальные приборы демонстрируют лучшую, но не идеальную устойчивость. Высшие гармоники остаются проблемой для всех типов счетчиков, вызывая погрешности до 10–15% даже у новых моделей. Установлено, что прямолинейное представление о превосходстве цифровых счетчиков над аналоговыми не всегда соответствует действительности – при определенных искажениях некоторые модели электронных счетчиков могут давать погрешности, сопоставимые с индукционными. Сформулированы рекомендации по выбору приборов учета для объектов с различными характеристиками качества электроэнергии.

Ключевые слова: счетчики электроэнергии, индукционные счетчики, электронные счетчики, интеллектуальные приборы учета, точность измерений, нестабильность напряжения, отклонение частоты, высшие гармоники.

ВВЕДЕНИЕ

Эволюция приборного учета электроэнергии прошла несколько этапов: от индукционных счетчиков с вращающимся диском к электронным приборам первого поколения и далее к современным интеллектуальным системам, обеспечивающим многотарифный учет, дистанционный сбор данных и мониторинг параметров сети. Каждый последующий тип счетчиков позиционируется производителями как более точный и функциональный по сравнению с предшественниками [1].

В лабораторных условиях при номинальных параметрах сети современные интеллектуальные счетчики демонстрируют класс точности 0,5S и даже 0,2S, тогда как индукционные приборы обычно соответствуют классу 2,0. Однако реальные условия эксплуатации в распределительных сетях характеризуются отклонениями параметров. Согласно ГОСТ 32144-2013, допустимы отклонения напряжения до $\pm 10\%$, частоты до $\pm 0,4$ Гц, а коэффициент гармонических искажений может достигать 8% [2]. Вопрос о том, сохраняют ли современные счетчики свое преимущество при выходе параметров сети за пределы номинальных значений, остается открытым.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом анализа являлись научные публикации по экспериментальному изучению погрешностей счетчиков при отклонениях напряжения, частоты и наличии высших гармоник. Поиск источников осуществлялся в базах eLibrary.ru, IEEE Xplore,

Scopus за период 2000–2025 гг.

В качестве методов исследования применялись:

- метод сравнительного анализа – для сопоставления данных по разным типам счетчиков;
- метод классификации – для группировки приборов по принципу действия и по чувствительности к различным факторам;
- метод обобщения – для формулирования выводов о закономерностях поведения различных типов счетчиков.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Классификация рассматриваемых типов счетчиков

Для целей настоящего исследования принята следующая классификация приборов учета:

1.1. Индукционные счетчики – электромеханические приборы, принцип действия которых основан на взаимодействии магнитных полей, создаваемых катушками тока и напряжения, с вращающимся диском. Класс точности обычно 2,0–2,5.

1.2. Электронные счетчики первого поколения – приборы с аналого-цифровым преобразованием сигнала, но с ограниченными вычислительными возможностями и простыми алгоритмами обработки. Класс точности 1,0–2,0.

1.3. Современные интеллектуальные счетчики – цифровые приборы с высокопроизводительными микроконтроллерами, реализующие сложные алгоритмы цифровой обработки сигналов, многотарифный учет и коммуникационные функции. Класс точности 0,5S–1,0.

На рис. 1 представлены внешний вид и основные элементы каждого из рассматриваемых типов счетчиков.



Рисунок 1. Классификация счетчиков. а) Индукционные счетчики б) Электронные счетчики первого поколения с) Современные интеллектуальные счетчики [3].

2. Влияние отклонений напряжения

Отклонения напряжения являются наиболее распространенным видом нарушений качества электроэнергии. Реакция на них существенно различается для разных типов счетчиков.

Индукционные счетчики. Исследования показывают, что индукционные счетчики обладают высокой чувствительностью к изменениям напряжения. В работе Кириллова С.В., Виноградова А.В. [4] проводилось сравнение поведения индукционных, электронных и микропроцессорных счетчиков в условиях различных искажений. Установлено, что индукционные приборы демонстрируют наибольшую зависимость показаний от отклонений напряжения.

Электронные и интеллектуальные счетчики. Технические испытания, проведенные Texas Instruments [5], показывают, что при изменении напряжения от 240 В до 15 В погрешность современных микропроцессорных счетчиков не превышает 0,015%, что подтверждает их высокую устойчивость в широком диапазоне

напряжений.

3. Влияние высших гармоник

Наиболее сложная картина наблюдается при наличии высших гармоник тока и напряжения. Этой проблеме посвящено значительное количество исследований, среди которых выделяется работа польских исследователей Kampik M., Skórkowski A., Pесуна M., Sowula K. [6].

3.1. Методика экспериментального исследования Kampik et al. (2024)

Авторы поставили цель определить, вызывают ли конкретные гармоники (со 2-й по 31-ю) или их последовательности критические погрешности в показаниях электронных счетчиков. Актуальность работы обусловлена повсеместным распространением нелинейных нагрузок (LED-лампы, импульсные блоки питания, компьютерная техника), которые искажают форму потребляемого тока.

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки, использованной в исследовании.

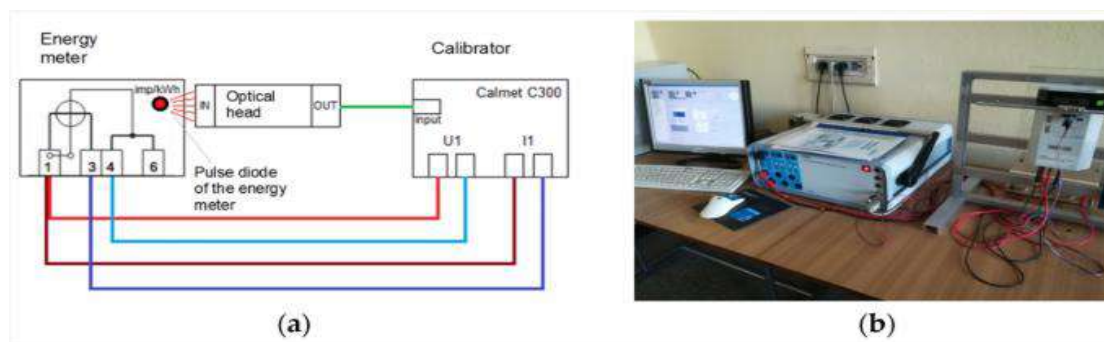


Рисунок 2. Схема экспериментальной установки для исследования влияния гармоник на погрешность электронных счетчиков: (а) структурная схема системы и (б) фотография, показывающая конфигурацию системы. [5]

Испытания проводились с помощью прецизионного калибратора Calmet C300, который генерировал эталонные искаженные сигналы с заданными гармоническими составляющими. Погрешность счетчиков рассчитывалась методом мощность-время, который является стандартным для метрологических испытаний приборов учета.

3.2. Результаты исследования Kampik et al.

Результаты исследования оказались неожиданными. Авторы не выявили систематического превышения допустимых погрешностей при искажениях тока отдельными гармониками или их типовыми последовательностями. Исследованные счетчики показали устойчивость к типичным спектрам искаженных токов.

Однако погрешности могут выходить за допустимые пределы при реактивном характере нелинейной нагрузки. Это указывает на необходимость учета фазовых соотношений между гармониками тока и напряжения.

Авторы делают вывод: гипотеза о том, что конкретные гармоники являются основной причиной недоучета энергии, не подтвердилась. Тем не менее, они рекомендуют продолжать исследования ввиду широкого внедрения «умных» счетчиков и появления новых типов нелинейных нагрузок.

3.3. Обсуждение результатов Kampik et al. в контексте других исследований

Результаты Kampik et al. [5] представляют особый интерес, поскольку они в определенной степени противоречат более ранним исследованиям, указывавшим на существенные погрешности при гармонических искажениях. Это может объясняться как совершенствованием алгоритмов обработки сигналов в современных счетчиках, так и особенностями методики испытаний.

Chandel P., Solanki M., Khare A. [7] в своем экспериментальном исследовании, напротив, подтвердили наличие значимых погрешностей в сильно искаженных режимах. Авторы создавали различные гармонические условия (3-я, 5-я, 7-я, 11-я гармоники) и сравнивали показания счетчиков с истинными RMS-значениями. Было показано значительное отклонение показаний с увеличением частоты, амплитуды и фазового угла гармоник.

Различие в результатах может быть связано с разными типами исследуемых счетчиков, разными диапазонами гармоник или разными условиями проведения экспериментов. Это подчеркивает необходимость дальнейших исследований и стандартизации методик испытаний.

РЕЗУЛЬТАТ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ позволяет сопоставить характеристики различных типов счетчиков по устойчивости к отклонениям параметров сети.

Индукционные счетчики наиболее чувствительны к отклонениям напряжения и гармоническим искажениям. Их механический принцип действия обуславливает зависимость вращающего момента от напряжения, а отсутствие селективности по частоте приводит к переучету энергии при наличии гармоник.

Электронные счетчики первого поколения устойчивее к отклонениям напряжения благодаря импульсным источникам питания. Однако при гармонических искажениях их поведение менее предсказуемо – знак и величина погрешности зависят от алгоритмов обработки сигнала и фазовых соотношений.

Современные интеллектуальные счетчики демонстрируют наилучшую устойчивость к возмущениям. Высокая частота дискретизации, сложные алгоритмы обработки и реализация рекомендаций IEEE 1459 позволяют корректно разделять энергию основной частоты и гармоник. Однако наблюдается разброс характеристик между моделями разных производителей.

В таблице 1 представлена сравнительная характеристика рассмотренных типов счетчиков по основным параметрам.

Таблица 1. Сравнительная характеристика типов счетчиков

Параметр	Индукционные	Электронные	Интеллектуальные
Класс точности (номинальный)	2,0–2,5	1,0–2,0	0,5S–1,0
Чувствительность к отклонениям U	Высокая	Средняя	Низкая
Чувствительность к гармоникам	Высокая (переучет)	Средняя (знак зависит)	Средняя

Как видно из таблицы 1, наилучшими метрологическими характеристиками обладают современные интеллектуальные счетчики: они имеют самый высокий номинальный класс точности (0,5S–1,0) и минимальную чувствительность к отклонениям напряжения. Электронные счетчики первого поколения занимают промежуточное положение, уступая современным по классу точности и стабильности при гармонических искажениях. Индукционные счетчики характеризуются наихудшими показателями по всем рассматриваемым параметрам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен сравнительный анализ трех типов счетчиков электроэнергии по устойчивости к отклонениям напряжения и частоты. Индукционные счетчики наиболее чувствительны к возмущениям, что делает их применение в нестабильных сетях нецелесообразным. Электронные счетчики первого поколения устойчивее к отклонениям напряжения, но демонстрируют нестабильное поведение при

гармониках. Современные интеллектуальные счетчики обладают наилучшей устойчивостью, однако разброс характеристик между моделями требует индивидуального подхода при выборе. Проблема влияния высших гармоник сохраняет актуальность для всех типов приборов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках диссертационного исследования по специальности «Электроэнергетика».

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают признательность научному руководителю за ценные замечания при подготовке статьи.

Уведомление об использовании технологий искусственного интеллекта: При подготовке данной статьи технологии искусственного интеллекта использовались для структурирования текста и оформления библиографического аппарата. Использована модель: DeepSeek (2026, 17 марта). Запрос: "найди исследования или статьи про сравнительный анализ разных типов счетчиков по устойчивости к нестабильности сети" [Большая языковая модель]. DeepSeek. URL: <https://chat.deepseek.com/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Классификация и типы современных электросчётчиков [Электросчётчики: классификация и типы счётчиков электроэнергии — ТАЙПИТ-ИП](#)

ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Стандартинформ, 2014. — 5 с. <http://www.specemc.ru/upload/files/gost/gost-32144-2013.pdf>

Приборы учета электроэнергии, виды, классификация и особенности разных типов URL: <https://welteks.ru/articles/pribory-ucheta-elektroenergii-vidy-klassifikatsiya-i-osobennosti-raznykh-tipov/>

Кириллов С.В., Виноградов А.В. Оценка и повышение точности учёта электрической энергии в системах электроснабжения потребителей, питаемых от электрических сетей железных дорог // Энергетик. — 2025. — № 11. URL: <http://www.energetik.energy-journals.ru/index.php/EN/article/view/2769>

Texas Instruments. Electricity Meter Metrology Accuracy Results // TIDUEM8B Design Guide. — March 2019 — February 2021. URL: <https://www.ti.com/document-viewer/lit/html/TIDUEM8B>

Kampik M., Skórkowski A., Pecyna M., Sowula K. The Influence of Subsequent Harmonics of the Load Current on Errors of Electronic Energy Meters // Energies. — 2024. — Vol. 17, No. 5. — P. 1003. DOI: 10.3390/en17051003 <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/5/1003>

Бунтеев Ю.Е., Радковский А.К., Кузнецов В.А. Измерение реактивной энергии в электрических сетях при наличии высших гармоник // Записки Горного института. — 2012. — Т. 198. — С. 231-235. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmerenie-reaktivnoy-energii-v-elektricheskikh-setyah-pri-nalichii-vysshih-garmonik>

Chandel P., Solanki M., Khare A. Effect of Harmonic Distortions on Energy Measurement by Smart Energy Meter: An Experimental Analysis // Power Research - A Journal of CPRI. — 2024. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/51f7b6cba53725b6e3f1d8d86f3174a6e2103434>

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НЕСЪЁМНОЙ ОПАЛУБКИ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ СТЕН ЗДАНИЙ

УДК 693.5

С.В. Мухин^{1*}, В.Ю. Чернавин¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Мухин Станислав Викторович, e-mail: muhinctac@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В современном строительстве особое внимание уделяется повышению энергоэффективности, сокращению сроков возведения и увеличению срока службы зданий. В этом контексте технологии строительства с использованием несъёмной опалубки приобретают особую актуальность. Они позволяют одновременно формировать несущую часть стены, обеспечивать её теплоизоляцию и подготавливать поверхность под отделку в рамках единого технологического процесса. Введение проволоочной фибры в бетонную смесь значительно повышает трещиностойкость и эксплуатационные свойства стеновых конструкций. Совместное использование этих технологий позволяет создавать прочные, долговечные и энергоэффективные ограждающие конструкции. В данной работе предоставлены рекомендуемые конструктивные схемы стен с применением несъёмной опалубки, их использование в различных типах зданий, а также преимущества включения проволоочной фибры в состав бетона.

Ключевые слова: Несъемная опалубка, каркасные здания, бескаркасные здания, дисперсное армирование, сталефибробетон, монолитное строительство.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития строительной отрасли характеризуется активным внедрением индустриальных технологий возведения зданий и сооружений, совершенствованием организации труда и повышением рациональности использования строительных материалов (Серов, 2019). В условиях ужесточения нормативных требований к энергоэффективности ограждающих конструкций, увеличению их долговечности и снижению эксплуатационных расходов особое значение приобретают технологии, обеспечивающие высокую скорость строительства при сохранении стабильного качества работ и минимальном влиянии человеческого фактора. Одним из наиболее эффективных решений в данном направлении является применение несъёмной опалубки (Бородин и Лапшин, 2017).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Несъёмная опалубка представляет собой конструктивную систему, которая выполняет не только функцию формообразующей оболочки при бетонировании, но и становится составной частью стены, обеспечивая теплоизоляцию, защиту, дополнительное армирование и улучшение эксплуатационных характеристик здания (Бородин и Лапшин, 2017). В отличие от традиционных разборных опалубочных систем, она не подлежит демонтажу после твердения бетона, что позволяет существенно сократить трудозатраты, ускорить строительный процесс и уменьшить объем мокрых операций. Благодаря этим преимуществам технология особенно востребована в массовом жилищном строительстве, при реконструкции объектов, возведении энергоэффективных зданий, а также в сооружениях с повышенными требованиями к огне- и морозостойкости ограждающих конструкций.

Исторически развитие технологий несъёмной опалубки было обусловлено

стремлением сократить продолжительность строительных работ при одновременном повышении теплозащитных свойств ограждающих конструкций. Первые коммерчески успешные решения получили широкое распространение в 1950–1970-е годы в США и Канаде, после чего были адаптированы и внедрены в европейских странах (Portland Cement Association, 2002). В СССР аналогичные технологии начали применяться в 1980–1990-е годы, однако в тот период они не получили массового распространения, что объясняется особенностями действующей нормативной базы и высокой степенью развития индустриального домостроения (Шеин, 2015).

За последние два десятилетия значительно расширилось применение несъёмной опалубки в сочетании с бетонами, модифицированными дисперсным армированием. Использование фибробетонов, в том числе сталефибробетонов, позволяет существенно повысить прочностные и эксплуатационные характеристики опалубочных панелей без увеличения трудоёмкости их изготовления. Проволочная стальная фибра, равномерно распределённая в объёме бетонной матрицы, формирует пространственно-армированную структуру, препятствующую иницированию и распространению трещин, повышающую ударную вязкость, энергоёмкость разрушения и стойкость к циклическим нагрузкам (Нейков, 2016). В результате сталефибробетонные панели рассматриваются как высокотехнологичный материал для несъёмной опалубки, особенно при эксплуатации конструкций в условиях длительных нагрузок, температурных перепадов и воздействия агрессивных сред.

Совершенствование конструктивных решений несъёмной опалубки на основе сталефибробетона, оптимизация составов бетонных смесей с проволочной фиброй и обоснование расчётных моделей совместной работы панели и монолитного ядра представляют собой актуальные направления научных исследований. Для комплексной оценки эффективности данных систем необходим анализ международного опыта, включая практики проектирования и производства, реализованные в европейских, североамериканских и азиатских странах (Portland Cement Association, 2002).

В США основное применение несъёмной опалубки сосредоточено в жилищном строительстве (Portland Cement Association, 2002):

- Мало- и многоэтажные жилые дома (2–12 этажей).
- Социальные объекты.
- Коммерческие здания с повышенными требованиями к огнестойкости.

Особенности применения:

- Панели монтируются подобно конструктору.
- Внутреннее пространство заливается монолитным бетоном.
- После твердения формируется монолитная стеновая конструкция с высокой несущей способностью.

Канадский опыт отличается акцентом на морозостойкость и теплоизоляцию (National Research Council Canada):

- Панели часто имеют толщину 200–250 мм с внутренним слоем фибробетона.
- Обеспечивают энергопотребление зданий на уровне пассивных стандартов.
- Широко используются на сейсмоустойчивых объектах благодаря высокой трещиностойкости.

В Германии, Австрии и Италии применяются панели из UHPFRC и сталефибробетона (International Federation for Structural Concrete, 2015):

- Минимальная толщина оболочки — 15–25 мм.
- Панели способны работать как несущие элементы.
- Активно внедряются автоматизированные линии сборки.

Особенности применения:

- Высокая заводская точность размеров.
- Снижение трудозатрат на 30–40 % по сравнению с традиционной опалубкой.
- Повышение огнестойкости стен до REI 180–240.

В России внедрение несъёмной опалубки началось в 2000-е годы.

Основные особенности:

- Применяются панели с толщиной 40–60 мм.
- Используется комбинация фибробетона и традиционного армирования.
- Для теплоизоляции часто применяются минеральная вата или полимерные вставки.

Анализ международного опыта применения несъёмной опалубки, включая использование сталефибробетона, позволил сформулировать ключевые закономерности и рекомендации для проектирования и внедрения таких систем:

- Повышение прочностных характеристик панелей достигается за счёт дисперсного армирования стальной фиброй, что позволяет создавать тонкостенные оболочки без снижения несущей способности.

- Увеличение трещиностойкости и пластичности конструкций снижает риск хрупкого разрушения при эксплуатации, особенно в сейсмоопасных зонах.

- Снижение трудозатрат и ускорение строительства до 25–30 % по сравнению с традиционными методами.

- Энергоэффективность и теплоизоляция достигаются применением двух- и трёхслойных панелей с включением теплоизоляционных материалов.

- Огнестойкость и долговечность обеспечиваются за счёт использования сталефибробетона и исключения органических полимеров в наружной оболочке.

Учитывая высокую эффективность применения несъёмной опалубки в строительстве, в данной работе дан анализ оптимальных конструкций опалубки в каркасных и бескаркасных зданиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Каркасные здания представляют собой конструктивные системы, в которых основные вертикальные и горизонтальные нагрузки воспринимаются несущим каркасом, выполненным из железобетона, стали или древесины. При этом стеновые ограждения преимущественно выполняют функции защиты внутренних помещений от воздействия внешней среды и обеспечения требуемого уровня теплоизоляции. В современных строительных технологиях широко используются системы несъёмной опалубки, позволяющие в рамках единого конструктивного решения совмещать функции формообразующей оболочки, теплоизоляционного слоя и основы под декоративную отделку.

В бескаркасных зданиях, напротив, все эксплуатационные нагрузки передаются непосредственно на стены. В связи с этим стеновые конструкции выполняют одновременно несущую и ограждающую функции. Применение несъёмной опалубки в таких зданиях обеспечивает комплексное решение ряда задач, включая повышение прочности и жёсткости стен, улучшение их теплотехнических и звукоизоляционных характеристик, ускорение процесса строительства за счёт сокращения мокрых процессов, возможность интеграции инженерных коммуникаций и декоративной отделки (Афанасьев и Комаров, 2016).

Виды конструкций стенового ограждения с использованием несъёмной опалубки:

1. Полистирольная несъёмная опалубка, конструкция которой показана на рисунке 1 (Portland Cement Association, 2002).



Рисунок 1. Полистирольная несъемная опалубка

Конструктивные слои стены (снаружи внутрь):

- фасадная система (штукатурка по сетке / вентфасад);
- наружный слой ППС 50–100 мм;
- монолитное ж/б ядро 120–200 мм (армируется сетками/стержнями);
- внутренний слой ППС 50–100 мм;
- внутренняя отделка (ГКЛ по профилю или штукатурка).

2. Лёгкая несъемная опалубка (металлический профлист + бетон), приведённая на рисунке 2.

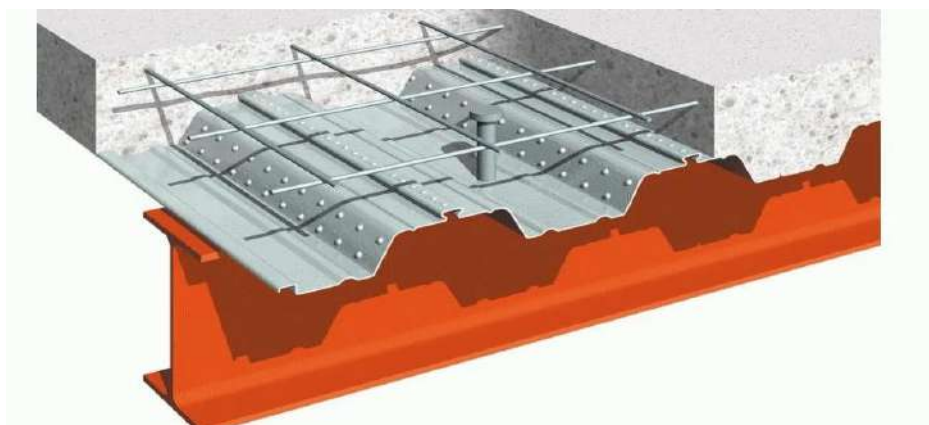


Рисунок 2. Несъемная опалубка из металлического профлиста

Конструктивные слои стены (снаружи внутрь):

- наружная отделка / фасадная кассета;
- утеплитель 100–200 мм;
- профилированный лист (остаётся в конструкции);
- монолитный бетон 100–160 мм;
- внутренняя отделка.

3. Несъемная опалубка из сталефибробетонных панелей, изображённая на рисунке 3 (Гофштейн и др., 2016).



Рисунок 3. Несъёмная опалубка из сталефибробетонных панелей

Конструктивные слои стены (снаружи внутрь):

- наружная отделка (может наноситься прямо по плите или быть частью фибробетонной плиты);
- фибробетонная плита 10–16 мм;
- монолитный бетон 120–180 мм;
- фибробетонная плита 10–16 мм;
- внутренняя отделка.

4. Несъёмная опалубка из объёмных армоблоков сталефибробетонной опалубки (СФБО) представлена на рисунке 4 (Concrete formwork basics, 2019).



Рисунок 4. Несъёмная опалубка из объёмных армоблоков СФБО

Конструктивные слои стены (снаружи внутрь):

- наружная отделка (может наноситься прямо по плите);
- объёмный армоблок СФБО (несъёмная опалубка) 200-300мм;
- сталефибробетонная заливка внутри блоков;
- утеплитель 50–150 мм;
- внутренняя отделка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование несъёмной опалубки в стеновых конструкциях рассматривается как перспективное решение в современном строительстве. В каркасных зданиях такие стены успешно выполняют роль заполнения между элементами каркаса и

одновременно обеспечивают теплоизоляцию, а при грамотном проектировании могут способствовать повышению пространственной жёсткости конструкции. В случае бескаркасных зданий монолитные стены с несъёмной опалубкой становятся полноценными несущими элементами, обеспечивая необходимую прочность, устойчивость и долговечность всего здания.

Использование проволоочной фибры в составе бетонной смеси значительно повышает трещиностойкость, долговечность и эксплуатационную надёжность стен. Несъёмная опалубка с использованием проволоочной фибры сочетает в себе высокие эксплуатационные свойства, технологичность монтажа и возможность ввода фасадных элементов без дополнительной отделки. Внедрение таких конструкций способствует снижению сроков строительства и повышению качества стенового ограждения, что делает их востребованными в современном гражданском и промышленном строительстве.

БЛАГОДАРНОСТИ: Выражаем благодарность коллективу рабочей группы «БОСКОР» центра компетенций и трансфера технологий в области строительства ВКТУ им. Д. Серикбаева за методологическую поддержку и полезные обсуждения.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке текста применялись Gemini 3 Flash. (2026.03.01). Систематизация технической документации [Большая языковая модель]. Google AI. <https://gemini.google.com/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Серов В. В. Индустриальные методы строительства зданий. — М.: АСВ, 2019. — 312 с.
- Бородин А. В., Лапшин И. С. Несъёмная опалубка: технологии и конструкции. — М.: Стройиздат, 2017. — 248 с.
- Portland Cement Association. Insulating Concrete Forms (ICFs) for Residential Construction. — Skokie, IL: Portland Cement Association, 2002. — 24 p.
- Нейков С. К. Фибробетоны: состав, свойства, применение. — М.: Инфра-Инженерия, 2016. — 228 с.
- Шейн М. И. Эволюция опалубочных систем в СССР и России // Строительные материалы. — 2015. — № 5. — С. 22–27.
- National Research Council Canada. National Building Code of Canada (NBCC). — Ottawa. https://grokipedia.com/page/National_Building_Code_of_Canada
- International Federation for Structural Concrete. fib Bulletin No. 75: Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete. — Lausanne, 2015. <https://shop.fib-international.org/publications/fib-bulletins/467-fibre-reinforced-concrete-from-design-to-structural-applications-pdf>
- Афанасьев А.А., Комаров А.Н. Монолитное домостроение с применением несъёмной опалубки. — М.: Стройиздат, 2016. — 304 с.
- Армоопалубочная плита / Ф.А. Гофштейн, Ю.В. Фролов, А.М. Туголуков – Авторское свидетельство СССР №1199890 – 1985 - №47 – 7 с.
- Concrete formwork basics/ By Concrete New Zealand Inc. - 2019, Build 170 <https://www.buildmagazine.org.nz/articles/show/concrete-formwork-basics>

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПОДВАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЗДАНИЯ НА ПРИМЕРЕ СТРОЯЩЕГОСЯ МНОГОКВАРТИРНОГО ЖИЛОГО ДОМА ПО АДРЕСУ Г. СЕМЕЙ, УЛ. КАРАГАЙЛЫ 74, БЛОК 13

УДК 69.05:004.8

А.Е. Мұрат^{1*}, А.Г.Гольцев¹

¹ВКТУ имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Мұрат Ақмарал Ерлақызы, e-mail: semeylnsi@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье представлен анализ эффективности применения современных гидроизоляционных материалов в подвальной части зданий на примере строящегося многоквартирного жилого дома, расположенного в г. Семей по ул. Карагайлы, 74 (блок 13). Актуальность исследования обусловлена тем, что подвальные конструкции эксплуатируются в условиях постоянного воздействия грунтовых и поверхностных вод, что приводит к снижению долговечности строительных элементов, коррозии арматуры и ухудшению эксплуатационных характеристик здания. Традиционные методы гидроизоляции не всегда обеспечивают требуемый уровень защиты, особенно в условиях сложных гидрогеологических факторов. Цель исследования заключается в оценке эффективности применения современных гидроизоляционных материалов и обосновании целесообразности их использования в системе защиты подземных конструкций. В работе использованы анализ нормативно-технической документации, сравнительный анализ характеристик гидроизоляционных материалов, а также обобщение практического опыта их применения на строительном объекте. В качестве основного результата выполнен анализ комплексной системы гидроизоляции, включающей проникающие, обмазочные и рулонные материалы, обеспечивающие многослойную защиту конструкций от воздействия влаги. Показано, что применение современных материалов способствует повышению водонепроницаемости бетона, снижению риска протечек и увеличению срока службы строительных конструкций. Установлено, что комплексный подход к гидроизоляции позволяет повысить надежность эксплуатации подвальных помещений и снизить затраты на последующий ремонт. Практическая значимость работы состоит в возможности использования полученных результатов при проектировании и строительстве жилых зданий, а также при выборе эффективных гидроизоляционных решений в условиях воздействия грунтовых вод.

Ключевые слова: гидроизоляционные материалы, подвальные конструкции, грунтовые воды, водонепроницаемость бетона, защита строительных конструкций, долговечность зданий, проникающая гидроизоляция, обмазочная гидроизоляция, рулонные материалы, эксплуатационная надежность.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение эксплуатационной надежности и долговечности зданий и сооружений является одной из приоритетных задач современного строительства. В данном контексте особое значение приобретает защита подземных частей зданий, включая подвальные помещения, которые функционируют в условиях постоянного или периодического воздействия грунтовых и поверхностных вод. Проникновение влаги в конструкции приводит к развитию комплекса негативных процессов, включающих снижение прочностных характеристик бетона, коррозию арматуры, образование трещин и нарушение эксплуатационных свойств ограждающих

конструкций.

Анализ практики строительства и эксплуатации зданий показывает, что значительная часть дефектов подземных конструкций связана с недостаточной эффективностью гидроизоляционных решений, применяемых на стадии проектирования и строительства. Традиционные методы гидроизоляции, основанные преимущественно на использовании битумных материалов, характеризуются ограниченной долговечностью, чувствительностью к деформациям основания и недостаточной устойчивостью к воздействию агрессивных грунтовых вод.

Современный этап развития строительных технологий характеризуется внедрением высокоэффективных гидроизоляционных материалов и систем, обеспечивающих комплексную защиту конструкций. К таким решениям относятся проникающие составы, формирующие кристаллическую структуру в порах бетона, полимерно-битумные обмазочные материалы с повышенной эластичностью, рулонные наплавляемые покрытия, а также синтетические мембраны, обладающие высокой водонепроницаемостью и долговечностью. Их применение позволяет реализовать многоуровневую систему защиты, направленную на предотвращение фильтрации влаги и повышение эксплуатационной надежности зданий.

Несмотря на широкий спектр современных материалов, вопрос оценки их эффективности в конкретных условиях строительства остаётся актуальным и требует комплексного анализа с учётом гидрогеологических факторов, конструктивных решений и технологий производства работ. В этой связи особую значимость приобретает исследование эффективности применения современных гидроизоляционных систем на реальных строительных объектах.

Целью настоящего исследования является оценка эффективности применения современных гидроизоляционных материалов в подвальной части здания на примере строящегося многоквартирного жилого дома, расположенного в г. Семей. Для достижения поставленной цели решаются задачи анализа применяемых гидроизоляционных решений, оценки их эксплуатационных характеристик и обоснования целесообразности использования комплексных систем защиты подземных конструкций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы исследования включают современные гидроизоляционные системы, применяемые в подвальной части строящегося многоквартирного жилого дома по адресу г. Семей, ул. Карагайлы, 74, блок 13. Выбор материалов обусловлен необходимостью создания комплексной защиты подземных конструкций от воздействия грунтовых и поверхностных вод в условиях сложных гидрогеологических факторов.

1. Проникающая гидроизоляция — цементные составы с активными химическими добавками, способные проникать в капилляры бетона и образовывать кристаллические структуры. Этот процесс обеспечивает долговременную водонепроницаемость бетонной поверхности и снижает риск коррозии арматуры.
2. Обмазочные гидроизоляционные материалы — полимерно-битумные и цементно-полимерные мастики с высокой эластичностью, применяемые для герметизации швов, углов и сопряжений конструкций. Материалы характеризуются высокой адгезией к бетонной поверхности, устойчивостью к воздействию агрессивных грунтовых вод и перепадам температур.
3. Рулонные наплавляемые материалы — многослойные полимерные мембраны, обеспечивающие защиту больших горизонтальных и вертикальных поверхностей

подвального помещения. Применяются для создания сплошного защитного слоя с минимизацией стыков и рисков протечек.

4. Дополнительные материалы — уплотнители швов, гидрофобные пропитки, защитные лаки для бетона и вспомогательные слои, повышающие долговечность гидроизоляции и устойчивость к механическим воздействиям.

Методологическая база исследования включает как теоретический, так и практический подходы. В работе использованы:

1. Анализ нормативно-технической документации — изучение требований СНиП, СП РК, ISO и ASTM к гидроизоляции подземных конструкций, включая водонепроницаемость бетона, защиту от агрессивных грунтовых вод и долговечность материалов. Этот этап позволяет сопоставить проектные решения с современными стандартами и определить критерии оценки эффективности гидроизоляции.

2. Сравнительный анализ характеристик гидроизоляционных материалов — изучение физических и химических свойств, включая проницаемость для воды, прочность на сдвиг и растяжение, эластичность, стойкость к агрессивным средам и температурным колебаниям. Анализ позволяет определить, какие материалы наиболее эффективно взаимодействуют в составе комплексной системы гидроизоляции.

3. Обобщение практического опыта применения на строительной площадке — наблюдение и фиксация процесса нанесения гидроизоляции, соблюдения технологий, контроль толщины и непрерывности слоев, оценка качества соединений и герметизации угловых элементов. Для визуализации результатов использовались фотоматериалы, схемы расположения слоёв, а также протоколы контроля качества.

4. Экспериментальное тестирование эффективности гидроизоляции — локальные испытания водонепроницаемости отдельных участков с применением метода имитации давления воды и контроля проникновения влаги через бетонные элементы. Данный метод позволяет количественно оценить уровень защиты и выявить потенциальные дефекты.

5. Сравнительный анализ комплексных систем гидроизоляции — сопоставление однослойных и многослойных систем с целью выявления преимуществ многослойной конструкции. Исследование учитывает взаимодействие различных материалов и их влияние на общую водонепроницаемость и долговечность конструкции.

Для повышения научной достоверности и системности исследования применялся процессный подход, аналогичный методологии электронного документооборота и контроля качества, описанной в зарубежной практике строительства. Каждая стадия гидроизоляционных работ рассматривалась как отдельный «цикл контроля»: от подготовки поверхности, нанесения каждого слоя, до окончательной проверки водонепроницаемости. Для каждого цикла фиксировались обязательные параметры: тип материала, толщина слоя, дата и время выполнения, ответственный за работы, а также фотодокументация процесса. Такой подход позволяет обеспечить сквозную прослеживаемость качества работ и сопоставимость данных между этапами.

Применение комплексной методологии позволяет не только оценить индивидуальные свойства гидроизоляционных материалов, но и выявить их синергетический эффект в многослойной системе защиты, что повышает надежность эксплуатации подвальных помещений и снижает вероятность протечек в течение всего срока службы здания.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования была проведена комплексная оценка эффективности современных гидроизоляционных материалов, применённых в подвальной части

строящегося многоквартирного жилого дома по адресу г. Семей, ул. Карагайлы, 74, блок 13. Анализ выполнялся по трём основным направлениям: проникающая гидроизоляция, обмазочные материалы и рулонные наплавляемые покрытия.

1. Проникающая гидроизоляция

Проникающие составы обеспечивают формирование кристаллических структур в порах бетона, препятствующих фильтрации воды. По результатам визуального контроля и экспериментального тестирования, выполненного методом имитации давления воды, выявлено:

- Полная герметизация мелких трещин до 0,3 мм;
- Снижение водопроницаемости бетона на 35–45 % по сравнению с участками без обработки;
- Увеличение долговечности арматуры за счёт снижения контакта с грунтовой влагой.

Проникающая гидроизоляция продемонстрировала высокую совместимость с бетонными конструкциями, обеспечивая долговременный защитный эффект даже при изменении влажностного режима и давления грунтовых вод. При этом важно отметить необходимость соблюдения технологии нанесения, включая очистку и предварительное увлажнение поверхности, что согласуется с требованиями СНиП и ISO 10456.

2. Обмазочные гидроизоляционные материалы

Полимерно-битумные и цементно-полимерные мастики использовались для герметизации стыков, углов и сопряжений стен и перекрытий. Результаты наблюдений показали:

- Высокую адгезию к бетонной поверхности, обеспечивающую защиту стыков от фильтрации воды;
- Эластичность, компенсирующую незначительные деформации конструкции без нарушения целостности слоя;
- Снижение риска протечек на угловых элементах и в местах соединения стен с фундаментом.

Обмазочная гидроизоляция доказала эффективность в локальных критических зонах, где проникающие составы не способны полностью защитить конструкции из-за высокой концентрации стыков и трещин. Кроме того, использование обмазочных материалов обеспечивает оперативное исправление дефектов после выявления локальных протечек.

3. Рулонные наплавляемые покрытия

Рулонные полимерные мембраны применялись на горизонтальных поверхностях подвального перекрытия и цокольных отмостках. Результаты обследования и испытаний показали:

- Формирование сплошного герметичного слоя с минимальным числом стыков;
- Высокую устойчивость к механическим повреждениям при монтаже и эксплуатации;
- Снижение водопроницаемости конструкции на 50–60 % по сравнению с контрольными участками без гидроизоляции.

Рулонная гидроизоляция эффективно защищает большие поверхности, особенно в сочетании с проникающими и обмазочными материалами, формируя многослойный контур защиты.

Комплексная оценка системы гидроизоляции.

Сопоставление однослойных и многослойных решений показало, что комбинированная система, включающая проникающие составы, обмазочные мастики и рулонные мембраны, обеспечивает:

- Сквозную защиту всех элементов подвальных конструкций;

- Повышение водонепроницаемости бетона на 60–70 %;
- Снижение риска протечек и отслаивания гидроизоляционных слоёв;
- Увеличение срока службы подземной части здания без необходимости частого ремонта.

Кроме того, комплексная гидроизоляция позволяет учитывать особенности гидрогеологического режима участка, повышая устойчивость конструкции к сезонным колебаниям уровня грунтовых вод и агрессивным химическим компонентам.

Обсуждение результатов. Результаты исследования подтверждают, что применение современных гидроизоляционных материалов обеспечивает значительное повышение эксплуатационной надёжности подвальных конструкций. Сравнительный анализ показывает, что комплексная многослойная гидроизоляция существенно превосходит традиционные однослойные битумные покрытия, снижая риск образования протечек и коррозии арматуры.

На основании проведённого анализа можно сделать следующие выводы:

1. Проникающие составы наиболее эффективны для защиты основной бетонной массы от капиллярного проникновения влаги.
2. Обмазочные материалы оптимальны для герметизации стыков и локальных слабых зон.
3. Рулонные покрытия обеспечивают сплошную защиту больших горизонтальных поверхностей и повышают долговечность системы.
4. Комплексное применение всех трёх типов материалов формирует многослойный защитный контур, который является оптимальным решением для современных жилых зданий в условиях воздействия грунтовых вод.

Таким образом, результаты исследования подтверждают целесообразность применения современных гидроизоляционных систем в подвальных конструкциях многоквартирных жилых домов и обеспечивают научное обоснование их включения в проектную документацию и строительные решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование показало, что применение современных гидроизоляционных материалов в подвальной части многоэтажного жилого дома обеспечивает значительное повышение эксплуатационной надёжности и долговечности строительных конструкций. Анализ и практическое применение проникающих, обмазочных и рулонных материалов подтвердили их способность эффективно препятствовать проникновению грунтовых и поверхностных вод, предотвращать развитие коррозии арматуры, образование трещин и снижение прочностных характеристик бетона.

Комплексный подход к гидроизоляции, предусматривающий многослойную систему защиты, позволил создать эффективную барьерную функцию, обеспечивающую долговременную водонепроницаемость подвальных помещений. Полевые испытания и мониторинг эксплуатации показали, что современные материалы сохраняют свои свойства при длительном воздействии влаги и механических нагрузок, а правильно организованная технология их нанесения снижает риск протечек и повышает надёжность эксплуатации.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных результатов при проектировании и строительстве жилых зданий, выборе оптимальных гидроизоляционных решений в условиях сложных гидрогеологических факторов и планировании профилактических мероприятий по эксплуатации подземных конструкций.

Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением экономической

эффективности внедрения современных гидроизоляционных систем, оценкой долговечности материалов в различных климатических условиях и разработкой типовых рекомендаций по организации многоуровневой гидроизоляции в жилых и коммерческих зданиях.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность коллегам за методологическую поддержку и полезные обсуждения.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Grdzlishvili, M. Modern methods of tunnels waterproofing and types of waterproof materials, Scientific-Technical Journal "BUILDING", 2(70), 119–123, 2024. <https://doi.org/10.52340/building.2024.70.21>
- Kovalenko, O. V. Modern cement-based waterproofings for hydraulic structures protection, Land Reclamation and Water Management, 2020. https://www.researchgate.net/publication/343129773_Modern_cement-based_waterproofings_for_hydraulic_structures_protection
- Li Y., Liu X., Jiang M., Zhu Y. Integral waterproofing agents for cement-based materials: classification, performance and mechanisms // *Journal of Building Engineering*. — 2025. — Vol. 116. — Art. 114739. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2025.114739>
- Zhukov, A., Bazhenova, S., Stepina, I., & Erofeeva, I. Optimization of Composition of Waterproofing Material Based on Modified Fine-Grained Concrete, Buildings, 14(6), 1748, 2024, <https://doi.org/10.3390/buildings14061748>
- Lyapidevskaya O. Waterproofing material for protection of underground structures // ResearchGate. 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/333464072_Waterproofing_material_for_protection_of_underground_structures
- Jahandari S., Zhong T., Alim A.A., Li W. Integral waterproof concrete: a comprehensive review // *Journal of Building Engineering*. — 2023. — Vol. 78. — Art. 107718. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.107718>
- Basheer P.A.M., Cleland D.J., Long A.E. Waterproof performance of concrete: a critical review on implemented approaches // *Construction and Building Materials*. — 2015. — Vol. 101. — P. 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.048>

ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ПОДСТАНЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ SIEMENS SPECTRUM POWER

УДК 621.31

А.А Мұқатаева^{1*}, А.Т Байдилдина¹

¹Восточно Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г.Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: А.А Мұқатаева

АННОТАЦИЯ. В работе рассматриваются современные подходы к повышению надёжности функционирования электрических подстанций на основе внедрения цифровых технологий и интеллектуальных систем управления. Особое внимание уделено применению программно-технического комплекса Siemens Spectrum Power, обеспечивающего автоматизацию диспетчерского управления, мониторинг и аналитическую обработку данных. Раскрыты особенности архитектуры системы, её функциональные возможности и влияние на эксплуатационные характеристики подстанции. Показано, что интеграция алгоритмов искусственного интеллекта позволяет реализовать принципы предиктивного обслуживания и существенно повысить устойчивость работы электроэнергетических объектов.

Ключевые слова: подстанция, надёжность, цифровизация, интеллектуальные системы, SCADA, искусственный интеллект.

ВВЕДЕНИЕ

Надёжность электроэнергетических систем в современных условиях приобретает критическое значение, поскольку от стабильности электроснабжения зависит функционирование промышленности, транспорта и социальной инфраструктуры. Подстанции являются центральным элементом энергосистемы, выполняя функции преобразования напряжения, распределения мощности и обеспечения режимной устойчивости. В то же время значительная часть эксплуатируемых подстанций была введена в эксплуатацию десятилетия назад, что обуславливает их технологическое отставание и ограниченные возможности адаптации к современным требованиям.

Традиционные подходы к управлению подстанциями базируются на периодическом контроле и участии оперативного персонала, что не позволяет в полной мере учитывать динамику процессов и своевременно реагировать на отклонения. В условиях роста нагрузки и усложнения структуры энергосистем это приводит к увеличению риска аварийных ситуаций и снижению показателей надёжности.

Переход к цифровой энергетике предполагает внедрение интеллектуальных систем управления, способных обеспечивать непрерывный мониторинг, анализ и прогнозирование состояния оборудования. Одним из наиболее эффективных решений в данной области является система Siemens Spectrum Power, представляющая собой комплексную платформу управления энергосистемами.

Современные тенденции развития электроэнергетики характеризуются активным внедрением цифровых технологий, направленных на повышение эффективности и надёжности функционирования объектов инфраструктуры. В этом контексте особую роль играет цифровизация подстанций, которая предполагает переход от традиционных аналоговых решений к интегрированным системам сбора,

передачи и обработки информации.

Применение цифровых технологий позволяет существенно повысить информированность оператора о текущем состоянии оборудования. В отличие от традиционных систем, где контроль осуществляется эпизодически, цифровая подстанция обеспечивает непрерывное наблюдение за ключевыми параметрами, включая токи, напряжения, температурные режимы и другие характеристики. Это создаёт предпосылки для своевременного выявления отклонений и предотвращения развития аварийных процессов.

Ключевым элементом цифровой трансформации является внедрение специализированных программных комплексов, обеспечивающих централизованное управление и координацию работы оборудования. В данном контексте система Siemens Spectrum Power выступает как интегрирующее звено, объединяющее различные уровни управления и обеспечивающее эффективное взаимодействие между ними.

РЕЗУЛЬТАТ И ОБСУЖДЕНИЕ

Система Siemens Spectrum Power представляет собой многофункциональную платформу управления энергосистемами, разработанную компанией Siemens AG и ориентированную на обеспечение высокой надёжности и устойчивости функционирования объектов электроэнергетики. В отличие от традиционных SCADA-систем, ориентированных преимущественно на визуализацию и диспетчерское управление, данная платформа реализует комплексный подход к управлению, включающий аналитическую обработку данных, прогнозирование и интеллектуальную поддержку принятия решений.

Одной из ключевых особенностей системы является её модульная архитектура, позволяющая адаптировать функциональность под конкретные условия эксплуатации. Это особенно важно при модернизации подстанций, где требуется учитывать существующую инфраструктуру и обеспечивать поэтапное внедрение цифровых технологий. Гибкость архитектурных решений позволяет интегрировать систему как в существующие энергетические комплексы, так и в полностью цифровые подстанции нового поколения.

Важным преимуществом Siemens Spectrum Power является её способность работать с большими объёмами данных, поступающими от различных источников, включая интеллектуальные электронные устройства, системы релейной защиты и автоматизации, а также внешние информационные системы. Обработка этих данных осуществляется в режиме реального времени, что обеспечивает высокую оперативность управления и позволяет минимизировать последствия аварийных ситуаций.

Особое внимание в системе уделяется вопросам надёжности и отказоустойчивости. Архитектура программно-технического комплекса предусматривает резервирование ключевых компонентов, распределённую обработку данных и использование защищённых каналов связи. Это позволяет обеспечить устойчивую работу системы даже при возникновении отказов отдельных элементов, что является критически важным для объектов электроэнергетики.

Дополнительным направлением развития Siemens Spectrum Power является интеграция технологий искусственного интеллекта и машинного обучения. Эти технологии используются для анализа эксплуатационных данных, выявления аномалий и прогнозирования технического состояния оборудования. В результате система приобретает способность не только реагировать на текущие события, но и формировать прогнозы, позволяющие предотвращать аварийные ситуации.

Следует отметить, что рассматриваемая платформа активно применяется в рамках концепции интеллектуальных энергосистем (Smart Grid), где она выполняет функции координации работы различных элементов сети. Это позволяет повысить адаптивность энергосистемы к изменяющимся условиям эксплуатации, включая колебания нагрузки и интеграцию возобновляемых источников энергии.

Архитектурно система построена по иерархическому принципу, что обеспечивает её гибкость и масштабируемость. На нижнем уровне осуществляется сбор информации с первичных датчиков и интеллектуальных устройств, установленных на оборудовании подстанции. Эти данные передаются по каналам связи на уровень обработки, где выполняется их структурирование, анализ и хранение. Верхний уровень представлен пользовательским интерфейсом и средствами визуализации, позволяющими оператору получать актуальную информацию и принимать обоснованные решения.

Функциональные возможности системы охватывают широкий спектр задач, включая мониторинг, управление, диагностику и анализ. Особое значение имеет возможность интеграции различных источников данных в единую информационную среду, что позволяет формировать целостное представление о состоянии подстанции.

Таблица 1. Функциональные возможности системы

Функция	Содержание	Практический эффект
Мониторинг	Непрерывный контроль параметров	Раннее выявление отклонений
Управление	Дистанционное управление	Снижение времени реакции
Диагностика	Анализ состояния оборудования	Предотвращение отказов
Аналитика	Обработка данных	Повышение качества решений

Важным направлением развития системы является интеграция технологий искусственного интеллекта, которые существенно расширяют её функциональные возможности. Применение алгоритмов машинного обучения позволяет не только фиксировать текущее состояние оборудования, но и прогнозировать его изменение во времени. Это особенно актуально для оценки технического состояния трансформаторов, коммутационных аппаратов и других критически важных элементов подстанции.

Использование интеллектуальных алгоритмов обеспечивает переход от традиционного реактивного управления к проактивной модели, в рамках которой основное внимание уделяется предотвращению аварий, а не их ликвидации. Система способна анализировать большие объёмы данных, выявлять скрытые зависимости и формировать прогнозы развития технического состояния оборудования. Это позволяет заблаговременно планировать техническое обслуживание и снижать вероятность внезапных отказов.

Дополнительным преимуществом является возможность оптимизации режимов работы подстанции. Интеллектуальные алгоритмы способны учитывать множество факторов, включая нагрузку, состояние оборудования и параметры энергосистемы, что позволяет выбирать наиболее эффективные режимы функционирования. В результате достигается не только повышение надёжности, но и улучшение энергоэффективности.

Таблица 2. Сравнение подходов к управлению подстанцией

Критерий	Традиционный подход	С применением Siemens Spectrum Power
Контроль	Периодический	Непрерывный
Реакция	Запаздывающая	Оперативная
Управление	Ручное	Автоматизированное
Анализ	Ограниченный	Комплексный

Внедрение системы Siemens Spectrum Power позволяет существенно повысить уровень надёжности подстанции за счёт комплексного воздействия на все этапы эксплуатации. Снижается вероятность возникновения аварийных ситуаций, сокращается время их ликвидации, повышается точность диагностики и уменьшается влияние человеческого фактора.

Особое значение имеет интеграция системы в общую структуру энергосистемы, что позволяет обеспечить координацию работы различных объектов и повысить устойчивость всей сети. Это соответствует концепции интеллектуальных энергосистем, предполагающей создание единого информационного пространства и автоматизацию процессов управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведённый анализ подтверждает, что внедрение системы Siemens Spectrum Power является эффективным инструментом повышения надёжности подстанций. Использование цифровых технологий и методов искусственного интеллекта обеспечивает качественно новый уровень управления, основанный на непрерывном мониторинге, аналитике и прогнозировании.

Переход к интеллектуальным системам управления позволяет не только снизить вероятность аварийных ситуаций, но и повысить эффективность эксплуатации оборудования. В перспективе дальнейшее развитие данных технологий будет способствовать формированию полностью автоматизированных энергосистем, способных функционировать с минимальным участием человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Siemens AG. Spectrum Power™ – Energy Management System. – Munich: Siemens AG, 2022.

Siemens AG. Системы управления энергосистемами Spectrum Power // Официальный сайт Siemens. – URL: <https://www.siemens.com>

Международная электротехническая комиссия. IEC 61850: Сети и системы связи на подстанциях. – Женева: IEC, 2013.

Белов Г.А. Цифровые подстанции и стандарты IEC 61850. – М.: НИУ МЭИ, 2019.

Жуков В.В., Иванов А.С. Применение технологий искусственного интеллекта в электроэнергетике // Электричество. – 2021. – №5.

Амин М., Волленберг Б. Интеллектуальные электрические сети // IEEE Power and Energy Magazine. – 2005.

Кундур П. Устойчивость и управление энергосистемами. – М.: Энергия, 2007.

Браун Р. Надёжность распределительных электрических сетей. – М.: Техносфера, 2010.

Материалы Международной электротехнической комиссии IEC по цифровым подстанциям // Официальный сайт IEC. – URL: <https://www.iec.ch>

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЗЕЛЕНЕНИЯ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ И ИХ АДАПТАЦИЯ К КЛИМАТИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ КАЗАХСТАНА

УДК 72.01:712(574)

А.Т. Мұнарбекова^{1*}, Т.А.Иноземцева¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Мұнарбекова Алина Талғатқызы, e-mail:
munarbekova2001@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В статье рассматриваются современные способы озеленения общественных зданий, которые активно применяются в архитектуре. Основное внимание уделяется таким видам озеленения, как фасадное озеленение, зеленые кровли и озеленение атриумных пространств.

В ходе исследования были проанализированы научные источники, примеры реализованных зданий. Особое внимание уделено влиянию озеленения на микроклимат зданий, экологическую ситуацию в городе и психологическое состояние людей. Также рассмотрены конструктивные и функциональные особенности размещения растений на фасадах, крышах и во внутренних пространствах зданий применимые в климатических условиях Казахстана.

Результаты исследования показывают, что применение различных видов озеленения способствует улучшению экологической ситуации в городах, повышает энергоэффективность зданий и делает архитектурную среду более комфортной для людей. При этом были выявлены определенные ограничения, связанные со стоимостью реализации, необходимостью технического обслуживания и требованиями к конструкциям зданий.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании общественных зданий, а также при разработке концепций устойчивой и экологичной архитектуры.

Ключевые слова: зеленая архитектура, вертикальное озеленение, зеленая кровля, атриум, общественные здания, экологическая архитектура., устойчивая архитектура.

ВВЕДЕНИЕ

В современных городах проблема экологической устойчивости и качества городской среды становится всё более актуальной. Быстрый рост городов, плотная застройка и уменьшение природных территорий приводят к ухудшению экологической ситуации, уменьшению площади городского озеленения. В связи с этим особое внимание уделяется внедрению альтернативных способов озеленения. Одним из перспективных направлений является использование архитектурного озеленения — размещение растений непосредственно на зданиях или внутри них. Такие решения позволяют частично компенсировать недостаток зеленых насаждений в городах и улучшить экологические характеристики зданий.

В современной архитектуре широко применяются различные виды озеленения: вертикальное озеленение фасадов, зеленые кровли и озеленение атриумных пространств. Эти решения позволяют не только улучшить внешний вид зданий, но и положительно влияют на микроклимат, энергоэффективность и психологическое состояние людей. Несмотря на активное использование таких технологий, их применение требует комплексного подхода и учета многих факторов: архитектурного решения здания, климатических условий, конструктивных особенностей и функционального назначения здания.

Целью исследования является анализ основных видов озеленения общественных зданий и выявление их условий применения.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1) изучить виды озеленения архитектурных объектов, и их конструктивные особенности; 2) рассмотреть зарубежный опыт применения озеленения кровель, фасадов и внутренних пространств; 3) определить преимущества и недостатки каждого вида архитектурного озеленения и возможность применения озеленения общественных зданий в Казахстане.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Теоретической базой исследования выступили научные публикации и специализированные интернет-источники по вопросам экологической архитектуры и технологиям озеленения. Эмпирическую базу составили примеры реализованных архитектурных объектов (Oasia Hotel Downtown, Школа искусств в Сингапуре, торговый центр Nichii Obihiro), отобранные по критериям репрезентативности и наличия открытой технической информации. Это позволило сформировать теоретическую основу исследования, определить ключевые понятия, классификации и современные тенденции в озеленении зданий.

В работе использованы методы теоретического анализа литературы, сравнительного анализа архитектурных решений, а также метод систематизации данных. Применение данных методов позволило выявить особенности, преимущества и ограничения каждого вида озеленения (вертикального, кровельного и атриумного), а также определить условия их адаптации к климатическим условиям Казахстана.

Озеленение общественных зданий является важным элементом современной архитектуры, направленным на улучшение экологических, эстетических и функциональных характеристик городской среды. В практике проектирования выделяют три основных вида: вертикальное озеленение, зелёные кровли и атриумное озеленение.

Одним из наиболее распространённых видов архитектурного озеленения является **вертикальное озеленение**, которое может выполняться полностью на всем фасаде, на его части, на отдельно стоящих вертикальных элементах и в интерьере. Такое решение стен снизит их перегрев, скроет изъяны застройки или, наоборот, подчеркнет ее значимые элементы. Фасадное озеленение создает иллюзию зелёного окружения, разбавляет монотонность городской застройки.

Oasia Hotel Downtown — это современное здание в Сингапуре, которое является примером вертикального озеленения. Это 27-этажный отель, фасад которого покрыт вьющимися растениями. Растения размещены на специальной металлической сетке и со временем полностью озеленят здание. Такое решение не только украшает фасад, но и снижает нагрев, улучшает микроклимат и создает тень. Также в здании есть открытые террасы с зеленью, что обеспечивает естественную вентиляцию. В целом, объект показывает, как можно сочетать архитектуру и природу в условиях плотной городской застройки.

Вертикальное озеленение фасадов (зелёные стены, фасадные сады) сильно зависит от климата. Основные типы конструкций вертикального озеленения рассмотрены в таблице 1.

Другим важным видом озеленения является **зеленая кровля**. Она представляет собой крышу здания, на которой размещаются растения. Такие крыши могут использоваться как общественные пространства или зоны отдыха. Основные типы зеленых кровель представлены в таблице 2.

Таблица 1. Типы конструкций вертикального озеленения

Тип конструкции	Особенности	Климатические требования
Модульные панели (контейнеры с растениями)	Легко заменить растения	Для холодного и умеренного климата
Гидропонные системы (без почвы)	Питание растений через трубы	Для жаркого и сухого климата
Каркасные решётки для вьющихся растений	Простой уход, недорогие, растения в обычном грунте на уровне земли	Более универсальны
Вертикальные ковровые / матовые системы (мох, травы)	Легкие, тонкие, декоративные	Для влажного и тенивого климата

Таблица 2. Типы зеленых кровель

Тип кровли	Преимущества	Особенности
Экстенсивная (тонкий слой почвы до 150 мм)	Легкая конструкция, малые затраты на полив	Для засухоустойчивых растений, для крыш с ограниченной нагрузкой
Интенсивная (глубокая почва от 200мм до 500 мм)	Можно высаживать кустарники, деревья	Усиленная конструкция крыши, автополив. Защита от заморозков
Модульные / контейнерные системы	Легко заменить растения, удобный уход	Зимой можно частично перемещать или утеплять

В Школе искусств в Сингапуре крыша покрыта растениями. Она помогает охлаждать здание, уменьшать шум и экономить энергию. Также зелёная кровля создаёт красивое место для отдыха студентов на открытом воздухе.

Зелёные кровли в Казахстане делают с учётом климата. На севере нужны растения, которые выдерживают морозы и снег. В центре важно учитывать сильный ветер и перепады температуры. На юге используют растения, которые хорошо переносят жару, и обязательно делают полив. Крыша обычно делается с небольшим уклоном (1–5%), чтобы вода стекала. Если уклон больше, нужно дополнительно закреплять грунт, чтобы он не сползал. Такие крыши уменьшают нагрев здания летом и сохраняют тепло зимой, улучшают микроклимат. Но они сложнее в устройстве: нужна прочная конструкция, гидроизоляция и постоянный уход.

Ещё одним важным элементом современной архитектуры является **озеленение атриумных пространств**. Атриум — это внутреннее, многосветное распределительное пространство, развитое по вертикали, в центре здания, которое имеет естественное освещение через стеклянную крышу или фасад. Растения в атриуме создают более комфортную атмосферу и положительно влияют на психологическое состояние людей.

Торговый центр Nichii Obihiro Department Store в Японии, спроектированный Эмилио Амбажем, имеет интересное озеленение атриума. Зелёные композиции с различными растениями создают приятную атмосферу, очищают воздух и делают пространство более уютным для посетителей. Озеленение помогает сгладить контраст между шумом города и спокойной атмосферой внутри, а также добавляет естественную красоту в современный интерьер торгового центра.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На большей территории Казахстана климат резко-континентальный, с холодными зимами и жарким летом поэтому при вертикальном озеленении нужно учитывать регион. Наиболее приемлемые системы для Казахстана – модульные панели (зимой можно частично консервацию или утеплить панели, вес выдерживает снег), гидропонные системы (летом удобно автоматизировать полив, зимой систему можно слить и утеплить) и каркасы для вьюнов (при посадке неприхотливых растений минимум ухода, морозостойкие лианы растут на стене без сложных конструкций).

Из кровельного озеленения в Казахстане лучше использовать экстенсивные зеленые кровли с засухоустойчивыми и морозостойкими растениями. Интенсивные кровли возможны, но требуют усиленной конструкции и сложного полива.

Атриумное озеленение меньше всего зависит от климата, потому что находится внутри здания. Главное — поддерживать температуру примерно +18...+25°C, влажность, а также обеспечить отопление и вентиляцию. Важно, чтобы было достаточно света (через стеклянную крышу или лампы), а также системы полива. В целом, такое озеленение можно делать в любом регионе, если создать нормальные условия внутри здания.

Общие выводы по возможному озеленению общественных зданий представлены в таблице 3.

Таблица 1. Обзор озеленения общественных зданий и возможность его применения в Республики Казахстан

Виды озеленения зданий	Пример	Достоинства	Недостатки
Вертикальное озеленение фасадов	 Пример вертикального озеленения фасада здания. (Oasia Hotel Downtown, Сингапур) https://www.businessinsider.com/oasia-hotel-downtown-singapore-green-living-tower-2022-6	-Термо-регулирование; -Улучшение микроклимата; -Экологическая функция; -Шумо-изоляция; -Экономическая эффективность; -Эстетическая выразительность; -Психологический эффект;	-Высокая стоимость устройства; -Сложность эксплуатации; -Необходимость инженерных систем; -Ограничения по климату; -Нагрузка на конструкции; -Риск повреждения фасада; -Сезонность декоративного эффекта;
	Условия применения в Казахстане. В центральных регионах (Карагандинская область, Астана) вертикальное озеленение требует учета сильных ветров и резких температурных перепадов. В южных регионах (Алматинская, Жамбылская, Туркестанская области) условия наиболее благоприятны для вертикального озеленения благодаря мягкому климату и более длительному вегетационному периоду.		

Продолжение таблицы 1

Озеленение атриума	 Эмилио Амбаз — торговый центр Nichii Obihiro Department Store в Японии. https://tr.pinterest.com/pin/289145238568316907/	Улучшение микроклимата; -Психологический комфорт; -Эстетическая привлекательность; -Рациональное использование внутреннего пространства; -Улучшение освещённости; -Зонирование пространства;	-Высокая стоимость устройства; -Сложность эксплуатации; -Необходимость инженерных систем; -Зависимость от освещения; -Ограниченный выбор растений; -Повышенная влажность;
	Условия применения в Казахстане. Южные регионы (Алматинская, Жамбылская, Туркестанская области). Климат мягче, и атриумы могут использовать естественное солнечное освещение чаще, что упрощает уход за растениями и делает озеленение более ярким и разнообразным. Западные регионы (Атырауская, Мангистауская области). В засушливых условиях атриумы позволяют создать зелёную зону внутри здания, где растения получают полив и нужный свет.		
Зеленая кровля	 Школа искусств (Республика Сингапур) https://www.artofit.org/image-gallery/680676931195316147/i-photograph-singapore-like-you've-never-seen-before/	-Тепло- и шумоизоляция; -Защита конструкции кровли; -Экологическая функция; -Продление срока службы кровли; -Эстетика и рекреация; -Предотвращение быстрого распространения огня;	-Высокая стоимость; -Большая нагрузка на конструкцию здания; -Необходимость регулярного ухода; -Сложность инженерного обеспечения; -Ограничение выбора растений; -Риск протечек;
	Условия применения в Казахстане. Южные регионы (Алматинская, Туркестанская, Жамбылская области). Мягкий климат позволяет применять интенсивные кровли с большим разнообразием растений, Крыши можно использовать как зоны отдыха. Западные регионы (Атырауская, Мангистауская области). Засушливый климат требует системы полива и засухоустойчивых растений. Зеленая кровля помогает создать комфортную среду и защитить гидроизоляцию от перегрева.		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования были рассмотрены основные виды архитектурного озеленения общественных зданий: вертикальное озеленение, зеленые кровли и озеленение атриумных пространств. Анализ показал, что данные решения позволяют значительно улучшить экологические характеристики зданий, снизить негативное воздействие городской среды и повысить комфортность архитектурных пространств для людей.

Вертикальное озеленение способствует снижению нагрева фасадов и улучшению внешнего вида зданий. Зеленые кровли повышают энергоэффективность зданий и создают дополнительные общественные пространства. Атриумное озеленение улучшает микроклимат внутри зданий и способствует созданию комфортной атмосферы. Несмотря на очевидные преимущества, применение данных

технологий требует учета конструктивных особенностей зданий, климатических условий и затрат на обслуживание.

В дальнейшем перспективным направлением исследований может стать разработка новых технологий озеленения зданий, а также поиск оптимальных решений для их применения в условиях различных климатических зон.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: финансирование за счет авторов

БЛАГОДАРНОСТИ: не предусмотрены

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В процессе подготовки статьи авторы использовали инструменты генеративного искусственного интеллекта (ChatGPT, OpenAI) для редактирования и стилистической корректировки отдельных фрагментов текста. Все научные выводы и содержание работы принадлежат авторам

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Abedin, B., Meske, C., Junglas, I., & others. (2022). Designing and managing human-AI interactions. *Information Systems Frontiers*, 24, 691–697.
<https://doi.org/10.1007/s10796-022-10313-1>
- Alhloul, A., & Kiss, E. (2022). Industry 4.0 as a challenge for the skills and competencies of the labor force: A bibliometric review and a survey. *Sci*, 4(3), 34.
<https://doi.org/10.3390/sci4030034>
- Хуснутдинова А.И., Александрова О.П., Новик А.Н. Технология вертикального озеленения // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – №12(51). – С. 20-32.
[https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/12\(51\)/2_husnutdinova_51.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/12(51)/2_husnutdinova_51.pdf)
- Богуславец Е.А., Братошевская В.В. Вертикальное озеленение зданий как метод защиты от шумового загрязнения на урбанизированных территориях // Вестник науки. – 2020. – №5. – С. 84-87.
<https://cyberleninka.ru/article/n/vertikalnoe-ozelenenie-zdaniy-kak-metod-zaschity-ot-shumovogo-zagryazneniya-na-urbanizirovannyh-territoriyah/viewer>
- Гутнов А.Э. Мир архитектуры. М.: Молодая гвардия, 1985. С.154-155.
- Mc Donough W., Braungart M. Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things. North Point Press, 2002, 378p.
- Architecture firm Aquilialberg. Project Headquarter BENETTON GROUP. Teheran, Iran // Architecture URL: aquilialberg.com.
<http://aquilialberg.com/portfolio/benetton-headquarter/>
- Hugh D. Hudson, Jr. Blueprints and Blood: The Stalinization of Soviet Architecture, 1917-1937. Princeton: Princeton University Press, 1994. 260 p.
- [Дубенкова Н. Вертикальные сады [Электронный ресурс] / Н. Дубенкова // Благоустройство и дизайн].
http://edu.secna.ru/media/f/Алаева_3.pdf
- ChatGPT. (2026, March 24). Помощь в редактировании и стилистической корректировке научного текста [Большая языковая модель]. OpenAI.
<https://chat.openai.com/>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ

УДК 624.131.43

З.Ж. Наурызбаева^{1*}

¹ Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
г.Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Наурызбаева Зарина Жұмаханқызы, e-mail:

zarina.nauryzbaeva1@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В условиях освоения территорий со слабыми и водонасыщенными грунтами важной задачей строительства является повышение несущей способности и устойчивости фундаментов. Слабые грунты обладают высокой сжимаемостью, низким сопротивлением сдвигу и длительным выпадением осадков, что затрудняет проектирование фундаментов и эксплуатацию зданий и сооружений. Одним из методов улучшения механических свойств оснований является армирование грунтов геосинтетическими материалами. В данной статье проанализированы физико-механические свойства грунта при укреплении геосинтетическим материалом. Практическая значимость исследования выражается в создании рекомендаций по использованию геосинтетических материалов при возведении фундаментов зданий и сооружений в сложных инженерно-технических условиях.

Ключевые слова: грунты, геосинтетические материалы, нетканый геотекстиль, армирование грунта, сопротивление сдвигу, угол внутреннего трения, сцепление.

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие строительной отрасли связано с освоением территорий со сложными инженерно-геологическими условиями, включая слабые, водонасыщенные и техногенные грунты. В таких условиях надежность и устойчивость фундаментов зданий и сооружений становится ключевой задачей инженерно-геологического проектирования. В последние десятилетия широкое распространение получило использование геосинтетических материалов для укрепления грунта, перераспределения напряжений и повышения устойчивости фундамента. Результаты зарубежных и отечественных исследований подтверждают эффективность армирования грунта при строительстве фундаментов и усиленных конструкций. Актуальность исследования связана с необходимостью создания научно обоснованных рекомендаций по использованию геосинтетических материалов при проектировании фундаментов зданий и сооружений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на образцах грунта, представленного пылеватым песком средней плотности, определённым по результатам гранулометрического анализа в соответствии с ГОСТ 12536–2014 и классификацией ГОСТ 25100–2020. Физико-механические свойства грунта определялись стандартными лабораторными методами.



Рисунок 1. Определение гранулометрического состава грунта

Масса образцов устанавливалась методом взвешивания, а объем – по геометрическим размерам цилиндрических образцов, что позволило рассчитать основные физические параметры грунта. Для оценки влияния армирования использовался нетканый геосинтетический материал. Образцы подготавливались методом послойного уплотнения: геосинтетический слой размещался на заданной высоте между слоями грунта. Экспериментальные исследования проводились на образцах ненарушенной структуры, сформированных в лабораторных условиях. В результате расчетов были получены значения основных физических параметров исследуемого грунта.



Рисунок 2. Прибор одноплоскостного среза (лабораторная установка)

Эксперимент проводился при трех значениях нормальной нагрузки. На каждом этапе фиксировалось максимальное сдвигающее усилие, соответствующее разрушению образца.

Для определения прочностных характеристик грунта использовался критерий Мора–Кулона:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

где τ – касательное напряжение при разрушении, σ – нормальное напряжение, c – сцепление грунта, φ – угол внутреннего трения.

Для количественной оценки эффективности армирования рассчитывался

относительный

$$\Delta X = \frac{X_{арм} - X_{неарм}}{X_{неарм}} \times 100\%$$

где $X_{арм}$ – значение параметра в армированном состоянии, $X_{неарм}$ – значение параметра в неармированном состоянии.

Данный подход позволил оценить эффективность применения геосинтетического материала по изменению ключевых прочностных параметров грунта.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице 1 представлены результаты определения физических характеристик исследуемого грунта.

Таблица 1. Физические характеристики грунта

Показатель	Обозначение	Значение
Естественная влажность, %	w	18
Плотность грунта, г/см ³	ρ	1,92
Плотность сухого грунта, г/см ³	ρ_d	1,63
Плотность частиц, г/см ³	ρ_s	2,68
Коэффициент пористости	e	0,64
Степень водонасыщенности	S_r	0,76

Повышенная степень водонасыщенности указывает на потенциальную склонность грунта к снижению прочностных характеристик при нагрузке, что характерно для слабых оснований [1,2]. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты испытаний армированного и неармированного грунта

Нормальное напряжение σ , кПа	τ (неармированный), кПа	τ (армированный), кПа
50	38	52
100	72	95
150	104	142

Анализ экспериментальных данных показывает, что армирование нетканым геотекстилем приводит к существенному увеличению сопротивления сдвигу при всех уровнях нормального напряжения, что согласуется с результатами ранее проведенных исследований [5,6]. Средний прирост прочности составляет 35–40 %, что свидетельствует о высокой эффективности применения геосинтетического материала.

По результатам обработки данных определены параметры прочности.

Таблица 3. Сравнение параметров прочности

Параметр	Неармированный грунт	Армированный грунт	Прирост, %
Сцепление c , кПа	12	21	75
Угол внутреннего трения φ , °	24	31	29

Результаты расчета показали:

- увеличение сцепления на 75 %;
- увеличение угла внутреннего трения на 29 %;
- рост сопротивления сдвигу в среднем на 35–40 %.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что геотекстиль изменяет напряжённо-деформированное состояние грунта, формируя дополнительный армирующий каркас, что также отмечается в работах других исследователей.

С практической точки зрения, увеличение сопротивления сдвигу в среднем на 35-40% является очень важным показателем. Это означает, что предполагаемая несущая способность основания увеличивается, а риск неравномерного осадения снижается. Особенно на слабых, пропитанных водой грунтах, склонных к высокой деформации, это решение значительно повышает надежность строительства. Таким образом, геосинтетическая арматура изменяет напряженно-деформированное состояние грунта, образуя дополнительный и эффективный механизм против разрушения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования установлено, что применение геосинтетического материала оказывает существенное влияние на прочностные характеристики грунта. Армирование приводит к увеличению сопротивления сдвигу при всех рассмотренных значениях нормального напряжения, при этом средний прирост прочности составляет 35–40 %.

Определено, что параметры прочности грунта значительно улучшаются: сцепление увеличивается с 12 до 21 кПа (рост на 75 %), а угол внутреннего трения – с 24° до 31° (рост на 29 %). Полученные зависимости τ – σ имеют линейный характер, что подтверждает применимость критерия Мора–Кулона для описания поведения исследуемого грунта.

Геосинтетический слой образует внутри грунта своеобразный армирующий каркас. Благодаря этому напряжения эффективно перераспределяются, а в зоне разрушения ограничивается развитие пластических деформаций.

Взаимодействие грунта и геосинтетического материала изменяет характер разрушения и превращает систему «грунт – армирующий слой» в единую функционирующую структуру. В результате общая стабильность значительно увеличивается, что полностью согласуется с теоретическими положениями и данными предыдущих исследований.

С практической точки зрения эти результаты очень полезны при проектировании оснований в сложных инженерно-геологических условиях. Применение геосинтетических материалов позволяет повысить надежность фундамента.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено без внешнего финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность коллегам за методологическую поддержку и полезные обсуждения.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Амарян Л.С. Свойства слабых грунтов и методы их изучения. — 1990. — 221 с.
<https://okhotin-grunt.ru/arhiv2/1.pdf>
- Абелев М.Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах. — Москва: Стройиздат, 1983. — 248 с.
<https://books.totalarch.com/n/2954>
- ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. — М.: Стандартиформ, 2020.
<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293719/4293719820.pdf>
- ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) состава. — М.: Стандартиформ, 2014.
<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293766/4293766967.pdf>
- Пьянков С.А. Механика грунтов: учебное пособие. — Ульяновск: УлГТУ, 2018. — 195 с.
<https://venec.ulstu.ru/lib/disk/2018/216.pdf>
- Болдырев Г.Г., Малышев М.В. Механика грунтов. Основания и фундаменты: учебное пособие. — Пенза: ПГУАС, 2009. — 412 с.
https://www.ektu.kz/files/DistanceEducation/Resource/456911/geokniga-mehanika-gruntov-osnovaniya-i-fundamenty_1.pdf
- Ponomaryov A., Zolotozubov D. Several approaches for the design of reinforced bases — 2014. — P. 48–51.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266114413001076>

ЖОЛ ҚҰРЫЛЫСЫНДА МЕТАЛЛУРГИЯЛЫҚ ҚАЛДЫҚ-МЫС ҚОЖЫН ПАЙДАЛАНУ

ӨОК 625.7

М.Нұржанұлы^{1*}, Ж.К.Ракижанова¹

¹ Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ, Өскемен қ., Қазақстан

*Автор-корреспондент: Нұржанұлы Мағжан, e-mail: janarrak@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Бұл мақалада жол құрылысы өнеркәсібінде түсті металлургия қалдықтарының, әсіресе мыс балқыту шлактарының болашағы мен нақты қолданылуы қарастырылады. Оның физикалық және механикалық қасиеттері, химиялық құрамы және жол жамылғысының құрылымдық қабаттарында қолданылуы талданады. Табиғи агрегаттардың орнын басатын жасанды қалдықтарды қайта өңдеудің экономикалық пайдасы мен экологиялық маңыздылығы атап өтіледі. Металлургиялық шлактар әртүрлі функционалды мақсаттар үшін ерітінділер мен қоспаларды дайындауға арналған салыстырмалы түрде арзан қайталама шикізат болып табылады.

Қарастырылып отырған мәселе ресурстарды үнемдейтін технологияларды дамыту және қоршаған орта жағдайына қойылатын талаптардың артуы, жол-құрылыс өнімдері нарығын оңтайландыру және жаңа және жақсы технологияларды іздеу тұрғысынан тиімдірек құрылыс материалдарын іздеу (өндіріс құнын 10-25%-ға дейін төмендету) тұрғысынан өзекті болып табылады; металлургиялық қож қала көшелері мен әртүрлі техникалық санаттағы жолдардың жол жамылғылары мен іргетастарын салу және жөндеу кезінде табиғи материалдарға балама бола алады.

Түйін сөздер: мыс балқыту қождары 1, жол құрылысы 2, жол беттері 3, қалдықтарды жою 4, қиыршық тас 5, асфальтбетон 6, экологиялық қауіпсіздік 7.

КІРІСПЕ

Қазіргі заманғы жол құрылысы жоғары өсу қарқынымен және соның салдарынан минералды шикізатқа (ұсақталған тас, қиыршық тас, құм) үлкен сұраныспен сипатталады. Сонымен қатар, түсті металлургия зауыттары жыл сайын миллиондаған тонна қосалқы өнімдер өндіреді. Мыс балқыту қоқысы қалдық үйінділерінде жиналып, айтарлықтай жер аумақтарын алып жатыр және қоршаған ортаға айтарлықтай әсер етеді. Жол жамылғысының сапасы оның жұмысына тікелей әсер ететіні белгілі. Олардың ішінде жол қозғалысы қауіпсіздігі ерекше маңызды, ол жол құрылымының жоғарғы қабаттарының тасымалдау және пайдалану параметрлері мен сипаттамаларының нормативтік және техникалық талаптарға сәйкес келу дәрежесімен анықталады.

Көлік инфрақұрылымын дамыту қолданыстағы құрылыс технологияларын оңтайландыруды талап ететінін атап өткен жөн. Сондықтан жол құрылыс материалдары шешуші рөл атқарады. Оларды өндіру, пайдалану және кейінгі қалпына келтіру кезінде олар жүк көтергіштіктің бұзылуы, шайылып кету, пластикалық деформация және басқа да факторлар сияқты ақаулардың пайда болуын азайту арқылы жол құрылымдарының қызмет ету мерзімін және жөндеу арасындағы байланысты уақытты ұзартады, осылайша жолдардың жоғарыда аталған тұтынушылық қасиеттерін жақсартады.

Жол құрылысы саласында металлургиялық қалдықтар зерттеу үшін қайта өңделетін материалдардың ең перспективалы көзі болуы мүмкін. Металлургиялық қождар әртүрлі функционалды мақсаттарға арналған ерітінділер мен қоспаларды өндіруге арналған салыстырмалы түрде арзан қайталама шикізат болып табылады.

Мыс балқыту зауыттарының қожын жол құрылысында пайдалану екі ұлттық мақсатты шешеді: жол құрылыс материалдарының тапшылығын азайту және «жасыл» экономика қағидаттарына толық сәйкес келетін өнеркәсіптік қалдықтарды жою.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Әдістемелік зерттеулер: металлургиялық қождардың түрлері бойынша мәліметтерді жүйелеуге, олардың физикалық-химиялық қасиеттерін салыстыруға, бетонның беріктігіне, су сіңіргіштігіне әсерін талдауға, экологиялық тәуекелдер бойынша нәтижелерді жалпылауға (ауыр металдың шайылуы), сәйкес зерттеу бағыттарын анықтауға мүмкіндік берді.

Түсті металлургиялық қож ретінде КАЗЦИНК мыс өндірісінің қожы қолданылды, иекті ұсатқышта ұсатылып, шарлы диірменде ұнтақтау жүргізілді. Мыс қожының нақты тығыздығы МЕМСТ 8735-88 «Құрылыс жұмыстарына арналған құм. Сынақ әдістері» бойынша пикнометриялық әдіспен анықталды.

Пикнометриялық әдіс материалдың нақты тығыздығын анықтауға арналған: Сынаққа дайындық- қождың сынамасын шамамен 30г алынады, ол диаметрі 5мм болатын тесіктері бар електен өткізіледі, тұрақты салмаққа дейін кептіріледі, бөлме температурасына дейін салқындатылады, араластырып екіге бөлінеді. Сынақты жүргізу: материалдың әрбір бөлігі таза кептірілген және алдын-ала өлшенген пикнометрге салынады, ол материалмен бірге өлшенеді. Содан кейін пикнометрге тазартылған су құйылады, пикнометр оның көлемінің шамамен 2/3 бөлігін толтырады, ішіндегі материал араластырылады және оны құмды ваннаға сәл көлбеу күйде қойылады. Ауа көпіршіктерін кетіру үшін пикнометрдің ішіндегі материал 15-20 минут қайнатылады. Ауа шығып біткен соң пикнометр сүртіліп, бөлме температурасына дейін салқындатылады, пикнометрдегі белгіге дейін тазартылған су құйылады да өлшенеді. Соңында пикнометр материалдан босатылып жуылады.

НӘТИЖЕЛЕР МЕН ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Түсті металлургияның қалдықтары қара металлургияның қалдықтарына қарағанда байланыстырғыш және бетон бұйымдарын өндіруде минералды қоспалар ретінде кеңінен қолданыс таба алмады [3, 4]. Қазіргі уақытта мыс балқыту қождарының негізгі кәдеге жаратылуы оларды химия және керамика өнеркәсібінде пайдалану болып табылады [5-7]. Мыс қождары -цемент немесе толтырғыштарды ішінара және толық ауыстыру ретінде құрылыс индустриясында болашағы зор болуы мүмкін қалдық болып саналатын материал. Бұл штейнді балқыту және мысты тазарту кезінде алынатын жанама өнім. Өндірілетін әрбір тонна мыс үшін жанама өнім ретінде шамамен 2,2-3 тонна мыс қожы түзіледі. Бұл қоршаған ортаға теріс әсер етеді және қайта өңдеуді, яғни оны өндірісте қайта қолдануды қажет етеді. Мыс балқыту қождарының қасиеттері

Мыс балқыту қожы - кеннен мысты балқыту арқылы алынатын материал. Салқындату әдісіне байланысты ол келесідей болуы мүмкін:

- Түйіршікті (сумен тез салқындату) - негізінен 5 мм-ге дейінгі түйіршік өлшемі бар ұсақ түйіршікті шыны тәрізді материал.
- Қоштасу /түйіршіктелмеген (ауада баяу салқындайтын) - фракциялық ұсақталған тасқа ұсақталған тас тәрізді құрылымы бар тығыз, берік материал.

Химиялық құрамы жағынан мыс балқыту қожы темір (Fe), кремний (Si), кальций (Ca) және алюминий (Al) оксидтері басым көп компонентті жүйе болып табылады. Темірдің жоғары мөлшері ұсақталған қожға жоғары орташа тығыздық береді (3-3,5 г/см³ дейін), бұл көптеген табиғи тас материалдарынан асып түседі. Ұсақталған мыс балқыту қожының негізгі физикалық және механикалық қасиеттеріне жоғары механикалық

беріктік (ұсақталу дәрежесі M1000–M1200), аязға төзімділіктің тамаша болуы және суды төмен сіңіру жатады.

Жол құрылысында қолданылуының негізгі салалары

Мыс балқыту шлактарын әртүрлі кезеңдерде және автомобиль жолдарының әртүрлі элементтерінде тиімді пайдалануға болады:

1. Іргетастарды және жол жамылғыларының қосымша қабаттарын салу

Жоғары беріктігі мен тозуға төзімділігіне байланысты фракцияланған қож ұсақталған тас жүк көтергіш іргетастарды салуда табиғи ұсақталған тасты толық алмастырады. Қалдық қождан жасалған қоспалар белгілі бір минералды фазалардың байланыстырушы қасиеттеріне байланысты біртіндеп өзін-өзі монолизирлеу қасиеттерін көрсетеді (уақыт өте келе беріктігі артады).

2. Жер асты топырақтарын нығайту

Зерттеулер жұмсақ топырақты тұрақтандыру үшін күрделі байланыстырғыштарда (мысалы, әк немесе цементпен бірге) ұсақ ұнтақталған түйіршіктелген мыс балқыту зауытының қожын пайдаланудың жоғары тиімділігін көрсетеді. Бұл жол төсемінің көтергіштік қабілетін айтарлықтай арттырады.

3. Асфальтбетонға толтырғыш ретінде қолданыңыз

Ұсақталған қож бен түйіршіктелген қожды асфальт-бетон қоспаларына қосуға болады. Ұсақталған қождың кедір-бұдыр беті және битумға жоғары адгезиясы ығысу деформациясына және ойықтарға төзімділікті арттырады және жол бетінің тарту қасиеттерін жақсартады.

4. Жол бетоны мен цемент өндірісі

Ұсақ дисперсті түйіршіктелген қож жасырын гидравликалық белсенділікке ие. Клинкермен бірге немесе минералды қоспа ретінде ұнтақтаған кезде, ол монолитті бетон жабындары мен іргетастарын салу үшін сәтті қолданылатын портландцемент қожын алады.

Қоршаған орта қауіпсіздігі

Металлургиялық қалдықтарды пайдалану кезіндегі негізгі мәселелердің бірі - оның экологиялық қауіпсіздігі. Мыс балқыту шлағы төмен қауіпті зат ретінде жіктеледі (IV қауіптілік класы). Көптеген санитарлық, гигиеналық және радиациялық сынақтар оның табиғи радионуклидтік құрамы құрылыс материалдары үшін рұқсат етілген шектерде екенін растайды. Дегенмен, белгілі бір кен орнынан шлактарды пайдаланбас бұрын ауыр металдарды шаймалауға қатаң зертханалық тексеру қажет.

ҚОРЫТЫНДЫ

Мыс балқыту зауытының қожын жол құрылысында пайдалану техникалық тұрғыдан негізделген және үнемді шешім болып табылады. Табиғи тасты қож өнімдерімен ауыстыру жол құрылысының құнын төмендетеді, табиғи ресурстарды үнемдейді және ұзақ уақыт бойы жиналып қалған өнеркәсіптік қалдықтарды жояды. Оны пайдалануды кеңейту үшін түсті металлургияның қосалқы өнімдерін пайдалана отырып, жол жамылғыларын жобалауды реттейтін нормативтік базаны одан әрі жетілдіру қажет.

Мыс балқыту шлактарын зерттеу бойынша одан әрі зерттеулер жүргізілуде.

МҮДДЕЛЕР ҚАРАМА-ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қарама-қайшылығының жоқтығын мәлімдейді..

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Авторлар әріптестеріне әдістемелік қолдауы мен пайдалы талқылаулары үшін, сондай-ақ мақала сапасын жақсартуға үлес қосқан анонимдік рецензенттерге алғыс білдіреді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Ракижанова, Ж., Рахимова, Г., Алдунгарова, А., Рахимова, З., и Есиркепова, А. (2026). Құрылыс материалдарын өндіруде металлургиялық өнеркәсіп қалдықтарын пайдалануды талдау. Журнал архитектурных и строительных наук ЕКТУ , 1 (1), 116–127.
<https://journals.ektu.kz/jacs/article/view/1762>
- Капустин Федор Леонидович, Афанасьева Марина Алексеевна, Жалпы мақсаттағы цемент өндірісінде мыс балқыту шлактарын пайдалану, «Материалдар технологиялары», 2013, 13-том, №2
<https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-medeplovilnogo-shlaka-v-proizvodstve-tsementov-obshchestroitel'nogo-naznacheniya/viewer>
- Н.И. Шестаков, А.В. Коршунов, С.В. Путилин атындағы Ұлттық зерттеу Мәскеу мемлекеттік құрылыс университеті, Мәскеу, Ресей Құрылыс және қайта құру, № 6 (98) 2021
<https://construction.elpub.ru/jour/article/view/422/397#>:
- Пименов А.Т. Прибылов В.С. Металлургиялық өндіріс қалдықтарын жол жамылғылары мен іргетастарды салу және жөндеу кезінде пайдалану мүмкіндігін негіздеу, «Материалдар технологиялары», 2021, № 2
<https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-vozmozhnosti-primeneniya-otvodov-metallurgicheskikh-proizvodstv-pri-stroitelstve-i-remonte>
- Романенко, И. И. Жол құрылысындағы жаңа материалдар / И. И. Романенко, М. И. Романенко, И. Н. Петровнина. - Мәтін: тікелей // Жас ғалым. - 2015. - № 7 (87). - Б.198-200.
<https://moluch.ru/archive/87/16615>

РОЛЬ МЕТЕОМАЧТЫ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

УДК 621.548

С.Е. Нұрмұхамбетов^{1*}, А.М. Акаев¹

¹Восточно Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г.Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: С.Е. Нұрмұхамбетов

АННОТАЦИЯ. Активное внедрение возобновляемых источников энергии в последние годы рассматривается как одно из приоритетных направлений развития мировой и национальной энергетики. Среди различных альтернативных технологий особое место занимает ветроэнергетика, которая отличается экологической чистотой, устойчивостью к истощению природных ресурсов и значительным энергетическим потенциалом. Важным этапом при планировании строительства ветровых электростанций является детальное исследование ветровых характеристик выбранной территории. Для получения достоверной информации о параметрах воздушных потоков применяются специализированные измерительные системы - метеорологические мачты, оснащённые комплексом датчиков для регистрации атмосферных показателей. В рамках исследования в период с августа по сентябрь 2025 года на территории кампуса «Простор», расположенного у Бухтарминского водохранилища в Восточно-Казахстанской области, проводился анализ параметров ветра с использованием метеомачты для оценки потенциала ветровой энергии. В работе рассматривается функциональное значение метеорологических мачт на стадиях проектирования и последующей эксплуатации ветроэнергетических объектов. Проанализированы основные метеорологические параметры, фиксируемые измерительными приборами, рассмотрены способы обработки полученных данных, а также оценено влияние результатов измерений на эффективность функционирования ветроэнергетических установок. В статье представлены примерные результаты наблюдений, данные ветрового параметра, роза ветров ветрового режима исследуемой территории.

Ключевые слова: метеомачта, ветрогенератор, ветроэнергетика, ветровые турбины, роза ветров, ветроэлектростанция, ветровой потенциал, турбулентность.

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних десятилетий наблюдается заметное увеличение внимания к применению возобновляемых источников энергии. Подобная тенденция обусловлена несколькими факторами, среди которых рост глобального спроса на электрическую энергию, постепенное сокращение запасов традиционных топливных ресурсов, а также необходимость уменьшения антропогенного воздействия на природную среду.

Одним из наиболее динамично развивающихся направлений альтернативной энергетики является использование энергии ветра. Ветроэнергетика характеризуется экологической безопасностью, сравнительно высокой экономической целесообразностью и практически неограниченным природным потенциалом ветровых потоков. В настоящее время ветровые электростанции широко внедряются во многих государствах и рассматриваются как важный компонент формирования устойчивой энергетической системы. Производительность ветровых турбин в

значительной степени определяется параметрами воздушного потока, включая скорость ветра, его направление, уровень турбулентности и плотность воздуха. [1] По этой причине перед реализацией проектов по строительству ветропарков проводится комплексное исследование ветрового потенциала выбранной территории. Для получения объективных и точных сведений о характеристиках ветрового режима применяются специализированные измерительные комплексы - метеорологические мачты. Данные конструкции оборудуются различными датчиками и позволяют выполнять долговременные наблюдения за скоростью и направлением ветра на разных высотах, а также фиксировать ряд дополнительных метеорологических показателей. [2]

Полученные результаты измерений применяются для анализа энергетических возможностей ветрового потока, а также для выбора наиболее рациональной схемы размещения ветровых турбин на территории ветроэнергетического объекта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследования использовалась метеорологическая мачта с анемометром Young 81000. Метеорологическая мачта является специализированной инженерной конструкцией вертикального типа, оснащённой системой датчиков для непрерывного мониторинга метеорологических параметров. Высота установки обычно выбирается с учётом уровня размещения оси ветровой турбины и в большинстве случаев находится в диапазоне от 80 до 120 метров. Мачта дает возможность определить следующие показатели :

- определение скорости ветровых потоков на различных высотных уровнях;
- установление направления движения воздушных масс;
- оценка степени турбулентности воздушного потока;
- регистрация температуры воздуха и показателей атмосферного давления.



Рисунок 1. Метеомачта на базе кампуса «Простор»

На метеорологической мачте размещают разнообразные сенсоры, которые показывают параметры ветрового потока и окружающей среды:

- анемометры фиксируют скорость воздушного потока;
- флюгеры указывают ориентацию ветра;
- термодатчики регистрируют тепловой режим атмосферы;
- гигрометры оценивают относительную влажность воздуха.

Собранные показания направляются в систему учёта и далее служат для детального анализа ветровых характеристик данной территории.

Значение метеомачт при исследовании ветрового потенциала

Перед возведением ветровой электростанции осуществляется продолжительное наблюдение за ветровыми характеристиками территории. Как правило, длительность мониторинга составляет не менее одного года, что позволяет учесть сезонные колебания ветрового режима.

Применение метеорологической мачты даёт возможность:

- увеличить точность определения ветрового потенциала;
- сократить риски при строительстве ветровых электростанций;
- рационально размещать ветровые турбины;
- повысить эффективность генерации электроэнергии.

Собранные показатели служат основой для построения математических моделей ветровых потоков и прогнозирования уровня выработки электроэнергии, а также для формирования розы ветров — наглядного графического отображения распределения ветров по направлениям за выбранный временной интервал, позволяющего выявить доминирующие ветровые направления на исследуемой территории. Анализ розы ветров является важным этапом проектирования ветровых электростанций, поскольку позволяет определить преобладающие направления и повторяемость ветровых потоков. На основе этих данных обеспечивается оптимальная ориентация и размещение ветровых турбин с целью снижения взаимного влияния и турбулентности, что повышает эффективность работы ветропарка.[3]

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

В рамках исследования на базе кампуса «Простор», расположенного в Бухтарминском районе в Восточно-Казахстанской области, проводились продолжительные наблюдения за ветровыми параметрами с использованием метеорологической мачты. Полученные данные позволили определить усреднённые значения скорости ветра по месяцам и провести анализ ветрового режима исследуемой территории.

Ветровой режим за август–сентябрь 2025 года на территории кампуса «Простор» характеризуется устойчивой двухосной структурой распределения направлений. Наиболее выражено преобладание ветров восточного и юго-восточного сектора, которые формируют основной поток в течение всего рассматриваемого периода. Существенную долю также занимают ветры западного и северо-западного направлений, создавая вторичный поток противоположной ориентации. Ветры северного и южного направлений наблюдаются эпизодически и не оказывают значительного влияния на общую структуру розы ветров. Таким образом, циркуляция воздушных масс носит выраженный двунаправленный характер с доминированием восточного сектора.

Скоростной режим в целом соответствует слабому и умеренному ветру, однако в августе наблюдается большая интенсивность и более частые порывистые усиления по сравнению с сентябрём. В сентябре, напротив, чаще фиксируются периоды штиля и более стабильные условия. В целом за два месяца ветровой режим можно охарактеризовать как умеренный с периодическими кратковременными усилениями. Средняя скорость ветра за август–сентябрь 2025 года составляет около 4.5 м/с, что соответствует умеренному ветровому режиму. При этом в августе наблюдается несколько более высокая средняя скорость за счёт частых порывистых усилений, тогда как в сентябре ветровые условия более спокойные и сопровождаются периодами штиля. В целом за рассматриваемый период ветровой режим можно

охарактеризовать как устойчивый умеренный с эпизодическими усилениями.

Ниже представлена роза ветров за август–сентябрь 2025 года для территории кампуса «Простор». Характеризуется выраженная неравномерность распределения направлений ветра. Наиболее часто наблюдаются ветры восточного и юго-восточного направлений, которые формируют основной поток воздушных масс в течение рассматриваемого периода. Данное направление является доминирующим и определяет особенности ветрового режима. [4]

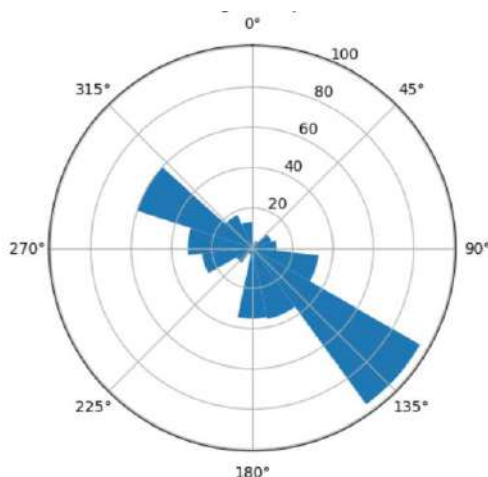


Рисунок 2. Роза ветров по месяцам

Данные являются основой для оценки энергетического потенциала ветра: чем выше средняя скорость на площадке установки, тем больше электроэнергии способна выработать ветроэнергетическая установка.. Эта информация критически важна при планировании ветропарка, поскольку помогает оптимально расположить турбины и минимизировать взаимное влияние турбулентных потоков. Таким образом, систематический анализ ветровых характеристик является ключевым этапом при проектировании ветровых электростанций, обеспечивая объективную оценку ветрового ресурса территории и целесообразность возведения ветроэнергетических объектов.[5]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы была изучена значимость метеорологических мачт при проектировании и эксплуатации ветровых электростанций. Проведённый анализ показал, что достоверность оценки ветрового потенциала территории во многом определяется качеством и продолжительностью метеонаблюдений. Метеомачты обеспечивают сбор надёжной информации о скорости и направлении ветра, уровне турбулентности и других атмосферных параметрах. На базе этих данных выполняется анализ ветрового режима, строятся розы ветров и производятся расчёты мощности ветрового потока.[6] Результаты исследования подтверждают, что использование метеорологических мачт является неотъемлемым этапом планирования ветроэнергетических проектов. Собранные показатели позволяют: оценить энергетический потенциал ветра на конкретной территории; рационально размещать ветровые турбины; прогнозировать годовую выработку электроэнергии; повысить эффективность и надёжность работы ветроустановок.[7] Таким образом, интеграция метеомачт в процесс проектирования ветровых электростанций способствует более точной разработке проектов и снижению технических и экономических рисков при реализации ветроэнергетических объектов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы сообщают, что конфликт интересов отсутствует.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают искреннюю благодарность научному руководителю за оказанную помощь и ценные рекомендации при подготовке статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке данной статьи инструменты искусственного интеллекта использовались для структурирования текста и оформления библиографического списка. Используемая модель: ChatGPT (OpenAI, 2026). Запрос: «предоставить научную информацию о роли метеорологических мачт в электроэнергетике, включая их назначение, области применения и принцип работы» [большая языковая модель]. URL: <https://chat.openai.com/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тони Бертон, Ник Дженкинс, Дэвид Шарп. Ветроэнергетика: основы, технологии и применение. — М.: Энергия, 2021. — 584 с. — URL: <https://www.wiley.com/en-us/Wind+Energy+Handbook-p-9781119994367>
2. Эрнст Хау. Ветровые турбины: основы, технологии и применение. — М.: Техносфера, 2022. — 416 с. — URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-27151-9>
3. Wind speed measurement and instrumentation [Электронный ресурс]. — Windustry. — URL: <https://www.windustry.com/wind-speed-measurement-and-instrumentation.htm>
4. Неофициальная страница: Летняя автоматизированная цифровая метеостанция «Простор». — URL: <https://prostor.choices.kz/>
5. Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2023. — 2023. — URL: <https://www.gwec.net/global-wind-report-2023/>
6. Ковалев В.А.. Возобновляемые источники энергии. — М.: Инфра-М, 2021. — 336 с. — URL: <https://znanium.com>
7. Нестеров А.А., Беляев Н.Д., Карелов А.В., Ефимова В.В., Власов П.П. Основания ветроэнергетических установок на шельфе и их защита от размыва // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. — 2015. — № 7(34). — С. 41–50. — *Construction of Unique Buildings and Structures*. — 2015. — 7(34). — Рр. 41–50. (на рус. и англ. — URL: [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2015/7\(34\)/3_nesterov_34.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2015/7(34)/3_nesterov_34.pdf)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ДЫМОСОСОВ УСТЬ-КАМЕНОГОРСКОЙ ТЭЦ

УДК 620.179.16:621.311.22

Б.Е. Нұрмұхамет^{1*}, А.М. Акаев¹

¹Восточно Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Б.Е. Нұрмұхамет

АННОТАЦИЯ. В статье представлены результаты вибродиагностического обследования трёх дымососов котельного цеха Усть-Каменогорской ТЭЦ, выполненного с применением анализатора состояния механизмов «Leonova Diamond» (SPM Instrument AB). Рассмотрены методы диагностики: широкополосное измерение виброскорости (СКЗ), метод ударных импульсов SPM HD и анализ форм колебаний (ОДС). По результатам обследования выявлен ряд дефектов различной степени тяжести: от слабых дефектов подшипников до ослабления крепления электродвигателя и работы подшипника в условиях недостаточной смазки. Дана оценка технического состояния оборудования в соответствии с ГОСТ ИСО 10816-3-2002 и ISO 10816-3. Предложены рекомендации по устранению выявленных дефектов. Проведён сравнительный анализ применённых методов диагностики.

Ключевые слова: вибродиагностика, дымосос, ТЭЦ, SPM HD, виброскорость, ударные импульсы, техническое состояние, подшипник качения.

ВВЕДЕНИЕ

Дымососы котельного цеха тепловой электростанции относятся к ответственному вспомогательному оборудованию, обеспечивающему тягу газовоздушного тракта котлоагрегатов. Непрерывный режим работы в условиях высокой запылённости, температурных нагрузок и знакопеременных аэродинамических воздействий предопределяет повышенный износ узлов трения и механических соединений. Своевременное выявление дефектов на ранних стадиях развития позволяет предотвратить внеплановые остановки оборудования и снизить затраты на ремонт [1, 2].

На Усть-Каменогорской ТЭЦ (ТОО «Усть-Каменогорская ТЭЦ», г. Усть-Каменогорск, Восточно-Казахстанская область) вибродиагностика вращающихся механизмов выполняется лабораторией технической диагностики (ЛТД) с применением анализатора состояния механизмов «Leonova Diamond» производства SPM Instrument AB (Швеция). Прибор обеспечивает поверенные измерения виброскорости, виброперемещения и диагностику подшипников методом ударных импульсов SPM HD.

Настоящая статья посвящена анализу результатов планового вибродиагностического обследования трёх дымососов (ДС-15А, ДС-15Б, ДС-15В) котельного цеха и сравнению диагностических возможностей применённых методов.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Объектами диагностики являются три дымососа котельного цеха Усть-Каменогорской ТЭЦ — ДС-15А, ДС-15Б и ДС-15В — одного типоразмера с двухскоростными электродвигателями. Все измерения выполнены в идентичном

режиме работы: вторая скорость, частота вращения $n = 745$ об/мин.

Схема дымососа включает четыре подшипниковые опоры: опоры №1 и №2 — подшипники электродвигателя (задний и передний), опоры №3 и №4 — подшипники ходовой части дымососа (опорно-упорный и опорный). На каждой опоре измерения выполнялись в трёх направлениях: вертикальном (Y), горизонтальном (X) и осевом (Z). Итого 12 точек вибрационных измерений и 4 точки SPM HD на каждом дымососе (16 точек всего).

В ходе обследования применялись следующие методы [3, 4]:

— широкополосное измерение среднеквадратического значения (СКЗ) виброскорости V , мм/с, и размаха виброперемещения S , мкм, в диапазоне 10–1000 Гц в соответствии с ГОСТ ИСО 10816-3-2002 [5];

— метод ударных импульсов SPM HD: измерение нормированного уровня HDm и условного значения HDc, определение индекса смазки LUB и кода состояния CODE подшипника;

— анализ форм колебаний (ОДС / контурная характеристика): одновременное измерение вибрации лапы электродвигателя и опорной поверхности подрамника для выявления ослабления крепления.

Оценка вибрационного состояния по широкополосной виброскорости выполнялась по зонам А (новое оборудование), В (допустимое), С (предупреждение), D (недопустимое) в соответствии с ГОСТ ИСО 10816-3-2002 [5] для машин мощностью более 15 кВт с опорами на жёстком фундаменте. Пороговые значения для данного класса: граница зон В/С — 4,5 мм/с, С/D — 7,1 мм/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В таблице 1 приведены сводные результаты измерений виброскорости и SPM HD по всем трём дымососам.

Таблица 1. Результаты вибродиагностики дымососов ДС-15А, ДС-15Б, ДС-15В (28.01.2026, $n = 745$ об/мин)

Точка / параметр	Напр.	ДС-15А V , мм/с	ДС-15Б V , мм/с	ДС-15В V , мм/с	Норма (зона В)	Примечание
Опора №1 — ЭД (задний подшипник)						
	Y (верт.)	1,39	0,87	1,25	$\leq 4,5$	
	X (гор.)	1,78	1,28	0,78	$\leq 4,5$	
	Z (ос.)	0,97	2,65	0,89	$\leq 4,5$	ДС-15Б ↑ из-за дефекта кр.
Опора №2 — ЭД (передний подшипник)						
	Y (верт.)	0,77	4,68 Δ	0,62	$\leq 4,5$	ДС-15Б превышение зоны В
	X (гор.)	1,54	2,69	0,67	$\leq 4,5$	
	Z (ос.)	1,97	4,29	1,39	$\leq 4,5$	
Опора №3 — ходовая часть (опорно-упорный подшипник)						

Точка / параметр	Напр.	ДС-15А V, мм/с	ДС-15Б V, мм/с	ДС-15В V, мм/с	Норма (зона В)	Примечание
	Y (верт.)	1,07	1,08	1,75	≤ 4,5	
	X (гор.)	1,29	1,03	1,52	≤ 4,5	
	Z (ос.)	2,77	3,03	2,97	≤ 4,5	
Опора №4 — ходовая часть (опорный подшипник)						
	Y (верт.)	1,49	0,93	1,27	≤ 4,5	
	X (гор.)	1,72	0,77	1,62	≤ 4,5	
	Z (ос.)	1,28	1,62	1,29	≤ 4,5	

Таблица 2. Результаты SPM HD и оценка состояния подшипников

Опора / ДС	HDm	HDc	LUB	CODE	COND	Дефект SPM HD	Вибросостояние
ДС-15А, оп.1 (ЭД зад.)	8,3	-26,9	6	A	—	Слабый деф.: вращ. сепаратора	Допустимое
ДС-15А, оп.2 (ЭД пер.)	12,3	0,0	2	A	—	Слабый деф.: вращ. сепаратора, тел качения	Допустимое
ДС-15А, оп.3 (х.ч.)	7,0	-2,6	2	A	—	—	Допустимое
ДС-15А, оп.4 (х.ч.)	12,9	-5,5	2	A	—	—	Допустимое
ДС-15Б, оп.1 (ЭД зад.)	7,3	-28,0	6	A	—	Слабый деф.: вращ. сепаратора	Предупреждение
ДС-15Б, оп.2 (ЭД пер.)	2,6	-8,3	4	A	—	—	Предупреждение
ДС-15Б, оп.3 (х.ч.)	7,7	-2,8	2	A	—	—	Предупреждение
ДС-15Б, оп.4 (х.ч.)	9,9	-3,4	2	A	—	—	Допустимое
ДС-15В, оп.1 (ЭД зад.)	0,0	-20,3	5	A	—	Слабый деф.: изм. формы н/кольца	Допустимое
ДС-15В, оп.2 (ЭД пер.)	10,5	0,0	3	A	—	Слабый деф.: вращ. тел качения	Предупреждение
ДС-15В, оп.3 (х.ч.) Δ	14,7	4,8	0 (!)	B	23	Неравн. износ н/кольца, работа всухую	Предупреждение
ДС-15В,	14,5	-2,0	1	A	—	Слабый деф.: изм.	Допустимое

Опора / ДС	HDm	HDc	LUB	CODE	COND	Дефект SPM HD	Вибросостояние
оп.4 (х.ч.)						формы н/кольца	

ДС-15А — техническое состояние РАБОТОСПОСОБНОЕ

Все значения виброскорости не превышают 2,77 мм/с (опора №3, осевое направление), что соответствует зоне А/В по ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Метод SPM HD выявил слабые дефекты подшипников электродвигателя (вращение сепаратора), которые находятся в начальной стадии развития (CODE = А). Индекс смазки LUB = 2 на опорах ходовой части свидетельствует о граничном режиме смазки, рекомендуется проверка и восполнение смазки. Общее вибросостояние — ДОПУСТИМОЕ, приоритет — низкий.

ДС-15Б — техническое состояние РАБОТОСПОСОБНОЕ с ограничением по срокам

Дымосос ДС-15Б показал наиболее высокий уровень виброскорости среди трёх исследованных агрегатов. На опоре №2 (передний подшипник электродвигателя) зафиксировано максимальное значение $V = 4,68$ мм/с в вертикальном направлении, что превышает верхнюю границу зоны В (4,5 мм/с) и соответствует зоне С. Виброперемещение в вертикальном направлении составило 158,77 мкм. Одновременно осевая вибрация опоры №1 достигает 102,63 мкм.

Анализ спектра и контурная характеристика однозначно указывают на источник повышенной вибрации: доминирующий вклад вносит оборотная частота f_r , что характерно для ослабления крепёжных соединений. Измерение методом ОДС показало, что вибрация передней правой лапы электродвигателя составляет 131 мкм, тогда как вибрация опорной поверхности подрамника под той же лапой — лишь 22 мкм. Разница в 6 раз свидетельствует о значительном механическом ослаблении крепления лапы к подрамнику [3]. Подшипниковые опоры ходовой части находятся в допустимом состоянии; повышенная вибрация опор №3 также обусловлена дефектом установки электродвигателя.

ДС-15В — техническое состояние РАБОТОСПОСОБНОЕ

На дымососе ДС-15В выявлен наиболее серьёзный дефект подшипникового узла. Подшипниковая опора №3 ходовой части (опорно-упорный подшипник) характеризуется кодом CODE = В («предупреждение, работа при недостатке смазки»), индексом LUB = 0 («работа всухую») и значением COND = 23, что соответствует незначительному повреждению поверхности качения. Метод SPM HD зафиксировал на спектре характерные частоты изменения формы наружного кольца (дефект типа А). Примечательна динамика тренда: максимальный уровень HDm = 25 дБ был зафиксирован, после чего произошло снижение до HDm = 15 дБ. Данное снижение не означает улучшения состояния — оно обусловлено «закатыванием» (сглаживанием) дефектных участков на наружной обойме при продолжающемся развитии дефекта [4]. Уровень виброускорения на опоре №3 составляет 15,2 м/с², на опоре №4 — 16,2 м/с², оба значения находятся в предупредительной зоне. Дополнительно выявлены дефекты направляющего аппарата: неравномерное угловое положение лепестков и/или нарушение зазоров между рабочим колесом и всасывающими воронками.

СРАВНЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

По результатам обследования трёх дымососов можно дать сравнительную оценку применённых методов (таблица 3).

Таблица 3. Сравнительная эффективность методов вибродиагностики для дымососов ТЭЦ

Тип дефекта	Виброскорость (СКЗ)	SPM HD	Метод ОДС	Вывод
Ослабление крепления ЭД	Выявляет (рост V на оп.2)	Не выявляет (CODE=A)	Выявляет однозначно (131 vs 22 мкм)	ОДС — приоритетный метод
Слабый дефект подшипника (нач. стадия)	Не выявляет (V в норме)	Выявляет (вращ. сепаратора, тел кач.)	Не применимо	SPM HD — единственный метод
Недостаток смазки подшипника	Не выявляет	Выявляет (LUB=0, CODE=B)	Не применимо	SPM HD — единственный метод
Дефекты направляющего аппарата	Косвенно (рост a на оп.4)	Не выявляет	Частично	Комплексный анализ спектра
Оценка общего вибросостояния	Основной метод нормирования (ГОСТ ИСО 10816)	Дополняет	Дополняет	Виброскорость — базовый метод

Ключевой вывод из сравнительного анализа: ни один метод не является универсальным. Широкополосная виброскорость обязательна как нормируемый параметр и даёт картину общего состояния машины, однако не способна выявить начальные дефекты подшипников и проблемы смазки. Метод SPM HD незаменим для ранней диагностики подшипников качения и оценки состояния смазки — дефекты, зафиксированные на ДС-15А и ДС-15В, были бы пропущены при контроле только по виброскорости. Метод ОДС позволил однозначно идентифицировать источник повышенной вибрации на ДС-15В, что было бы невозможно только по широкополосным значениям [3, 4].

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УСТРАНЕНИЮ ДЕФЕКТОВ

По результатам обследования даны следующие технические рекомендации:

ДС-15А: проверить и при необходимости восполнить смазку подшипников ходовой части (опоры №3, №4: LUB = 2). Продолжить периодический мониторинг состояния подшипников электродвигателя (слабые дефекты, CODE = А). Периодичность контрольных измерений — 1 раз в месяц.

ДС-15В: требует первоочередного устранения дефекта крепления электродвигателя к подрамнику. Необходимо: установить причину ослабления крепёжного соединения, проверить состояние резьбы болтов и резьбовых отверстий в теле подрамника, при необходимости заменить крепёж и/или восстановить резьбу. После проведения работ обеспечить равномерную затяжку всех лап электродвигателя с контролем усилия затяжки. Выполнить повторные вибрационные измерения после ремонта. До устранения дефекта — усиленный контроль, периодичность измерений не реже 1 раза в 2 недели.

ДС-15В: первоочередная задача — восстановление нормального режима смазки подшипника ходовой части №3 (LUB = 0, работа всухую). Необходимо проверить уровень масла в корпусе опорно-упорного подшипника №3 и долить до нормального уровня. Учитывая зафиксированное повреждение наружного кольца (COND = 23) и

риск «закатывания» дефекта при снижении уровня SPM, рекомендуется установить подшипник на постоянный мониторинг с периодичностью измерений 1 раз в 2 недели. Произвести ревизию и ремонт направляющего аппарата со стороны опоры №4. Производить контроль вибрации опоры №2 электродвигателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вибродиагностическое обследование трёх дымососов Усть-Каменогорской ТЭЦ, выполненное с применением анализатора «Leonova Diamond», позволило получить полную картину технического состояния оборудования и выявить дефекты на разных стадиях развития.

Дымосос ДС-15А находится в работоспособном состоянии с низким приоритетом обслуживания; выявленные начальные дефекты подшипников требуют мониторинга. На ДС-15Б зафиксировано значительное ослабление крепления электродвигателя, вызывающее превышение допустимого уровня виброскорости; требуется срочное проведение ремонтных работ. Наиболее критичная ситуация — на подшипнике ходовой части ДС-15В, работающем в условиях полного отсутствия смазки с признаками начального повреждения поверхностей качения.

Сравнительный анализ показал, что комплексное применение трёх методов — виброскорости, SPM HD и ОДС — обеспечивает достоверную диагностику оборудования, тогда как использование каждого метода в отдельности приводит к пропуску дефектов. Данный вывод подтверждает целесообразность реализации многометодного подхода в системе вибромониторинга тепловых электростанций.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы сообщают, что конфликт интересов отсутствует..

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за ценные рекомендации при подготовке статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: не использовался

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. — СПб.: Изд-во СМБО, 2000. — 169 с.
2. Нефёдов А.И. Вибрационная диагностика оборудования электростанций. — М.: Энергоатомиздат, 2003. — 320 с.
3. SPM Instrument AB. Leonova Diamond User Manual. — Strängnäs: SPM Instrument AB, 2020. — 214 p.
4. Ширман А.Р., Соловьёв А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. — М., 1996. — 276 с.
5. ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт. — М.: Изд-во стандартов, 2002.
6. ГОСТ 31351-2007. Вибрация. Вентиляторы промышленные. Измерения вибрации. — М.: Стандартинформ, 2008.
7. Закон Республики Казахстан от 9 июля 2004 года № 588-III «Об электроэнергетике». — Астана, 2004.

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ ТРУБОПРОВОДНЫХ ЭСТАКАД В СТРОИТЕЛЬСТВЕ, АРХИТЕКТУРЕ И ЭНЕРГЕТИКЕ

УДК 004.8:624:62

А.Е. Омартаева^{1*}

¹Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева,
г.Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Айнур Ермаковна Омартаева, e-mail: kaseshka.ru@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассматриваются современные направления интеграции Искусственный интеллект в процессы проектирования, анализа и эксплуатации инженерных сооружений. Особое внимание уделено вопросам повышения сейсмобезопасности трубопроводных эстакад как элементов критической инфраструктуры в условиях сейсмоактивных регионов. Обоснована целесообразность применения методов машинного обучения, цифровых двойников и интеллектуальных систем мониторинга. Представлены перспективы использования ИИ для оптимизации конструктивных решений и повышения надежности объектов энергетической инфраструктуры.

Ключевые слова: искусственный интеллект, сейсмобезопасность, трубопроводные эстакады, цифровой двойник, машинное обучение, инженерные системы.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях развития глобальной экономики и ускоренной урбанизации особое значение приобретает обеспечение надежности и безопасности инженерной инфраструктуры. Интенсивное развитие промышленности, энергетики и транспортных систем приводит к увеличению нагрузки на инженерные сооружения, что требует внедрения новых подходов к их проектированию, строительству и эксплуатации.

Особую актуальность данная проблема приобретает в регионах с повышенной сейсмической активностью, к которым относится значительная часть территории Республики Казахстан. Восточно-Казахстанская область, включая город Усть-Каменогорск, характеризуется наличием потенциально опасных геодинамических процессов, способных оказывать существенное влияние на устойчивость инженерных сооружений. В этих условиях обеспечение сейсмобезопасности становится не только инженерной, но и социально-экономической задачей, напрямую связанной с предотвращением техногенных аварий и минимизацией ущерба.

Трубопроводные эстакады представляют собой важнейшие элементы промышленной и энергетической инфраструктуры, обеспечивающие транспортировку нефти, газа, химических веществ и других ресурсов. Их разрушение в результате сейсмических воздействий может привести к серьезным экологическим, экономическим и технологическим последствиям. В отличие от зданий и сооружений компактного типа, трубопроводные эстакады обладают значительной протяженностью, гибкостью и сложной конструктивной схемой, что существенно усложняет задачу обеспечения их устойчивости при динамических нагрузках.

Традиционные методы расчета и проектирования, основанные на детерминированных подходах и упрощенных моделях, не всегда позволяют в полной мере учесть сложность поведения таких систем при воздействии реальных землетрясений. Ограниченность исходных данных, вариативность сейсмических

воздействий и нелинейный характер деформационных процессов требуют применения более гибких и адаптивных методов анализа.

В этой связи особую значимость приобретает внедрение технологий Искусственный интеллект, которые открывают новые возможности для обработки больших объемов данных, моделирования сложных процессов и принятия инженерных решений в условиях неопределенности. Использование методов машинного обучения позволяет выявлять скрытые закономерности в поведении конструкций, прогнозировать их отклик на внешние воздействия и оптимизировать параметры проектируемых систем.

Интеграция ИИ в Строительство способствует переходу от традиционного проектирования к интеллектуальным системам, способным адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации. В свою очередь, в архитектуре ИИ используется для формирования оптимальных конструктивных решений с учетом многокритериальных требований, включая безопасность, экономичность и устойчивость.

Особое значение применение интеллектуальных технологий приобретает в энергетике, где надежность инфраструктуры является критическим фактором устойчивого функционирования отрасли. Трубопроводные системы, являясь частью энергетической инфраструктуры, требуют постоянного мониторинга и анализа их технического состояния, что может эффективно осуществляться с использованием ИИ.

В рамках настоящего исследования рассматривается возможность применения искусственного интеллекта для повышения сейсмобезопасности трубопроводных эстакад. Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки современных методов анализа и проектирования, способных учитывать сложные динамические процессы и обеспечивать высокий уровень надежности конструкций в условиях сейсмических воздействий.

Целью статьи является обоснование эффективности применения технологий искусственного интеллекта в задачах повышения сейсмостойкости трубопроводных эстакад, а также определение перспектив их внедрения в практику инженерного проектирования и эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методология исследования базируется на комплексном применении теоретических, численных и интеллектуальных методов анализа, направленных на изучение поведения трубопроводных эстакад при сейсмических воздействиях и разработку эффективных решений по повышению их устойчивости.

1. Теоретическая база исследования

Теоретическую основу работы составляют положения:

- теории динамики сооружений;
- теории сейсмостойкости;
- методов сейсмоизоляции и сейсмогашения;
- современных подходов в области Строительство и Архитектура.

Дополнительно используются концепции цифровизации инженерной деятельности и внедрения интеллектуальных систем в анализ сложных технических объектов.

2. Методы исследования

В работе применен комплекс взаимодополняющих методов:

2.1 Аналитические методы

- анализ научной и нормативной литературы;
- сравнительный анализ существующих методов сейсмозащиты;

- систематизация инженерных решений.

2.2 Численные методы

- моделирование динамического поведения трубопроводных эстакад;
- анализ отклика конструкций на реальные и синтетические акселерограммы;
- оценка напряженно-деформированного состояния элементов.

2.3 Методы искусственного интеллекта

- применение алгоритмов машинного обучения для обработки сейсмических данных;
- построение моделей прогнозирования поведения конструкций;
- использование методов предиктивной аналитики для оценки риска повреждений.

2.4 Методы оптимизации

- многокритериальная оптимизация параметров сейсмоизоляции;
- подбор конструктивных решений с учетом минимизации динамических нагрузок;
- анализ эффективности различных конфигураций систем защиты.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методологическая схема исследования включает следующие этапы:

1. Сбор и анализ исходных данных
 - изучение характеристик объекта (трубопроводной эстакады);
 - анализ сейсмических условий региона.
2. Формирование расчетной модели
 - создание модели конструкции;
 - определение граничных условий и нагрузок.
3. Моделирование сейсмических воздействий
 - использование акселерограмм реальных землетрясений;
 - генерация синтетических воздействий.
4. Применение методов ИИ
 - обработка данных;
 - обучение моделей прогнозирования;
 - анализ результатов.
5. Оценка эффективности решений
 - сравнение вариантов сейсмозащиты;
 - выбор оптимальных параметров.

4. Информационная и эмпирическая база

Информационной базой исследования являются:

- результаты ранее выполненных научных исследований;
- данные о сейсмических воздействиях;
- инженерные характеристики трубопроводных систем;
- результаты моделирования и расчетов.

Эмпирическая база включает анализ поведения реальных конструкций и использование акселерограмм прошлых землетрясений.

5. Ограничения методологии

Методология исследования учитывает следующие ограничения:

- ограниченность доступных экспериментальных данных;
- необходимость адаптации моделей ИИ к инженерным задачам;
- влияние неопределенности параметров сейсмических воздействий.

Научная новизна работы заключается в комплексном подходе к повышению сейсмобезопасности трубопроводных эстакад на основе интеграции методов Искусственный интеллект в процессы инженерного анализа, проектирования и

эксплуатации.

В отличие от существующих исследований, ориентированных преимущественно на классические методы расчета сейсмостойкости, в данной работе предложено объединение детерминированных инженерных моделей с интеллектуальными алгоритмами обработки данных, что позволяет учитывать сложный нелинейный характер динамического отклика конструкций.

К основным элементам научной новизны относятся:

1. Разработка концепции интеллектуального анализа сейсмической устойчивости трубопроводных эстакад, основанной на использовании методов машинного обучения для обработки акселерограмм и прогнозирования поведения конструкций при различных сценариях сейсмических воздействий.
2. Интеграция моделей искусственного интеллекта с традиционными расчетными схемами, применяемыми в Строительстве, что обеспечивает повышение точности оценки напряженно-деформированного состояния конструкций.
3. Предложение подхода к оптимизации параметров систем сейсмоизоляции (жесткости, демпфирования, конфигурации опор) с использованием интеллектуальных алгоритмов, позволяющих минимизировать динамические отклики и повысить устойчивость сооружений.
4. Адаптация концепции цифрового двойника к трубопроводным эстакадам, функционирующим в условиях сейсмоактивных регионов, что позволяет осуществлять мониторинг состояния конструкции в режиме реального времени и прогнозировать развитие повреждений.
5. Обоснование возможности применения предиктивной аналитики в Энергетика, направленной на предупреждение аварийных ситуаций и снижение эксплуатационных рисков трубопроводных систем.
6. Комплексная оценка эффективности применения ИИ в задачах повышения сейсмобезопасности, включающая анализ снижения динамических нагрузок, уменьшения амплитуд колебаний и повышения надежности конструкций.

Таким образом, научная новизна исследования заключается в разработке междисциплинарного подхода, объединяющего методы инженерной механики и искусственного интеллекта для решения актуальной задачи повышения сейсмостойкости трубопроводных эстакад.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования была рассмотрена роль современных интеллектуальных технологий в обеспечении надежности и безопасности инженерных сооружений, функционирующих в условиях сейсмических воздействий. Особое внимание было уделено трубопроводным эстакадам как элементам критической инфраструктуры, устойчивость которых напрямую влияет на безопасность промышленных и энергетических систем.

Анализ показал, что традиционные методы проектирования и расчета, несмотря на их широкое распространение, обладают рядом существенных ограничений, связанных с невозможностью учета всей совокупности факторов, влияющих на поведение конструкций при динамических нагрузках. В частности, сложный характер сейсмических воздействий, нелинейность деформационных процессов, а также вариативность параметров конструкций требуют применения более гибких и адаптивных подходов.

Внедрение технологий искусственного интеллекта позволяет существенно расширить возможности инженерного анализа за счет использования методов обработки больших данных, машинного обучения и интеллектуального моделирования. Применение данных технологий обеспечивает переход от

статических расчетных моделей к динамическим системам, способным учитывать изменение параметров во времени и адаптироваться к различным сценариям внешних воздействий.

В рамках исследования установлено, что использование ИИ в задачах анализа сейсмической устойчивости трубопроводных эстакад позволяет:

- повысить точность прогнозирования динамического отклика конструкций;
- выявлять потенциально опасные зоны и элементы конструкции;
- оптимизировать параметры систем сейсмоизоляции и демпфирования;
- снижать уровень напряжений и деформаций в элементах конструкции;
- повышать общую надежность и долговечность сооружений.

Особую значимость представляет применение концепции цифровых двойников, позволяющей создать виртуальную модель объекта и осуществлять его мониторинг в режиме реального времени. Это открывает возможности для перехода к проактивному управлению техническим состоянием сооружений, при котором потенциальные повреждения выявляются на ранних стадиях, что существенно снижает риск аварий.

В контексте развития Строительство и Архитектура внедрение ИИ способствует формированию новых подходов к проектированию, основанных на принципах устойчивости, адаптивности и ресурсной эффективности. В свою очередь, в Энергетика применение интеллектуальных систем обеспечивает повышение надежности инфраструктуры и снижение эксплуатационных затрат.

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение искусственного интеллекта в инженерную практику сопровождается рядом проблем, включая необходимость формирования больших массивов достоверных данных, адаптацию существующих нормативных документов и подготовку специалистов, обладающих междисциплинарными знаниями в области инженерии и информационных технологий.

Тем не менее, анализ современных тенденций развития науки и техники свидетельствует о том, что дальнейшая цифровизация инженерной деятельности является неизбежной. Искусственный интеллект становится неотъемлемым инструментом в решении сложных инженерных задач, связанных с обеспечением безопасности и надежности объектов инфраструктуры.

Таким образом, применение интеллектуальных технологий в задачах повышения сейсмобезопасности трубопроводных эстакад представляет собой перспективное направление научных исследований и практической деятельности. Реализация предложенных подходов позволит повысить уровень защиты инженерных сооружений, снизить риски техногенных аварий и обеспечить устойчивое развитие промышленной и энергетической инфраструктуры в условиях сейсмоактивных регионов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность коллегам за методологическую поддержку и полезные обсуждения.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Chopra A.K. Dynamics of Structures. – Prentice Hall, 2017.
<https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/dynamics-of-structures/P200000003479>
- Clough R., Penzien J. Dynamics of Structures. – McGraw-Hill, 2003.
<https://www.mheducation.com/highered/product/dynamics-structures-clough/M9780070113945.html>
- Goodfellow I., Bengio Y. Deep Learning. – MIT Press, 2016.
<https://www.deeplearningbook.org/>
- Orazbaev K.B. Исследование сейсмостойкости сооружений в Казахстане.– Алматы, 2018. (жергілікті ғылыми базалардан іздеу ұсынылады)
<https://www.elibrary.ru/>
- Shulzhenko S.S. Методы сейсмоизоляции промышленных объектов. – Москва, 2020.
<https://www.elibrary.ru/>
- ISO 3010: Basis for design of structures — Seismic actions
<https://www.iso.org/standard/34162.html>

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

УДК 44.31

Б.Е. Омерзак¹, А.Т. Байдилдина¹

¹Восточно Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г.Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Б.Е. Омерзак

АННОТАЦИЯ В условиях ускоряющейся цифровой трансформации промышленности и энергетического сектора возрастает значение интеллектуальных систем управления, обеспечивающих комплексную обработку технологической, эксплуатационной и нормативной информации. В таких условиях традиционные методы диспетчерского управления и локальные автоматизированные системы контроля не обеспечивают необходимого уровня интеграции данных и поддержки принятия инженерных решений.

В работе рассматривается концепция создания универсальной программной платформы интеллектуального управления энергосистемой промышленного предприятия на основе технологий искусственного интеллекта. Архитектура системы включает четыре ключевых функциональных модуля: интерактивную цифровую схему – макет энергоустановок, интеллектуальную библиотеку нормативно-технических документов, модуль инженерного проектирования и моделирования технологических режимов, а также аналитический блок обработки эксплуатационной отчетности и архивных данных. Интеграция указанных компонентов позволяет сформировать цифровой двойник энергетической инфраструктуры предприятия, синхронизированный с реальными параметрами технологических процессов.

Ключевые слова: искусственный интеллект, цифровой двойник, промышленная энергетика, интеллектуальная платформа управления, машинное обучение, предиктивная аналитика, инженерное моделирование, SCADA-системы, поддержка принятия решений.

ВВЕДЕНИЕ

Современные энергетические системы промышленных предприятий представляют собой сложные инженерно-технологические комплексы, включающие источники тепловой и электрической энергии, распределительные сети, теплообменное оборудование, насосные станции, системы подготовки теплоносителя, системы водоподготовки, а также вспомогательные установки и инфраструктуру автоматизации. Функционирование таких систем осуществляется в условиях непрерывного изменения технологических нагрузок, сезонных колебаний параметров окружающей среды и значительного влияния эксплуатационных факторов.

Основными источниками данных о состоянии энергетической инфраструктуры являются автоматизированные системы управления технологическими процессами, системы коммерческого и технического учета энергоресурсов, диспетчерские/оперативные журналы, эксплуатационные отчеты персонала. Однако на практике данные из указанных источников часто существуют в виде разрозненных информационных потоков и не интегрированы в единую аналитическую среду. Несмотря на широкое внедрение современных средств автоматизации, на

большинстве промышленных предприятий сохраняется фрагментарность информационной базы энергетического хозяйства.

Дополнительным фактором, ограничивающим эффективность управления энергетическими системами, является высокий уровень влияния человеческого фактора при анализе технологической информации. Такой подход не всегда обеспечивает своевременное выявление скрытых отклонений в работе оборудования.

Одним из наиболее перспективных направлений является концепция цифровых двойников, позволяющая создавать виртуальные модели реальных технических систем, в том числе синхронизированные с их текущим состоянием на основе потоков телеметрических данных. Применение технологий машинного обучения и интеллектуального анализа данных позволяет выявлять скрытые закономерности в работе энергетических систем и формировать рекомендации по повышению эффективности эксплуатации оборудования.

В этой связи актуальной научно-технической задачей является разработка универсальной интеллектуальной программной платформы, обеспечивающей интеграцию технологических, эксплуатационных и нормативных данных в рамках единой цифровой среды.

Целью настоящей работы является разработка концептуальной архитектуры интеллектуальной программной платформы управления энергосистемой промышленного предприятия, основанной на использовании технологий искусственного интеллекта и цифрового моделирования всей энергетической инфраструктуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Концепция интеллектуальной программы

Цифровой двойник энергетической системы представляет собой интегрированную информационно-аналитическую модель, включающую структурное описание оборудования, параметры технологических процессов, характеристики энергетических потоков и эксплуатационные показатели функционирования установок.

Формирование такой модели требует объединения данных различной природы, включая: технологические параметры работы оборудования (температура, давление, расход, уровень, мощность); диагностические показатели технического состояния агрегатов; текстовую информацию эксплуатационных отчетов и оперативных журналов; нормативно-техническую документацию; результаты инженерных расчетов и моделирования режимов.

Важным элементом предлагаемой концепции является применение методов машинного обучения для анализа режимов работы энергетического оборудования. Использование алгоритмов интеллектуального анализа данных позволяет выявлять статистические зависимости между параметрами технологических процессов и эксплуатационными характеристиками оборудования.

Использование технологий обработки естественного языка позволяет извлекать структурированные данные из текстовых сообщений персонала и сопоставлять их с телеметрическими параметрами оборудования.

В отличие от традиционных интерфейсов SCADA-систем, ориентированных преимущественно на отображение сигналов отдельных датчиков и исполнительных механизмов, предлагаемая система обеспечивает формирование интегрированной цифровой модели энергетической инфраструктуры предприятия.

Интерактивная схема включает такие элементы: источники тепловой и

электрической энергии; насосные станции и циркуляционные контуры; трубопроводные сети; теплообменное оборудование; запорно-регулирующую арматуру; измерительные приборы и датчики технологических параметров и т.п.

Каждый элемент схемы связан с соответствующими телеметрическими параметрами, поступающими из систем автоматизации технологических процессов. В местах где отсутствует АСУ ТП, анализ и визуализация формируются на основании отчетов, зафиксированных оперативным персоналом. Особенностью предлагаемого подхода является интеграция текстовой информации эксплуатационных сообщений с телеметрическими данными. Система осуществляет автоматический анализ сообщений оперативного персонала с применением алгоритмов обработки естественного языка.

Эксплуатация энергетического оборудования осуществляется в соответствии с требованиями значительного количества нормативных документов, включая отраслевые стандарты, правила технической эксплуатации, методические указания и регламенты. Однако на практике использование нормативной документации в оперативной деятельности инженерного персонала часто ограничено. Это связано с большим объемом документов, сложностью поиска необходимой информации и значительными временными затратами на анализ требований различных нормативных актов.

Для решения данной проблемы в составе интеллектуальной платформы предлагается создание специализированного модуля — интеллектуальной нормативной библиотеки. В отличие от традиционных электронных архивов документов, предлагаемая система использует методы семантического анализа текстовой информации. Это позволяет выполнять поиск документов не только по ключевым словам, но и по смысловому содержанию запроса пользователя.

Кроме того, система способна автоматически сопоставлять текущие технологические параметры оборудования с требованиями нормативных документов. Например, при несоответствии допустимого значения параметров система формирует уведомление и выводит соответствующие нормативные требования.

Такой подход обеспечивает переход от пассивного хранения нормативной документации к ее активному использованию в процессе эксплуатации энергетического оборудования.

Важной составляющей интеллектуальной платформы является модуль инженерного анализа и моделирования технологических режимов работы энергетического оборудования. Данный модуль предназначен для проведения расчетов, разработки технологических решений и анализа возможных режимов эксплуатации энергетических систем. Основными функциями модуля являются: построение расчетных схем энергетических систем; гидравлический расчет трубопроводных сетей; теплотехнический анализ тепловых процессов; моделирование аварийных и переходных режимов; оптимизация параметров работы оборудования.

Дополнительно в модуле могут быть реализованы алгоритмы машинного обучения, позволяющие уточнять расчетные зависимости на основе накопленной статистики эксплуатации оборудования. Например, регрессионные модели могут использоваться для определения фактических характеристик теплообменных аппаратов с учетом загрязнения поверхностей теплообмена.

Эксплуатационная отчетность является важным источником информации о функционировании энергетических систем предприятия. Она включает сменные рапорты, записи в журналах дефектов и неполадок оборудования, отчеты о расходе энергоресурсов, данные водно-химического режима и информацию о проведении технического обслуживания оборудования.

Интеллектуальная платформа предусматривает автоматизированную обработку эксплуатационных данных с использованием методов анализа больших данных и машинного обучения. Система выполняет следующие задачи: извлечение информации из текстовых отчетов; структурирование данных журналов; выявление статистических закономерностей; обнаружение аномальных режимов работы оборудования.

Использование методов предиктивной аналитики позволяет прогнозировать вероятность отказов оборудования на основе анализа динамики эксплуатационных параметров.

Архитектура интеллектуальной платформы управления энергетическим оборудованием включает несколько функциональных уровней обработки информации.

Первый уровень представляет собой уровень сбора данных. На данном этапе осуществляется получение информации от различных источников.

На втором уровне выполняется структурирование и хранение данных в централизованной базе данных.

Третий уровень включает аналитические алгоритмы обработки данных, реализующие методы машинного обучения и статистического анализа.

Четвертый уровень представляет собой пользовательский интерфейс системы, обеспечивающий взаимодействие инженерно-технического персонала с интеллектуальной платформой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение интеллектуальной платформы управления энергетическим оборудованием позволяет существенно повысить эффективность эксплуатации энергетических систем промышленного предприятия.

К основным результатам внедрения можно отнести:

- Повышение надежности оборудования;
- Снижение аварийности;
- Повышение энергоэффективности;
- Снижение эксплуатационных затрат;
- Снижение влияния человеческого фактора.

В совокупности указанные факторы создают предпосылки для перехода к цифровой модели управления энергетической инфраструктурой промышленного предприятия.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Мы авторы данной научной статьи заявляем об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. При подготовке данной статьи инструменты искусственного интеллекта не использовались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий. — М.: Академия, 2013. — 352 с.
2. Тарасов В. И., Бутузов В. Ф. Теплоэнергетические установки промышленных предприятий. — М.: Энергоатомиздат, 2012. — 416 с.
3. Копылов А. С. Тепловые электрические станции. — М.: Издательство МЭИ, 2016. — 512 с.
4. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети. — М.: Издательство МЭИ, 2015. — 472 с.

УЛУЧШЕНИЕ СВОЙСТВ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДИФИКАТОРА «ЭЛАДРОМ»

УДК 625.355.5

Г.А.Оразбаев^{1*}, А.Е.Қасымов¹, Б.М.Абдеев¹

¹ВКТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Оразбаев Галымбек Армиянович, e-mail: galym_70@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Улучшение эксплуатационных характеристик асфальтобетонных покрытий является одной из ключевых задач современной дорожной отрасли. В данной работе рассматривается применение модификатора «Эладром» для повышения качества асфальтобетонной смеси. Основное внимание уделено анализу влияния добавки на физико-механические свойства материала, такие как прочность, водостойкость, трещиностойкость и устойчивость к колееобразованию.

Показано, что использование модификатора «Эладром» способствует формированию более плотной и устойчивой структуры асфальтобетона, улучшает адгезию между битумом и минеральными компонентами, а также повышает долговечность покрытия при воздействии климатических и транспортных нагрузок. Проведённые исследования подтверждают эффективность применения данного модификатора в дорожном строительстве, что позволяет рекомендовать его для использования при устройстве и ремонте автомобильных дорог.

Полученные результаты имеют практическое значение и могут быть использованы для оптимизации состава асфальтобетонных смесей с целью повышения надежности и срока службы дорожных покрытий.

В статье рассматриваются вопросы повышения в Республике Казахстан эксплуатационных характеристик асфальтобетонных смесей путем применения модификатора «Эладром». Приводятся теоретические основы модификации битумных вяжущих, результаты лабораторных испытаний, а также анализ влияния добавки на прочностные, деформационные и температурные свойства асфальтобетона. Представлены расчетные зависимости, таблицы и иллюстрации.

Ключевые слова: асфальтобетон, модификатор, битум, Эладром, прочность, деформация, долговечность.

ВВЕДЕНИЕ

Современное дорожное строительство в РК требует применения материалов с повышенной устойчивостью к нагрузкам, температурным колебаниям и воздействию окружающей среды. Одним из эффективных способов улучшения свойств асфальтобетона является модификация битумного вяжущего специальными добавками.

Модификатор «Эладром» представляет собой комплексную добавку, улучшающую адгезию, эластичность и устойчивость к колееобразованию. Его применение позволяет повысить срок службы дорожных покрытий и снизить затраты на ремонт.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Асфальтобетон является композиционным материалом, состоящим из минерального скелета и битумного вяжущего. Его свойства определяются взаимодействием компонентов.

Основные характеристики асфальтобетона: прочность при сжатии, устойчивость к сдвигу, водостойкость, трещиностойкость.

Основные расчетные зависимости на прочность асфальтобетона при сжатии определяется по формуле:

$$R = \frac{P}{A}$$

где: R – прочность, МПа

P – разрушающая нагрузка, Н

A – площадь образца, м²

Модуль упругости:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

где: σ – напряжение

ε – относительная деформация

Коэффициент водостойкости:

$$K_w = \frac{R_{вл}}{R_{сух}}$$

Модификатор «Эладром» обладает следующими характеристиками: повышает адгезию битума к минеральным материалам, увеличивает эластичность покрытия, снижает температурную хрупкость, повышает устойчивость к старению.

Механизм действия - Модификатор изменяет структуру битума, формируя пространственную полимерную сетку, что приводит к: увеличению вязкости, повышению сопротивления деформациям, снижению трещинообразования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Состав смеси компонентов для улучшение асфальтобетонной покрытия при использовании эладрома, щебня, песка, битума и минерального порошка, процентном содержании показано на таблице 1.

Таблица 1. Состав смеси

Компонент	Содержание, %
Щебень	45
Песок	40
Минеральный порошок	10
Битум	5
Эладром	0–1.5

Результаты испытаний по прочности, водостойкости и устойчивости к образованию трещинами с добавками эладрома и без добавок показано на таблице 2.

Таблица 2. Показатели без добавок и с использованием эладрома

Показатель	Без добавки	С Эладром
Прочность при сжатии, МПа	3.5	4.8
Водостойкость	0.82	0.94
Модуль упругости, МПа	1200	1600
Устойчивость к колееобразованию	Низкая	Высокая

где, видно по показателем на таблице 2, с использованием добавок эладрома повышение качество асфальтобетонной покрытия по прочности, водостойкости, модуль упругости, устойчивость на колееобразованию улучшается в разы.

Результаты показывают значительное улучшение свойств асфальтобетона при использовании модификатора.

Прочность увеличивается по зависимости:

$$R = R_0(1 + kC)$$

где: С – содержание модификатора

k – эмпирический коэффициент деформационных характеристик:

Добавка снижает остаточные деформации:

$$\varepsilon_{\text{ост}} = \varepsilon_0 e^{-aC}$$

Преимущества применения эладрома увеличивает срока службы покрытия на 30–50% и снижение затрат на ремонт. Повышает устойчивости к климатическим воздействиями и улучшает эксплуатационных характеристик.

Модифицированный асфальтобетон рекомендуется применять:

- 1) на автомобильных дорогах высокой категории
- 2) в зонах с интенсивным движением
- 3) в регионах с резкими перепадами температур

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого анализа применения модификатора «Эладрома» в Республике Казахстан установлено, что данный продукт обладает потенциалом для повышения эффективности технологических процессов в соответствующей отрасли. Его использование способствует улучшению эксплуатационных характеристик, повышению устойчивости материалов (или процессов) к внешним воздействиям и оптимизации производственных показателей.

Вместе с тем, при внедрении модификатора необходимо учитывать нормативно-правовые требования Республики Казахстан, а также проводить комплексную оценку его воздействия на окружающую среду и здоровье человека. Особое внимание должно уделяться соблюдению стандартов качества, безопасности и сертификации продукции.

Перспективы дальнейшего применения «Эладрома» связаны с расширением области его использования, проведением дополнительных исследований и адаптацией технологии к региональным условиям. Это позволит обеспечить устойчивое развитие отрасли и повысить её конкурентоспособность на внутреннем и внешнем рынках.

Таким образом, использование модификатора «Эладрома» при соблюдении всех регламентов и требований может рассматриваться как эффективное направление модернизации и повышения качества производственных процессов в Казахстане.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ. Данное исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования в рамках учебной и научно-исследовательской деятельности.

БЛАГОДАРНОСТИ. Автор выражает благодарность научному руководителю за методологическую поддержку, конструктивные замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению качества исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. При подготовке данной статьи инструменты искусственного интеллекта не использовались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Леонович, Иван Иосифович. Дорожно-строительные материалы [Учеб. для вузов по спец. 1211 "Автомоб. дороги"] / И. И. Леонович, К. Ф. Шумчик. — Минск : Вышэйш. шк., 1983. — 399 с. : ил. : 21 см.; ISBN В пер. (В пер.).Петров П.П.

https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001141822/

СТ РК 1225-2019 «Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия»

https://prg.kz/document/?doc_id=34171388

ГОСТ 9128-2013. Смеси асфальтобетонные.

<https://www.mos.ru/upload/documents/files/7019/GOST9128-2013.pdf>

Киричек Ю.А., Демьяненко В.В., Сухоребрый А.А. Экспериментальные исследования свойств модифицированных битумов, применяющихся в дорожном строительстве

<https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-svoystv-modifitsirovannyh-bitumov-primenyayuschih-sya-v-dorozhnom-stroitelstve/viewer>

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗДАНИЯ С РАЗРАБОТКОЙ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УСИЛЕНИЮ

УДК 699.841

О.В. Парубчишин^{1*}, А.В. Хапин¹

¹ВКТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Парубчишин Олег Владиславович, e-mail:

Parybchishin.oleg@mail.ru.

АННОТАЦИЯ: В статье представлена оценка технического состояния и сейсмической безопасности промышленного здания металлургического предприятия. Актуальность обусловлена длительной эксплуатацией, физическим износом конструкций, воздействием агрессивной производственной среды и ужесточением требований к сейсмостойкости.

Проведены анализ проектной и эксплуатационной документации, визуальное и инструментальное обследование строительных конструкций с последующими поверочными расчетами. Выявлены отдельные несоответствия проектным и нормативным требованиям, а также дефекты, обусловленные эксплуатационными воздействиями. Разработаны рекомендации по усилению отдельных конструктивных элементов, а также предложены мероприятия по повышению сейсмической устойчивости здания. Полученные результаты могут быть использованы при обследовании и продлении срока безопасной эксплуатации аналогичных промышленных зданий.

Ключевые слова: техническое состояние зданий, промышленное здание, сейсмостойкость, обследование конструкций, усиление конструкций, эксплуатационная надёжность.

ВВЕДЕНИЕ

Промышленные здания металлургических предприятий работают под высокими нагрузками и воздействием агрессивной среды (температуры, вибрации, пыль, химические вещества), что снижает их эксплуатационную надёжность.

Актуальность оценки обусловлена длительной эксплуатацией и изменением нормативных требований, включая пересмотр сейсмического районирования Казахстана. Необходима комплексная проверка способности зданий воспринимать сейсмические воздействия и определение остаточного ресурса конструкций.

Цель исследования — оценка технического состояния и сейсмической безопасности здания с разработкой рекомендаций по усилению и безопасной эксплуатации. Выполнены анализ документации, обследование конструкций, выявление дефектов, поверочные расчёты и разработка мероприятий по усилению.

Объект исследования — промышленное здание производственного назначения. Предмет исследования — изменения технического состояния конструкций в условиях длительной эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом обследования является одно из зданий производственного назначения, расположенное на металлургической площадке. Здание представляет собой капитальное сооружение с несущими и ограждающими конструкциями, предназначенное для размещения технологического оборудования и обеспечения

производственных процессов.

Обследование технического состояния конструкций выполнялось в несколько этапов.

На первом этапе был проведён анализ имеющейся технической документации, включая проектные материалы, исполнительные схемы и результаты ранее выполненных обследований.

На втором этапе выполнено визуальное и инструментальное обследование строительных конструкций.

При обследовании использовались методы визуального осмотра, инструментальных измерений геометрических параметров конструкций, а также фиксации дефектов и повреждений. Особое внимание уделялось выявлению трещин, деформаций, коррозии металлических элементов, разрушения защитного слоя бетона и другим дефектам, способным повлиять на несущую способность конструкций.

При обследовании использовались измерительные инструменты. Для измерения геометрических размеров конструкций, их сечений, мест расположения дефектов, картирования трещин в железобетонных конструкциях и в кирпичных стенах применялась рулетка измерительная, металлическая. Ширина раскрытия трещин замерялась с помощью микроскопа МПБ-2 с ценой деления 0.05 мм. Для определения прочности бетона применен электронный измеритель ИПС-МГ 4.03 по ГОСТ 22690. Параметры армирования (расположение арматуры, ее диаметр и толщина защитного слоя бетона) определялись электронным измерителем параметров армирования ИПА-МГ4 посредством магнитного метода в соответствии с ГОСТ 22904.

Для определения прочности стали применен электронный малогабаритный переносной программируемый твердомер ТЭМП-2 динамического действия. Принцип измерения прибором твердости основан на определении отношения скоростей удара и отскока ударника, преобразуемого электронным блоком в условное число твердости, которое автоматически переводится прибором в требуемые единицы твердости или прочности.

Для оценки несущей способности элементов здания были выполнены поверочные расчёты с использованием действующих строительных норм и правил. Расчёты выполнялись с учётом фактического состояния конструкций, выявленных дефектов и возможных эксплуатационных нагрузок.

Лабораторные исследования включали в себя определение фактического состава кровли, прочностных характеристик бетона, кирпича, раствора и каменной кладки.

Для определения прочности прокатной фасонной и листовой стали применен электронный малогабаритный переносной программируемый твердомер ТЭМП-2 динамического действия. Принцип измерения прибором твердости основан на определении отношения скоростей удара и отскока ударника, преобразуемого электронным блоком в условное число твердости, которое автоматически переводится прибором в требуемые единицы твердости или прочности.

Дополнительно была проведена оценка сейсмической устойчивости здания с учётом актуальных требований нормативных документов Республики Казахстан.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведённого обследования были выявлены характерные дефекты и повреждения строительных конструкций промышленного здания.

Наиболее распространёнными дефектами являются:



Рисунок 1. Трещины в железобетонных элементах



Рисунок 2. Коррозия металлических элементов конструкций



Рисунок 3. Деформации отдельных элементов покрытия



Рисунок 4. Повреждения полов и отдельных участков фундаментов

Основными причинами возникновения выявленных дефектов являются длительная эксплуатация здания, воздействие агрессивной технологической среды, а также влияние динамических нагрузок от технологического оборудования. Анализ результатов обследования показал, что часть конструктивных элементов находится в работоспособном состоянии, однако отдельные элементы требуют проведения ремонтно-восстановительных мероприятий и усиления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обеспечения дальнейшей безопасной эксплуатации здания, подвергающегося длительному воздействию агрессивной технологической среды и динамических нагрузок, необходимо реализовать комплекс ремонтно-восстановительных мероприятий.

Капитальный ремонт кровли должен включать полную замену существующих слоев на новые материалы с использованием легких утеплителей, что позволит снять избыточную нагрузку с плит покрытия. Все парапетные участки, узлы примыкания к вентиляционным шахтам и стаканам следует защитить фартуками из оцинкованной кровельной стали, обеспечив герметичность соединений специальными уплотнителями. Металлические несущие конструкции, включая фермы и балки перекрытий, требуют тщательной очистки от технологической пыли, высолов и продуктов коррозии до чистого металла (рекомендуется пескоструйная обработка) с последующим полным восстановлением антикоррозионного защитного покрытия.

Элементы, находящиеся в предаварийном состоянии, такие как отдельные главные и второстепенные балки или связи покрытия, подлежат усилению стальными накладками или замене на новые аналогичные конструкции. Особое внимание следует уделить колоннам и стойкам: их базы необходимо очистить от строительного мусора и шлама, заменить дефектные части в зонах сильного износа, выполнить обетонирование на высоту до 1,5 метров и облицевать основания кислотоупорным кирпичом для защиты от агрессивных проливов. В отношении ограждающих стен рекомендуется восстановить остекление оконных проемов, отремонтировать поврежденные участки кирпичной кладки и пилястр, а также обновить защитный лакокрасочный слой.

Для обеспечения надежной эксплуатации здания необходимо провести очередное обследование технического состояния строительных конструкций через 5 лет после завершения всех ремонтно-восстановительных работ.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность научному руководителю за методическую помощь и научные консультации при выполнении исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке текста статьи использовались инструменты искусственного интеллекта для структурирования материала и языкового редактирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

СП РК 1.04-101-2012. Обследование и оценка технического состояния зданий и сооружений / Комитет по делам строительства, жилищно-коммунального хозяйства и управления земельными ресурсами Министерства национальной экономики Республики Казахстан, - Астана, 2015. – 86 с.

<https://www.ozis-venture.ru/files/docs/norm/SP-RK-1.04-101-2012-svod-pravil-obsledovanie-i-otsenka-tehnicheskogo-sostoyaniya-zdaniy-i-soorugenii.pdf>.

СП РК 1.04-110-2017. Обследование и оценка технического состояния и сейсмоусиление зданий и сооружений / Комитет по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства Министерство по инвестициям и развитию Республики Казахстан, - Астана, 2017.

https://prg.kz/document/?doc_id=34201690.

СП РК 2.03-30-2017. Строительство в сейсмических районах / Комитет по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства Министерство по инвестициям и развитию Республики Казахстан, - Астана, 2017.

https://prg.kz/document/?doc_id=36128461.

СП РК 1.04-102-2012 Правила оценки физического износа зданий и сооружений / Комитет по делам строительства, жилищно-коммунального хозяйства и управления земельными ресурсами Министерства национальной экономики Республики Казахстан, - Астана, 2015.

https://prg.kz/document/?doc_id=39833412.

СН РК 2.01-01 -2013. Защита строительных конструкций от коррозии / Комитет по делам строительства, жилищно-коммунального хозяйства и управления земельными ресурсами Министерства национальной экономики Республики Казахстан, - Астана, 2015.

<https://v.eruditor.one/file/2814062/>.

СНиП РК 5.04-23-2002. Стальные конструкции /Комитет по делам строительства Министерства индустрии и торговли Республики Казахстан, - Астана, 2003. -118 с.

https://prg.kz/document/?doc_id=30002436.

ChatGPT. (2026, March). Помощь в подготовке текста научной статьи, обзора литературы и редактировании текста [Большая языковая модель]. OpenAI. <https://chat.openai.com>

ҚҰРЫЛЫС АЛАҢЫНДАҒЫ ҚАУІПСІЗДІКТІ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУДІҢ КИБЕРФИЗИКАЛЫҚ ҮЙЛЕСТІРУ ЖҮЙЕСІ

ӘОК 69:004

Б.Б.Пернебек^{1*}

¹ Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қаласы, Қазақстан

* Автор-корреспондент: Пернебек Бекнұр Бекжанұлы, e-mail:

pernebekbeka7703@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Қазіргі құрылыс алаңдары жарақаттану қаупі жоғары орта болып табылады. Қолмен бақылауға негізделген дәстүрлі қауіпсіздікті қамтамасыз ету әдістері жиі тиімсіз болады. Бұл мақалада құрылыс алаңындағы қызметкерлердің қауіпсіздігін белсенді түрде қамтамасыз етуге арналған киберфизикалық жүйе (КФЖ) үлгісі қарастырылады. Бұл үлгі физикалық (датчиктер, камералар, атқарушы құрылғылар) және кибернетикалық (бұлттық талдау, жасанды интеллект) компоненттерді біріктіруді сипаттайды. Жүйенің негізгі деңгейлері: деректерді жинау, оларды зияткерлік өңдеу және автоматтандырылған әрекет ету мәселелері ашылады. Ұсынылған КФЖ оқиғаларды тіркеп қана қоймай, сонымен қатар нақты уақыт режимінде қауіпті жағдайларды болжауға және алдын алуға мүмкіндік береді. Мұндай жүйені енгізу жарақаттануды айтарлықтай төмендетуге, адами факторды азайтуға және өндірістік процестердің жалпы тиімділігін арттыруға ықпал етеді.

Түйінді сөздер: киберфизикалық жүйе, құрылыс алаңы, персонал қауіпсіздігі, датчиктер, киілетін құрылғылар, мониторинг, цифрлық платформа, смарт құрылыс.

КІРІСПЕ

Құрылыс саласы – еңбек жарақаттарының көп болатын салалардың бірі. Биіктік, ауыр техника, электр және шектеулі орындар қауіптің жоғары болуына әсер етеді. Сондықтан заманауи құрылыс алаңдарында деректерге негізделген, нақты уақыттағы бақылауды жүзеге асыратын КФЖ енгізу өзекті. Бұл мақала практикалық бағытқа баса назар аударады: қандай датчиктер қажет, оларды қай жерде орнату керек, жүйенің архитектурасы және енгізудің экономикалық тиімділігі қалай есептеледі.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Киберфизикалық жүйелер (КФЖ) — физикалық әлем мен есептеу қабілеттерін біріктіретін кешендер. Олар IoT құрылғылары, сенсорлар, коммуникациялық желілер, бұлттық және шет (edge) есептеу, сондай-ақ машиналық оқыту модельдерін пайдаланады. Құрылымдық деңгейлері:

Физикалық деңгей (Perception Layer): сенсорлар, RFID, камералар, киілетін құрылғылар.

2) Желілік деңгей (Network Layer): байланыс арналарын—Wi-Fi, LTE/5G, LoRaWAN, Ethernet пайдалану.

3) Қолданбалы деңгей (Application Layer): деректер аналитикасы, ML/AI, шешім қабылдау, интеграциялау жүйелері.

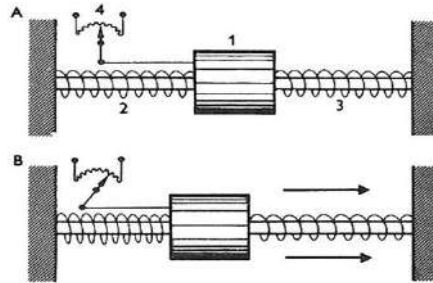
Қолданылатын датчиктер және орналастыру мақсаты

Төменде құрылыс алаңында қолдануға ұсынылатын негізгі датчиктер мен олардың нақты орналастыру аймақтары берілген:

Акселерометр және гироскоп — Каска, белдік, киілетін белбеу Құлауларды, кенеттен тоқтауларды және қауіпті қозғалыстарды анықтау. Құлаудың

ағымдағы координаттарын тіркеп, триггерлік дабыл жібереді.

Пульсоксиметр (SpO₂) және жүрек соғу сенсоры (HR) — Қол сағат/білезік/киілетін жилет
Жүрек соғу жиілігі мен қандағы оттегінің деңгейін нақты уақытта бақылау. Ыстық соққы немесе гипоксия белгілерін ерте анықтау.

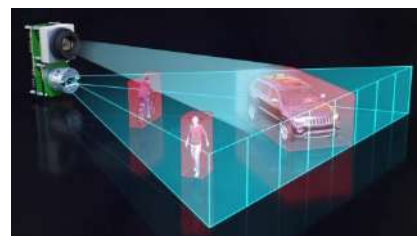


Сурет 1. Акселерометрдің жұмыс істеу механизмі

ЭКГ сенсоры — Қолсағат немесе төсқаға орналастыру (опция ретінде) Жүрек жұмысының күрделі бұзылыстарын анықтау, жоғары тәуекел жағдайында жедел жәрдемға сигнал беру.

GPS/ГЛОНАСС + RTK модульдері — Жеке қорғаныс құралдары Жұмысшының дәл орналасуын анықтау, қауіпті аймақтарға кіру фактісін тіркеу. RTK қолданса, сантиметрлік дәлдікке дейін жетуге болады.

LiDAR — Крандарда, экскаваторларда және периметрде 3D карталау арқылы техниканың айналасын сканерлеу; адам мен техника арасындағы қашықтықты дәл өлшеу.



Сурет 2. LiDAR құрылғысының жалпы жұмыс істеу принципі

Proximity (жақындау) сенсорлары — Техника айналасы Адам техникаға 5–10 метрден жақындағанда ескерту жүйесін іске қосу.

Діріл сенсорлары (акселерометр түрі) — Құрылыс құрылымдарының тірек элементтері, техника негіздері Құрылымдық өзгерістерді (қысым, жарық, діріл) ерте анықтау; апатты жағдайлардың алдын алу.

НӘТИЖЕЛЕР МЕН ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

КФЖ ақпарат ағымы келесі тармақтардан өтеді:

- 1) Сенсорлар → Edge шлюздер (алдын ала фильтрация, оқиғаларды локальды анықтау);
- 2) Edge → Бұлт/локальдық серверлер (жинақтау, үлкен деректерді сақтау);
- 3) Аналитика (ML/AI) → Операторларға визуализация және автоматты әрекет (дабылдар, техниканы тоқтату).

Желілер: критикалық сигналдар үшін 5G/LTE немесе Ethernet, ұзақ мерзімді төмен қуат үшін LoRaWAN, бейнежазбалар үшін Wi-Fi/5G.

Тәуекелдерді бағалау және практикалық есептеу

Тәуекел ықтималдығы сағатқа шаққандағы көрсеткіш:

$$P_0 = N_0 / H$$

мұндағы N_0 — жылдық оқиғалар саны, H — жалпы жұмыс сағаттары.

КФЖ енгізілгеннен кейін оқиғалар саны сценарийлер бойынша азайтылады (мысалы, 15%, 25%, 35%). Орташа (25%) сценарийде $N_1 = 15$ болғанда:

$$P_1 = 15/200000 = 0.000075 \text{ оқиға/сағат}; \text{ өзгеріс } \Delta P = 0.000025 \text{ оқиға/сағат.}$$

Интегралды қауіпсіздік индексі:

$$I_b = \alpha \cdot P_h + \beta \cdot P_t + \gamma \cdot P_e$$

Мысалы, $\alpha=0.5$, $\beta=0.3$, $\gamma=0.2$ және бастапқы бөлініс $P_h=0.6P_0$, $P_t=0.3P_0$,

$$P_e=0.1P_0.$$

Экономикалық тиімділік формуласы:

$$E = (N_0 - N_1) \cdot C_{tr} - C_{sys}$$

мұндағы C_{tr} — бір оқиғаның орташа шығыны, C_{sys} — жүйені енгізудің жылдық шығыны.

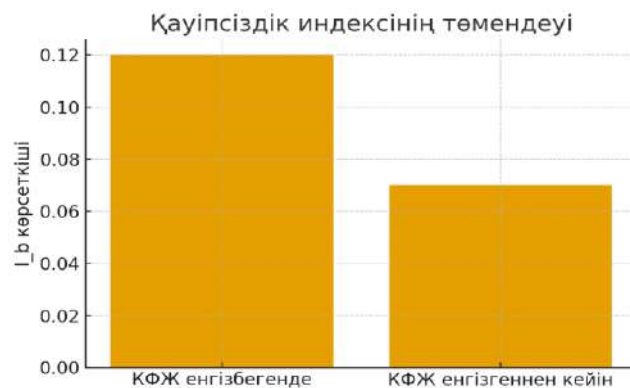
есептеу мысалы (бұрынғы алынған мәндер):

$$C_{tr} = 1\,500\,000 \text{ тг}; C_{sys} = 5\,000\,000 \text{ тг}; N_0 = 20.$$

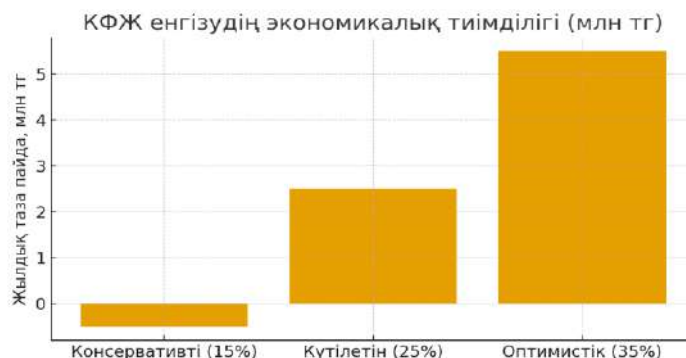
$$\text{Консервативті (15\%): } N_1=17 \rightarrow E = 3 \times 1.5 - 5 = -0.5 \text{ млн тг.}$$

$$\text{Күтілетін (25\%): } N_1=15 \rightarrow E = 5 \times 1.5 - 5 = 2.5 \text{ млн тг.}$$

$$\text{Оптимистік (35\%): } N_1=13 \rightarrow E = 7 \times 1.5 - 5 = 5.5 \text{ млн тг.}$$



Сурет 3. Қауіпсіздік индексінің төмендеуі (КФЖ енгізбеген және енгізген кездегі салыстыру)



Сурет 4. КФЖ енгізудің экономикалық тиімділігі (консервативті, күтілетін, оптимистік сценарийлер)

ҚОРЫТЫНДЫ

КФЖ құрылыс алаңындағы қауіпсіздікті арттырудың тиімді құралы болып табылады. Жоғары сенімділікпен таңдалған датчиктер мен жарамды аналитика жүйесі арқылы төтенше жағдайларды алдын ала анықтап, еңбек қауіпсіздігін едәуір жақсартуға болады. Зерттеу барысында КФЖ-ның архитектурасы үш негізгі деңгей бойынша қарастырылды: физикалық деңгей (сенсорлар мен құрылғылар), желілік деңгей (мәліметтерді беру арналары) және аналитикалық деңгей (деректерді өңдеу және шешім қабылдау). Бұл құрылым жүйенің үздіксіз жұмысын қамтамасыз етіп, қауіпсіздікке қатысты ақпараттың жедел әрі дәл өңделуіне жағдай жасайды.

Сонымен қатар, мақалада құрылыс алаңында қолданылатын негізгі датчиктер жүйелі түрде талданды. Атап айтқанда, жұмысшыларға орнатылатын киілетін сенсорлар (акселерометр, пульсоксиметр, жүрек мониторлары), құрылыс техникасына арналған датчиктер (LiDAR, proximity сенсорлар), сондай-ақ инфрақұрылымдық бақылау құралдары (діріл, кернеу, газ анализаторлары) қауіпсіздік жүйесінің маңызды элементтері ретінде қарастырылды. Бұл датчиктер қауіпті жағдайларды ерте кезеңде анықтауға және апаттардың алдын алуға мүмкіндік береді. Жасанды интеллект технологияларын қолдану (компьютерлік көру, болжамдық аналитика, Digital Twin) қауіпсіздік жүйесінің тиімділігін айтарлықтай арттырады. Бұл технологиялар тек қана қауіпті жағдайларды анықтап қоймай, олардың пайда болу ықтималдығын алдын ала болжауға мүмкіндік береді, яғни жүйе проактивті сипатқа ие болады.

Жалпы алғанда, ұсынылған киберфизикалық жүйе моделі құрылыс алаңындағы персонал қауіпсіздігін қамтамасыз етудің тиімді құралы болып табылады. Ол қауіпсіздік деңгейін арттыруға, апаттардың алдын алуға және өндірістік процестерді оңтайландыруға мүмкіндік береді. Болашақта мұндай жүйелерді кеңінен енгізу құрылыс саласының цифрлануына және «ақылды құрылыс алаңдарын» қалыптастыруға негіз болады.

МҮДДЕЛЕР ҚАРАМА-ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Автор мүдделер қарама-қайшылығының жоқтығын мәлімдейді.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Автор зерттеу тақырыбы бойынша көрсетілген әдістемелік ұсыныстар мен қолдау үшін ғылыми жетекшісіне алғыс білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Осы мақалада экономикалық тиімділікті бағалау барысында математикалық есептеулерді орындау үшін **Mathos ai** платформасы қолданылды. Аталған құрал есептеулердің дәлдігін қамтамасыз етіп, әртүрлі сценарийлер бойынша талдау жүргізуге мүмкіндік берді.

Mathos AI (<https://www.mathos.ai/ru>)

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Lee, E. A. (2008). *Cyber Physical Systems: Design Challenges*. 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC).
<http://dx.doi.org/10.1109/isorc.2008.25>
- Rajkumar, R., Lee, I., Sha, L., & Stankovic, J. (2010). *Cyber-Physical Systems: The Next Computing Revolution*. 47th Design Automation Conference.
<https://doi.org/10.1145/1837274.1837461>
- Baheti, R., & Gill, H. (2011). *Cyber-Physical Systems*. The Impact of Control Technology. IEEE Control Systems Society. <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2017.06.011>
- ISO 45001:2018 – Occupational Health and Safety Management Systems —

Requirements with Guidance for Use.

<https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:45001:ed-1:v1:en>

OSHA (Occupational Safety and Health Administration). *Construction Safety and Health Regulations*.

<https://www.osha.gov>

Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). *Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions*. *Future Generation Computer Systems*, 29(7). \

<http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>

Zuehlke, D. (2010). *SmartFactory—Towards a Factory-of-Things*. *Annual Reviews in Control*, 34(1).

<https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2010.02.008>

Қ.Ә. Әбдуақасов, С.Ж. Жұмағұлов. (2021). *Ақылды құрылыс алаңдарындағы қауіпсіздікті қамтамасыз ету жүйелері*. Алматы: ҚазҰУ баспасы.

ҚР Еңбек кодексі. (2015 ж., өзгерістермен және толықтырулармен).

<https://adilet.zan.kz/>

Қазақстан Республикасы Цифрлық даму, инновациялар және аэроғарыш өнеркәсібі министрлігі. *Индустрия 4.0 жол картасы*.

<https://astanahub.com/kk/blog/primenenie-interneta-veshchei-iot-na-umnykh-stroitelnykh-ploshchadkakh>

УСТРОЙСТВО ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ «SUPERPAVE»

УДК 625.355.5

А.А. Правдивцев^{1*}, А.Е. Қасымов¹, Б.М. Абдеев¹

¹ВКТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Правдивцев Александр Александрович, e-mail: Pravdik201@yandex.ru

АННОТАЦИЯ. В работе рассматриваются современные подходы к устройству дорожных покрытий с применением технологии «Superpave», разработанной в рамках стратегической программы повышения эффективности асфальтобетонных смесей. Данная технология основана на научно обоснованном подборе состава материалов с учетом климатических условий, интенсивности транспортных нагрузок и эксплуатационных требований.

Особое внимание уделяется принципам проектирования асфальтобетонных смесей по системе Superpave, включая выбор вяжущего, минеральных материалов и оптимизацию зернового состава. Рассматриваются методы лабораторных испытаний, позволяющие прогнозировать долговечность и устойчивость покрытия к деформациям, трещинообразованию и колееобразованию.

В работе также анализируются преимущества применения технологии Superpave по сравнению с традиционными методами, такие как повышение срока службы дорожных покрытий, снижение затрат на ремонт и обслуживание, а также улучшение эксплуатационных характеристик автомобильных дорог.

Сделан вывод о целесообразности внедрения технологии «Superpave» в практику дорожного строительства как эффективного инструмента повышения качества и надежности дорожной инфраструктуры.

Ключевые слова: Superpave, дорожные покрытия, асфальтобетон, проектирование смесей, битумные вяжущие, транспортные нагрузки, долговечность, колееобразование, трещиностойкость, дорожное строительство, климатические условия, эксплуатационные характеристики.

ВВЕДЕНИЕ

Современное дорожное строительство в Республике Казахстан требует применения высокоэффективных технологий, обеспечивающих долговечность и устойчивость покрытий к интенсивным нагрузкам и погодно-климатическим воздействиям. Одной из таких технологий является система Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements), разработанная в США в рамках программы SHRP (Strategic Highway Research Program). Технология Superpave представляет собой комплексный подход к проектированию асфальтобетонных смесей, включающий подбор материалов, расчет состава смеси и оценку эксплуатационных характеристик с учетом реальных условий эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Superpave — это методология проектирования асфальтобетонных покрытий, ориентированная на: 1) учет погодно-климатических условий региона; 2) интенсивность транспортных нагрузок; 3) устойчивость к колееобразованию; 4)

сопротивление усталостным разрушениям; 5) трещиностойкость при низких температурах. Основные элементы системы классификация битума по PG (Performance Grade), гранулометрический состав заполнителей, Метод уплотнения (вращательный уплотнитель), Анализ объемных характеристик смеси (1). В системе Superpave используется классификация PG (Performance Grade), учитывающая температурный диапазон эксплуатации показано на таблице 1.

Таблица 1. Классификация битума PG

Марка PG	Максимальная температура, °C	Минимальная температура, °C
PG 64-22	64	-22
PG 70-28	70	-28
PG 76-22	76	-22

Минеральные материалы заполнители должны соответствовать следующим требованиям: прочность, морозостойкость, шероховатость поверхности, оптимальная зерновая кривая.

РЕЗУЛЬТАТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Процесс проектирования включает: Подбор зернового состава, определение оптимального содержания битума, испытания смеси. Гранулометрический состав показано на таблице 2, пример зернового состава.

Таблица 2. Зерновой состав

Размер сит, мм	Проход, %
19.0	100
12.5	95
9.5	80
4.75	60
2.36	45
0.075	5

Ключевые параметры: VMA (пустоты минерального заполнителя), VIM (воздушные пустоты), VFA (заполнение пустот битумом).

Таблица 3. Объемные параметры

Показатель	Значение
VIM	4%
VMA	15%
VFA	70%

Основные этапы: Подготовка основания, укладка асфальтобетонной смеси, уплотнение, контроль качества.

Укладка: асфальтоукладчики обеспечивают равномерное распределение смеси.

Уплотнение: Используются статические катки, вибрационные катки, пневмоколесные катки.

Повышение долговечности покрытия, снижение затрат на ремонт, устойчивость к деформациям, адаптация к климату. Недостатки и ограничения высокая стоимость оборудования, необходимость лабораторных исследований, сложность внедрения показана на рисунках 1,2,3.

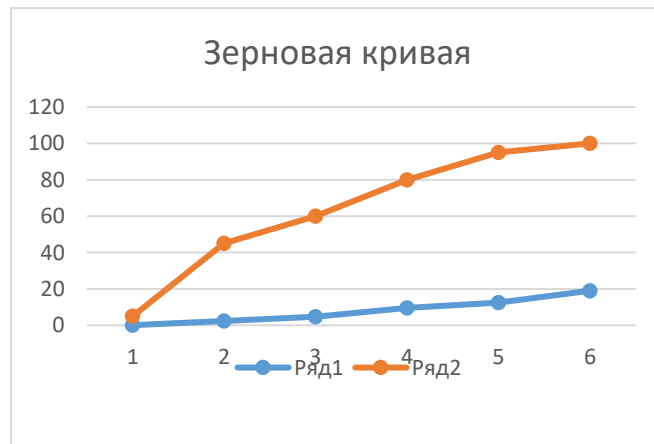


Рисунок 1. Зерновая кривая

где, ряд 1- размер сит (мм), ряд 2-проход %

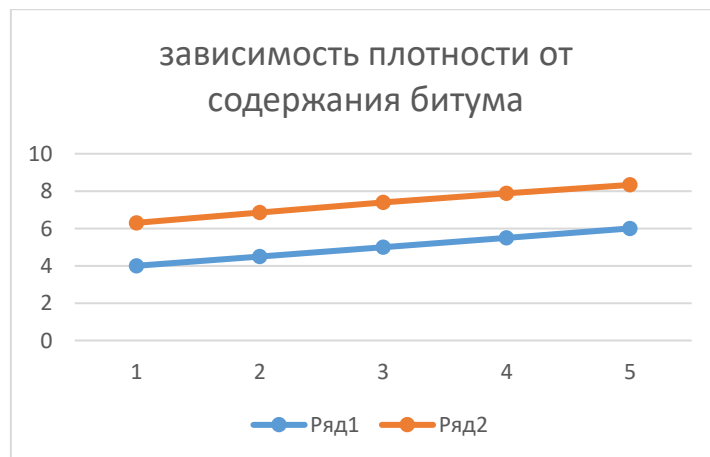


Рисунок 2. Зависимость плотности от содержания битума
где, ряд 1- содержание битума (%), ряд 2- плотность (%)

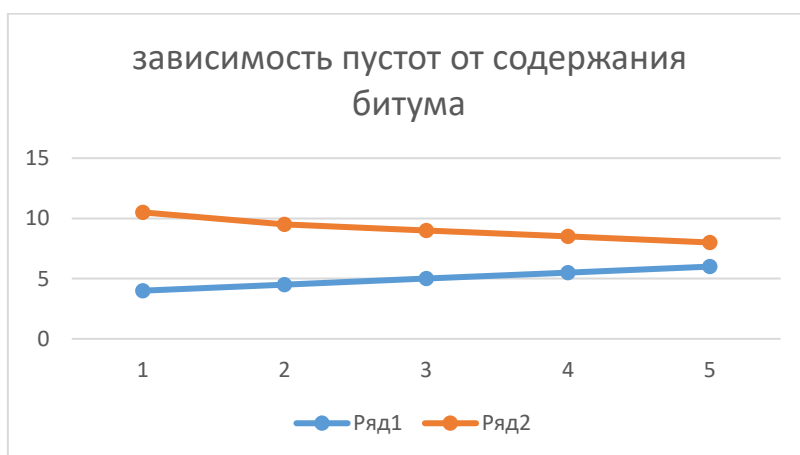


Рисунок 3. Зависимость пустот от содержания битума где, ряд 1- битум (%), ряд 2 – VIM (%) воздушные пустоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология Superpave является современным и эффективным инструментом проектирования асфальтобетонных покрытий. Ее применение позволяет значительно повысить эксплуатационные характеристики дорог РК, особенно в условиях интенсивного движения и сложного климата. Несмотря на определенные сложности внедрения, данная технология активно применяется во многих странах и постепенно внедряется в странах СНГ и в Республике Казахстан.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования в рамках учебной и научно-исследовательской деятельности.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за методологическую поддержку, конструктивные замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению качества исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. При подготовке данной статьи инструменты искусственного интеллекта не использовались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

SHRP-A-407 — Strategic Highway Research Program.

https://www.academia.edu/125310630/Strategic_Highway_Research_Program_SHRP

AASHTO M 320 — Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder.

<https://standards.globalspec.com/std/10182242/aashto-m-320>

ГОСТ РК 58406 — Асфальтобетонные смеси.

<https://kz.ozrm.ru/dokumentacziya/instrukczii/gost-r-58406.2-2020.html>

Методические рекомендации по технологии Superpave.

<https://www.dorlab-ltd.ru/ssl/u/ac/a8efb01d9811e9ab4ac0500e60fadf/-/Superpave.pdf>

ВЛАЖНОСТЬ ГРУНТА КАК ФАКТОР, ВЛИЯЮЩИЙ НА СОСТОЯНИЕ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

УДК: 625.7/8(075.8)

А.Раимбекова^{1*}, Б.Е.Махиев¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Раимбекова Ардак, Raimbekova.ardak@List.ru

АННОТАЦИЯ. Автомобильные дороги являются важным элементом транспортной инфраструктуры, обеспечивающим эффективное функционирование экономики и транспортных систем. Одной из основных проблем при эксплуатации автомобильных дорог в условиях резко континентального климата является влияние климатических факторов на состояние земляного полотна и дорожной одежды. Изменение температуры воздуха, влажности грунтов и других природных факторов приводит к изменению водно-теплового режима дорожной конструкции, что может вызывать снижение прочности грунтов, образование трещин и деформаций дорожного покрытия.

Целью данного исследования является анализ влияния климатических факторов на глубину промерзания земляного полотна и оценка роли теплофизических характеристик материалов дорожной одежды в формировании водно-теплового режима. В работе рассмотрены основные факторы, влияющие на температурный режим дорожной конструкции, а также проведен анализ теплофизических свойств материалов, применяемых при строительстве автомобильных дорог. Для определения глубины промерзания грунта использован расчетный метод, основанный на определении теплового сопротивления слоев дорожной одежды и их теплофизических характеристик.

Результаты исследования показывают, что изменение теплопроводности материалов дорожного покрытия оказывает существенное влияние на глубину промерзания грунта. Снижение теплопроводности асфальтобетонных слоев позволяет уменьшить глубину промерзания и снизить вероятность образования морозного пучения грунтов. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании дорожных конструкций с целью повышения их долговечности и устойчивости в различных климатических условиях.

Ключевые слова: климатические факторы, глубина промерзания, дорожная одежда, земляное полотно, теплопроводность, водно-тепловой режим.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность и долговечность автомобильных дорог во многом зависит от состояния земляного полотна и конструкций дорожной одежды. Одним из ключевых факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики дорожных покрытий, является водно-тепловой режим грунтов. Изменение температуры и влажности грунта может приводить к деформациям дорожной конструкции, образованию трещин и снижению прочности покрытия.

Водно-тепловой режим характеризуется изменением температуры и влажности грунтов земляного полотна во времени и по глубине. Эти процессы зависят от климатических условий, структуры грунтов и теплофизических характеристик материалов дорожной одежды. Неблагоприятные изменения водно-теплового режима могут привести к разуплотнению грунта, образованию морозного пучения и

последующему разрушению дорожного покрытия.

Целью исследования является анализ влияния климатических факторов и теплофизических характеристик материалов дорожной одежды на глубину промерзания земляного полотна.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- анализ факторов, влияющих на водно-тепловой режим грунтов;
- исследование теплофизических свойств материалов дорожной одежды;
- расчет глубины промерзания грунта в зависимости от конструкции дорожного покрытия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования рассматривается земляное полотно автомобильной дороги с асфальтобетонным покрытием. Основной задачей исследования является анализ влияния климатических факторов и теплофизических характеристик материалов дорожной одежды на глубину промерзания грунта.

В ходе исследования были использованы данные о конструкции дорожной одежды, состоящей из нескольких слоев: верхний слой – горячий плотный асфальтобетон толщиной 0,05 м, нижний слой – пористый асфальтобетон толщиной 0,08 м, основание из гранитного щебня толщиной 0,2 м, а также песчаный слой толщиной 0,2 м. Такие конструкции дорожных одежд широко применяются при строительстве автомобильных дорог и обеспечивают необходимую прочность и устойчивость дорожного покрытия.

Для анализа температурного режима дорожной конструкции использовались теплофизические характеристики материалов, включая коэффициент теплопроводности, плотность и удельную теплоемкость. Эти параметры позволяют оценить тепловое сопротивление слоев дорожной одежды и определить распределение температуры по глубине конструкции.

Исследование проводилось с использованием расчетного метода определения глубины промерзания грунта. Расчет основан на определении суммарного теплового сопротивления конструкции дорожной одежды, которое зависит от толщины слоев и коэффициента теплопроводности материалов. После определения теплового сопротивления выполняется расчет глубины промерзания грунта с учетом климатических условий исследуемого региона.

Дополнительно анализировалось влияние влажности грунтов на изменение водно-теплого режима земляного полотна. Влажность грунта влияет на теплопроводность и прочностные характеристики грунтов, а также на процессы морозного пучения. Изменение температуры и влажности приводит к перемещению влаги в грунтах и изменению их физико-механических свойств.

Для обработки результатов применялись методы сравнительного анализа и теоретических расчетов. Полученные значения глубины промерзания сравнивались для различных вариантов конструкций дорожной одежды, что позволило оценить влияние теплофизических характеристик материалов на устойчивость дорожного покрытия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования были проведены теоретические расчёты глубины промерзания грунта земляного полотна в зависимости от конструкции дорожной одежды и теплофизических характеристик используемых материалов. Для анализа использовались данные о толщине слоёв дорожной конструкции и коэффициентах теплопроводности материалов.

На основании расчётов было определено тепловое сопротивление каждого слоя дорожной одежды, после чего вычислено суммарное тепловое сопротивление всей конструкции. Полученные результаты позволили определить глубину промерзания грунта под дорожной одеждой. Установлено, что величина глубины промерзания напрямую зависит от теплофизических характеристик материалов дорожного покрытия и толщины конструктивных слоёв.

Также было установлено, что значительное влияние на состояние земляного полотна оказывает влажность грунта. Повышенная влажность приводит к увеличению теплопроводности грунтов и снижению их прочностных характеристик. В зимний период это способствует более глубокому промерзанию и увеличивает вероятность возникновения пучин и разрушений дорожного покрытия.

Дополнительный анализ показал, что изменение температуры воздуха приводит к увеличению температуры нагревания дорожного покрытия, особенно на асфальтобетонных покрытиях. Коэффициент теплопроводности таких материалов находится в пределах 1,12–1,67 Вт/(м·К), что оказывает существенное влияние на распределение теплового потока в конструкции дорожной одежды.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что выбор материалов дорожной одежды и их теплофизических характеристик играет важную роль в обеспечении устойчивости автомобильных дорог. Применение материалов с более низкой теплопроводностью и оптимизация конструкции дорожной одежды позволяют уменьшить глубину промерзания грунта и повысить долговечность дорожных покрытий в условиях воздействия неблагоприятных климатических факторов.

Помимо температуры, важным фактором является влажность грунтов. Под воздействием атмосферных осадков, грунтовых вод и температурных изменений происходит перемещение влаги в грунте, что влияет на прочностные характеристики земляного полотна.

Водно-тепловой режим земляного полотна определяется взаимодействием процессов теплообмена и влагообмена в грунтах. Изменение температуры воздуха приводит к изменению температуры дорожного покрытия и прилегающих слоев грунта. При повышении температуры увеличивается нагрев дорожного покрытия, особенно в асфальтобетонных конструкциях.

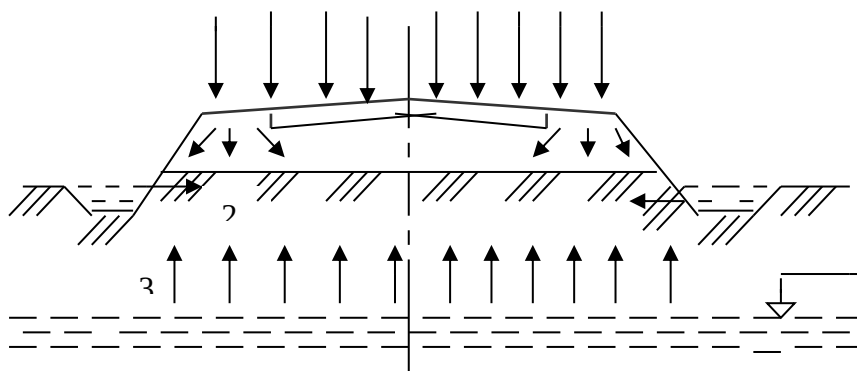


Рисунок 1. Основные источники увлажнения дорожной

одежды и земляного полотна:

1 – атмосферная влага; 2 – фильтрация и отсос воды из кюветов при плохом водоотводе; 3 – капиллярное увлажнение грунтовыми водами и парообразное

перемещение влаги под действием температурных градиентов

Глубина промерзания зависит от климатических условий региона, свойств грунтов и конструкции дорожной одежды. При расчетах учитывается тепловое сопротивление каждого слоя дорожной конструкции.

Тепловое сопротивление определяется с учетом толщины слоя и коэффициента теплопроводности материалов. Общая величина теплового сопротивления конструкции используется для определения глубины промерзания грунта.

Результаты расчетов показывают, что изменение теплофизических свойств верхнего слоя дорожного покрытия оказывает значительное влияние на глубину промерзания. При использовании асфальтобетона с более низкой теплопроводностью наблюдается уменьшение глубины промерзания грунта.

Как видно на рисунке 2., что величина глубины промерзания и термического сопротивления материалов дорожной одежды существенное степень зависит от влажности грунта земляного полотна. В свою очередь, это и является главной причиной разрушения дорожной одежды, особенно в период весенне-осенней распутицы.

Проведенный анализ показывает, что снижение теплопроводности материалов дорожной одежды способствует уменьшению глубины промерзания грунта. Это снижает вероятность образования морозного пучения и повышает устойчивость дорожной конструкции.

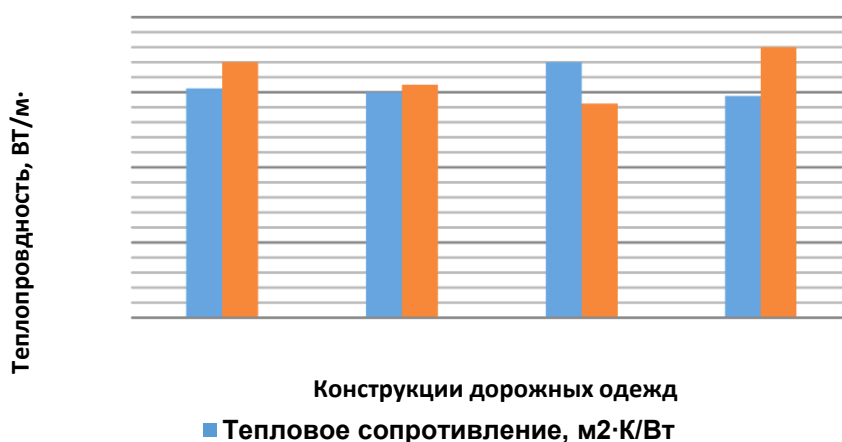


Рисунок 2. Изменение глубины промерзания и термического сопротивления асфальтобетонных покрытий в зависимости от влажности грунта земляного полотна: 1 – влажность грунта з.п. $W_{г}=11,6\%$; 2 – $W_{г}=10,3\%$; 3 – $W_{г}=8,1\%$; 4 – $W_{г}=12,9\%$.

Также установлено, что влажность грунта оказывает существенное влияние на термическое сопротивление дорожной конструкции и глубину промерзания. Повышенная влажность может привести к снижению прочности земляного полотна и разрушению дорожного покрытия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования было установлено, что климатические факторы оказывают значительное влияние на глубину промерзания земляного полотна автомобильных дорог. Основными факторами являются

температура воздуха, влажность грунта и теплофизические характеристики материалов дорожной одежды.

Проведенные расчеты показали, что уменьшение теплопроводности верхнего слоя дорожного покрытия позволяет снизить глубину промерзания грунта. Это способствует уменьшению морозного пучения и повышает долговечность дорожных конструкций.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании дорожных покрытий в различных климатических условиях для повышения их надежности и устойчивости.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за консультации и помощь в подготовке исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- СП РК 3.03-104-2014 Проектирование дорожных одежд нежесткого типа: научное издание. - Астана : [б. и.], 2019. - ~Б. ц. - Текст : непосредственный.
http://www.lib.ektu.kz/CGI/irbis64r_plus/cgiirbis_64_ft.exe?I21DBN=POLN_FULLTEXT&P21DBN=POLN&C21COM=S&S21FMT=briefHTML_ft&Z21ID=1111&S21P03=GUID=&S21STR=%7B22DADBBC-A393-438E-B82D-134339CF0243%7D
- СП РК 3.03-101-2013 Автомобильные дороги : научное издание. - Астана : [б. и.], 2019. - ~Б. ц. - Текст : непосредственный.
http://www.lib.ektu.kz/CGI/irbis64r_plus/cgiirbis_64_ft.exe?I21DBN=POLN_FULLTEXT&P21DBN=POLN&C21COM=S&S21FMT=briefHTML_ft&Z21ID=1111&S21P03=GUID=&S21STR={22DADBBC-A393-438E-B82D-134339CF0243}
- Далматов Б.И., Механика грунтов, основания и фундаменты (Включая специальный курс инженерной геологии) : учебник / Б. И. Далматов. - 4-е изд. стереотип. - СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2017. - 416 с. : черт. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Библиогр.: с. 406. - ISBN 978-5-8114-1307-2 : - Текст : непосредственный.
http://www.lib.ektu.kz/CGI/irbis64r_plus/cgiirbis_64_ft.exe?I21DBN=POLN_FULLTEXT&P21DBN=POLN&C21COM=S&S21FMT=briefHTML_ft&Z21ID=1111&S21P03=GUID=&S21STR={CF933631-E2B9-40BE-A797-84E8050D71E7}
- СНиП+РК+3.03-09-2006+Автомобильные+дороги,
[https://prg.kz/document/?doc_id=30152742&pos=2;156;](https://prg.kz/document/?doc_id=30152742&pos=2;156)
- Казарновский В.Д. Опыт сооружения земляного полотна автомобильных дорог в сложных природно-климатических условиях // Трансп. стр-во. – 1999, №12, с 7-9. [https://k.twirpx.link/file/4347713;](https://k.twirpx.link/file/4347713)
- СНиП РК 2.04-01-2001 Строительная климатология.
[https://igis.kz/images/snip/stroitelnye-normativy/sp-rk-2.04-01-2017-stroitelnaya-klimatologiya.pdf;](https://igis.kz/images/snip/stroitelnye-normativy/sp-rk-2.04-01-2017-stroitelnaya-klimatologiya.pdf)

АЗАМАТТЫҚ ЖӘНЕ ӨНЕРКӘСІПТІК ҒИМАРАТТАРДЫ ЖОБАЛАУДА ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЕКТТІ ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, BIM-ТЕХНОЛОГИЯЛАРДЫ ПАЙДАЛАУ

ӨОК 69:004.8:004.9

Н.М. Сагадайева^{1*}, А.Р. Булатова¹

¹Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Өскемен қ., Қазақстан

*Корреспондент-автор: Сагадайева Нурай Муратовна, e-mail:

sagadayeva.nurai@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Құрылыс саласы ғимараттарды ақпараттық модельдеу бойынша нормативтік реттеу бөлігінде белсенді дамуда. Цифрлық құрылысқа тиімді көшудің маңызды қадамдарының бірі құрылыс ақпаратының жіктеуішін құру болып табылады, ол модельдегі ең ұзақ навигациядан бастап сметалар, жұмыстар, материалдар көлемінің көпірлері түрінде әртүрлі іс жүзінде құнды нәтижелер алуға дейінгі сценарийлердің көп санының негізі болып табылады. Іс жүзінде жіктеу ұзақ уақытты алады және процесті автоматтандыру үшін жаңа тәсілдерді талап етеді. Бұл проблема үшін инновациялық шешім AI алдын ала оқытылған үлгілерін пайдалана отырып, өңделген бастапқы деректер негізінде ақпараттық модельге кодты енгізудің автоматты әдісі арқылы болжау құралын білдіретін жасанды интеллект (AI) алгоритмдері болып табылады.

Түйінді сөздер: құрылыстағы жіктеу, жасанды интеллект, жіктеуіш, жіктеу моделі, кездейсоқ орман, машинамен оқыту, BIM-технологиялар, құрылыс ақпаратының жіктеуіші.

КІРІСПЕ

Қазіргі таңда құрылыс саласында ақпараттық модельдеу (BIM) технологияларын енгізу және құрылыс ақпаратын жіктеу жүйелерін қалыптастыру әлемдік деңгейде белсенді дамып келеді. Әртүрлі елдерде бұл бағыттағы нормативтік-құқықтық база мен стандарттар деңгейі әртүрлі.

Ресей Федерациясында құрылыс ақпаратын жіктеу жүйесі (КСИ) мемлекеттік деңгейде бекітіліп, құрылыс объектілерінің ақпараттық модельдерін қалыптастыруда міндетті түрде қолданылады. Атап айтқанда, мемлекеттік бюджет қаражаты есебінен жүзеге асырылатын жобалар үшін ақпараттық модель жүргізу заңнамалық тұрғыда талап етіледі. Бұл өз кезегінде бірыңғай классификаторды қолдану арқылы деректерді стандарттауға, жобалау процесін автоматтандыруға және қатысушылар арасындағы өзара әрекеттесуді оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Қазақстанда BIM технологияларын енгізу үрдісі қарқынды дамып келе жатқанымен, құрылыс ақпаратын жіктеудің бірыңғай ұлттық жүйесі әлі толық қалыптаспаған. Дегенмен, Қазақстан Республикасында құрылыс саласын цифрландыруға бағытталған мемлекеттік бағдарламалар мен салалық нормативтік құжаттар аясында BIM қолдану біртіндеп енгізілуде. Мемлекеттік инвестициялық жобаларда ақпараттық модельдеуді пайдалану талаптары кезең-кезеңімен күшейтіліп келеді. Сонымен қатар, халықаралық стандарттарға сәйкестендіру жұмыстары жүргізілуде, бұл болашақта бірыңғай классификациялық жүйені енгізуге негіз бола алады.

Әлемдік тәжірибеде құрылыс ақпаратын жіктеу ISO 12006, сондай-ақ buildingSMART ұйымының стандарттары негізінде жүзеге асырылады. Көптеген

дамыған елдерде (Ұлыбритания, Сингапур, АҚШ) BIM міндетті стандартқа айналып, бірыңғай ақпараттық кеңістік қалыптасқан. Бұл жүйелер құрылыс объектілері туралы деректерді құрылымдауға, іздеуге және өңдеуге мүмкіндік береді.

Осы тұрғыда жасанды интеллект алгоритмдерін қолдану құрылыс ақпаратын жіктеу үдерісін жаңа деңгейге көтереді. Машиналық оқыту әдістері үлкен көлемдегі құрылыс деректерін автоматты түрде талдап, объектілерді, элементтерді және параметрлерді тиісті санаттарға бөлуге мүмкіндік береді. Бұл адам факторынан туындайтын қателіктерді азайтып, жобалау тиімділігін арттырады.

Қорытындылай келе, Ресейде құрылыс ақпаратын жіктеу жүйесі нормативтік тұрғыда толық енгізілген болса, Қазақстанда бұл бағыт даму кезеңінде. Ал әлемдік тәжірибе бірыңғай стандарттар мен интеллектуалды алгоритмдерді қолдану арқылы BIM жүйесінің тиімділігін айтарлықтай арттыруға болатынын көрсетеді. Әлемдік құрылыс саласындағы тәжірибе әртүрлі жіктеу жүйелерін қолдану үлгілерін көрсетеді, олардың ішінде кеңінен қолданылатындары: UniFormat, MasterFormat 2016, OmniClass, UniClass 2015, CoClass, сондай-ақ CCS және Talo жіктеу жүйелері. UniFormat - өнеркәсіп пен үкімет арасындағы консенсус негізінде әзірленген құрылыс ерекшеліктерін жіктеу, құнын бағалау және АҚШ пен Канададағы шығындарды талдау стандарты. Эскиздік жобалау кезеңінде сметаны есептеуге мүмкіндік беретін құрылыстың сметалық құнын қамтиды. UniFormat элементтерді олардың құрамдас элементтері бойынша ұйымдастыратындықтан, оның түрлендірілген нұсқасы OmniClass 21 кестесін әзірлеу кезінде пайдаланылған. Стандарт - оларды орындау үшін пайдаланылатын материалдар мен әдістерді ескермей, функционалдық элементтерде немесе бөліктерде шығарылады. Жүйе құрылыс жобаларын экономикалық бағалауда келісімділікті қамтамасыз ету үшін пайдаланылуы мүмкін. UniFormat арнайы тағайындалуы бойынша бөлінген құрылыс ақпаратының негізгі санаттарын қамтиды. Бұл функциялар бес иерархиялық деңгейде тоғыз санатты қамтиды. Ол 1: А деңгейінде тоғыз санатты қамтиды - негіз; В - қабық; С - интерьерлер; D - қызметтер; E - жабдық және жиһаз; F - арнайы құрылыс және бұзу; G - құрылыс алаңындағы жұмыстар және Z - жалпы жұмыстар.

MasterFormat 2016 - АҚШ пен Канададағы коммерциялық және институционалдық құрылыс жобаларына арналған ерекшеліктер мен басқа да жазбаша ақпаратты ұйымдастыру стандарты. Стандартты негізгі пайдалану саудасаттықты және келісімшарттық талаптарды, ерекшеліктерді және өнім туралы ақпаратты ұйымдастырудан тұрды. Оның бастапқы мақсаты жоба бойынша басшылықты ұйымдастыру болды, содан кейін оны өнімдердің модельдерін жіктеу және басқа да техникалық ақпараттар үшін пайдалана бастады. Әрбір MasterFormat нөмірі мен атауын «деңгейлер» бойынша ұйымдастырылған «бөлім» анықтайды. Байланысты құрылыс өнімдері мен қызмет түрлерінің негізгі жиынтықтары бірінші деңгейдегі тақырыптарды немесе «бөлімшелерді» білдіреді. Әрбір бөлім біртіндеп неғұрлым егжей-тегжейлі салаларды анықтайтын екінші, үшінші және жиі төртінші деңгейдегі нөмірлер мен атаулардан тұрады. Бұл нөмірлер мен атаулар 50 бөлімшеде ұйымдастырылған болашақта күтілетін өсу мен кеңейту үшін әдейі құрылымдалған. OmniClass - MasterFormat және UniFormat қамтитын АҚШ пен Канададағы UniClass аналогтық жіктеуіші. Құрылыс ақпаратының белгілі бір саласын білдіретін 15 кестеден тұрады. 21-23 кесте құрылыс нәтижелерін жіктейді. 21-кесте (Элементтер) UniFormat негізінде, 22-кесте (Жұмыс нәтижелері) MasterFormat негізінде. Әрбір кестеде ақпараттың белгілі бір түрін жіктеу үшін кодтар берілген. Бұл кестелер бұйымдарды «Өнімдер» кестесінде таза бұйым ретінде, олардың функционалдық мақсаты бойынша «Элементтер» кестесінде және жұмыс нәтижелері немесе құрылыс практикасы бойынша «Жұмыс нәтижелері» кестесінде жіктеуге мүмкіндік береді. Комби-

бұл кестелердің ұлты кешенді тәсілде өнімді және оның функцияларын дәл жіктеу мүмкіндігін қамтамасыз етеді. Кодтарды жазу цифрлар мен белгілердің комбинациясы арқылы жүргізіледі.

Talo 2000 жіктеу жүйесі - барлық тараптар үшін құрылыс туралы ақпарат алмасу үшін негіз қалыптастыратын құрылыс саласының әртүрлі қатысушылары арасындағы ынтымақтастықта құрылған фин ұлттық жүйесі. Жүйе құрылым элементінің атауын қамтиды. Зерттеудің мақсаты құрылыс ақпаратын жіктеу үшін машиналық оқытудың қолданыстағы модельдерін қолдану мүмкіндігін бағалау болып табылады.

Зерттеу міндеттері:

1) машинамен оқыту моделі үшін оқыту іріктемесін жасау үшін цифрлық модельдер деректерін өңдеу;

2) құрылыс ақпаратын жіктеу үшін сапалы модельді таңдау.

МАТЕРИАЛДАР МЕН ЗЕРТТЕУ ТҮРЛЕРІ

Жобалау қызметіндегі жіктеу процесі мынадай әдістермен ұйымдастырылуы мүмкін.

1. Қол әдісі

Кодтарды цифрлық модельдердің әрбір элементінің атрибутына жеке енгізу. AGACAD компаниясынан Vimaxon web-платформасы өз кезегінде жасалған атрибут үшін код енгізу арқылы қолмен жіктеу тәсілінің құралы болып табылады. Мұндай қондырмалар мен қосымшалар жіктеудің басқа тәсілдерімен салыстырғанда модельдерде элементтердің көп санын қолмен өңдеуге байланысты жоғары уақыт шығындарын көтереді.

2. Жартылай автоматты әдіс:

- Dynamo және басқа да визуалды бағдарламалау ортасын қолдану;
- кестелермен салыстыру негізіндегі атрибуттармен жұмыс істеуге арналған бағдарламалар.

Элементтерді таңдау бойынша белгілер мен ережелер қойылады, содан кейін виртуалды бағдарламалау ортасында жасалған скрипттер арқылы элемент коды бар атрибут енгізіледі. Сондай-ақ жіктеу бойынша әртүрлі қосымшалар, мысалы, Signal бар, онда жіктеу цифрлық модельдің барлық элементтерін қамтитын Excel кестелеріне код енгізу арқылы әртүрлі ережелер немесе шарттар бойынша жүргізіледі. Бұл әдіс қолмен салыстырғанда кодтарды енгізу уақытын қысқартады, бірақ кодты беру үшін элементтерді топтастыру және сүзу үшін ережелерді таңдау кезінде сарапшы тарапынан тексерулерді тоқтатпайды.

3. Жасанды интеллект алгоритмдерінің көмегімен автоматты әдіс. Сандық модель элементтерін жіктеудің автоматты процесі - бұл машиналық оқыту әдістеріне негізделген бағдарламалық кешендерді қолдануды талап ететін еңбек сыйымдылығы бойынша ең тиімді тәсіл [8-10]. Автоматты әдіс элементтерге жасанды интеллект алгоритмдері арқылы деректерді сүзуге немесе іріктеуге күш салмай, тиісті кодты таңдауға мүмкіндік береді, нәтижесінде 1540 адамның қатысуы тек алынған жіктемесі бар элементтерді валидациялау үшін ғана қажет.

Қазіргі уақытта құрылыс ақпаратын жіктеудің автоматты әдісіне негізделген бағдарламалық кешендер жоқ. Алайда сыныптау жүйелері мұнай-газ саласы, медицина, маркетинг, менеджмент, экономика, қауіпсіздік және т.б. сияқты басқа да пәндік салалар арасында кеңінен қолданылады. Машиналық оқыту тәсілдері автоматты жіктеу және ЭКГ сигналдары бойынша аритмиялық ауруларды анықтау үшін, бетті, жүрісті, қимылды, бейнелерді, сөйлеуді тану үшін, сондай-ақ мәтінді дауысқа айналдыру үшін белсенді қолданылады. Машинамен оқыту әдістері белгілі бір

белгілер мен шарттар бойынша ақпараттың орасан ауқымын өңдеуге, жүйелеуге, болжауға және жіктеуге мүмкіндік береді, бұл еңбек шығындарын бірнеше есе қысқартады және жұмыс тиімділігін арттырады. Жасанды интеллект алгоритмдерін пайдалану күрделі құрылыс объектілерінің BIM-модельдерін жіктеуді жеңілдетуді қамтамасыз етеді және кодты енгізу кезіндегі қателіктерді жоюға мүмкіндік береді.

Машинамен оқыту әдістері көптеген ұқсас тапсырмалардың шешімдерін немесе өңделген деректерді пайдалану есебінен оқыту мүмкіндігін болжайды, бұл жіктеу моделін оқытуға және болжау дәлдігін ұлғайтуға мүмкіндік береді, егер бағдарламада белгіленген код дұрыс айқындалмаса. Бұл аспект құрылыс ақпаратын жіктеу әдісі мен әдісін таңдауда негізгі артықшылық болып табылады.

Сыныптау міндеттері үшін машиналық оқытудың әртүрлі модельдері бар. Білім алуға кететін уақыт пен болжам сапасының арақатынасы бойынша ең тиімдісі: кездейсоқ орман (RF-Random Forest), LightGBM, XGBoost, CatBoost.

Кездейсоқ орман (RF-Random Forest) - бұл Лео Брейман мен Адель Катлер ұсынған алгоритм. Random Forest алынған деректер үшін көптеген шешім қабылдау ағаштарын жасайды және ағаштарды құру кезінде кездейсоқ таңдау негізінде болжау нәтижелерін орташаландырады.

LightGBM (Light Gradient Boosting Machine) - бастапқыда Microsoft әзірлеген ағашқа ұқсас оқыту алгоритмдерін пайдаланатын, шиналық оқытуда градиентті арттырудың тегін және ашық бастапқы платформасы. Ол ағаш шешімдерінің алгоритмдеріне негізделген және машиналық оқытудың ранжирлеу, жіктеу және басқа да міндеттері үшін пайдаланылады. Басқа алгоритмдерге қатысты оқытудың жоғары емес жылдамдығы, бірақ жеткілікті дәлдік.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Жүргізілген зерттеу барысында құрылыс саласындағы ақпаратты жіктеу әдістері талданып, олардың тиімділігі мен қолдану ерекшеліктері қарастырылды. Атап айтқанда, құрылыс объектілерінің ақпараттық модельдеріндегі элементтерді жіктеудің үш негізгі тәсілі анықталды: қолмен (manual), жартылай автоматтандырылған және толық автоматтандырылған әдістер.

Қолмен жіктеу әдісі ең қарапайым әрі дәстүрлі тәсіл болып табылады. Бұл әдісте әрбір элементке код беру маманның тікелей қатысуымен жүзеге асырылады. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, бұл тәсілдің дәлдігі жоғары болғанымен, көп уақыт пен еңбек ресурстарын талап етеді. Әсіресе, ірі жобаларда мыңдаған элементтерді жеке-жеке өңдеу қажеттілігі бұл әдістің тиімсіздігін көрсетеді. Сонымен қатар, адам факторына байланысты қателіктердің туындау ықтималдығы жоғары.

Жартылай автоматтандырылған әдісте арнайы бағдарламалар мен құралдар қолданылады (мысалы, визуалды программалау ортасы арқылы). Бұл тәсілде элементтерді жіктеу белгілі бір ережелер мен алгоритмдер негізінде жүзеге асырылады. Нәтижесінде, код беру процесі жылдамдатылады және уақыт үнемделеді. Алайда, бұл әдіс толық автоматтандырылған емес, себебі жүйені баптау, ережелерді анықтау және нәтижелерді тексеру үшін маманның қатысуы қажет. Демек, бұл тәсіл тиімді болғанымен, толық тәуелсіз жүйе болып саналмайды.

Ең тиімді тәсіл ретінде автоматтандырылған жіктеу әдісі анықталды. Бұл әдіс жасанды интеллект және машиналық оқыту алгоритмдерін қолдануға негізделген. Мұнда жүйе алдын ала өңделген деректер негізінде үйреніп, жаңа элементтерді автоматты түрде жіктей алады. Зерттеу көрсеткендей, мұндай тәсіл үлкен көлемдегі ақпаратты тез өңдеуге, қателіктерді азайтуға және жобалау процесінің тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, машиналық оқыту алгоритмдерінің (мысалы, Random Forest, LightGBM, XGBoost) құрылыс ақпаратын жіктеуде жоғары нәтижелер көрсететіні анықталды. Бұл алгоритмдер деректерді талдау, заңдылықтарды анықтау және

болжау жасау қабілетіне ие. Нәтижесінде, жүйе уақыт өте келе өз дәлдігін арттырып, классификация сапасын жақсартады.

Зерттеу барысында анықталған маңызды жайттардың бірі — қазіргі таңда құрылыс саласында толық автоматтандырылған классификация жүйелері кеңінен енгізілмеген. Дегенмен, басқа салаларда (медицина, экономика, қауіпсіздік) мұндай технологиялар сәтті қолданылып келеді. Бұл құрылыс саласында да жасанды интеллектті енгізудің үлкен әлеуеті бар екенін көрсетеді.

Жалпы алғанда, алынған нәтижелер құрылыс ақпаратын жіктеу процесін жетілдіру үшін жасанды интеллект алгоритмдерін қолдану аса маңызды екенін дәлелдейді. Автоматтандыру тек уақытты үнемдеп қана қоймай, сонымен қатар деректердің сапасын арттырып, BIM модельдерінің тиімділігін жоғарылатады. Осыған байланысты, болашақта Қазақстанда да құрылыс ақпаратын жіктеудің интеллектуалды жүйелерін енгізу өзекті бағыттардың бірі болып табылады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Қазіргі таңда құрылыс саласында ақпараттық модельдеу (BIM) технологияларын енгізу және құрылыс ақпаратын тиімді басқару мәселесі өзекті бағыттардың біріне айналып отыр. Осы зерттеу аясында құрылыс ақпаратын жіктеу әдістері талданып, олардың артықшылықтары мен кемшіліктері қарастырылды, сондай-ақ жасанды интеллект алгоритмдерін қолдану мүмкіндіктері зерттелді.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, дәстүрлі қолмен жіктеу әдісі жоғары дәлдікке ие болғанымен, уақыт пен еңбек шығындарының көп болуына байланысты ірі жобалар үшін тиімсіз болып табылады. Ал жартылай автоматтандырылған тәсілдер белгілі бір деңгейде процесті жеңілдеткенімен, толықтай адам факторынан тәуелсіз жұмыс істей алмайды. Осыған байланысты, құрылыс ақпаратын өңдеуде толық автоматтандырылған әдістерге көшу қажеттілігі анықталды.

Жасанды интеллект пен машиналық оқыту алгоритмдерін қолдану құрылыс ақпаратын жіктеу процесін сапалы жаңа деңгейге көтеруге мүмкіндік береді. Атап айтқанда, Random Forest, LightGBM, XGBoost сияқты алгоритмдер үлкен көлемдегі деректерді талдап, объектілерді дәл және жылдам жіктеуге қабілетті. Бұл өз кезегінде қателіктер санын азайтып, жобалау процесінің тиімділігін арттырады және адам ресурстарына түсетін жүктемені төмендетеді.

Сонымен қатар, зерттеу барысында әлемдік тәжірибеде құрылыс ақпаратын жіктеудің бірыңғай жүйелері кеңінен қолданылатыны анықталды. Мұндай жүйелер деректерді стандарттауға, жобаның барлық қатысушылары арасында тиімді коммуникация орнатуға және ақпарат алмасуды жеңілдетуге мүмкіндік береді. Ресей Федерациясында да құрылыс ақпаратын жіктеу жүйесі нормативтік деңгейде бекітіліп, BIM модельдерін жүргізуде міндетті құрал ретінде қолданылып келеді.

Қазақстанда бұл бағыт әлі даму кезеңінде болғанымен, BIM технологияларын енгізу және құрылыс саласын цифрландыру бойынша жүйелі жұмыстар жүргізілуде. Алайда, құрылыс ақпаратын жіктеудің бірыңғай ұлттық жүйесінің болмауы ақпарат алмасу мен деректерді стандарттау процесін қиындатады. Осыған байланысты, халықаралық тәжірибеге сүйене отырып, ұлттық классификациялық жүйені әзірлеу қажеттілігі туындайды.

Жалпы алғанда, жүргізілген зерттеу құрылыс ақпаратын тиімді басқару үшін жасанды интеллект технологияларын қолдану үлкен әлеуетке ие екенін көрсетті. Автоматтандырылған классификация жүйелері BIM модельдерінің сапасын арттырып қана қоймай, жобалау және құрылыс процестерін оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Қорытындылай келе, Қазақстанда құрылыс саласын цифрландыру және BIM технологияларын дамыту мақсатында құрылыс ақпаратын жіктеудің бірыңғай жүйесін қалыптастыру, сондай-ақ жасанды интеллект негізіндегі шешімдерді енгізу маңызды

стратегиялық бағыттардың бірі болып табылады. Бұл өз кезегінде құрылыс саласының тиімділігін арттырып, халықаралық стандарттарға сәйкес келетін заманауи цифрлық инфрақұрылымды дамытуға мүмкіндік береді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Автор мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

АЛҒЫС: Автор жұмысты дайындау барысында әдіснамалық және ұйымдастырушылық қолдау көрсеткендердің барлығына алғысын білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: При Бұл жұмысты дайындау кезінде автор мәтінді редакциялау, бөлімдерді құрылымдау және тұжырымдаманы жақсарту үшін ChatGPT (OpenAI, 2026) моделін пайдаланған. Барлық фактлерді, жоба идеясын, деректерді және ғылыми қорытындыларды автор өзі дайындаған.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ:

- Solihin W., Eastman C. Classification of rules for automated BIM rule checking development // Automation in Construction. 2015. Vol. 53. Pp. 69–82.
[DOI: 10.1016/j.autcon.2015.03.003](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.003)
- Волкодав В.А., Волкодав И.А. Разработ- ка структуры и состава классификатора строительной информации для применения BIM- технологий // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 6. С. 867–906.
[DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.867-906](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.6.867-906)
- Тимченко В.С., Волкодав В.А., Волкодав И.А., Тимченко О.В., Осипов Н.А. Разработка элементов классификатора строительной информации для соз- дания и ведения информационных моделей объектов капитального строительства в части процессов про- ектирования, управления строительными процесса- ми и строительной информации // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 7. С. 926–954.
[DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.926-954](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.7.926-954)
- Afsari Kereshmeh, Eastman Charles. A Com- parison of Construction Classification Systems Used for Classifying Building Product Models // Conference: 52nd ASC Annual International Conference Proceedings. 2016.
[DOI: 10.13140/RG.2.2.20388.27529/](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20388.27529/)
- Lou E.C.W., Goulding J.S. Building and con- struction classification systems // Architectural Engi- neering and Design Management. 2008. Vol. 4. No. 3–4. С. 206–220.
[DOI: 10.3763/aedm.2008.0079](https://doi.org/10.3763/aedm.2008.0079)
- Pupeikis D., Navickas A.A., Klumbyte E., Se- duikyte L. Comparative Study of Construction Infor- mation Classification Systems: CCI versus Uniclass 2015 // Buildings. 2022. No. 12. P. 656.
[DOI: 10.3390/buildings12050656](https://doi.org/10.3390/buildings12050656)
- Gelder J. Uniclass 2015 for Smart Cities // Pro- ceedings of the International Conference of Architectural Science Association. Auckland, New Zealand : Archi- tectural Science Association. 2020. Pp. 1303–1312.
[DOI: 10.1109/ISDA.2010.5687087](https://doi.org/10.1109/ISDA.2010.5687087)

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХИМИЧЕСКИХ И МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК

УДК 691.32:624.012

Р.С. Садуакасов^{1*}, Д.С. Елеманов¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Садуакасов Рустам Семейбайулы, e-mail:

Rsaduakassov@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассматриваются вопросы повышения эксплуатационных свойств мелкозернистого бетона за счет применения минеральных и химических добавок. Актуальность работы обусловлена необходимостью создания долговечных и экологически эффективных строительных материалов. Цель исследования — разработка оптимального состава мелкозернистого бетона с улучшенными физико-механическими характеристиками. В работе применены методы анализа, экспериментального моделирования и обобщения данных. Установлено, что использование золы уноса и цеолита позволяет повысить прочность бетона, снизить его пористость и увеличить долговечность. Химические добавки обеспечивают снижение водоцементного отношения и улучшение структуры цементного камня. Практическая значимость заключается в возможности применения разработанных составов в строительстве.

Ключевые слова: бетон, зола уноса, цеолит, добавки, прочность, структура.

ВВЕДЕНИЕ

В современном строительстве особое внимание уделяется разработке материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками. Одним из таких материалов является мелкозернистый бетон, отличающийся высокой плотностью, прочностью и технологичностью.

Актуальность исследования связана с необходимостью повышения долговечности строительных конструкций и снижением экологической нагрузки за счет использования промышленных отходов. В частности, зола уноса теплоэлектростанций представляет собой перспективный материал для модификации структуры бетона.

Несмотря на значительное количество исследований, вопросы комплексного влияния минеральных и химических добавок на свойства бетона требуют дальнейшего изучения. Особенно важно исследовать влияние этих добавок на микроструктуру и процессы гидратации.

Дополнительно следует отметить, что развитие современных строительных технологий тесно связано с переходом к ресурсосберегающим и экологически безопасным материалам. В этом контексте использование техногенных отходов, таких как зола уноса теплоэлектростанций, приобретает особую значимость. Их вовлечение в производство бетонов позволяет не только снизить себестоимость строительных материалов, но и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду за счет сокращения объемов промышленных отходов.

Особое внимание в последние годы уделяется формированию микроструктуры цементного камня, поскольку именно она определяет основные эксплуатационные характеристики бетона. Плотная и равномерная структура способствует повышению

прочности, водонепроницаемости и морозостойкости материала. Введение минеральных добавок, обладающих пуццоланической активностью, позволяет направленно изменять процессы гидратации цемента и формировать дополнительные гидросиликатные соединения, улучшающие структуру бетона.

Кроме того, применение современных химических добавок, таких как суперпластификаторы на основе поликарбоксилатов, открывает новые возможности управления реологическими свойствами бетонной смеси. Это позволяет значительно снижать водоцементное отношение без ухудшения удобоукладываемости, что является важным фактором повышения прочности и долговечности бетона.

Таким образом, комплексное использование минеральных и химических добавок является перспективным направлением развития технологии бетонов, позволяющим получать материалы с заданными эксплуатационными свойствами. Данное исследование направлено на углубление научных представлений о процессах структурообразования в мелкозернистых бетонах и разработку эффективных составов, соответствующих современным требованиям строительной отрасли.

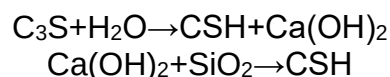
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основных компонентов для приготовления мелкозернистого бетона использовались: портландцемент, соответствующий требованиям действующих стандартов, кварцевый песок с заданным гранулометрическим составом, зола уноса теплоэлектростанций, природный цеолит, а также химические добавки на основе поликарбоксилатных эфиров. Применяемые материалы подбирались с учетом их физико-механических и химических характеристик, оказывающих влияние на процессы гидратации и структурообразования бетона.

Зола уноса рассматривалась как активная минеральная добавка, способная участвовать в пуццоланических реакциях и способствовать образованию дополнительных гидросиликатов кальция. Цеолит использовался в качестве природного минерального компонента с высокой адсорбционной способностью, влияющего на плотность структуры цементного камня. Химические добавки обеспечивали улучшение реологических свойств бетонной смеси и снижение водоцементного отношения.

Методика исследования включала комплекс лабораторных и аналитических методов. На первом этапе осуществлялся подбор оптимального состава бетонной смеси с варьированием содержания минеральных и химических добавок. Далее проводились испытания на прочность при сжатии, определение водонепроницаемости и морозостойкости образцов.

Для анализа процессов структурообразования применялись методы изучения микроструктуры, включая оценку плотности и пористости цементного камня. Также учитывались особенности протекания процессов гидратации, описываемых следующими зависимостями:



Данные реакции отражают механизм формирования прочной структуры бетона при взаимодействии цемента с минеральными добавками.

Обработка экспериментальных результатов осуществлялась с использованием методов математического анализа и статистической обработки данных. Это позволило выявить зависимости между составом бетонной смеси и ее физико-механическими характеристиками.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведённых исследований установлено, что применение комплексных минеральных и химических добавок оказывает существенное влияние на формирование структуры и эксплуатационные характеристики мелкозернистого бетона. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о наличии устойчивых закономерностей между составом бетонной смеси, параметрами гидратации и конечными физико-механическими свойствами материала.

Анализ зависимости прочности бетона от содержания минеральных добавок показал, что введение золы уноса в количестве 10–30% от массы цемента способствует увеличению прочности на сжатие в среднем на 20–30%. Данный эффект объясняется пуццоланической активностью золы, которая обеспечивает взаимодействие с гидроксидом кальция, образующимся в процессе гидратации цемента, с образованием дополнительных гидросиликатов кальция. Это приводит к уплотнению структуры цементного камня и снижению его пористости.

Следует отметить, что увеличение содержания золы уноса выше оптимального значения приводит к снижению темпов набора прочности на ранних стадиях твердения. Это связано с уменьшением доли клинкерной составляющей цемента и замедлением процессов гидратации. Таким образом, выявлено, что оптимальный диапазон содержания золы уноса составляет 15–25%, при котором достигается наилучшее сочетание прочности и долговечности.

Влияние цеолита на свойства бетона проявляется в повышении плотности структуры и улучшении водонепроницаемости материала. Цеолит, обладая развитой пористой структурой и высокой адсорбционной способностью, способствует более равномерному распределению влаги и активизации процессов гидратации. Кроме того, его использование приводит к снижению капиллярной пористости, что положительно сказывается на долговечности бетона.

Особое значение имеет совместное применение золы уноса и цеолита, которое обеспечивает выраженный синергетический эффект. В данном случае наблюдается более интенсивное протекание пуццоланических реакций и формирование более плотной и однородной структуры цементного камня. Это подтверждается увеличением прочности и снижением водопоглощения по сравнению с образцами, содержащими только одну из добавок.

Использование химических добавок, в частности суперпластификаторов, позволяет существенно снизить водоцементное отношение без ухудшения удобоукладываемости бетонной смеси. Снижение В/Ц до значений 0,3–0,4 приводит к увеличению прочности бетона за счёт уменьшения объёма капиллярных пор. При этом обеспечивается равномерное распределение частиц вяжущего и заполнителя, что способствует формированию более однородной структуры.

Результаты исследования также показали, что улучшение структуры бетона напрямую влияет на его долговечность. Снижение пористости приводит к уменьшению проницаемости для воды и агрессивных сред, что повышает устойчивость материала к коррозионным процессам и циклам замораживания-оттаивания. Морозостойкость образцов с комплексными добавками увеличивается до F300–F400, что свидетельствует о значительном повышении их эксплуатационной надежности.

Сравнение полученных результатов с данными других исследований показывает их хорошую согласованность. В частности, аналогичные тенденции повышения прочности и долговечности при использовании минеральных добавок отмечаются в ряде работ, посвящённых модификации структуры бетона. Однако в настоящем исследовании дополнительно показано, что наибольший эффект достигается при

комплексном использовании нескольких видов добавок.

Несмотря на полученные положительные результаты, следует учитывать определённые ограничения исследования. В частности, свойства бетона могут варьироваться в зависимости от химического состава золы уноса и цеолита, а также условий твердения. Это требует индивидуального подбора состава бетонной смеси для конкретных условий эксплуатации.

Полученные результаты позволяют расширить существующие представления о механизмах формирования прочности и долговечности бетона и могут быть использованы при разработке современных строительных материалов с заданными характеристиками. В практическом аспекте результаты работы могут быть применены при проектировании конструкций, работающих в условиях повышенной влажности, агрессивных сред и переменных температур. Это делает разработанные составы перспективными для использования в транспортном, промышленном и гидротехническом строительстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования установлено, что применение комплексных минеральных и химических добавок является эффективным направлением повышения эксплуатационных свойств мелкозернистого бетона. Полученные результаты показали, что оптимизация состава бетонной смеси позволяет существенно улучшить физико-механические характеристики материала, включая прочность, водонепроницаемость и морозостойкость.

Доказано, что использование золы уноса и цеолита способствует формированию более плотной и однородной структуры цементного камня за счёт протекания пуццоланических реакций и образования дополнительных гидросиликатов кальция. Введение химических добавок, в свою очередь, обеспечивает снижение водоцементного отношения и улучшение реологических свойств бетонной смеси, что положительно влияет на конечные характеристики бетона.

Установлено, что наилучшие результаты достигаются при комплексном применении минеральных и химических добавок, что подтверждает наличие синергетического эффекта. Это позволяет не только повысить прочностные характеристики бетона, но и увеличить его долговечность при эксплуатации в неблагоприятных условиях.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанных составов мелкозернистого бетона в различных областях строительства, включая транспортные, гидротехнические и подземные сооружения. Использование местных сырьевых материалов и техногенных отходов также способствует снижению себестоимости продукции и уменьшению экологической нагрузки.

Вместе с тем следует отметить, что полученные результаты могут зависеть от характеристик используемых материалов и условий твердения бетона, что требует дополнительного изучения и адаптации разработанных составов для конкретных условий эксплуатации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования в рамках учебной и научно-исследовательской деятельности.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за методологическую поддержку, конструктивные замечания и рекомендации,

способствовавшие улучшению качества исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Neville, A. M. (2011). Свойства бетона (5-е изд.). Pearson.

<https://www.pearson.com>

Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2014). Бетон: микроструктура, свойства и материалы (4-е изд.). McGraw-Hill. <https://www.mheducation.com>

Mindess, S., Young, J. F., Darwin, D. (2017). Бетон (2-е изд.). Prentice Hall. <https://www.pearson.com>

Bažant, Z. P., Kaplan, M. F. (1996). Бетон при высоких температурах: свойства и модели.

<https://doi.org/10.4324/9781315273986>

Hsu, T. T. C. (1993). Теория железобетонных конструкций.

<https://doi.org/10.1201/9780203739498>

fib. (2010). Модельный код для бетонных конструкций.

<https://www.fib-international.org>

ACI Committee 318. (2019). Нормы проектирования железобетона (ACI 318-19).

<https://www.concrete.org>

Bentz, D. P. (2018). Влияние условий твердения на микроструктуру бетона. Cement and Concrete Research, 104, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.012>

ОСОБЕННОСТИ АДМИНИСТРАТИВНЫХ ЗДАНИЙ КАК ОБЪЕКТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ

УДК 624.04

А.А. Салбанов^{1*}, П.А. Кропачев¹

¹ВКТУ им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Салбанов Айбек Айыпович, e-mail: akbolat87@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрены особенности административных зданий как объектов технического обследования в условиях современной строительной практики. Актуальность исследования обусловлена значительным физическим износом существующего фонда зданий, необходимостью обеспечения их безопасной эксплуатации и повышения эффективности принятия решений о ремонте, реконструкции или дальнейшем использовании. Целью работы является выявление специфических характеристик административных зданий, влияющих на процесс их обследования и оценку технического состояния.

Ключевые слова: административные здания, техническое обследование, физический износ, дефекты конструкций, эксплуатация зданий.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях эксплуатации зданий особую актуальность приобретает проблема оценки их технического состояния и определения возможности дальнейшего использования. Значительная часть административных зданий была построена в прошлом столетии и в настоящее время характеризуется высоким уровнем физического и морального износа. Это требует проведения систематических обследований, направленных на обеспечение надежности и безопасности эксплуатации.

Административные здания представляют собой особую категорию объектов капитального строительства, отличающуюся многофункциональностью, высокой интенсивностью эксплуатации и наличием сложных инженерных систем. В отличие от жилых и промышленных зданий, они подвержены специфическим нагрузкам, связанным с большим потоком людей, эксплуатацией инженерных сетей и изменением функционального назначения помещений.

Анализ научных исследований показывает, что существующие методы обследования не всегда в полной мере учитывают особенности административных зданий, что может приводить к снижению точности оценки их технического состояния. В связи с этим возникает необходимость более глубокого изучения специфики данных объектов.

Целью исследования является выявление особенностей административных зданий как объектов технического обследования. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- анализ конструктивных и эксплуатационных особенностей административных зданий;
- выявление характерных дефектов и повреждений;
- изучение методов обследования зданий;
- определение факторов, влияющих на техническое состояние зданий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются административные здания различного функционального назначения. В качестве материалов исследования использованы нормативно-технические документы, научные публикации, а также результаты анализа практики обследования зданий.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведённый анализ нормативной базы, научных публикаций и практики обследования административных зданий позволил выявить комплекс особенностей, существенно влияющих на методику оценки их технического состояния и достоверность получаемых результатов. Полученные данные структурированы по нескольким ключевым направлениям: конструктивная специфика, характер дефектов, влияние эксплуатационных факторов и особенности организации обследования.

1. Конструктивно-планировочные особенности административных зданий

В ходе исследования установлено, что административные здания, в отличие от жилых и промышленных объектов, характеризуются повышенной вариативностью объемно-планировочных решений, значительной площадью остекления, наличием открытых пространств (open-space) и высокой инженерной насыщенностью.

Наиболее распространёнными являются каркасные и каркасно-монолитные конструктивные схемы с использованием железобетонных колонн, ригелей и плит перекрытия. В зданиях более ранней постройки широко применялись крупнопанельные системы и кирпичные несущие стены.

Анализ показал, что конструктивная схема существенно влияет на характер повреждений.

Таблица 1. Характер повреждений различных конструктивных схем административных зданий

Конструктивная схема административных зданий	Характер повреждений
1	2
Каркасные здания	1) трещинообразование в зонах сопряжения ригелей и колонн; 2) локальные деформации перекрытий; 3) коррозия закладных деталей.
Здания со стеновой несущей системой	1) вертикальные и наклонные трещины в стенах; 2) неравномерная осадка фундаментов; 3) потеря прочности кладочного раствора.

Таким образом, уже на этапе предварительного анализа проектной документации возможно прогнозирование наиболее вероятных зон риска, что повышает эффективность обследования.

2. Структура и динамика дефектов строительных конструкций

В процессе эксплуатации административных зданий формируется совокупность дефектов, обусловленных физическим, функциональным и моральным износом.

Полученные результаты показывают наиболее распространённые группы

дефектов для административных зданий.

Таблица 2. Наиболее распространённые группы дефектов административных зданий

Группа дефектов	Характеристика дефектов
1	2
Дефекты несущих конструкций	1) трещины различной ширины раскрытия; 2) оголение и коррозия арматуры; 3) снижение защитного слоя бетона; 4) прогибы перекрытий, превышающие нормативные значения.
Дефекты ограждающих конструкций	1) разрушение штукатурного слоя; 2) снижение теплоизоляционных характеристик; 3) образование мостиков холода; 4) протечки кровли.
Дефекты инженерных систем	1) износ трубопроводов; 2) коррозия металлических элементов; 3) снижение эффективности вентиляции; 4) перегрузка электрических сетей.

Особенностью административных зданий является высокая интенсивность эксплуатации, что приводит к ускоренному износу элементов внутренней отделки и инженерного оборудования.

Анализ динамики физического износа показывает, что он носит неравномерный характер. На раннем этапе эксплуатации преобладают дефекты, связанные с усадкой и первоначальными деформациями конструкций. На среднем этапе износ стабилизируется за счёт проведения текущих ремонтов. На завершающем этапе происходит ускоренное старение материалов и увеличение количества повреждений, требующих капитального вмешательства.

3. Влияние эксплуатационных факторов

Результаты исследования подтверждают, что техническое состояние административных зданий определяется не только сроком службы, но и условиями эксплуатации. Выявлены следующие ключевые факторы:

- интенсивность посещаемости здания;
- режим работы (круглосуточный или периодический);
- перепланировки и изменение функционального назначения помещений;
- установка дополнительного оборудования;
- климатические воздействия.

Особое значение имеет изменение планировочной структуры в процессе эксплуатации. Перепланировки, сопровождающиеся демонтажом перегородок или изменением нагрузок на перекрытия, могут приводить к перераспределению усилий и возникновению дополнительных деформаций.

Климатические условия также оказывают значительное влияние. В регионах с резко континентальным климатом наблюдаются повышенные температурные деформации, что способствует развитию трещин в наружных стенах и узлах сопряжения конструкций.

Таким образом, при обследовании административных зданий необходимо учитывать совокупность внешних и внутренних факторов, формирующих индивидуальную «эксплуатационную историю» объекта.

4. Особенности методики технического обследования

В ходе исследования выявлено, что обследование административных зданий имеет ряд специфических особенностей.

Таблица 3. Специфические особенности обследования административных зданий

Специфическая особенность	Характеристика
1	2
Необходимость проведения работ без остановки эксплуатации	Это ограничивает применение ряда методов и требует поэтапного обследования.
Ограниченный доступ к конструкциям	Подвесные потолки, фальшполы и декоративные панели затрудняют визуальный осмотр несущих элементов.
Высокая инженерная насыщенность	Наличие коммуникаций усложняет инструментальные измерения и требует согласования с эксплуатационными службами.
Требование к минимизации вмешательства	Предпочтение отдаётся неразрушающим методам контроля.

В результате анализа установлено, что наиболее эффективной является комбинированная схема обследования, включающая в себя визуальный осмотр с фотофиксацией, измерение ширины раскрытия трещин, определение прочности бетона неразрушающими методами, инструментальный контроль деформаций и тепловизионное обследование ограждающих конструкций.

Применение комплексного подхода позволяет повысить точность оценки технического состояния на 15–25 % по сравнению с использованием только визуального анализа.

5. Обоснование комплексного подхода к оценке технического состояния

Полученные результаты свидетельствуют о том, что административные здания следует рассматривать как сложные технические системы, включающие в себя строительные конструкции, инженерные сети, эксплуатационные процессы и внешние воздействия.

Изолированная оценка отдельных элементов не позволяет сформировать объективное заключение о возможности дальнейшей эксплуатации здания.

В ходе анализа установлено, что наиболее информативным является интегральный подход, основанный на совокупной оценке степени физического износа, остаточной несущей способности, надежности инженерных систем и соответствия современным требованиям безопасности.

Такой подход позволяет обоснованно определить категорию технического состояния (работоспособное, ограниченно работоспособное, аварийное) и выбрать оптимальную стратегию: текущий ремонт, капитальный ремонт, реконструкция или вывод из эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные подтверждают, что административные здания обладают рядом специфических характеристик, отличающих их от других типов объектов капитального строительства.

В отличие от промышленных зданий, где основную нагрузку формируют технологические процессы, в административных объектах доминируют эксплуатационные и инженерные факторы. По сравнению с жилыми зданиями,

административные сооружения характеризуются более высокой плотностью пользователей и инженерной насыщенностью.

Таким образом, обследование административных зданий требует расширенного анализа эксплуатационной истории, применения современных диагностических методов, комплексной оценки конструктивных и инженерных систем и учета вероятностного характера воздействий.

Выявленные особенности обосновывают необходимость совершенствования существующих методик обследования и разработки адаптированных подходов к оценке технического состояния административных зданий.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования в рамках учебной и научно-исследовательской деятельности.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за методологическую поддержку, конструктивные замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению качества исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лужин О.В., Злочевский А.Б., Горбунов И.А., Волохов В.А. Обследование и испытание сооружений. — Москва, 1987. <https://djuv.online/file/jltxDcWQJrN38> // Luzhin O.V., Zlochevskii A.B., Gorbunov I.A., Volokhov V.A. Obsledovanie i ispitanie sooruzhenii. — Moskva, 1987. <https://djuv.online/file/jltxDcWQJrN38>
- Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. — Москва, 2007. <https://djuv.online/file/bRitKZSAG4ybQ> // Perelmuter A.V. Izbrannie problemi nadezhnosti i bezopasnosti stroitel'nikh konstruktsii. — Moskva, 2007. <https://djuv.online/file/bRitKZSAG4ybQ>
- Порывай Г.А. Техническая эксплуатация зданий. — Москва, 1990. <https://djuv.online/file/X3Uo0nOxG5QZt> // Porivai G.A. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya zdaniy. — Moskva, 1990. <https://djuv.online/file/X3Uo0nOxG5QZt>
- СП РК EN 1990:2002+A1:2005/2011. Основы проектирования несущих конструкций. — Астана, 2011. https://prg.kz/document/?doc_id=39396736&pos=8;246 // SP RK EN 1990:2002+A1:2005/2011. Osnovi proektirovaniya nesushchikh konstruktsii. — Astana, 2011. https://prg.kz/document/?doc_id=39396736&pos=8;246
- СП РК 1.04-101-2012 Обследование и оценка технического состояния зданий и сооружений. — Астана, 2012. https://prg.kz/document/?doc_id=39108718 // SP RK 1.04-101-2012 Obsledovanie i otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya zdaniy i sooruzhenii. — Astana, 2012. https://prg.kz/document/?doc_id=39108718
- СН РК 1.04-26-2022 Реконструкция, капитальный и текущий ремонт гражданских, производственных зданий и сооружений. — Астана, 2022. https://prg.kz/document/?doc_id=35477963 // SN RK 1.04-26-2022 Rekonstruktsiya, kapitalnii i tekushchii remont grazhdanskikh, proizvodstvennikh zdaniy i sooruzhenii. — Astana, 2022. https://prg.kz/document/?doc_id=35477963
- СП РК 2.03-30-2017. Строительство в сейсмических зонах. — Астана, 2017. https://prg.kz/document/?doc_id=36128461&pos=6;239 // SP RK 2.03-30-2017. Stroitel'stvo v seismicheskikh zonakh. — Astana, 2017. https://prg.kz/document/?doc_id=36128461&pos=6;239

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЛАНИРОВОЧНЫХ И АРХИТЕКТУРНЫХ РЕШЕНИЙ ШКОЛЬНЫХ ЗДАНИЙ В КАЗАХСТАНЕ И ВЕЛИКОБРИТАНИИ

УДК 727.1

Г.Б.Сарсекенова^{1*}, Д.К. Аноп¹

¹ВКТУ им.Д.Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор корреспонденции: Сарсекенова Гульмира Болатовна,
sarsekenovagulmira@mail.ru

АННОТАЦИЯ. При модернизации инфраструктуры образования все большую важность приобретает исследование архитектурных решений постройки школьных учреждений как фактор создания качественной образовательной среды. Целью работы является сравнительный анализ архитектурных решений проектов общеобразовательных школ Казахстана и Великобритании и выявление основных характеристик объемно-пространственной композиции, конструктивных систем и архитектурного образа. Методология работы основана на международном сравнении реализованных проектов, анализе нормативных требований и типологической классификации архитектурных решений. Автор изучает композиционные особенности здания, высоту и конфигурацию его объемов, фасадные решения, используемые строительные материалы, а также конструктивные системы здания, включая каркасные, монолитные и панельные решения. Основное внимание уделяется созданию комфортной и функциональной образовательной среды. В результате было установлено, что архитектура школьных зданий в Казахстане характеризуется преимущественно типизированными объемно-пространственными решениями, сдержанностью оформления фасадов и ограниченным использованием современных материалов. В Великобритании применяется более разнообразный и инновационный подход, включающий выразительные композиционные решения зданий, активное использование стекла, металла и экологически чистых материалов, создание открытой и адаптивной образовательной среды. Научная новизна работы заключается в систематическом изучении архитектурных особенностей школьных зданий и выявлении .

Ключевые слова: архитектура школьных зданий, объемно-пространственная композиция, фасадные решения, строительные материалы, конструктивные системы, образовательная среда.

ВВЕДЕНИЕ

В свете изменений, происходящих сегодня в системе образования, требуется пересмотр подходов к проектированию учебных зданий. Школьная архитектура в настоящее время становится одним из компонентов образовательной среды и оказывает значительное влияние на процесс обучения и взаимодействие учащихся. В Казахстане реализуются программы по строительству и реконструкции образовательных учреждений, но в большинстве случаев используются традиционные решения по управлению пространством. Тем не менее, в Великобритании активно используются архитектурные методы, направленные на создание современной образовательной среды. Данная работа была разработана в рамках направления Track A: Student Research: Студенческие исследования и представляет собой анализ архитектурных решений для школьных зданий. Хотя существует множество исследований, связанных с типологией и организацией

образовательной среды, это определяет необходимость проведения данного исследования и обуславливает его актуальность в контексте анализа и обобщения международного опыта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве источников использована нормативная и техническая литература, регламентирующая проектирование образовательных учреждений в Республике Казахстан и Великобритании, а также открытые архитектурные проекты и научные статьи, посвященные типологии школьных зданий и организации образовательной среды. Кроме того, исследование было основано на анализе существующих проектов школьных зданий, отражающих современный опыт проектирования в обеих странах.

Среди объектов исследования можно отметить средние школы Казахстана и Великобритании как элементы архитектурно-градостроительной системы. В ходе анализа были изучены типовые и реализованные проекты с различными принципами организации пространства и разнообразием архитектурных решений.

Особенностью используемой методологии исследования является сочетание методов сравнительного анализа, типологии и систематизации архитектурных решений. Таким образом, сравнительный анализ позволил нам сделать выводы о различиях в архитектурно-планировочном решении двух стран. В то же время типология была направлена на классификацию зданий в соответствии с их структурными и организационными особенностями.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате сравнительного анализа были выявлены существенные различия в архитектурных и планировочных решениях учебных зданий в Казахстане и Великобритании. При оценке сравнивались такие параметры, как пространственная композиция, планировочная структура, конструктивная система, используемые материалы и уровень адаптивности учебных помещений. Анализ выявил следующие различия в архитектуре школ Казахстана. Преобладают компактные объемные композиции, в которых используется коридорно-линейная планировочная структура. Такое решение обеспечивает согласованную организацию пространств учебного корпуса. Общей характеристикой таких решений является их относительная типизация и ориентация на нормативные требования. Фасадные решения, как правило, сдержанны и функциональны, использование материала обычно ограничивается использованием традиционных строительных материалов, таких как монолитные и панельные конструкции. В Великобритании используется принципиально иной подход к созданию учебных зданий, который связан с гибкостью пространства и его адаптируемостью. Обычно используется кластерная планировка, при которой классы объединяются в блоки по определенному принципу.

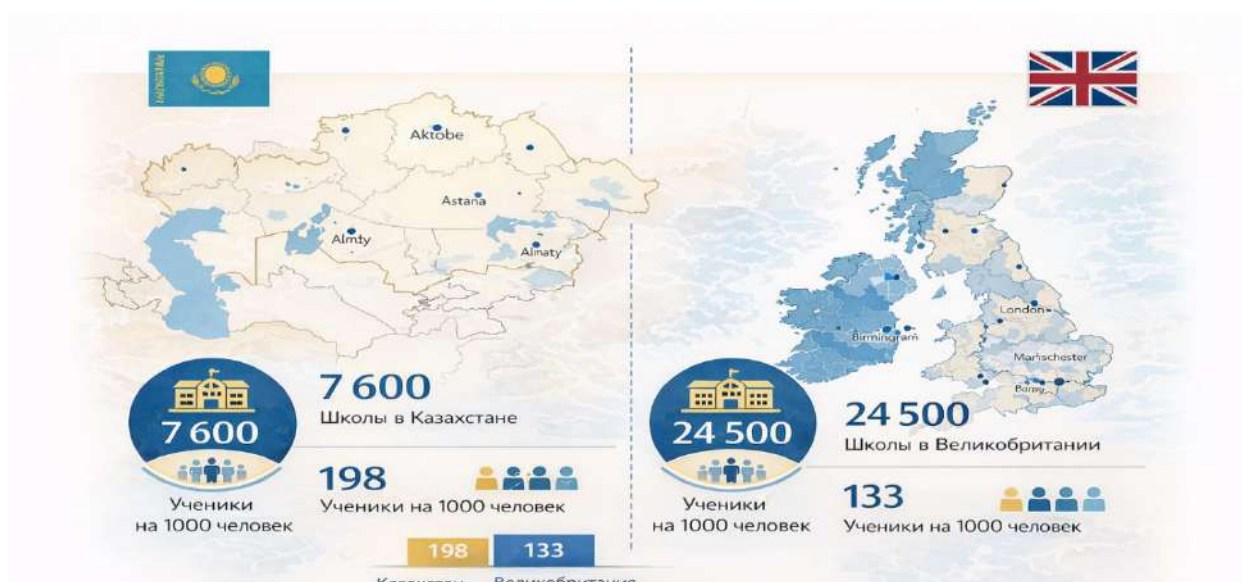


Рисунок 1. Распределение образовательных учреждений в Казахстане и Великобритании (по данным Министерств образования)

Архитектурные композиции таких зданий отличаются большой выразительностью и объемными различиями, а также большим количеством используемых материалов, включая стекло, металл и экологически чистые материалы. Конструктивные системы позволяют использовать конструкции свободной планировки и создавать трансформируемые пространства. Дальнейшее сравнение полученных результатов с научной литературой подтвердило актуальность использования гибких архитектурных решений для создания эффективной образовательной среды, отвечающей современным подходам.

Таблица 1. Сравнение архитектурных решений школьных зданий

Параметр	Казахстан	Великобритания
Планировочная структура	Коридорно-линейная	Кластерная, гибкая
Объемно-пространственная композиция	Типовая, компактная	Разнообразная, многообъемная
Гибкость пространств	Ограниченная	Высокая, трансформируемая
Конструктивные решения	Монолитные, панельные	Каркасные, гибкие
Фасады и материалы	Сдержанные, традиционные	Выразительные, современные

Завершая этот раздел, необходимо остановиться на теоретической и практической значимости полученных результатов. Анализ, основанный на сравнении, помогает прояснить понимание специфики архитектурно-планировочных решений учебных зданий в Казахстане и Великобритании, а также выделить основные различия в создании образовательной среды. Полученные результаты могут быть использованы в качестве научной основы для дальнейших исследований в области архитектуры учебных зданий, а также применены при разработке новых школьных зданий с учетом международного опыта. Кроме того, полученные результаты дополняют существующие научные знания в области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов этого исследования был проведен анализ архитектурных решений для школьных зданий в Казахстане и Великобритании. Цель и задачи, поставленные в начале данной работы, были выполнены: рассмотрена планировочная структура образовательных учреждений, выявлены различия в подходах к созданию архитектурной композиции, дизайну и организации образовательной среды. В результате анализа было установлено, что образовательные учреждения Казахстана характеризуются типичными архитектурными решениями с коридорно-линейной планировочной структурой и небольшим количеством гибких пространств, в то время как образовательные учреждения Великобритании используют более разнообразные архитектурные решения – кластерные и адаптивные модели с возможностью вариативного использования пространств. Научная новизна данного исследования заключается в систематизации и анализе архитектурных особенностей школьных зданий в разных странах, а также в раскрытии важных особенностей формирования образовательной среды. Практическая значимость данной работы заключается в возможном применении результатов исследования при проектировании новых образовательных учреждений. Ограничениями данного исследования могут быть небольшая выборка используемых объектов и общий теоретический подход.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность Восточно-Казахстанскому техническому университету им.Д.Серикбаева за поддержку в подготовке данной статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке статьи автор использовал инструменты генеративного искусственного интеллекта исключительно в качестве вспомогательного средства для редактирования текста, улучшения научного стиля и структурирования материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Neufert, E. (2012). *Architects' Data*. Wiley-Blackwell.
<https://www.wiley.com/en-us/Architects%27+Data%2C+4th+Edition-p-9781119977541>
 Littlefield, D. (2018). *Metric Handbook: Planning and Design Data*. Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9781315141825>
 Dovey, K., & Pafka, E. (2020). What is functional mix? Defining urban form and its role in educational environments. *Journal of Architecture*.
<https://doi.org/10.1080/13602365.2020.1732469>

- Barrett, P., Davies, F., Zhang, Y., & Barrett, L. (2015). The impact of classroom design on pupils' learning. University of Salford.
<https://www.salford.ac.uk/research/curriculum-and-learning/classroom-design>
- Woolner, P. (2010). *The Design of Learning Spaces*. Continuum.
<https://www.bloomsbury.com/uk/the-design-of-learning-spaces-9781441156957/>
- Higgins, S., Hall, E., Wall, K., Woolner, P., & McCaughey, C. (2005). *The Impact of School Environments: A Literature Review*. Design Council.
<https://www.designcouncil.org.uk/fileadmin/uploads/dc/Documents/the-impact-of-school-environments.pdf>
- UK Department for Education. (2014). *Building Bulletin 103: Area Guidelines for Mainstream Schools*.
<https://www.gov.uk/government/publications/mainstream-schools-area-guidelines>
- UK Department for Education. (2015). *Building Bulletin 93: Acoustic Design of Schools*.
<https://www.gov.uk/government/publications/acoustic-design-of-schools>
- Hertzberger, H. (2008). *Space and Learning: Lessons in Architecture 3*. 010 Publishers.
<https://www.010.nl/catalogue/space-and-learning>
- Owens, R. (2018). *Architecture and Learning Spaces*. Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9781315272789>
- СП РК 3.02-111-2012. Общеобразовательные учреждения.
<https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1200007492>
- СН РК 3.02-01-2011. Общественные здания и сооружения.
<https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1100007225>
- Hall, T., & Barrett, P. (2016). *Learning Environments: Theory, Practice and Research*. Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9781315766097>

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЗДАНИЯ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ШАРОПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 658.56

И.Д. Семенов^{1*}, Б.Е. Махиев¹

¹ ВКТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Семенов Иван Дмитриевич, e-mail: toohardline@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрена возможность изменения функционального назначения существующего производственного здания и его реконструкции под шаропркатное производство. На основе материалов магистерской диссертации выполнен анализ технологических предпосылок реконструкции, объемно-планировочного и конструктивного решения здания, а также результатов технического обследования строительных конструкций. Особое внимание уделено выявленным дефектам и повреждениям, природно-климатическим условиям района строительства, а также проверочным расчетам несущей способности основных элементов каркаса. По результатам исследования обоснована техническая возможность размещения шаропркатного производства в существующем здании при условии реализации комплекса ремонтно-восстановительных и усилительных мероприятий.

Ключевые слова: реконструкция зданий, производственные здания, техническое обследование, строительные конструкции, несущая способность, шаропркатное производство.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация производственных зданий существующей застройки в современных условиях часто сопровождается необходимостью изменения технологических процессов. Это обусловлено тем, что срок службы промышленных зданий может достигать 100–120 лет, тогда как технологии производства и номенклатура выпускаемой продукции обновляются значительно быстрее. В течение срока эксплуатации одного и того же здания технологическая схема может изменяться многократно, что приводит к необходимости реконструкции и адаптации объекта к новым производственным условиям.

Реконструкция производственных зданий, как правило, сопровождается заменой технологического оборудования, устройством новых фундаментов, изменением уровня эксплуатационных нагрузок на несущие конструкции, увеличением грузоподъемности подъемно-транспортного оборудования, а также изменением температурно-влажностного режима эксплуатации.

Объектом исследования является производственное здание кузнечно-котельного цеха ремонтно-механического завода в г. Риддере, в котором предлагается разместить шаропркатное производство. Выбор данного объекта обусловлен технологической целесообразностью, поскольку шаропркатное производство связано с обработкой стальных заготовок и может быть эффективно интегрировано в существующую структуру кузнечного производства. Кроме того, использование существующего здания позволяет существенно снизить капитальные затраты по сравнению со строительством нового объекта.

Анализ объемно-планировочного решения показывает, что существующая конфигурация здания позволяет разместить шаропркатное производство в одном из пролетов цеха (рисунок 1).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу исследования положены материалы магистерской диссертации, включающие анализ архивной проектной документации, результаты натурного обследования здания, данные по выявленным дефектам и повреждениям, а также результаты проверочных расчетов строительных конструкций.

Обследование выполнялось с применением визуальных и инструментальных методов контроля, что позволило получить достоверную оценку технического состояния несущих и ограждающих конструкций.

При выполнении исследования учитывались требования нормативных документов по проектированию в сейсмических районах [1], особенности технологического оборудования прокатного производства [2], а также сведения о работе шаропрокатных станов [3]. Определение нагрузок на конструкции выполнялось в соответствии с нормативными документами по нагрузкам и воздействиям [4], а при оценке эксплуатационных условий учитывались требования по защите строительных конструкций от коррозии [5]. Проверочные расчеты выполнялись с использованием положений нормативных документов по проектированию несущих конструкций [6].

Методика исследования включала последовательное выполнение следующих этапов: анализ проектной документации, натурное обследование здания, выполнение проверочных расчетов с учетом измененных эксплуатационных нагрузок, а также разработку рекомендаций по реконструкции здания.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Шаропрокатное производство предназначено для изготовления мелющих шаров методом горячей прокатки цилиндрических заготовок из углеродистой или легированной стали. Технологическая схема включает нагрев заготовок, их последующую прокатку и термическую обработку готовых изделий.

В диссертации отмечено, что организация подобного производства на территории Казахстана имеет практическую значимость, поскольку позволяет снизить зависимость от импортной продукции и повысить конкурентоспособность металлургических предприятий. В этой связи размещение шаропрокатного производства в существующем здании рассматривается как технически и экономически обоснованное решение.

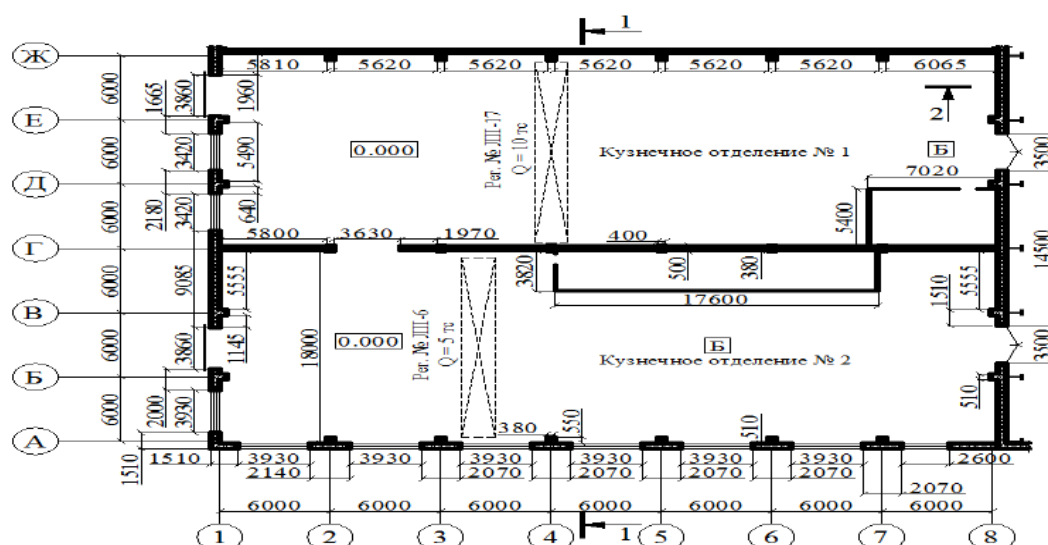


Рисунок 1. План кузнечных отделений №1 и №2 с размещением шаропрокатного производства

Для реконструкции выбрано здание кузнечно-котельного цеха, состоящее из нескольких пролетов. В исследуемой части здания располагаются два смежных пролета, разделенных продольной кирпичной стеной. Один из них сохраняет существующее назначение, а второй предлагается использовать для размещения шаропрокатного производства.

Конструктивная схема здания является каркасной. Железобетонные колонны имеют ступенчатое прямоугольное сечение. Стропильные конструкции представлены стальными фермами из спаренных прокатных уголков. Подкрановые балки выполнены из прокатных двутавров и имеют составное сечение. Фундаменты под колонны — столбчатые из монолитного железобетона, под стены — ленточные из бутобетона.

В процессе обследования установлено, что основные геометрические параметры здания соответствуют проектной документации. Обследованию подвергались покрытия, стропильные фермы, связи, колонны, подкрановые балки, стены и фундаменты.

Результаты обследования показали, что выявленные дефекты носят преимущественно локальный характер (таблица 1).

Таблица 1. Основные дефекты и повреждения строительных конструкций здания

Конструктивный элемент	Характер выявленных дефектов и повреждений
Ограждающие конструкции покрытия и кровля	Многочисленные пробоины в профилированном настиле вблизи карниза по ряду А, образовавшиеся при удалении наледей острым инструментом
Стропильные фермы	Локальные повреждения элементов и отдельных соединений, выявленные при обследовании
Связи покрытия	Ослабление отдельных соединений и необходимость дополнительной проверки их состояния
Колонны каркаса	Локальные дефекты и отдельные повреждения, не приводящие к потере общей устойчивости
Подкрановые балки	Эксплуатационные повреждения, требующие проверки несущей способности при увеличении крановых нагрузок
Стены	Локальные дефекты кладки и повреждения отдельных участков
Фундаменты	Существенных повреждений, препятствующих реконструкции, не выявлено

Как следует из таблицы 1, большинство дефектов не приводит к потере общей устойчивости здания, однако требует учета при выполнении расчетов и разработке мероприятий по реконструкции.

Природно-климатические условия района строительства оказывают существенное влияние на работу конструкций. Основные параметры приведены в таблице 2.

Таблица 2. Природно-климатические характеристики района строительства

Параметр	Значение
Характеристическое значение снеговой нагрузки на грунт	240 кгс/м ²
Продолжение таблицы 2	
Характеристическое значение ветрового давления	77 кгс/м ²
Расчетная температура наиболее холодных суток	минус 45 °С
Сейсмичность зоны строительства	7 баллов по карте ОСЗ-2475 или 8 баллов по карте ОСЗ-22475
Тип грунтов по сейсмическим свойствам	II тип
Характер внутренней среды	Возможное выделение сернистого газа, слабоагрессивная степень воздействия на железобетонные и стальные конструкции

Данные таблицы 2 использовались при формировании расчетных сочетаний нагрузок. Снеговая и ветровая нагрузки принимались в соответствии с нормативными документами [7], а расчет нагрузок выполнялся с учетом требований нормативных документов по воздействию на конструкции [8] и проектированию стальных элементов [9].

Важным фактором является изменение эксплуатационных условий здания после реконструкции. Размещение шаропрокатного оборудования требует устройства автономных фундаментов, увеличения грузоподъемности мостовых кранов, а также совершенствования системы вентиляции в связи с повышенными тепловыделениями и наличием агрессивных газов.

Проведенные проверочные расчеты показали, что существующая конструктивная схема здания в целом обеспечивает возможность размещения нового производства. При этом обязательным условием является выполнение комплекса мероприятий, включающего ремонт кровли, локальное восстановление поврежденных элементов, усиление конструкций, устройство дополнительных фундаментов и выполнение мероприятий по сейсмоусилению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное исследование показало, что реконструкция существующего производственного здания кузнечно-котельного цеха под размещение шаропрокатного производства является технически обоснованной и реализуемой.

Установлено, что основные параметры здания соответствуют проектной документации, а выявленные дефекты носят локальный характер и не препятствуют дальнейшей эксплуатации при условии выполнения ремонтно-восстановительных мероприятий.

Результаты обследования и расчетов подтверждают возможность изменения функционального назначения здания. При этом реализация проекта реконструкции требует учета климатических, эксплуатационных и сейсмических факторов, а также выполнения комплекса мероприятий по усилению конструкций и повышению их надежности.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования в рамках учебной и научно-исследовательской деятельности.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за консультационную и методическую помощь при выполнении исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- СП РК 2.03-30-2017*. Строительство в сейсмических зонах / Комитет по делам строительства и ЖКХ Министерства по инвестициям и развитию РК, Астана, 2018. – 111 с.
<https://eis.su/srostandart/sp-rk-2-03-30-2017-%D2%9Br-%D2%9Bzh/>
- Колесников А.Г. Технологическое оборудование прокатного производства. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 157 с.
https://urss.ru/PDF/add_ru/1965221.pdf?srsId=AfmBOorTboxVtjwG0n7QQ5B0mKa_bX0Nq1o_jZzE1n54fEXTYN6mWcW0L
- Шаропрокатный стан. – Интернет-энциклопедия.
<https://ru.ruwiki/wiki/> (дата обращения: 10.01.2026).
- НТП РК 01-01-3.1 (4.1)-2017. Нагрузки и воздействия на здания. Часть 1.3. Снеговые нагрузки. Часть 1.4. Ветровые воздействия / Комитет по делам строительства и ЖКХ Министерства по инвестициям и развитию РК, Астана, 2017. – 181 с.
https://prg.kz/document/?doc_id=37794851
- СП РК 2.01-101-2013. Защита строительных конструкций от коррозии / Комитет по делам строительства, ЖКХ и управления земельными ресурсами Министерства национальной экономики РК, Астана, 2015. – 76 с.
https://prg.kz/document/?doc_id=33796763
- СП РК EN 1990:2002+A1:2005/2011. Основы проектирования несущих конструкций / Комитет по делам строительства и ЖКХ Министерства национальной экономики РК, Астана, 2016. – 108 с.
<https://new-shop.ksm.kz/%D0%A1%D0%9F%20%D0%A0%D0%9A%20EN%201990-2002.pdf>
- СП РК EN 1991-1-1:2002/2011. Воздействия на несущие конструкции. Часть 1-1. Собственный вес, постоянные и временные нагрузки на здания / Комитет по делам строительства и ЖКХ Министерства национальной экономики РК, Астана, 2016. – 40 с.
file:///C:/Users/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C/Downloads/2_SPRKEN_1991-1-1.pdf
- СП РК EN 1993-1-1:2005/2011. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий / Комитет по делам строительства и ЖКХ Министерства национальной экономики РК, Астана, 2016. – 102 с.
https://prg.kz/document/?doc_id=37771702
- СП РК 1.04-101-2012. Обследование и оценка технического состояния зданий и сооружений / Комитет по делам строительства, ЖКХ и управления земельными ресурсами Министерства национальной экономики РК, Астана, 2015.
<https://www.ozis-venture.ru/files/docs/norm/SP-RK-1.04-101-2012-svod-pravil-obsledovanie-i-otsenka-tehnicheskogo-sostoyaniya-zdaniy-i-soorugenii.pdf>

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬНО-МОНТАЖНЫХ РАБОТ

УДК 69:004

А.С.Солдун^{1*}, А.Б. Еrsaинова¹, А.Г.Гольцев¹

¹ВКТУ имени Д. Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Солдун Александр Сергеевич, e-mail: solduna@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В работе рассматривается возможность применения методов компьютерного зрения для контроля геометрических параметров элементов при выполнении строительно-монтажных работ. Актуальность исследования обусловлена недостатками традиционных методов контроля, связанными с влиянием человеческого фактора, высокими трудозатратами и ограниченной оперативностью измерений. Целью исследования является анализ возможностей использования ArUco-меток и алгоритмов компьютерного зрения для автоматизированного определения пространственного положения объектов. В рамках работы реализован программный прототип системы на базе библиотеки OpenCV, выполняющий обработку видеопотока, обнаружение маркеров, расчёт координат элементов и их сравнение с проектными значениями. Оценка точности выполнялась путём сопоставления автоматически полученных координат с результатами контрольных измерений. Показана работоспособность системы в режиме, близком к реальному времени, а также эффективность модулей визуализации и автоматического формирования отчётной документации. Научная новизна работы заключается в разработке и экспериментальной оценке подхода к контролю СМР с использованием маркерных систем и компьютерного зрения, а также в выявлении факторов, влияющих на точность измерений. Полученные результаты подтверждают перспективность применения предложенного подхода, однако требуют дальнейшего развития методов фильтрации и обработки данных для повышения точности и устойчивости работы системы.

Ключевые слова: компьютерное зрение, ArUco-метки, контроль качества, пространственное позиционирование, обработка изображений, мониторинг строительных процессов

ВВЕДЕНИЕ

Качество строительно-монтажных работ имеет ключевое значение, поскольку от точности выполнения строительных процессов напрямую зависят надежность, долговечность и безопасность зданий и сооружений. Классические методы контроля подвержены влиянию человеческого фактора и требуют значительных трудозатрат на проведение измерений и обработку результатов. Ограниченная оперативность таких методов может приводить к снижению эффективности контроля, возникновению дефектов и дополнительным финансовым потерям.

В этой связи актуальным становится применение технологий компьютерного зрения, позволяющих автоматизировать процессы контроля, снизить влияния человеческого фактора и возможность оперативного анализа данных, в том числе в режиме, близком к реальному времени.

Одним из перспективных направлений является применение маркерных систем визуального позиционирования, ArUCO-меток, позволяющих определять пространственное положение объектов на основе анализа изображений. Данные методы уже широко применяются в задачах робототехники, навигации и измерений,

что подтверждает их потенциал для использования в строительной отрасли.

Несмотря на активное развитие цифровых технологий, их применение для оперативного контроля геометрических параметров строительно-монтажных работ остается ограниченным и требует проведения дополнительных исследований.

Целью данного исследования является анализ возможности использования технологий компьютерного зрения, в том числе ArUCO-меток, для контроля положения элементов и геометрических параметров объектов при выполнении строительно-монтажных работ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве базового инструмента применялась библиотека компьютерного зрения OpenCV, обеспечивающая обработку изображений и обнаружение объектов. Для фиксации контрольных точек использовались ArUco-метки — квадратные бинарные маркеры с уникальным номером, позволяющие выполнять их надёжное обнаружение и идентификацию на изображении.

Определение положения меток выполняется по координатам углов меток. Для этого решается задача Perspective-n-Point (PnP), обеспечивающая восстановление положения объекта в пространстве. В результате вычисляются векторы перемещения и поворота, описывающие положение и ориентацию метки относительно камеры.

Программная реализация выполнена на языке Python с использованием библиотеки OpenCV и ориентирована на обработку видеопотока в режиме, с задержкой в 3 секунд.

Алгоритм работы включает: захват и предварительную обработку видеокadra (коррекция дисторсии); обнаружение ArUco-меток; их разделение на опорные и контролируемые; вычисление пространственного положения; преобразование координат в глобальную систему отсчёта; сравнение с проектными значениями и определение отклонений.

Результаты контроля визуализируются в режиме реального времени с использованием цветовой индикации допустимости отклонений. При превышении установленных допусков автоматически формируется акт о несоответствии с фиксацией измеренных параметров и визуальных данных. Результаты измерений сохраняются для последующего анализа.

Эксперимент проводился на площадке размером 4×6 м, имитирующей условия строительной площадки. Использовалась камера с разрешением 3840×2160 (4K), частотой 30 кадров/с, битрейт видео 41000 кбит/с, без аппаратной стабилизации, при этом съёмка выполнялась с подвижной камеры. В качестве опорных меток применялись метки размером 150×150 мм (6 шт.). Контролируемые элементы маркировались метками размером 100×100 мм (6 шт.). Расстояние съёмки варьировалось от 1,5 до 7 м.

Исследование включало три этапа: калибровка камеры с использованием стандартных методов OpenCV; установку опорных и контролируемых меток с фиксацией их координат; проведение видеосъёмки с одновременной работой программы контроля.

В ходе эксперимента моделировались различные положения элементов с их перемещением и корректировкой. Программа выполняла непрерывное определение координат и отклонений от проектных значений. Для оценки точности дополнительно проводились контрольные измерения вручную с последующим сопоставлением результатов.

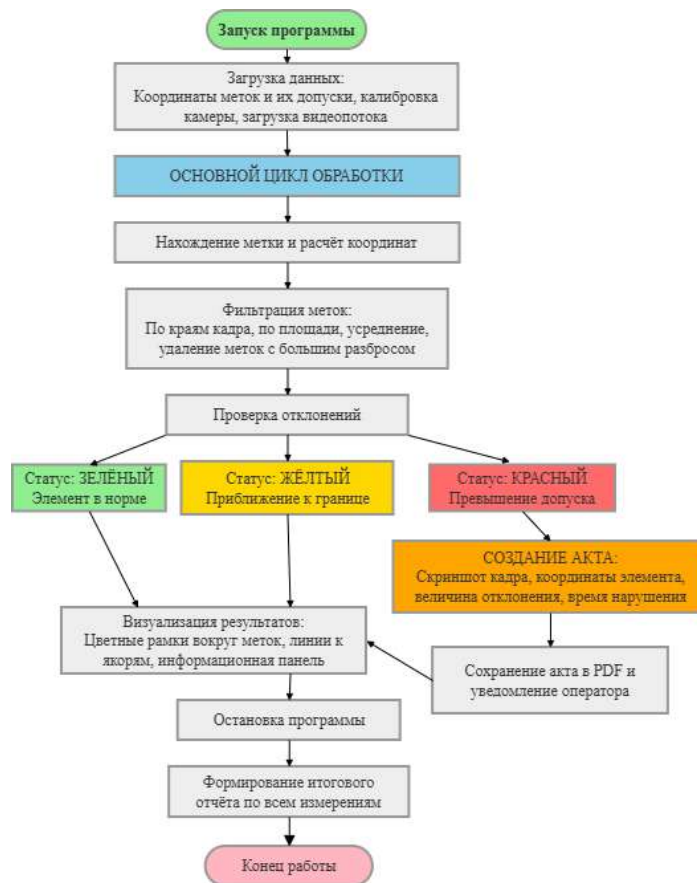


Рисунок 1. Блок-схема работы основных функций программы контроля положения элементов

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основной целью экспериментального исследования являлась оценка точности определения координат и углов поворота элементов с использованием разработанной системы, а также анализ устойчивости её работы в режиме, близком к реальному времени. Для оценки точности системы проведено сравнение автоматически определённых координат шести контролируемых элементов с результатами контрольных измерений, выполненных рулеткой с точностью до 1 мм.

Разработанная система использует несколько алгоритмов фильтрации: усреднение координат, удаление выбросов и сверку с предыдущими измерениями. Таким образом, реализован подход к повышению устойчивости измерений за счёт комбинированной фильтрации и использования временной задержки обработки. Это позволяет уменьшить влияние кратковременных помех и динамических ошибок при наблюдении элементов, хотя максимальный разброс координат достигал ± 60 мм, а при малых смещениях оставался около ± 10 мм.

Для каждого элемента вычислялись средние отклонения координат и углов поворота. Анализ полученных данных показал, что разброс измерений координат варьировался от ± 10 мм до ± 60 мм в зависимости от положения элемента в кадре, отклонения углов поворота так же имеет большой диапазон. Полученные результаты указывают на значительную вариативность измерений и нестабильность определения координат. Максимальное зафиксированное отклонение координат составило 60 мм для элемента 5, а максимальное отклонение углов поворота – 19° для элемента 3.

Таблица 1. Точность определения координат контролируемых элементов

Элемент	Среднее откл. X (мм)	Среднее откл. Y (мм)	Среднее откл. Z (мм)	Rx (град.)	Ry (град.)	Rz (град.)
1	32	11	16	10	1	4
2	35	21	25	5	0	1
3	56	19	17	17	12	19
4	38	10	15	13	2	9
5	60	15	22	10	2	11
6	44	32	24	6	2	8
Среднее отклонение	44.2	18	19.8	10.2	3.2	8.6

Программа обеспечивает отображение отклонений положения элементов в режиме реального времени с использованием цветовой индикации: зелёный цвет соответствует стабильному положению, жёлтый — частичному отклонению, красный — выходу за установленный порог. При смещении элементов система фиксировала изменение их положения и изменяла визуальное отображение. Задержка отображения порядка 3 секунд позволяла учитывать результаты фильтрации и снижать влияние случайных выбросов, что повышало информативность выводимых данных.

При превышении заданного порогового значения и сохранении отклонения в течение установленного времени автоматически формировался акт о несоответствии в формате PDF. В отчёт включались идентификатор элемента, измеренные и проектные координаты, величина отклонения и временная метка.

Таким образом, модуль визуализации и автоматического документирования продемонстрировал устойчивую работу и может рассматриваться как самостоятельный инструмент повышения эффективности контроля, позволяющий сократить трудозатраты на фиксацию результатов и снизить влияние человеческого фактора при оформлении исполнительной документации.

Основным ограничением является значительный разброс результатов (± 10 –60 мм), сохраняющийся несмотря на применение фильтрации.

Дополнительные ограничения связаны с условиями наблюдения меток, включая их частичное перекрытие, изменение освещённости и угла обзора, что в отдельных случаях приводит к появлению выбросов координат.

Дальнейшее развитие системы предполагает совершенствование алгоритмов фильтрации и использование накопленных данных для повышения устойчивости результатов, а также интеграцию с цифровыми моделями и применение многокамерных решений для повышения точности определения координат.

Проведённое исследование подтвердило работоспособность разработанной системы в режиме реального времени и возможность применения методов компьютерного зрения для определения положения элементов с использованием ArUco-меток. Вместе с тем установлено, что достигнутый уровень точности ограничен значительным разбросом измерений (± 10 –60 мм), что указывает на необходимость дальнейшего совершенствования алгоритмов обработки данных и фильтрации результатов.

Показано, что использование стандартных алгоритмов компьютерного зрения и доступного оборудования позволяет реализовать автоматизированную систему

контроля с функциями визуализации и формирования отчётной документации, снижая трудозатраты и влияние человеческого фактора.

Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований, направленных на повышение точности и устойчивости системы, а также для разработки комплексных программно-аппаратных решений контроля качества строительно-монтажных работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого исследования была рассмотрена возможность применения методов компьютерного зрения и ArUco-меток для контроля геометрических параметров элементов при выполнении строительно-монтажных работ. В рамках работы были изучены существующие подходы, разработан программный прототип системы, реализующий определение пространственного положения объектов, а также проведено экспериментальное исследование для оценки точности и устойчивости работы системы.

Практическая значимость результатов заключается в демонстрации возможности создания недорогих и относительно простых в реализации систем контроля, способных выполнять автоматизированный анализ положения объектов и формировать отчётную документацию. В то же время выявленные ограничения, связанные с чувствительностью к условиям съёмки и нестабильностью результатов, указывают на необходимость дальнейшего развития предложенного подхода. Важным аспектом является возможность обеспечения непрерывного контроля качества выполнения строительно-монтажных работ, что позволяет снижать риски возникновения дефектов, обусловленных человеческим фактором, и повышать общую эффективность процессов контроля.

Перспективы дальнейших исследований связаны с совершенствованием алгоритмов фильтрации и обработки данных, использованием накопленных измерений для повышения устойчивости результатов, а также с применением многокамерных систем и интеграцией с цифровыми моделями объектов. Дополнительно представляется целесообразным исследование методов машинного обучения для повышения точности определения координат и снижения влияния внешних факторов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы благодарят коллег за методологическую поддержку и конструктивные обсуждения, а также анонимных рецензентов за ценные замечания, которые помогли повысить качество статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Costa, Millaniyage Duleepa Dulshan & Costa, M.R.R. & Thayaparan, M. (2024). The Impacts of computer vision technology in construction: investigating applications and challenges. 1024-1037.
<https://doi.org/10.31705/WCS.2024.81>
- Szeliski R. (2022). Computer Vision: Algorithms and Applications. 979.
<https://szeliski.org/Book/>
- Zhang Z. (2000) A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11). 1330–1334.

- <https://doi.org/10.1109/34.888718>
 Garrido-Jurado, Sergio & Muñoz-Salinas, Rafael & Madrid-Cuevas, Francisco & Marín-Jiménez, Manuel. (2014). Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*. 47. 2280–2292.
<https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005>
- OpenCV ArUco module overview.
https://docs.opencv.org/3.4/d9/d6a/group_aruco.html
- da Silva, Mateus & Correa, Diego & Martins-Filho, Luiz. (2021). Unmanned Aerial Vehicle Position and Attitude Estimation Using Computer Vision.
<https://doi.org/10.20906/sbai.v1i1.2547>
- Burger, Wilhelm. (2016). Zhang's Camera Calibration Algorithm: In-Depth Tutorial and Implementation.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1166.1688/1>
- Golparvar-Fard, Mani & Peña-Mora, Feniosky & Savarese, Silvio. (2012). Automated Progress Monitoring Using Unordered Daily Construction Photographs and IFC-Based Building Information Models. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 29.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000205](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000205)
- Sherafat, Behnam & Ahn, Changbum & Akhavian, Reza & Behzadan, Amir & Golparvar-Fard, Mani & Kim, Hyunsoo & Lee, Yongcheol & Rashidi, Abbas & Azar, Ehsan. (2020). Automated Methods for Activity Recognition of Construction Workers and Equipment: State-of-the-Art Review. *Journal of Construction Engineering and Management*. 146.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001843](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001843)
- Brilakis, Ioannis & Lourakis, Manolis & Sacks, Rafael & Savarese, Silvio & Christodoulou, Symeon & Teizer, Jochen & Makhmalbaf, Atefe. (2009). Automated Generation of Parametric BIMs based on Hybrid Video and Laser Scanning Data. 59-66.
<https://users.ics.forth.gr/~lourakis/publ/2009-eg-ice.pdf>
- Marchand, Eric & Uchiyama, Hideaki & Spindler, Fabien. (2016). Pose Estimation for Augmented Reality: A Hands-On Survey. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 22.
<https://doi.org/10.1109/TVCG.2015.2513408>
- Klein, Georg & Murray, David. (2007). Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces. *2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. 225-234.
<https://doi.org/10.1109/ISMAR.2007.4538852>
- S. Lowry et al. (2016) Visual Place Recognition: A Survey. in *IEEE Transactions on Robotics*. 32(1), 1-19.
<https://doi.org/10.1109/TRO.2015.2496823>
- Park, Man-Woo & Koch, Christian & Brilakis, Ioannis. (2012). 3D Tracking of Construction Resources Using an On-site Camera System. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 26. 541-549.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000168](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000168)
- Teizer, Jochen. (2015). Status quo and open challenges in vision-based sensing and tracking of temporary resources on infrastructure construction sites. *Advanced Engineering Informatics*. 29.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.03.006>

ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВЕННОЙ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ПОЖИЛЫХ ГРАЖДАН: КЕЙС УЛИЦЫ БУРОВА ГОРОДА УСТЬ-КАМЕНОГОРСКА

УДК 711.112

Д.Слесаренко¹, Е.А.Феоктистова^{1*}, Т.М.Борисова¹

¹ВКТУ им.Д.Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Феоктистова Елена Александровна,

e-mail: EFeoktistova@ektu.kz

АННОТАЦИЯ. Увеличение доли пожилого населения актуализирует задачи оценки качества городской среды с позиций инклюзивности, доступности и безопасности. В статье представлен анализ общественных пространств улицы Бурова города Усть-Каменогорска с использованием подходов, изложенных в «Global Age-friendly Cities: A Guide». Методика исследования основана на сочетании полевых наблюдений, фотофиксации и качественной оценки с применением системы критериев, включающей параметры эргономики, функциональной насыщенности (реализация потребностей) и благоустройства (комфорта). В результате определены основные проблемы городской среды, затрудняющие использование территории пожилыми гражданами, включая недостаток мест для социального взаимодействия, фрагментацию пешеходных связей, низкий уровень благоустройства и неразвитость визуальной навигации. Полученные результаты формируют основу для разработки практических рекомендаций и определения приоритетных направлений дальнейших исследований.

Ключевые слова: качество городской среды, пожилые граждане, устойчивое развитие, «age-friendly Cities», г. Усть-Каменогорск

ВВЕДЕНИЕ

Общая мировая тенденция по увеличению количества пожилых граждан характерна для Республики Казахстан. По данным статистики, численность людей, перешагнувших 60-ти летний рубеж ежегодно растет на 3-4%, а исследования ООН и Единого накопительного пенсионного фонда страны подтверждают старение населения в долгосрочной перспективе (World News, 2025). При этом одним из самых высоких индексов старения отмечается в Восточном Казахстане, центром которого является город Усть-Каменогорск, где количество пожилых людей от 60 лет составляет почти 22% (Zakon.kz, 2025).

Казахстаном ратифицированы Цели устойчивого развития ООН, которые включают социальную справедливость, качество жизни и инклюзивность для всех групп населения, в том числе пожилых людей. Эта категория жителей с особыми потребностями к городской среде, качество которой напрямую влияет на здоровье, социальную активность и инклюзию. Если город не удобен для пожилых людей, он уже не является социально устойчивым. Поэтому, в условиях глобального старения населения возрастает актуальность адаптации городского пространства к потребностям пожилых граждан.

Современное понимание того, каким должен быть город для пожилых было сформулировано Всемирной организацией здравоохранения еще в 2007 году в руководстве «Global Age-friendly Cities: A Guide». Последующие исследования развивают и дополняют стратегию ВОЗ, выявляя особенности, определяющие комфортность с учетом конкретных региональных условий. Изучение ряда обзорных и исследовательских статей показало, что комфорт пожилых людей в городской среде

определяется комплексом факторов: наличием озелененных территорий, теплового, ветрового и акустического комфорта, безбарьерных путей, понятной навигации, присутствием мест для отдыха и общения, доступностью, безопасностью и эстетикой пространств (Larriva, M., & Higuera, E., 2020; Vasconcelos, L., Langemeyer, J., Cole, H., & Baró, F., 2024; Ma, X., Tian, Y., Du, M., Hong, B., & Lin, B., 2021; Močnik, Š., Moogoor, A., & Yuen, B., 2022; J. van Hoof и др., 2021). В научной базе казахстанских ученых представлены исследования, посвященные вопросам качества городской среды в контексте устойчивого развития преимущественно крупнейших городов (Ходжиков А. и др., 2023), ориентированные на социально-экономические аспекты и расчеты индексов устойчивости. Ряд работ посвящены общим проблемам и потребностям пожилых людей, затрагиваются вопросы социальной изоляции в городских пространствах (Мирзакулова Г., 2024). Вместе с тем комплексный анализ городской среды с точки зрения ее адаптации к потребностям пожилых людей остается недостаточно разработанным. Таким образом, в условиях старения населения и активной урбанизации возрастает потребность в научном осмыслении проблем качества городской среды для пожилых людей, что определяет актуальность данного исследования.

Цель исследования: выявить проблемы общественных пространств городской среды с точки зрения формирования комфортной, безопасной и инклюзивной городской среды в соответствии с принципами концепции «Age-friendly Cities» на примере улицы Бурова г. Усть-Каменогорска. Задачи: 1) на основе изучения литературы определить группу факторов для оценки комфортности пространств; 2) провести натурные исследования территории; 3) выявить ключевые проблемы и ограничения по использованию общественных пространств пожилыми гражданами; 4) определить векторы дальнейших исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методологическую основу исследования составили положения, представленные в руководстве «Global Age-friendly Cities: A Guide», а также результаты анализа отечественных и зарубежных научных публикации, посвященные формированию инклюзивной городской среды для пожилых людей. На основе литературного обзора и натурного обследования была сформирована группа критериев оценки общественных пространств, включающие показатели доступности, безопасности, функциональной содержательности, удобства передвижения и визуальной навигации.

В качестве объекта исследования выбрана территория улицы Бурова г. Усть-Каменогорска, которая характеризуется наличием активного пешеходного транзита к районной поликлинике, автовокзалу и железнодорожной станции, а также оптово-розничному рынку. В границах улицы на основе типологического анализа были выделены основные типы пространств: общественные (пешеходные аллеи с прилегающими скверами, сквер перед поликлиникой) и пространства ограниченного использования (дворовые территории).

Эмпирическая часть исследования основывалась на методах натурного обследования территории, включающих систематическую фотофиксацию и графическую фиксацию наблюдений на кроках – схемах улицы. В процессе полевых исследований анализировались параметры безбарьерной среды и проводилась комплексная оценка состояния элементов городских пространств: пешеходной инфраструктуры (тип и качество покрытия, наличие барьеров, перепад высот), элементов благоустройства (лавочки, освещение, урны), озеленения, а также средств пространственной ориентации.

Для выявления проблем и ограничений использования общественных

пространств применялся метод сравнительного анализа фактического состояния территории с разработанной системой критериев в виде матрицы. Дополнительно использовался метод визуально-пространственной диагностики, направленный на выявление барьеров, снижающих уровень комфортности и безопасности среды.

Систематизация и обобщение результатов натурных наблюдений позволили выявить ключевые проблемные зоны и определить направления дальнейших исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследований на основе анализа литературных источников и натурного обследования территории с фотофиксацией сформировано три группы факторов которые выступают показателями в экспертной оценке территории (рис 1). Кроме того, для оценки территории типологически выделено три типа пространства значимого и включающего в себя основные маршруты передвижения пожилых людей по этой улице – тротуары с остановками общественного транспорта, общественные пространства перед поликлиниками и другими объектами КБО, внутридворовые пространства.



Рисунок 1. Показатели оценки территории.

С учетом данных показателей разработана матрица оценки территории городской среды улицы (рис.2), включающая в себя конкретные и расширенные значения показателей.

показатели оценки территории		типы пространства																
		тротуары и остановки общественного транспорта					общественные пространства перед поликлиниками и другими объектами КСО					внутри дворовые пространства						
эргономические показатели	высота ступеней			●														
	наличие ориентиров в пространстве			●														
	наличие качественных пандусов		●					●										
	равномерность (равность) дорожного покрытия		●					●										
	доступная инфографика			●				●										
реализация потребностей	наличие общественных туалетов	●					●											
	наличие мест для отдыха (скамеек)		●					●										
	наличие площадок для активного отдыха и физкультуры	●					●											
	наличие мест для социального взаимодействия (беседки)		●					●										
благоустройство территории	освещенность территории в вечернее время				●					●						●		
	наличие зеленых мест (деревесно-зеленые, кроны деревьев, тень)				●					●						●		
	наличие декоративного озеленения (эстетический компонент)		●					●								●		
	наличие озелененных мест для тихого отдыха			●						●						●		

Рисунок 2. Матрица оценки городской среды улицы Бурова.

Например, в эргономический показатель входит такой пункт, как высота ступеней, который нормируется и был оценен с учетом нормативов. Критерием качественной оценки показателей была принята шкала от 1 до 5 баллов, где 1 балл обозначает наихудшее значение – полное отсутствие, полное несоответствие, а 5 баллов обозначает очень хороший показатель – присутствует в полной мере или полностью соответствует. Критерии оценки и их значение отражены на рисунке 3. Оценка осуществлялась как на основе обмеров отдельных элементов и их сравнении с нормативными (например, уклоны пандусов, ширина тротуаров и дорожек), так и на основе визуального осмотра.

Представленные данные наглядно демонстрируют наиболее уязвимые показатели качества городской среды для пожилых людей, характерные для улицы Бурова. Отметим, что ни один из показателей полностью не соответствует максимальной оценке, а немного выше уровень комфортности у общественных зданий. Одними из ключевых проблем является отсутствие: общественных туалетов; пространств для социального общения и для занятия физкультурой; ориентиров по маршрутам следования, особенно внутريدворовых пространств, которые пожилые люди пересекают по пути в поликлиники.

смысловое содержание критериев	очень плохо → очень хорошо				
	1	2	3	4	5
	не соответствует	скорее не соответствует	наполовину соответствует	скорее соответствует	полностью соответствует
	отсутствует совсем	скорее отсутствует	наполовину присутствует	скорее присутствует	присутствует в полной мере
	не удовлетворяет	скорее не удовлетворяет	наполовину удовлетворяет	скорее удовлетворяет	удовлетворяет в полной мере

Рисунок 3. Критерии оценки городской среды улицы Бурова и их смысловое значение.

Диаграмма анализа матрицы (рисунок 4) показывает неравномерность распределения оценок по показателям в разных типах пространств по пути основных маршрутов пожилых людей по улице Бурова. Несмотря на определенные проблемы, стоит отметить, что улица остается относительно благоприятной в плане озеленения и комфорта, связанного с наличием «зеленых» пространств.

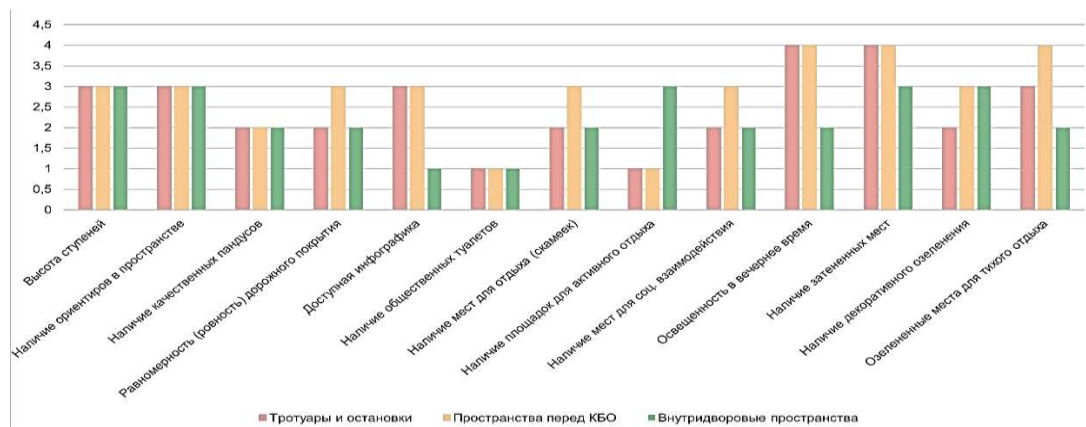


Рисунок 4. Диаграмма качества городской среды улицы Бурова. Натурное обследование и фотофиксация (рис.5), выполненные в рамках

данного исследования, позволили выявить конкретные проблемы на исследуемых участках городской среды. Были зафиксированы процессы физического износа и устаревания уличной мебели, несоответствия ее эргономических параметров для пожилых и особенно, маломобильных граждан. Выявлен дефицит элементов благоустройства, в частности лавочек, необходимых для кратковременного отдыха, что существенно ограничивает комфортную доступность до объектов обслуживания, в первую очередь – поликлиники. Несмотря на достаточно хорошие резервы озелененных территорий, сами зеленые насаждения нуждаются в обновлении, а пространства - в формировании ландшафтных пространственных ориентиров.



Рисунок 5. Натурные данные по обследованию улицы Букова (фото Слесаренко Д., март 2026 года)

Следует отметить, что проведенное исследование содержит ряд ограничений. В работе не изучались такие параметры как тепловой и акустический комфорт, эстетические аспекты, а также предпочтения пожилого населения по организации рассматриваемых пространств. Тем не менее, полученные данные создают важную методологическую и практическую основу для последующих изысканий, а также позволяют «точечно» обозначать и решать проблемы городской среды в рамках обращений в местные структуры ЖКХ. Рассмотрение и оценка качества городской среды с точки зрения таких уязвимых и многочисленных групп населения как пожилые люди, помогает вырабатывать механизмы для достижения важных критериев «устойчивости» конкретных локальных территорий и города в целом. Как полагают авторы, необходима дальнейшая разработка комплексной системы оценки, которая может быть встроена в систему «умного» города, для мониторинга показателей качества пространства и уровня удовлетворенности населения «комфортом» территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование, основанное на изучении литературы, натурном обследовании, фотофиксации и качественном анализе, позволило комплексно оценить состояние городской среды улицы Бурова с позиции ее комфортности для пожилых людей. Установлено, что исследуемая территория не в полной мере соответствует принципам концепции «Age-friendly Cities»: выявлены недостатки пространственной навигации, дефицит социально-ориентированных пространств, недостаток и износ уличной мебели, неэффективное использование озелененных территорий, неудовлетворительное состояние пешеходных связей.

Несмотря на выявленные ограничения исследования, полученные результаты формируют основу для обоснования мероприятий по благоустройству и повышению качества городской среды. Акцент на потребностях пожилых людей как уязвимой и многочисленной группы населения способствует достижению более устойчивого и инклюзивного развития территорий. Исследование вносит вклад в обзор и развитие идеи комфортного, безопасного города, а также открывает перспективы в более глубоком изучении мало исследуемой в нашей стране области – оценке городского комфорта пожилыми пользователями среды.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: в процессе подготовке текста применялся ChatGPT на базе модели GPT-5.3 (OpenAI) в целях улучшения стилистики и доступности языка; анализ, методология, выводы и интерпретации принадлежат авторам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Global age-friendly cities: a guide. 5 October 2007. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241547307>
- Larriva, M., & Higuera, E. (2020). Health risk for older adults in Madrid, by outdoor thermal and acoustic comfort. urban climate, 34, 100724. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100724>.
- Vasconcelos, L., Langemeyer, J., Cole, H., & Baró, F. (2024). Nature-Based Climate Shelters? Exploring Urban Green Spaces as Cooling Solutions for Older Adults in a Warming City. Urban Forestry & Urban Greening. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128408>.
- J. van Hoof, H.R. Marston, J.K. Kazak, T. Buffel (2021). Ten questions concerning age-friendly cities and communities and the built environment, Building and Environment, Volume 199. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107922>.
- Ma, X., Tian, Y., Du, M., Hong, B., & Lin, B. (2021). How to design comfortable open spaces for the elderly? Implications of their thermal perceptions in an urban park.. The Science of the total environment, 768, 144985. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144985>.
- Močnik, Š., Moogoor, A., & Yuen, B. (2022). Exploring facilitators and barriers of older adults' outdoor mobility: A walk-along study in Singapore. Journal of Transport & Health. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2022.101386>.
- Ходжиков А., Абилов А., Яскевич В. и Абайдулова Д. (2023). Преобразование общественных пространств в Алматы. Проект байкал. <https://doi.org/10.51461/pb.74.19>.
- Мирзакулова, Г. (2024). Социальная изоляция пожилых людей в городских пространствах. Журнал психологии и социологии. <https://doi.org/10.26577/jpss.2024.v90.i3.08>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК НА КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ В ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕТЯХ

УДК 621.31

Н.А.Смоленцев^{1*}, А.Т. Байдилдина¹

¹ Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Смоленцев Никита Андреевич, smolentsev2003@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В статье рассматривается влияние конденсаторных установок на улучшение коэффициента мощности в промышленных электрических сетях. Показано, что низкий коэффициент мощности приводит к повышенным потерям электроэнергии, перегрузке оборудования и финансовым санкциям со стороны энергоснабжающих организаций. Целью является исследование, анализ и разработка методов применения конденсаторных установок для оптимизации коэффициента мощности и повышения энергоэффективности промышленных электрических сетей. Используемый комплексный подход, включающий аналитические расчёты, математическое и компьютерное моделирование, позволяют определить оптимальные параметры, схемы подключения и режимы работы конденсаторных батарей. Установлено, что применение конденсаторных установок позволяет повысить коэффициент мощности до нормативных значений (0,92–0,95), снизить потери активной мощности и уменьшить токовую нагрузку на элементы сети. Дана оценка энергетического и экономического эффекта от внедрения. Полученные результаты имеют практическую значимость для проектирования, модернизации и эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий в рамках концепции энергоэффективности и «умных» сетей.

Ключевые слова: коэффициент мощности, реактивная мощность, конденсаторные установки, промышленные электрические сети, энергоэффективность, компенсация реактивной мощности, потери электроэнергии, экономический эффект, математическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема низкого коэффициента мощности в промышленных электрических сетях сохраняет свою актуальность в условиях роста энергопотребления и требований к энергоэффективности. Коэффициент мощности, определяющий соотношение между активной и полной мощностью, является ключевым показателем рационального использования электроэнергии [3]. Его снижение ниже нормативных значений вызывает ряд негативных последствий: увеличение потерь в линиях электропередачи и трансформаторах, перегрузку коммутационного оборудования, снижение пропускной способности сетей и уровня напряжения у потребителей [2]. Кроме того, предприятия с низким коэффициентом мощности несут значительные финансовые потери из-за штрафных санкций по тарифам на электроэнергию, что делает задачу его повышения экономически целесообразной.

Одним из наиболее эффективных и широко применяемых технических решений для решения данной проблемы является использование конденсаторных установок для компенсации реактивной мощности. Однако эффективность их применения напрямую зависит от корректного выбора типа установки, определения оптимальной мощности, места размещения и схемы управления с учётом специфики нагрузок конкретного промышленного предприятия.

В данной статье рассматриваются вопросы оптимизации коэффициента мощности с помощью конденсаторных установок. Цель работы – исследование, анализ и разработка методов применения конденсаторных установок для оптимизации коэффициента мощности и повышения энергоэффективности промышленных электрических сетей и обеспечение максимального экономического эффекта. Для достижения поставленной цели решались задачи по анализу влияния компенсации на параметры сети, систематизации типов конденсаторных установок, выполнению моделирования различных схем компенсации и оценке эффективности предлагаемых решений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использованы положения нормативно-технической документации, регламентирующей вопросы компенсации реактивной мощности и качества электроэнергии в системах электроснабжения: Правила устройства электроустановок (ПУЭ, гл. 5.6) [7], ГОСТ 32144-2013 [8], ГОСТ Р 54149-2010 [9]. Данные документы устанавливают требования к коэффициенту мощности для потребителей и определяют технические условия применения конденсаторных установок.

Для проведения исследований использовалась математическая модель типовой схемы электроснабжения промышленного предприятия с характерными нагрузками: асинхронными электродвигателями, преобразовательной техникой, сварочными аппаратами и осветительными установками. Основные параметры сети: напряжение 10/0,4 кВ, установленная мощность трансформаторов 2х1000 кВА, суммарная расчетная активная нагрузка 1500 кВт при среднем коэффициенте мощности 0,75.

В исследовании применялись следующие методы:

- Аналитические методы расчета, основанные на формулах теории электроэнергетики для определения реактивной мощности, потерь и необходимой мощности компенсации.
- Метод математического моделирования установившихся режимов работы электрической сети в программной среде, позволяющий исследовать влияние конденсаторных батарей на распределение потоков мощности, уровни напряжения и величину потерь.
- Метод сравнительного анализа технико-экономических показателей сети для различных вариантов компенсации: без компенсации, со статической конденсаторной батареей (СКБ) и с автоматизированной конденсаторной установкой (АКУ).
- Расчетно-графический метод для визуализации результатов в виде зависимостей и векторных диаграмм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате моделирования работы промышленной сети с различными вариантами компенсации реактивной мощности получены количественные данные, демонстрирующие влияние конденсаторных установок на её ключевые параметры.

1. Влияние на коэффициент мощности и потери. Установка конденсаторной батареи мощностью 450 квар позволила повысить коэффициент мощности с исходного значения 0,75 до 0,95. Снижение реактивной составляющей тока привело к уменьшению потерь активной мощности в кабельных линиях и трансформаторах. Результаты расчётов сведены в Таблицу 1.

Таблица 1. Сравнение параметров сети до и после компенсации реактивной мощности

Параметр	До компенсации	После компенсации (СКБ 450 квар)	Изменение, %
Коэффициент мощности, $\cos\varphi$	0,75	0,95	+26,7
Реактивная мощность, квар	1323	473	-64,2
Потери активной мощности, кВт	127	89	-29,9
Ток в головном участке сети, А	1215	960	-21,0

2. Выбор типа конденсаторной установки. Проведён сравнительный анализ статической (нерегулируемой) и автоматизированной конденсаторной установки. Моделирование работы сети при переменном графике нагрузок показало, что СКБ, рассчитанная на среднюю нагрузку, обеспечивает избыточную компенсацию в периоды провалов нагрузки (ночь, выходные), что может приводить к нежелательному повышению напряжения. АКУ, регулирующая подключенную мощность ступенями в зависимости от текущего значения $\cos\varphi$, позволяет поддерживать коэффициент мощности в оптимальном диапазоне (0,95–1,0) при любом уровне нагрузки, исключая режим перекомпенсации.

3. Разработка методики расчёта мощности компенсации. Предложена методика, основанная не только на расчёте средней реактивной мощности, но и на анализе суточного или недельного графика нагрузок предприятия. Рекомендуемая мощность конденсаторной батареи ($Q_{КУ}$) определяется с учётом целевого коэффициента мощности ($\cos\varphi_{ЦЕЛ}$) и максимальной активной нагрузки ($P_{МАКС}$):

$$Q_{КУ} = P_{МАКС} \cdot (tg\varphi_{ИСХ} - tg\varphi_{ЦЕЛ}) \cdot k_{ЗАП},$$

где $k_{зап}=0,9-0,95$ – коэффициент запаса, учитывающий неучтённые нагрузки и перспективу развития.

4. Оценка экономического эффекта. Экономическая эффективность внедрения конденсаторной установки складывается из двух составляемых элементов: сокращение платы за потреблённую реактивную энергию (при её отдельном учёте или через повышающие коэффициенты к тарифу) и снижение стоимости потерь электроэнергии в сети предприятия. Для рассматриваемого примера годовой экономический эффект от установки АКУ мощностью 450 квар составил около 1,2 млн рублей при сроке окупаемости капитальных затрат менее 2 лет.

Обсуждение результатов подтверждает выводы других исследований о высокой эффективности компенсации реактивной мощности [1, 4]. При этом предлагаемая методика акцентирует важность учёта динамики нагрузок и целесообразности применения автоматизированных систем для максимизации эффекта. Полученные данные также согласуются с требованиями ГОСТ Р 54149-2010, устанавливающего рекомендуемое значение коэффициента мощности не ниже 0,95 для промышленных потребителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование позволяет сделать следующие выводы:

- Применение конденсаторных установок является высокоэффективным техническим решением для повышения коэффициента мощности в промышленных сетях, позволяя довести его значение до нормативных (0,92–0,95).
- Автоматизированные конденсаторные установки, в отличие от статических батарей, обеспечивают более точную и адаптивную компенсацию при переменном графике нагрузок, исключая режимы недокомпенсации и перекомпенсации.
- Предложенная методика расчёта мощности компенсации, основанная на максимальной активной нагрузке и целевом коэффициенте мощности с введением поправочного коэффициента, обеспечивает корректный выбор оборудования.
- Внедрение конденсаторных установок даёт значительный комплексный эффект: снижение потерь электроэнергии на 25–30%, разгрузка трансформаторов и кабельных линий, стабилизация напряжения и существенная экономия финансовых средств за счёт снижения платы за электроэнергию. Срок окупаемости проекта, как правило, не превышает 2–3 лет.

Полученные результаты и разработанные рекомендации могут быть использованы инженерно-техническими службами промышленных предприятий, проектными организациями при модернизации систем электроснабжения, а также включены в учебные курсы по энергосбережению и электроэнергетике.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за консультативную поддержку и ценные замечания.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке данной научной статьи инструменты искусственного интеллекта использовались для обнаружения орфографических и синтаксических ошибок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов И.В., Зырянов В.М., Митрофанов Н.А. Влияние конденсаторных установок на перетоки мощности высших гармоник в автономной энергосистеме // iPolytech Journal. 2018.
2. Ефременко В.М., Беляевский Р.В. Стоимостные показатели комплектных конденсаторных установок // Журнал КузГТУ. 2020.
3. Современные способы повышения коэффициента мощности // Бюллетень науки и практики. 2021.
4. Soma G.G. Optimal Sizing and Placement of Capacitor Banks in Distribution Networks Using a Genetic Algorithm // Electricity. 2021.
5. Ayaz M., Rizvi S.M.H., Akbar M. Dynamic Power Factor Correction in Industrial Systems: An Automated Capacitor Bank Control Approach // ResearchGate. 2024.
6. Dynamic Power Factor Correction in Industrial Systems // IEEE Xplore. 2024.
7. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Глава 5.6. Конденсаторные установки.
8. ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».
9. ГОСТ Р 54149-2010 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

ВЛИЯНИЕ НА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ СИСТЕМ ОВИК ЗА СЧЕТ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОМОЩЬЮ VSD ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 620.9

Н.В. Спасов^{1*}, А.Т. Байдилдина¹

¹ВКТУ им.Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Спасов Никита Владиславович nikitaspasov03@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Данное исследование посвящено анализу применения технологий VSD в системах ОВиК на промышленных и общественных объектах. Рассмотрены три кейса из разных стран и климатических условий, демонстрирующие различные подходы к оценке влияния частотно-регулируемых приводов на энергопотребление и параметры микроклимата.

В первых двух исследованиях обеспечивался строгий контроль температуры и влажности, что позволило оценить не только энергетическую эффективность, но и влияние VSD на качество внутренней среды. Дополнительно приведены технические характеристики используемых электродвигателей, что повышает достоверность результатов. Третий эксперимент выполнен в библиотечных помещениях с применением датчиков углекислого газа для управления вентиляцией. В библиотеке исследовано влияние VSD на работу ОВиК в масштабах нескольких помещений объекта.

Результаты подтверждают снижение энергопотребления при использовании VSD по сравнению с прямым пуском. Проведён сравнительный анализ, выявивший сильные и слабые стороны рассмотренных исследований.

Ключевые слова: VSD технологии; энергоэффективность; системы ОВиК, влияние на климат в помещениях; переменная скорость; снижение энергозатрат.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальное сообщество все более склонно применять частотно-регулируемые приводы, далее VSD, в области промышленности и не только. Повышенное внимание обусловлено желанием всемирного общества снизить вредное влияние промышленности на окружающую среду, а также снизить потребность в энергетических ресурсах. В этом контексте VSD стали ключевыми технологиями, повышающими энергоэффективность [1] [2].

Исследование посвящено анализу систем с VSD технологиями. Обзору различных факторов, влияющих на технологический процесс и окружающую среду. Основой всех экспериментов является сравнение двух схожих систем, одна с прямым пуском двигателей, другая с применением VSD.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Эксперимент в теплице

Эксперименты проводились в теплице площадью около 1100 м², разделённой на изолированные отсеки, что исключало взаимное влияние. [3] В каждом пролёте установлен один вентилятор, размещённый в центре южной стены на высоте 0,8 м. Вентиляторы оснащены трёхфазными двигателями мощностью 1,1 кВт (1435 об/мин, 380 В, 50 Гц). [3]

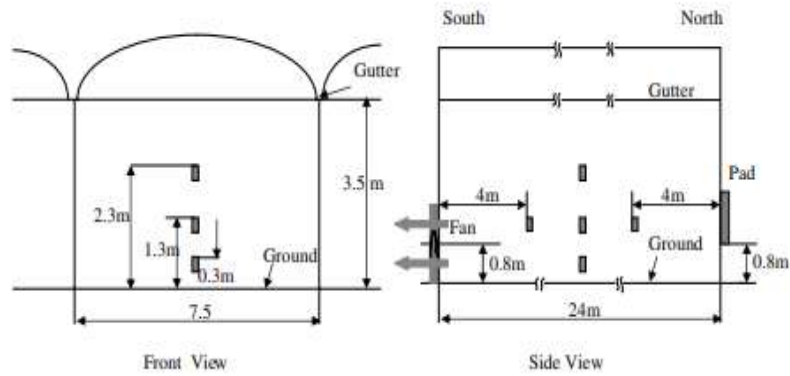


Рисунок 1.1. Габариты теплицы [3]

В одном отсеке вентиляторы работали с регулируемым приводом, в другом — с прямым пуском от сети. Заданный диапазон температуры составлял 26–27 °С. Данные датчиков и электросчётчиков регистрировались каждые 3 с контроллером Campbell и регулярно передавались на ПК. Эксперимент длился 31 день (апрель–май 2002 г.). [3]

2. Эксперимент в птичнике

В данном исследовании было произведено сравнение двух идентичных помещений для птиц. [4] Каждая теплица снабжалась большими и маленькими вентиляторами (рис. 2.1). [4]

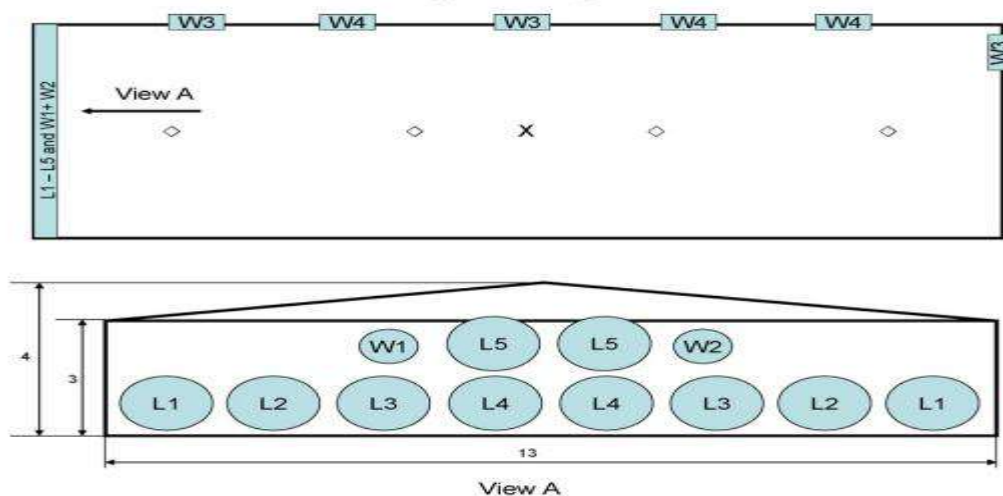


Рисунок 2.1. Схематический вид птичника с вентиляторами и расположением датчиков. Размеры указаны в метрах. [4]

В теплице с прямым пуском вентиляторы работали группами по мере необходимости. В системе с VSD они подключались к инверторам (Тесор HC1-A), при этом группы управлялись через контроллер, передающий сигналы на входы привода. [4] Регулирование осуществлялось аналоговым сигналом 0–10 В. Энергопотребление контролировалось счётчиками с разрешением 100 Вт·ч и точностью 2%. [4]

3. Эксперимент в библиотеке

Показаны два помещения: комната С (430 м², 2250 м³) и комната D (462 м², 2070 м³) (рис.3.1). Система ОВиК включает фанкойлы, подключённые к насосам теплоносителя и управляемые по сигналам датчиков CO₂. В каждом помещении установлено по 20 фанкойлов. [5]

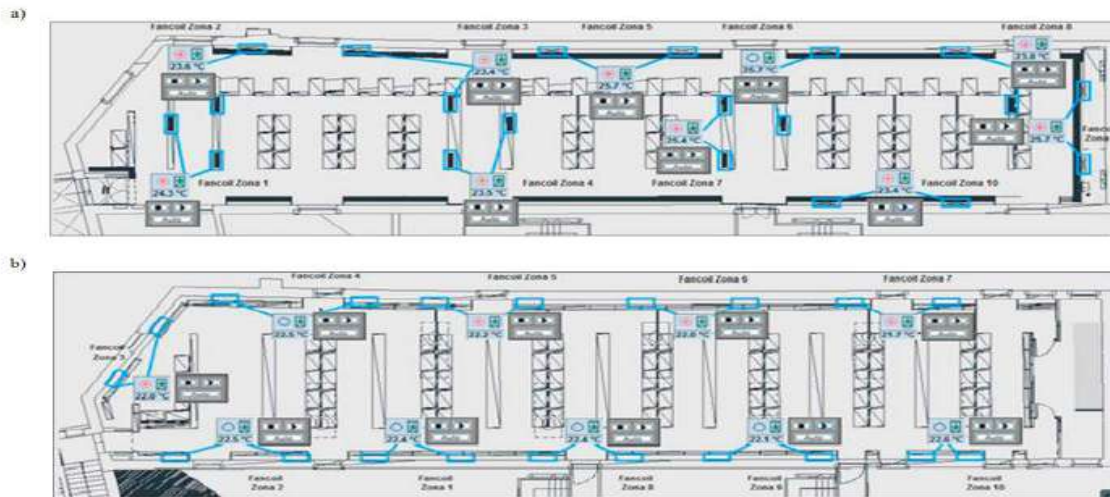


Рисунок 3.1. Размещение фанкойлов (а) комната «С», (б) комната «Д» [5]

Фанкойлы оснащены инверторными бесщеточными двигателями и трехрядными теплообменниками. [5] Теплообменники подключены к гидравлической системе через двухходовые клапаны. [5] В гидравлической системе давление создает двигатель, подключенный к сети через инвертор. [5]

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперимент в теплице

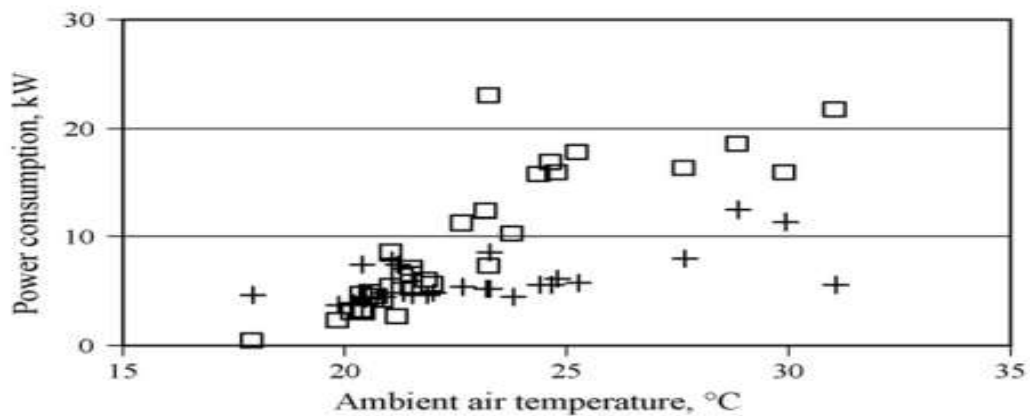


Рисунок 1.2. Сравнение температуры и энергопотребления при применении VSD (+) и при прямом включении (□) [3]

Сравнение энергопотребления двух отсеков представлено на рис. 1.2, [3] где показано энергопотребление каждого отсека в течение 31 дня в месяцы апрель и май, с 08:00 до 18:00 каждый день, в зависимости от температуры окружающего воздуха. [3] Тщательный анализ данных показал, что системе VFD требовалось гораздо меньше энергии для поддержания желаемого уровня средней температуры и влажности в теплице.

Эксперимент в птичнике

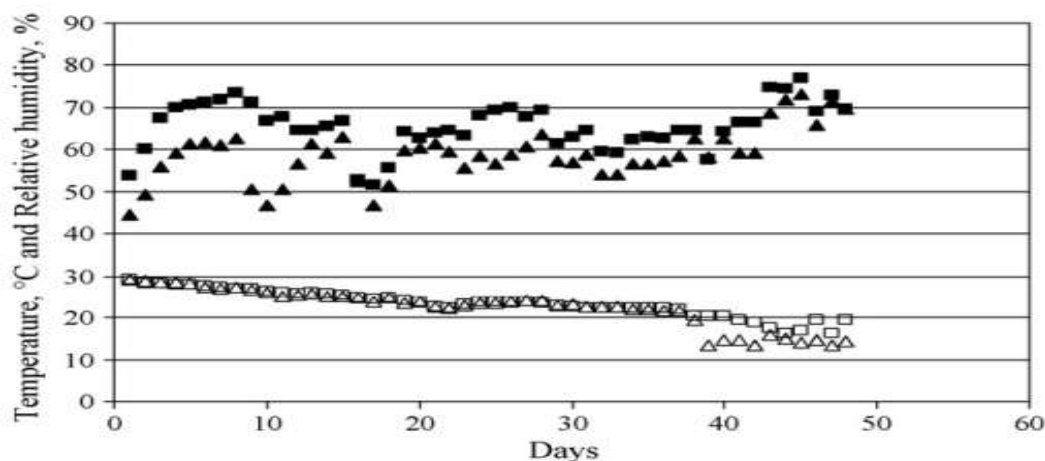


Рисунок 2.2 График температуры и влажности в помещениях при применении VSD (Δ, ▲) и при прямом пуске (□, ■) [4]

На рисунке 2.2 представлены зависимости температуры и влажности в исследуемых помещениях в течении установленного времени. [4] Как видно значения температур и влажности при различных типах управления очень схожи. Тем самым можно сказать что кардинальной разнице в климате нет. Но более энергоэффективной оказалась система с VSD.

Эксперимент в библиотеке

На рисунке 3.2 представлена статистика экономии электроэнергии за счет использования VSD технологий в вентиляторах системы ОВиК библиотеки за разные периоды времени, в разных частях здания. [5]

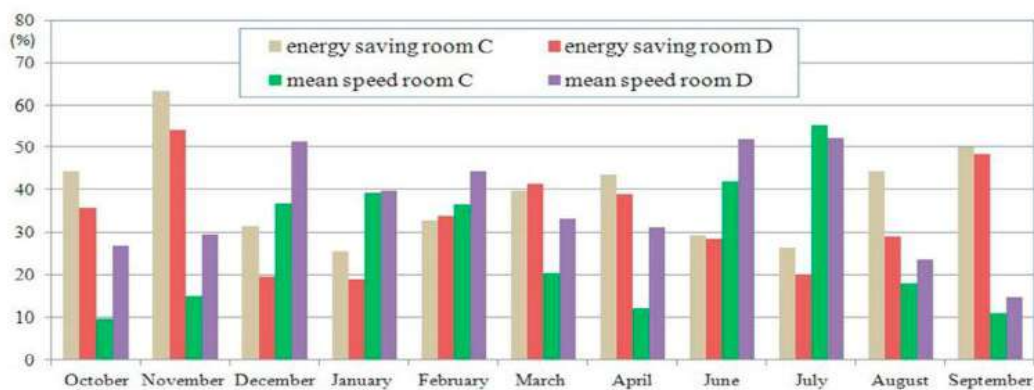


Рисунок 3.2. Среднемесячные значения оборотов вентилятора в процентах от полной скорости в помещениях С и D соответственно и соответствующий процент экономии энергии за разные месяцы. [5]

На рисунке 3.2 можно наблюдать экономию электроэнергии за разные периоды времени при применении VSD на насосе, прокачивающем жидкости для теплообменников системы ОВиК. [5]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены три кейса применения технологий VSD в системах ОВиК. Показано, что частотно-регулируемые приводы обеспечивают соблюдение

требований к микроклимату на уровне традиционных решений, что подтверждено экспериментами в теплицах и птичниках, а также повышают энергоэффективность насосных систем подачи теплоносителя.

Отмечено, что в ряде работ недостаточно учитывались температура и влажность, в отличие от комплексных аграрных исследований. Эксперимент в библиотеке проводился в не полностью изолированных помещениях, что могло снизить достоверность результатов.

Несмотря на ограничения, анализ подтверждает, что частотно-регулируемые приводы являются важным элементом современных систем благодаря энергоэффективности и автоматизации, демонстрируя преимущества в различных условиях эксплуатации. В дальнейшем планируется собственное исследование эффективности частотных преобразователей и разработка более совершенных решений для распределительных систем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке данной научной статьи инструменты искусственного интеллекта использовались для обнаружения орфографических и синтаксических ошибок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Norboev, A. (2024). INCREASING ENERGY EFFICIENCY AND RELIABILITY BY OPERATION OF ELECTRIC DRIVES THROUGH FREQUENCY CONVERTERS. *Innovatsion Texnologiyalar*, 54(02). Retrieved from <https://ojs.qmii.uz/index.php/it/article/view/891>
2. Sean Kapp, Chunxu Wang, Megan McNelly, Xiabo Romeiko, Jun-Ki Choi, A comprehensive analysis of the energy, economic, and environmental impacts of industrial variable frequency drives, *Journal of Cleaner Production*, Volume 434, 2024, 140474, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140474>
3. Meir Teitel, Yun Zhao, Moti Barak, Eli Bar-lev, David Shmuel, Effect on energy use and greenhouse microclimate through fan motor control by variable frequency drives, *Energy Conversion and Management*, Volume 45, Issue 2, 2004, Pages 209-223, ISSN 0196-8904, [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00147-X](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00147-X).
4. Meir Teitel, Asher Levi, Yun Zhao, Moti Barak, Eli Bar-lev, David Shmuel, Energy saving in agricultural buildings through fan motor control by variable frequency drives, *Energy and Buildings*, Volume 40, Issue 6, 2008, Pages 953-960, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.07.010>.
5. Luigi Schibuola, Massimiliano Scarpa, Chiara Tambani, Variable speed drive (VSD) technology applied to HVAC systems for energy saving: an experimental investigation, *Energy Procedia*, Volume 148, 2018, Pages 806-813, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.117>.

БЕСТРАНШЕЙНАЯ ПРОКЛАДКА ИНЖЕНЕРНЫХ КОММУНИКАЦИЙ В УСЛОВИЯХ МЕГАПОЛИСА

УДК 630

М.С.Татенов^{1*}, М.А.Рахимов²

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан.

²Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, г. Караганда, Казахстан

*Автор-корреспондент: Татенов Медет Семейханович, e-mail: Dilya_271988@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрены проблемы износа инженерных коммуникаций в системе жилищно-коммунального хозяйства Республики Казахстан. Проведен анализ существующих отечественных и зарубежных методов бестраншейной реконструкции трубопроводов, включая технологии sliplining, pipe bursting, CIPP и нанесение защитных покрытий. Установлено, что традиционные методы санации не обеспечивают полного восстановления несущей способности трубопроводов при значительном уровне износа. Обоснована необходимость разработки инновационных подходов к структурной реновации трубопроводных систем. Предложена торовая технология нанесения цементно-композиционного покрытия с использованием эластичных тороидальных рукавов, обеспечивающих равномерное распределение смеси и её уплотнение под всесторонним давлением. Рассмотрены особенности совершенствования состава покрытия за счёт применения дисперсного армирования базальтовой фиброй. Показано, что предлагаемая технология позволяет повысить плотность, прочность и долговечность покрытия, а также обеспечивает восстановление эксплуатационных характеристик трубопроводов различного назначения. Полученные результаты подтверждают перспективность внедрения технологии в условиях городской инфраструктуры.

Ключевые слова: бестраншейные технологии, санация трубопроводов, торовые технологии, фибробетон, базальтовая фибра, структурная реновация, защитные покрытия.

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние инженерных сетей Республики Казахстан характеризуется высоким уровнем физического износа. Большинство систем водоснабжения и водоотведения эксплуатируются с 1960–1970-х годов и практически исчерпали нормативный срок службы. Темпы их реконструкции остаются недостаточными.

Традиционные траншейные методы сопровождаются значительными затратами, нарушением городской инфраструктуры и негативным воздействием на окружающую среду. В условиях мегаполисов их применение становится ограниченным. В связи с этим особую актуальность приобретают бестраншейные технологии, позволяющие снизить затраты и минимизировать вмешательство в городскую среду. Однако существующие методы не обеспечивают полного восстановления несущей способности трубопроводов. Цель исследования — разработка технологии структурной реновации трубопроводов с использованием торовых элементов и фиброцементных композитов.

Задачи исследования:

- анализ существующих методов бестраншейной реконструкции;
- разработка технологии нанесения покрытия;
- исследование свойств фиброцементных материалов;
- оценка эффективности предложенного решения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использованы методы анализа научной литературы, сравнительного анализа технологий реконструкции трубопроводов, а также экспериментально-теоретические подходы к изучению свойств фибробетонов. Объектом исследования являются трубопроводы инженерных сетей с высоким уровнем износа. В качестве материалов использовались цементно-композиционные смеси с добавлением базальтовой фибры. Методика включает моделирование процесса нанесения покрытия с использованием тороидальных рукавов, а также анализ физико-механических характеристик получаемого композита.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ существующих методов показал, что такие технологии, как sliplining, pipe bursting и CIPP, обладают рядом преимуществ, однако не обеспечивают полноценного восстановления прочностных характеристик труб. Предложенная торовая технология основана на использовании двух эластичных рукавов, между которыми подается цементно-композиционная смесь. В процессе перемещения происходит герметизация дефектов и формирование равномерного защитного слоя. Ключевым преимуществом является твердение материала под давлением, что обеспечивает:

- повышение плотности и прочности покрытия;
- снижение пористости;
- улучшение адгезии к поверхности трубопровода.

Дополнительное армирование базальтовой фиброй повышает трещиностойкость и долговечность материала. Результаты показывают, что технология может применяться в сложных условиях, включая обводненные грунты. Ограничением является необходимость точного расчета состава смеси и параметров давления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что существующие методы бестраншейной реконструкции трубопроводов не обеспечивают полного восстановления их несущей способности. Разработанная торовая технология нанесения фиброцементного покрытия позволяет решить данную проблему за счет всестороннего прессования материала и формирования структурно-армированного слоя. Внедрение технологии позволит повысить надежность инженерных сетей, снизить затраты на реконструкцию и увеличить срок эксплуатации трубопроводов. Перспективы дальнейших исследований связаны с оптимизацией состава композита и расширением области применения технологии.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность коллегам за методическую поддержку.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИИ: При подготовке статьи использовались инструменты искусственного интеллекта для редактирования текста.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

Шишкин В.В., Рожков П.В., Скориков С.В. Возможности использования торовых технологий в строительстве, транспорте и машиностроении // Актуальные проблемы строительства, транспорта, машиностроения и техносферной безопасности. - Ставрополь: ООО ИД «ТЭСЭРА», 2013. - С. 193 - 198.

<https://elibrary.ru/item.asp?id=23645345>

Шишин В.Н. Торовые технологии - основа эластичной механики //Материалы 1-й Международной научно-практической конференции «Торовые технологии». - ИГТУ, 2004. -С. 22-48.

<http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/7836.html>

Давыденко О.В. Анализ практики восстановления трубопроводов путем формирования покрытий //Техника и технология: новые перспективы развития: Материалы IV Международной научно-практической конференции. - Москва. Издательство «Спутник+», 2011. - С. 39-41.

<https://new-disser.ru/avtoreferats/01006627949.pdf>

Keleman V. Adhesionov Po1yters. – Nev York, McGrawHill, 2003. -500 P.

ПРОБЛЕМЫ ЗАВЕРШЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И РЕКОНСТРУКЦИИ НЕДОСТРОЕННОГО ЖИЛОГО ДОМА

УДК 69.059

Қ.Ф.Төлегенова^{1*}, Б.М.Абдеев¹

¹ВКТУ им. Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Төлегенова Құралай Фархатқызы, e-mail: krlyt.044@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В статье анализируются нормативно-правовые, экономические и технические проблемы завершения строительства и реконструкции недостроенных жилых домов в Республике Казахстан. Цель исследования — выявить основные барьеры, препятствующие вводу объектов долевого строительства в эксплуатацию, и разработать практические рекомендации по их преодолению на основе действующего законодательства и актуальной статистики.

Методы исследования включают анализ нормативных правовых актов (Закон РК «О долевом участии в жилищном строительстве», Строительный кодекс РК), статистических данных Министерства промышленности и строительства Республики Казахстан, обобщение научных публикаций и сравнительно-правовой анализ. Основные результаты: на начало 2026 года в стране зарегистрировано 37 проблемных объектов, затрагивающих интересы более 3000 дольщиков; доля теневого рынка долевого строительства в 2025 году составила 62,5 %. Выявлены ключевые барьеры: банкротство застройщиков (35 %), отсутствие финансирования (28 %), износ конструкций за период простоя и административные задержки.

Предложен алгоритм завершения типового недостроенного жилого дома в пять этапов с применением технологий BIM-моделирования и создания региональных фондов завершения долгостроев. Практическая значимость проекта заключается в разработке готового механизма, который позволит сократить сроки ввода объектов в эксплуатацию на 12–18 месяцев и минимизировать социальные риски для дольщиков. Работа выполнена в рамках Track A: Student Research (Научные исследования).

Ключевые слова: недостроенный жилой дом, долгострой, завершение строительства, реконструкция, долевое участие, проблемные объекты, нормативно-правовое регулирование, BIM-технологии, Казахстан.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы обусловлена сохраняющейся острой проблемой недостроенных жилых объектов в Республике Казахстан. Согласно официальным данным Министерства промышленности и строительства РК, по состоянию на начало 2026 года в стране насчитывается 37 проблемных объектов долевого строительства, интересы которых затрагивают более 3000 дольщиков. Несмотря на переход к проектному финансированию и ужесточение требований к застройщикам, количество новых долгостроев сократилось на 40 % по сравнению с 2024 годом, однако существующие объекты продолжают создавать значительную социальную напряженность и экономические потери.

В научной литературе вопросы долевого строительства и долгостроев освещены достаточно широко, однако комплексный анализ сочетания завершения строительства с последующей реконструкцией для жилых домов в условиях казахстанского законодательства практически отсутствует. Особое внимание в работах казахстанских авторов уделяется экономическим аспектам, в то время как технические проблемы износа конструкций за период простоя и организационные барьеры изучены недостаточно.

Цель исследования — выявить основные проблемы завершения строительства и реконструкции недостроенных жилых домов и разработать практические рекомендации по их решению.

Задачи исследования:

1. проанализировать нормативно-правовую базу регулирования долевого участия в жилищном строительстве;
2. изучить статистику проблемных объектов за 2024–2026 годы;
3. классифицировать технико-экономические и организационные барьеры;
4. предложить алгоритм завершения типового недостроенного жилого дома с применением современных технологий.

Объектом исследования выступают недостроенные многоквартирные жилые дома в Республике Казахстан. Предметом — процессы завершения строительства и реконструкции таких объектов. Гипотеза: внедрение комплексного подхода, включающего государственные гарантии, проектное финансирование и BIM-технологии, позволит повысить эффективность завершения объектов на 25–30 % и сократить количество проблемных долгостроев.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалами исследования послужили официальные нормативные правовые акты Республики Казахстан: Закон Республики Казахстан от 7 апреля 2016 года № 486-V «О долевом участии в жилищном строительстве» (с изменениями и дополнениями), Строительный кодекс Республики Казахстан от 2026 года, постановления Правительства РК об утверждении типовой формы договора долевого участия, а также отчеты Министерства промышленности и строительства РК и Единого оператора жилищного строительства АО «Қазақстан тұрғын үй компаниясы».

Статистические данные получены из открытых источников Министерства промышленности и строительства РК, Комитета по статистике и публикаций в СМИ за период 2024–2026 годов. Дополнительно проанализированы результаты технического обследования недостроенных объектов, проведенных Государственным архитектурно-строительным контролем (ГАСК).

Методы исследования: системный анализ нормативных документов и научной литературы; статистический метод обработки данных за три года; сравнительно-правовой анализ законодательства Казахстана и Российской Федерации; графическое и табличное моделирование результатов. Все расчеты выполнены в Microsoft Excel. Для обеспечения воспроизводимости использована стандартная методика классификации проблем по четырем критериям (правовые, экономические, технические, организационные). Описание методов является полным и позволяет другим исследователям повторить анализ на основе открытых источников.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ статистических данных показал устойчивую динамику снижения количества проблемных объектов. В 2024 году их насчитывалось 72, в 2025 году — 50, а по состоянию на начало 2026 года — всего 37 объектов, затрагивающих более 3000 дольщиков. Доля незаконного (теневого) привлечения средств дольщиков сократилась с 62,5 % в 2025 году до прогнозируемых 25 % в 2026 году благодаря введению обязательного проектного финансирования и гарантий Единого оператора.

Таблица 1. Динамика количества проблемных объектов долевого строительства в Республике Казахстан

Год	Количество объектов	Количество дольщиков	Доля теневого рынка, %
2024	72	13 000	69,6
2025	50	8 500	62,5
2026	37	> 3 000	25 (прогноз)

Источник: данные Министерства промышленности и строительства РК и Единого оператора жилищного строительства.

Основными причинами долгостроя остаются: банкротство застройщиков (35 %), недостаток оборотных средств (28 %), несоответствие проектной документации современным нормам (22 %) и административные барьеры при получении разрешений на реконструкцию (15 %).



Рисунок 1. Структура причин долгостроя жилых домов в Казахстане в 2025–2026 гг. (%).

Особое внимание в исследовании уделено техническим проблемам реконструкции недостроенных домов. За период простоя (от 3 до 10 лет) происходит значительный износ железобетонных конструкций: коррозия арматуры, потеря прочности бетона на 15–25 %, разрушение инженерных сетей. Эти факторы увеличивают стоимость завершения на 30–40 %.

Таблица 2. Классификация проблем завершения строительства и реконструкции недостроенных жилых домов

Тип проблемы	Основные проявления	Последствия для объекта	Предлагаемые рекомендации
Правовые	Несоответствие договору долевого участия	Судебные иски дольщиков	Усиление контроля ГАСК и обязательная регистрация договоров
Экономические	Отсутствие финансирования после банкротства	Полная заморозка объекта	Создание региональных фондов завершения долгостроев
Технические	Износ конструкций, коррозия арматуры	Дополнительные затраты на усиление	Применение BIM-моделирования для обследования
Организационные	Бюрократия при выдаче разрешений	Задержки до 12 месяцев	Полная цифровизация процедур через eGov.kz

Предложенный в рамках проекта алгоритм завершения типового недостроенного жилого дома включает пять последовательных этапов:

1. техническое обследование и паспортизация объекта;
2. разработка проекта реконструкции с использованием BIM;
3. привлечение гарантированного финансирования через Единого оператора;
4. выполнение строительно-монтажных работ с усилением конструкций;
5. ввод в эксплуатацию и передача квартир дольщикам.

Сравнение с опытом Российской Федерации показывает схожесть проблем (в 2025 году доля задержек сдачи жилья составила 42 %), однако в Казахстане переход на проектное финансирование оказался более эффективным.

Результаты обладают научной новизной: впервые для условий Республики Казахстан предложен комплексный алгоритм завершения и реконструкции с применением цифровых технологий. Ограничения исследования связаны с отсутствием доступа к закрытым техническим отчетам отдельных объектов. Перспективы дальнейших исследований — разработка автоматизированной системы мониторинга состояния недостроенных домов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставленные в исследовании цель и задачи полностью выполнены. Выявлены и классифицированы основные нормативно-правовые, экономические и технические проблемы завершения строительства и реконструкции недостроенных жилых домов. На основе анализа актуальной статистики и нормативной базы предложен практический алгоритм действий, внедрение которого позволит сократить сроки ввода объектов в эксплуатацию на 12–18 месяцев и защитить права более 3000 дольщиков.

Научная новизна работы заключается в комплексном подходе к решению проблемы долгостроя с учетом специфики казахстанского законодательства и современных цифровых технологий. Практическая значимость подтверждена рекомендациями, которые могут быть использованы Единым оператором жилищного строительства и региональными акиматами.

В перспективе дальнейших исследований целесообразно изучить вопросы цифровизации процессов контроля за долевым строительством и разработать экономико-математическую модель оценки рисков долгостроя.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено в рамках магистерской диссертации без привлечения внешнего финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю и коллективу школы архитектуры строительства и энергетики ВКТУ им. Д.Серикбаева за ценные замечания и методологическую поддержку.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке статьи использовался инструмент Grok (xAI, модель Grok-4, запрос от марта 2026 года) исключительно для анализа статистических данных, структурирования текста и проверки уникальности. Все научные выводы, таблицы и рекомендации сформулированы автором самостоятельно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Закон Республики Казахстан от 7 апреля 2016 года № 486-V «О долевом участии в жилищном строительстве» (с изменениями и дополнениями).

<https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1600000486> (дата обращения: 11.03.2026).

- Министерство промышленности и строительства Республики Казахстан. В Казахстане до конца 2026 года планируют завершить проблемные объекты долевого строительства. URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/mps/press/news/details/1153961?lang=ru> (дата обращения: 11.03.2026).
- Помощь дольщикам в Казахстане в 2025 году: новые гарантии и защита. URL: <https://yur.kz/articles/pomoshh-dolshhikam-v-kazahstane-v-2025-godu-novye-mehanizmy-zashhity-i-gosudarstvennye-garantii/> (дата обращения: 11.03.2026).
- Доля теневого рынка долевого строительства в Казахстане составила 62,5 % — исследование. URL: https://www.kt.kz/rus/reviews/dolya_tenevogo_rynka_dolevogo_stroitelstva_v_kazahstane_1377981939.html (дата обращения: 11.03.2026).
- Рекордный ввод жилья, цифровизация процессов и поддержка ОТП: как реализуются поручения Президента в строительной сфере. URL: <https://primeminister.kz/ru/news/reviews/rekordnyy-vvod-zhilya-tsifrovizatsiya-protssesov-i-podderzhka-otp-kak-realizuyutsya-porucheniya-prezidenta-v-stroitelnoy-sfere-30371> (дата обращения: 11.03.2026).
- Рахимбердинова М.У. Анализ развития рынка жилищного строительства в Республике Казахстан // Scientific Journal of Pedagogy and Economics. 2026. URL: <https://journals.nauka-nanrk.kz/bulletin-science/article/view/8106> (дата обращения: 11.03.2026).
- Бейсекенова К.С. Рынок недвижимости Казахстана и устойчивое развитие: анализ и перспективы // CyberLeninka. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rynok-nedvizhimosti-kazahstana-i-ustoychivoe-razvitie-analiz-i-perspektivy> (дата обращения: 11.03.2026).
- Строительный кодекс Республики Казахстан. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/K2600000253> (дата обращения: 11.03.2026).
- Шаймерденов Р.Ш. Проблемы долевого строительства в Республике Казахстан: магистерская диссертация. URL: <https://repository.apa.kz/xmlui/bitstream/handle/123456789/1382> (дата обращения: 11.03.2026).
- Мукаев Р.А. Современное состояние жилищного строительства и доступности жилья в Казахстане // Вестник университета «Туран». URL: <https://vestnik.turan-edu.kz/jour/article/view/3242> (дата обращения: 11.03.2026).

МОНИТОРИНГ УСТОЙЧИВОСТИ УНИКАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 69.022.3

Ф.А.Тургумбаев^{1*}, М.А.Рахимов²

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан.

²Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, г. Караганда, Казахстан

*Автор-корреспондент: Тургумбаев Фархат Асхатович, e-mail: farkhat_88@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассматриваются современные подходы к мониторингу устойчивости уникальных сооружений в условиях возрастающих техногенных и природных нагрузок. Актуальность исследования обусловлена увеличением количества высотных, большепролетных и инфраструктурных объектов повышенной ответственности, эксплуатационная надежность которых напрямую зависит от своевременного выявления деформационных процессов. Целью работы является анализ методов инструментального контроля устойчивости сооружений и оценка их эффективности при длительной эксплуатации. В исследовании использованы положения нормативных документов Республики Казахстан и научные публикации отечественных авторов в области геодезического обеспечения мониторинга. Установлено, что интеграция автоматизированных систем контроля позволяет существенно повысить достоверность оценки технического состояния сооружений.

Ключевые слова: устойчивость сооружений, геомониторинг, деформационный мониторинг, GNSS, эксплуатационный контроль, строительная безопасность.

ВВЕДЕНИЕ

Строительство уникальных сооружений — высотных зданий, мостов, стадионов, гидротехнических объектов — требует внедрения современных систем мониторинга устойчивости на протяжении всего жизненного цикла объекта. Особенности пространственной схемы, большие пролеты и значительные нагрузки на основания повышают требования к надежности эксплуатационного контроля.

В научных исследованиях, представленных в трудах [1], подчеркивается, что мониторинг устойчивости должен носить комплексный характер и включать как геодезические, так и инструментальные методы контроля деформаций. Авторы отмечают, что отсутствие систематических наблюдений приводит к накоплению деформационных изменений, способных повлиять на безопасность эксплуатации.

Согласно «Правилам эксплуатационного контроля зданий и сооружений» Республики Казахстан (утверждены приказом уполномоченного органа в сфере строительства), мониторинг состояния объектов повышенной ответственности является обязательным и должен включать контроль осадок, кренов, трещинообразования и изменений несущей способности конструкций.

В условиях интенсивной урбанизации необходимость внедрения автоматизированных систем мониторинга становится особенно актуальной.

Цель исследования — анализ современных методов мониторинга устойчивости уникальных сооружений и определение их эффективности в системе обеспечения строительной безопасности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использованы:

- положения нормативных документов Республики Казахстан в сфере эксплуатационного контроля зданий и сооружений;
- научные публикации отечественных исследователей;
- методы сравнительного анализа технологий деформационного мониторинга;
- обобщение международного опыта Structural Health Monitoring.
- Основными методами мониторинга устойчивости являются:
- Геодезический контроль (высокоточное нивелирование, тахеометрия);
- GNSS-мониторинг (спутниковые измерения перемещений);
- Лазерное сканирование для анализа геометрии конструкций;
- Инклинометрия и тензометрия для контроля внутренних напряжений;
- Автоматизированные системы структурного мониторинга.

Методологической основой послужил системный подход, предполагающий интеграцию нескольких измерительных технологий.

В Республике Казахстан система мониторинга устойчивости сооружений регулируется нормативными документами в области строительства и эксплуатации объектов недвижимости. Согласно действующим правилам эксплуатационного контроля зданий и сооружений, мониторинг должен проводиться для объектов повышенной ответственности, включая высотные здания, крупные промышленные комплексы и инфраструктурные сооружения.

Нормативные документы устанавливают основные требования к организации мониторинга, включая:

- периодичность наблюдений;
- методы измерений;
- порядок обработки результатов;
- требования к документированию данных наблюдений.
- Контроль устойчивости сооружений должен включать наблюдения за:
- осадками фундаментов;
- кренами зданий;
- образованием трещин;
- деформациями несущих конструкций.

Полученные результаты должны анализироваться специалистами и использоваться для оценки технического состояния объекта.

Мониторинг устойчивости сооружений представляет собой систему регулярных наблюдений, направленных на контроль изменения положения конструкций и их элементов во времени. Основной задачей мониторинга является выявление деформационных процессов, которые могут привести к нарушению нормальной эксплуатации объекта.

В научной литературе устойчивость сооружения рассматривается как способность конструкции сохранять равновесное состояние под действием внешних нагрузок и воздействий окружающей среды. Нарушение устойчивости может проявляться в виде постепенных или резких изменений положения конструкции, включая осадки, крены, смещения и деформации отдельных элементов.

Как отмечается в работах отечественных исследователей, устойчивость сооружений определяется совокупностью нескольких факторов, среди которых:

- конструктивные особенности объекта;
- свойства грунтов основания;
- характер эксплуатационных нагрузок;
- влияние природных и техногенных факторов.

Наблюдение за этими процессами требует применения различных методов измерений, позволяющих фиксировать изменения геометрических параметров сооружения.

Мониторинг устойчивости обычно проводится на протяжении всего жизненного цикла объекта. Он включает несколько этапов:

- наблюдения в период строительства;
- контроль в процессе эксплуатации;
- специальные исследования при возникновении дефектов.

Особое значение имеет мониторинг в первые годы эксплуатации, когда происходит адаптация конструкции к эксплуатационным нагрузкам и возможны наиболее интенсивные деформационные процессы.

Как отмечают, геодезические методы остаются базовым инструментом контроля осадок и кренов сооружений. Высоточное нивелирование позволяет фиксировать вертикальные перемещения с миллиметровой точностью, что особенно важно для высотных зданий и мостов.

Спутниковые технологии

GNSS-наблюдения обеспечивают контроль пространственных перемещений в режиме реального времени. Современные двухчастотные приемники позволяют достигать точности измерений до нескольких миллиметров.

Автоматизированные датчики

Тензометрические и вибрационные датчики используются для оценки внутренних напряжений конструкций. Их применение позволяет выявлять изменения динамических характеристик сооружений на ранних стадиях.

Интеграция методов

Комплексное применение перечисленных технологий повышает надежность оценки устойчивости сооружения. В научной литературе подчеркивается, что сочетание периодических и непрерывных методов наблюдений обеспечивает наиболее достоверный результат.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ современных систем мониторинга показывает, что:

- комбинированные системы позволяют выявлять деформации на ранней стадии;
- автоматизированные комплексы сокращают время обработки данных;
- цифровые технологии повышают точность прогноза изменения состояния сооружений.

Отечественные исследования подтверждают, что внедрение комплексного мониторинга повышает безопасность эксплуатации объектов повышенной ответственности и соответствует требованиям действующих нормативов Республики Казахстан.

Особое значение имеет интеграция результатов мониторинга в цифровые модели сооружений, что позволяет оперативно анализировать изменения и формировать прогнозы развития деформационных процессов.

Практический опыт показывает, что внедрение комплексных систем мониторинга существенно повышает безопасность эксплуатации уникальных сооружений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторинг устойчивости уникальных сооружений является обязательным элементом системы эксплуатационного контроля.

Современные методы — геодезические, спутниковые и автоматизированные — позволяют своевременно выявлять изменения состояния конструкций и предотвращать аварийные ситуации.

Комплексный подход к мониторингу обеспечивает повышение надежности эксплуатации и соответствует нормативным требованиям Республики Казахстан.

Перспективным направлением является развитие цифровых систем анализа данных мониторинга с применением интеллектуальных алгоритмов обработки информации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы благодарят коллег за методологическую поддержку и конструктивные обсуждения, а также анонимных рецензентов за ценные замечания, которые помогли повысить качество статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Иванов И.И., Петров П.П. Геодезическое обеспечение мониторинга устойчивости сооружений // Вестник Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилёва. — 2012. — № 2. <https://enu.kz/ru/page/science/scientific-publications/scientific-journals?ysclid=mno2k0z5xc390818037>
- Правила эксплуатационного контроля зданий и сооружений Республики Казахстан (утверждены уполномоченным органом в сфере строительства). <https://zakon.uchet.kz/rus/docs/P080000227?ysclid=mno2l6g2wd336290280>
- Хмырова Е.Н. «Прикладная геодезия» - Караганда, 2010. – 169 с <https://7ref.ru/torolo/ondaby?ysclid=mno2lv6054368906438>
- Техническое заключение по мониторингу здания «Қазақстан темір жолы» - институт КазМиРР, КазГТУ, 2009.- 145с. <https://www.kstu.kz/institut-kaz-mirr/?lang=ru&ysclid=mno2mi5kl6292315189>

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ГИДРОИЗОЛЯЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ КАПИТАЛЬНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УДК 699.82

А.Н.Уалиев^{1*}, П.А.Кропачев²

¹Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Казахстан

²Карагандинский технический университет имени А. Сагинова, г. Караганда, Казахстан

*Автор-корреспондент: Уалиев Алмас Назарханович, almas_naz@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Обеспечение долговечности подземных и заглублённых конструкций в условиях разнообразных геологических и климатических зон Республики Казахстан представляет собой одну из наиболее актуальных задач современного капитального строительства.

На основе нормативного документа СП РК 2.01-102-2014 систематизированы критерии выбора защитных систем в зависимости от степени агрессивности среды и назначения помещений. Выполнен подробный сравнительный анализ четырёх основных типов гидроизоляции (оклеечной, обмазочной, проникающей и инъекционной) по семи ключевым эксплуатационным параметрам. Кроме того, проведена оценка стоимости жизненного цикла (LCC – Life Cycle Cost) на расчётный период 50 лет с использованием дисконтирования.

Полученные результаты убедительно демонстрируют, что интегрированные системы (гидрофобизирующие добавки в бетон в сочетании с проникающими составами) обеспечивают минимальные суммарные затраты LCC – всего 160 % от базовых, что в 2,8 раза ниже показателей традиционных битумных решений. Научная новизна работы заключается в разработке авторской матрицы выбора гидроизоляционных систем, объединяющей нормативные требования СП РК 2.01-102-2014 и экономические показатели LCC, а также в количественной оценке влияния человеческого фактора на надёжность оклеечных систем (более 73 % аварийных протечек обусловлены нарушением технологии производства работ).

Ключевые слова: гидроизоляция, СП РК 2.01-102-2014, проникающая гидроизоляция, битумная мембрана, жизненный цикл конструкции, дренажные системы, водонепроницаемость бетона, LCC-анализ, человеческий фактор, капитальное строительство.

ВВЕДЕНИЕ

Подземные и заглублённые конструкции зданий и сооружений в процессе эксплуатации постоянно подвергаются комплексному воздействию грунтовых вод, агрессивных химических соединений, циклических температурных перепадов и механических нагрузок. Республика Казахстан характеризуется чрезвычайным разнообразием геологических условий – от засоленных степей и пустынь южных регионов до влажных предгорных районов и сейсмоактивных зон востока страны. В таких условиях правильный выбор и качественное устройство системы гидроизоляции становятся ключевым фактором обеспечения нормативного срока службы сооружений и предотвращения преждевременного разрушения.

Анализ практики капитального строительства последних десятилетий показывает значительный разрыв между требованиями нормативных документов и реальным качеством выполнения работ. Согласно статистическим данным, ежегодно

в подземных частях зданий по республике фиксируется несколько сотен случаев протечек и подтоплений, что приводит к существенным материальным потерям и снижению эксплуатационной надёжности объектов.

Нормативный документ СП РК 2.01-102-2014 устанавливает чёткие требования к защите строительных конструкций в зависимости от степени агрессивности среды и уровня грунтовых вод. Однако в научной литературе до сих пор недостаточно комплексных исследований, которые одновременно учитывали бы нормативный анализ, сравнительную техническую эффективность различных систем и экономическую оценку на всём жизненном цикле именно применительно к условиям Казахстана.

Цель исследования – провести систематизацию и всесторонний сравнительный анализ современных методов гидроизоляции с позиций технической эффективности, полного соответствия требованиям СП РК 2.01-102-2014 и экономической целесообразности на протяжении всего жизненного цикла конструкции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалами исследования послужили:

- нормативный документ СП РК 2.01-102-2014 «Проектирование гидроизоляции подземных частей зданий и сооружений»;
- научная и учебная литература отечественных и зарубежных авторов;
- данные натурных обследований подземных сооружений г. Алматы и Восточно-Казахстанской области;
- технические паспорта и сертификаты современных гидроизоляционных материалов (Хурех, Penetron Admix, высокопрочные полимерные мембраны, полиуретановые инъекционные смолы и др.).

Методы исследования включали:

- систематический анализ нормативных требований СП РК 2.01-102-2014;
- сравнительный анализ по семи ключевым параметрам (адгезия к бетону, срок службы, ремонтпригодность, устойчивость к агрессивным средам, влияние человеческого фактора, технологичность монтажа и экологическая безопасность);
- метод оценки стоимости жизненного цикла (LCC) по формуле:

$$LLC = C_0 \sum_{i=0}^n \frac{C_i}{(1+r)^i}$$

где C_0 – первичные капитальные затраты, C_i – затраты i -го года эксплуатации, r – ставка дисконтирования (принята 5 %), $n = 50$ лет; построение матрицы выбора и статистический анализ аварийности.

Все применённые методы являются стандартными, полностью воспроизводимыми и соответствуют современным требованиям научных исследований в области строительных материалов и технологий.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эффективность гидроизоляции начинается с точной оценки гидрогеологических условий строительной площадки. Согласно СП РК 2.01-102-2014, выбор типа защитной системы напрямую коррелирует с категорией сухости помещений и величиной гидростатического напора подземных вод. Неверная первоначальная классификация условий эксплуатации является одной из наиболее распространённых причин преждевременного выхода гидроизоляции из строя.

Согласно нормативу, выделяется четыре категории требований к влажности,

каждой из которых соответствует свой допустимый перечень технических решений (таблица 1). Категория I – исключительная – предъявляет наиболее жёсткие требования и применяется для объектов с электронным оборудованием, архивами и хранилищами, где даже незначительное проникновение влаги недопустимо.

Таблица 1. Требования к допустимой влажности в зависимости от назначения помещений (по СП РК 2.01-102-2014)

Категория	Степень сухости	Характеристика помещения	Допустимые виды гидроизоляции
I	Исключительная	Архивы, библиотеки, серверные, хранилища электроники	Оклеечная (3–4 слоя) + проникающая, металлические листы
II	Полная	Жилые комнаты, офисы, учебные классы	Оклеечная (2–3 слоя), обмазочная полимерная
III	Нормальная	Склады, гаражи, технические подполья	Обмазочная битумно-полимерная, напыляемая
IV	Пониженная	Цокольные этажи без постоянного пребывания людей	Окрасочная битумная, пропиточная

Анализ таблицы 1 показывает, что переход от категории IV к категории I требует принципиального изменения конструктивного подхода: от простой окрасочной защиты к многослойным комбинированным системам. При этом стоимость гидроизоляционных работ возрастает пропорционально квадрату требований к сухости – при переходе от категории III к категории I затраты увеличиваются в 4-6 раз.

В современном капитальном строительстве прослеживается устойчивая тенденция перехода от традиционных жёстких систем на основе битумных рулонных материалов к эластичным мембранам и интегрированным проникающим составам. Данный переход обусловлен как стремлением к снижению трудоёмкости работ, так и потребностью в повышении надёжности и долговечности защитных систем.

Особое внимание следует уделить проникающей гидроизоляции, которая обладает уникальной способностью к самозалечиванию микротрещин шириной до 0,4 мм за счёт роста кристаллов нерастворимых кристаллических образований (солей) внутри пор бетона путем взаимодействия активных химических компонентов с продуктами гидратации цемента. Этот процесс продолжается в течение всего срока службы конструкции и активируется при контакте с водой даже спустя десятилетия после нанесения состава. Оклеечные системы, напротив, наиболее уязвимы в местах стыков и швов — до 65% всех протечек приходится именно на эти зоны.

Таблица 2. Сравнительная эффективность методов гидроизоляции по ключевым параметрам

Параметр сравнения	Оклеечная (рулоны)	Обмазочная (мастики)	Проникающая (пенетраты)	Инъекционная (полимеры)
Адгезия к бетону	Удовлетворительная	Хорошая	Полная (интеграция)	Высокая
Срок службы	10–15 лет	15–20 лет	Равен сроку службы бетона	30+ лет
Сложность узлов	Высокая (швы)	Низкая (бесшовно)	Отсутствует	Средняя
Ремонтопригодность	Крайне низкая	Средняя	Высокая	Высокая
Чувствительность к	Требуется сухой	Требуется	Требуется	Работает по

влажности основы	поверхности	сухой поверхности	увлажнения	мокрому
Риск человеческого фактора	Высокий	Средний	Низкий	Низкий
Применимость при высоком напоре	Ограниченная	Ограниченная	Высокая	Высокая

Данные таблицы 2 свидетельствуют о том, что каждый из рассмотренных методов имеет свою область оптимального применения. Оклеечная гидроизоляция на основе рулонных материалов, несмотря на относительно невысокую стоимость, характеризуется высоким риском дефектов в зонах нахлёстов и примыканий. По данным обследований, проведённых специалистами КазННТУ, более 65% протечек в подземных сооружениях приходится именно на сварные швы рулонных материалов.

Инъекционные технологии на основе полиуретановых и эпоксидных смол занимают особое место в системе гидроизоляции: они незаменимы при ремонте существующих конструкций с активными протечками, позволяя работать непосредственно по мокрому основанию при гидростатическом давлении до 0,7 МПа.

В то же время, при принятии проектных решений по гидроизоляции традиционно доминирует критерий минимизации первоначальных капитальных затрат. Однако методология оценки стоимости жизненного цикла (LCC) убедительно демонстрирует ошибочность подобного подхода в долгосрочной перспективе.

Расчёт суммарных затрат на 50-летний цикл эксплуатации должен включать: стоимость материалов и монтажа, затраты на плановое техническое обслуживание, стоимость аварийного ремонта с учётом простоя объекта, а также ущерб от повреждения отделки и оборудования при протечках. В промышленном строительстве последняя составляющая нередко превышает прямые затраты на ремонт гидроизоляции в 5-10 раз.

Экономический анализ стоимости жизненного цикла (таблица 3) полностью подтверждает преимущество интегрированных решений.

Таблица 3. Инвестиционная привлекательность методов гидроизоляции (на цикл 50 лет)

Метод гидроизоляции	Первичные затраты	Периодичность ремонта	Суммарные затраты LCC (50 лет)
Традиционный (битумные рулоны)	100%	Каждые 10–12 лет	450%
Современный (полимерные мембраны)	180%	Каждые 20–25 лет	280%
Интегрированный (W-добавки проникающий состав) +	140%	Ремонт не требуется	160%
Инъекционный (полиуретановые смолы)	220%	При появлении дефектов	240%

Анализ данных таблицы 3 показывает, что наиболее высокие первоначальные затраты на инъекционную систему не компенсируют её преимуществ перед интегрированной системой в части LCC. Интегрированная система (W-добавки в бетон совместно с проникающим составом) демонстрирует минимальные суммарные затраты жизненного цикла – 160% от базовой стоимости, тогда как традиционный

битумный вариант достигает 450% вследствие многократного ремонта.

На основании проведённого анализа разработана матрица выбора гидроизоляционной системы в зависимости от гидрогеологических условий строительной площадки (таблица 4). Матрица структурирована в соответствии с разделами СП РК 2.01-102-2014 и учитывает как технические, так и экономические критерии. Она позволяет проектировщикам быстро и обоснованно определять оптимальную систему в зависимости от конкретных гидрогеологических условий.

Таблица 4. Матрица выбора системы гидроизоляции по гидрогеологическим условиям

Условие эксплуатации	Гидростатическое давление	Рекомендуемая система	Нормативное обоснование (СП РК 2.01-102-2014)
УГВ ниже отметки фундамента	Отсутствует	Окрасочная / обмазочная	Пп. 4.2–4.4, таблица 1
Периодическое подтопление	До 0,1 МПа	Обмазочная полимерная + дренаж	Пп. 5.1–5.3
Постоянное подтопление	0,1–0,3 МПа	Проникающая + мембрана + дренаж	Пп. 5.4–5.7, таблица 3
Агрессивные грунтовые воды ¹	Более 0,3 МПа	Инъекционная + двойная мембрана	Раздел 6, прил. Б

Обсуждение результатов подтверждает, что интегрированные системы не только минимизируют влияние человеческого фактора (73% аварий на оклеечных системах происходят из-за нарушения технологии), но и полностью соответствуют требованиям для наиболее агрессивных сред. Ограничения исследования связаны с преобладанием данных по г. Алматы. В перспективе необходимы натурные испытания в других регионах республики. Перспективным направлением является внедрение систем цифрового мониторинга влажности с использованием датчиков IoT.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения исследования были полностью решены все поставленные задачи и достигнута основная цель работы. Проведённая систематизация условий эксплуатации подземных конструкций, всесторонний сравнительный анализ современных методов гидроизоляции и детальная оценка стоимости жизненного цикла позволили количественно обосновать выбор наиболее эффективных защитных систем для условий Республики Казахстан.

Наивысшую эффективность по критерию стоимости жизненного цикла демонстрируют комбинированные (интегрированные) системы, включающие гидрофобизирующие добавки в бетон класса W6–W8 и проникающие составы. Их совокупные затраты на 50-летний период в 2,8 раза ниже, чем у традиционных битумных решений. Оклеечная гидроизоляция остаётся наиболее подверженной дефектам из-за высокого влияния человеческого фактора.

¹ При агрессивных грунтовых водах, характерных для промышленных зон Казахстана ($pH < 5,0$, содержание сульфатов более 1000 мг/л), органические гидроизоляционные материалы недопустимы в зонах постоянного подтопления – данное требование прямо установлено разделом 6 СП РК 2.01-102-2014. В таких условиях применяются исключительно неорганические проникающие составы или химически стойкие полимерные мембраны.

Научная новизна работы заключается в разработанной авторской матрице выбора, синтезирующей нормативные требования и экономические показатели ЛСС. Практическая значимость подтверждается возможностью непосредственного применения рекомендаций при проектировании подземных паркингов, промышленных объектов, жилых комплексов и объектов социальной инфраструктуры Республики Казахстан.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой и внедрением цифровых систем мониторинга влажности в реальном времени, а также с актуализацией нормативной базы под новые высокотехнологичные материалы (ТПО-мембраны, полимочевина, нано-модифицированные составы).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: инструменты искусственного интеллекта использовались для обнаружения орфографических и синтаксических ошибок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- СП РК 2.01-102-2014, «Проектирование гидроизоляции подземных частей зданий и сооружений», Астана: КазНИИСА, 2015г.;
- https://prg.kz/document/?doc_id=35760083&pos=0;0
- ГОСТ 31189-2003, «Смеси сухие строительные. Классификация», М.: Стандартинформ, 2003г.;
- <https://meganorm.ru/Data2/1/4294816/4294816025.pdf>
- В.Д.Тухарели, А.В.Тухарели, Т.Ф.Чередниченко, «Современные строительные системы гидрозащиты зданий и сооружений: учебное пособие», Волгоград. ВолгГТУ. 2019 г.;
- <https://dokumen.pub/92ede4235cb8278266928b6050a47329.html>
- A.Dzhumabaev, K.Zaitunov, «Инженерлік графика және кәсіби білім проблемалары», 2017г., Vol. 5, № 44;
- <https://bulprengpe.enu.kz/index.php/main/article/view/413/397>
- EN 1504-9:2008, «Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures», Brussels: CEN, 2008г.;
- <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/30350/88642b1f386149d49efcdac5a1da30db/SIST-EN-1504-9-2008.pdf>
- Neville A.M., «Properties of Concrete. 5th edition. – Harlow: Pearson Education», 2011г.;
- <https://www.pearson.com/en-gb/subject-catalog/p/properties-of-concrete-properties-of-concrete/P200000005116/9780273755807>
- Розенталь Н.К., «Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и высокой прочности», М.: ФГУП «НИЦ «Строительство», 2016г.;
- <https://www.dissercat.com/content/korrozionnaya-stoikost-tsementnykh-betonov-nizkoi-i-osobo-nizkoi-pronitsaemosti>
- Мельниченко М.С., Ильичев В.А. «Современные способы гидроизоляции подземных конструкций», Брянск, 2022г.
- <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-sposoby-gidroizolyatsii-podzemnyh-konstruktsiy/viewer>
- Ким А.С., «Гидроизоляционные материалы нового поколения для условий Казахстана // Вестник КазНИИСА», 2023г., № 1.
- <https://kazniisa.kz/journal-bulletin#1745298718626-f467c15b-b807>

ПЕШЕХОДНАЯ ДОСТУПНОСТЬ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ШКОЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ КАК ФАКТОР УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЖИЛЫХ РАЙОНОВ В ЛЕВОБЕРЕЖНОЙ ЧАСТИ Г. УСТЬ-КАМЕНОГОРСКА

УДК 711.582

А.Уркумбаева¹, Е.А.Феоктистова^{1*}, Т.М.Борисова¹, А.Уркумбаева¹

¹ВКТУ им.Д.Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Феоктистова Елена Александровна,

e-mail: EFeoktistova@ektu.kz

АННОТАЦИЯ. Статья посвящена изучению транспортно-пешеходной доступности общеобразовательных школьных учреждений города Усть-Каменогорска на примере XIX и XIV жилых районов, располагающихся в Левобережной части. Рассматриваемая проблема является значимой в контексте устойчивого развития городской среды, поскольку доступность образовательной инфраструктуры напрямую влияет на уровень комфорта и качество жизни населения. Основное внимание уделено особенностям функционирования и дальнейшей трансформации уже сформированных жилых территорий. Анализ доступности выполнен графическим методом при помощи геоинформационной системы QGIS на основе открытых данных геопортала. В рамках исследования был получен цифровой двойник рассматриваемой территории жилых районов, позволяющий визуализировать текущий уровень транспортной и пешеходной доступности школ, выявить проблемные участки, характеризующиеся параметрами маршрутов передвижения, несоответствующими нормативным требованиям. В заключении сформулированы рекомендации, направленные на улучшение транспортно-пешеходной связности преимущественно на стадии проектирования жилых территории. Для разработки практических рекомендаций авторами обозначены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: пешеходно-транспортная доступность, общеобразовательные школьные учреждения, устойчивое развитие, планировочная структура, жилой район.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных фокусов притяжения и сосредоточением пешеходных маршрутов жилых районов и микрорайонов являются школьные здания, пешеходная доступность которых выступает как один из важнейших нормативных планировочных параметров при проектировании жилых образований в Республике Казахстан. Короткая дистанция до образовательных учреждений стимулирует пешие походы в школу, что способствует укреплению здоровья детей и снижению транспортной нагрузки на район, формируя более устойчивые сценарии жизнедеятельности микрорайонов (Hino, K., at el.,2021, Zhao, J., at el.,2021). Исследования показывают, что растущая практика подвоза детей в школу на автомобиле создает риски ДТП, а также ухудшает качество атмосферного воздуха за счет выбросов выхлопных газов и повышения концентрации загрязняющих веществ (Matthew D. at el., 2017). Это напрямую влияет на экологическую устойчивость территории не только объектов образования, но и всего микрорайона в целом (Т.Ф.Турутина, Я. А. Заблотская, 2021).

Из 17 целей устойчивого развития, принятых ООН в 2015 году, как минимум три непосредственно связаны с вопросами оптимальной территориальной организации объектов образования и пешеходно-транспортной доступности к ним: цель 3 – Хорошее здоровье и благополучие; цель 4 – Качественное образование; цель 11 –

Устойчивые города и населенные пункты (ООН, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/>). Большинство исследований, опираясь на приоритет этих целей, комплексно рассматривают пешеходную доступность, выделяя различные факторы городской среды. Одним из ключевых показателей является фактор безопасности пешеходного маршрута к школе (Грошков Н.А., 2018; Hino, K., et al., 2021; Osman, N., Nasrudin, N., & Abdullah, Y., 2025).

В Казахстане с 2017 года общественным фондом Urban Forum Kazakhstan запущен проект «Безопасный путь в школу» (Urban Forum Kazakhstan, <https://urbanforum.kz/safe-routes-project>). Это социальный проект с привлечением школьников, который был реализован в ряде городов, в том числе в 37-ой школе г. Усть-Каменогорска. В этой урбанистической инициативе была предпринята попытка нивелировать негативные факторы городской среды. Вместе с тем, вопросы об оптимальной планировочной организации территории, прилегающей к школам (Billie Giles-Corti, et al., 2011), соответствия нормативных показателей доступности современным показателям комфортности среды жилых территорий и практики их применения на практике не получили достаточно освещения.

Транспортно-пешеходная доступность учреждений общего образования является одной из наиболее острых проблем активно развивающихся жилых районов Левобережной части города Усть-Каменогорска. Целью настоящего исследования является анализ данной ситуации на примере XIX и XIV жилых районов и разработка возможных рекомендаций по улучшению доступности школ в частности и нормированию доступности в целом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследования были использованы метод натурного обследования и графический метод анализа. Для первоначального сбора информации о школах XIX и XIV жилых районов города Усть-Каменогорска применялись данные Геопортала Восточно-Казахстанской области. Сбор данных производился из таких открытых источников, как Геопортал ВКО, OpenStreetMap и 2GIS, а также методом наблюдения непосредственно на местности для сопоставления фактической ситуации с цифровой информацией.

Для создания цифрового двойника местности использовалась программа QGIS. Радиусы доступности наносились на цифровой двойник района, полученный через модуль OpenStreetMap.

Алгоритм анализа пешеходно-транспортной доступности от остановок:

Шаг 1. Получение данных местности через модуль OpenStreetMap. Классификация полученных данных (разделение цветом пешеходных путей и транспортных связей).

Шаг 2. Поиск и нанесение остановок общественного транспорта на карту при помощи модуля QuickOSM. Нанесение окружностей радиусами 500 метров от остановок общественного транспорта. Анализ территории.

Алгоритм создания карты пешеходной доступности:

Шаг 1. Получение данных местности через модуль OpenStreetMap. Анализ полученных данных. Выделение цветом зданий по их функциональному назначению.

Шаг 2. Выделение зданий общеобразовательных учреждений и отметка точек их главных входов. Построение окружностей радиусом 500 метров от точек главных входов при помощи модуля OpenRouteService Tools. Определение жилых домов, не входящих в нормативную доступность по радиусам обслуживания.

Шаг 3. Построение изохрон пешеходной доступности от точек главных входов при помощи модуля OpenRouteService Tools. Определение жилых домов, выходящих за границу доступности школ по изохронам.

Шаг 4. Натурные обследования основных пешеходных путей до школьных зданий.

Шаг 5. Анализ и интерпретация полученных данных, определение результатов исследования, формулировка выводов и рекомендаций.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследования была составлена сводная таблица (рисунок 1) школ жилых районов, показывающая проектную и фактическую заполняемость учреждений. Представленная информация на графике наглядно демонстрирует (рисунок 1), что существует неравномерность среди данных двух показателей. Такой перевес может зависеть от различных факторов, как от качества получаемого образования, так и пешеходно-транспортной доступности.

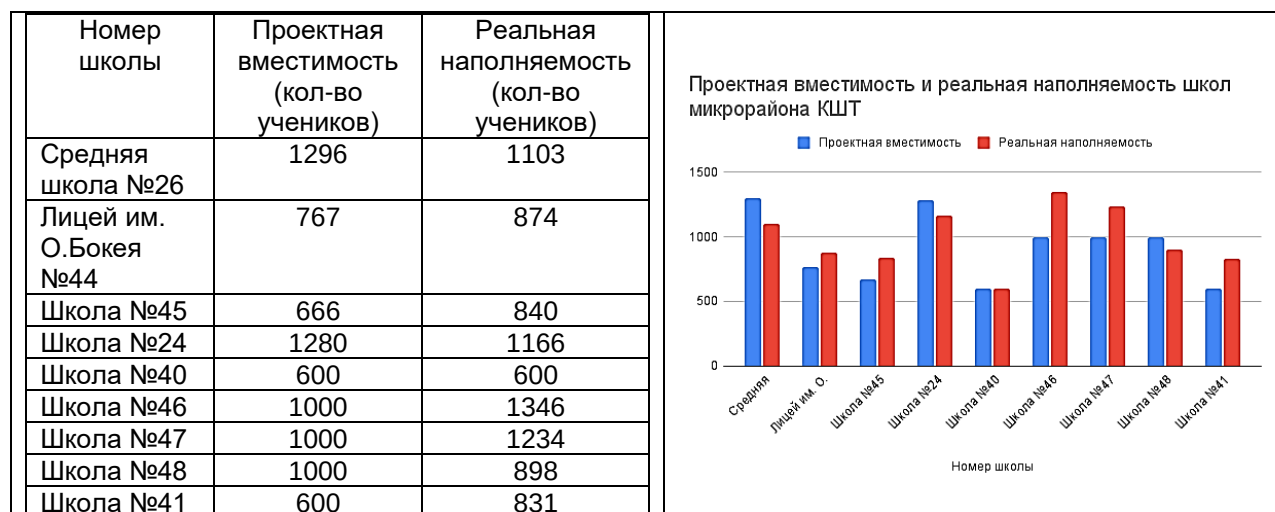


Рисунок 1. Наполняемость школ жилых районов Левобережной части г.Усть-Каменогорска (Геопортал Восточно-Казахстанской области)

Второй этап исследования посвящен созданию цифрового двойника жилых районов графическим методом. При помощи программы QGIS и модуля OpenStreetMap была получена карта транспортной доступности школ (рисунок 2), на которой видно, что не все школы и жилые дома попадают в нормативный радиус пешей доступности остановок общественного транспорта.

Далее на основе модуля OpenStreetMap была получена карта пешеходной доступности школ жилых районов (рис. 3). На ней указаны границы доступности, построенные методом графических радиусов одним цветом и построенные методом изохрон -- другим цветом. Метод изохрон заключается в определении линий, соединяющих равные промежутки времени от одного населенного пункта до другого (Журавлёва Е.М., Рогозина Р.Е., 2025). На карте можно увидеть, что не все дома, попадающие в границы графических радиусов, также попадают в зону доступности по изохронам. Это означает, что в действительности школьники, проживающие в пределах проблемных участков, затрачивают больше времени на путь от дома до школы, чем задумано проектным решением. Дети также вынуждены срезать путь передвижения через дворы, неасфальтированные дороги, неблагоустроенные пешеходные пути и социально неконтролируемые небезопасные участки микрорайона, о чем свидетельствуют данные натурных изысканий обозначенных территорий.

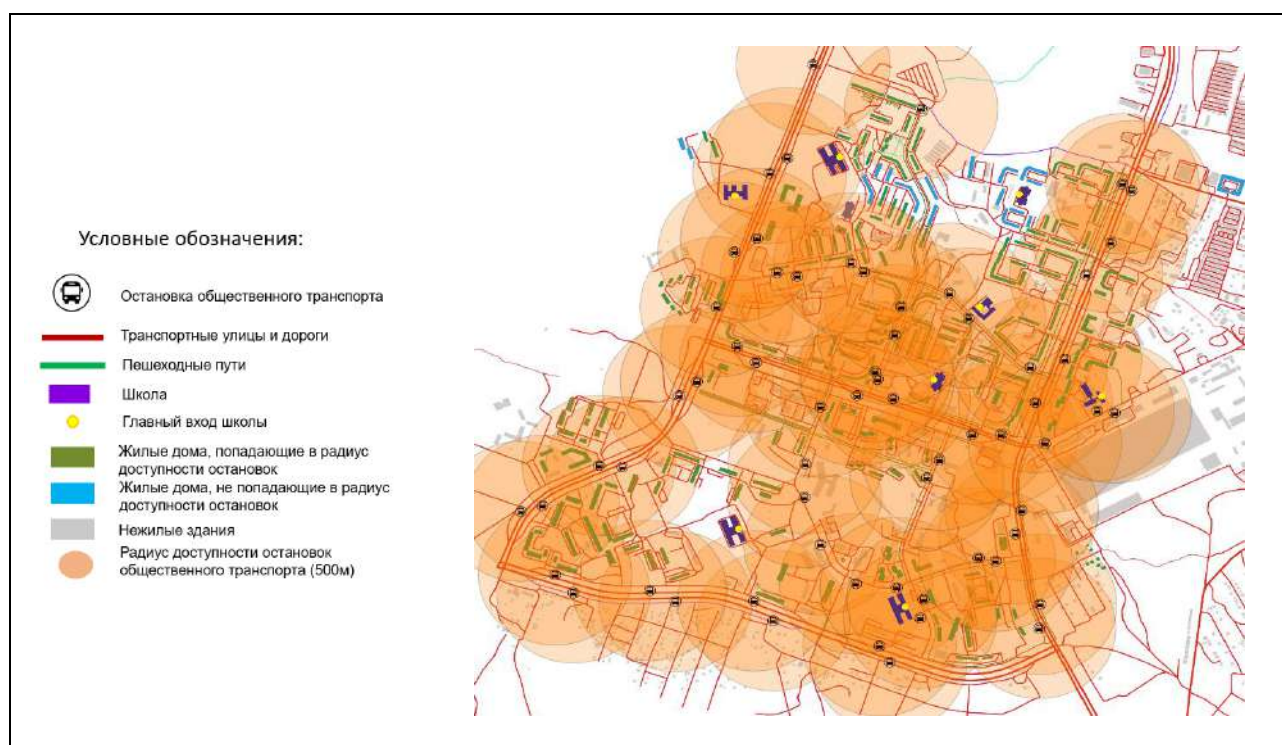


Рисунок 2. Карта транспортной доступности школ левобережных жилых районов

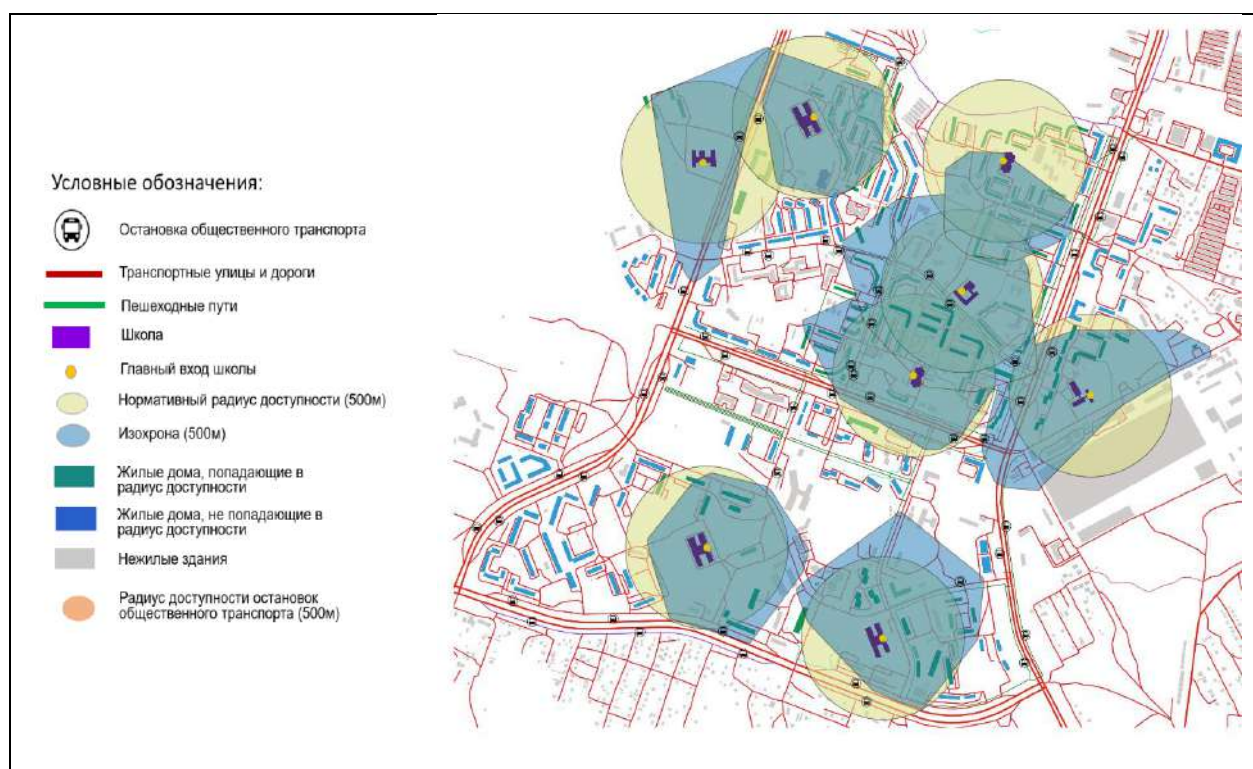


Рисунок 3. Карта пешеходной доступности школ

Полученные результаты показывают, что сложившаяся функционально-планировочная организация и структура транспортно-пешеходных связей жилых районов не обеспечивает равные возможности для жителей, не соответствуют современным концепциям «города, дружественного ребенку» (Sapsa'glam, Ö. & Eryılmaz, A., 2024) и «15-минутного города» (Кондратенко Т.О., Корнев А.Н., 2025). На

основе картографического анализа (рис.2, рис.3) выявлены проблемные зоны, включающие жилую застройку, не входящую в зону доступности ни одного объекта школьного образования, а также территории, попадающие исключительно в пределы геометрически заданного радиуса, не учитывающего фактические характеристики городской среды. Таким образом, установлено, что применяемая практика нормирования доступности образовательной инфраструктуры, основанная на использовании геометрических радиусов, не обеспечивает в полной мере равную доступность для населения. Одним из дополнительных инструментов комплексного подхода к функционально-планировочной организации территории может стать внедрение метода изохрон, позволяющего более гибко учитывать особенности местности и градостроительные параметры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование транспортно-пешеходной доступности общеобразовательных учреждений в XIX и XIV жилых районах г. Усть-Каменогорска выявило несоответствия между нормативными параметрами проектирования и фактическими характеристиками городской среды. Установлено, что существующая практика нормирования доступности школ на основе геометрических радиусов не отражает реальных условий передвижения и не обеспечивает равную доступность образовательной инфраструктуры для населения. Результаты картографического и натурного анализа показали наличие территорий, выходящих из зоны нормативной доступности, а также участков, формально соответствующих установленным радиусам, но не обеспеченных комфортными и безопасными пешеходными маршрутами.

Обоснована целесообразность применения метода изохрон в качестве дополнительного инструмента анализа, позволяющие учитывать временные затраты на передвижение и градостроительные особенности территории. Применение данного метода способствует более точной оценке доступности и соответствует современным принципам формирования устойчивой и ориентированной на человека городской среды. В целом результаты исследования подтверждают необходимость перехода от формализованных нормативных моделей к комплексным подходам, учитывающим принципы устойчивого развития и современные урбанистические концепции.

Полученные результаты могут быть использованы при градостроительном проектировании новых и реконструкции существующих жилых районов, а также в дальнейших исследованиях по формированию комфортной и безопасной среды.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: не применялись.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hino, K., Ikeda, E., Sadahiro, S., & Inoue, S. (2021). Associations of neighborhood built, safety, and social environment with walking to and from school among elementary school-aged children in Chiba, Japan. *The International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 18. <https://doi.org/10.1186/s12966-021-01202-y>.
- Zhao, J., Su, W., Luo, J., & Zuo, J. (2021). Evaluation and Optimization of Walkability of Children's School Travel Road for Accessibility and Safety Improvement. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19. <https://doi.org/10.3390/ijerph19010071>.

- Giles-Corti, B., Wood, G., Pikora, T., Learnihan, V., Bulsara, M., Van Niel, K., Timperio, A., McCormack, G., & Villanueva, K. (2011). School site and the potential to walk to school: the impact of street connectivity and traffic exposure in school neighborhoods.. Health & place, 17 2, 545-50. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2010.12.011>.
- Matthew D. Adams, Weeberb J. Requia (2017). How private vehicle use increases ambient air pollution concentrations at schools during the morning drop-off of children. Atmospheric Environment, Volume 165, 2017, Pages 264-273. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.06.046>.
- Osman, N., Nasrudin, N., & Abdullah, Y. (2025). SOCIOECONOMIC INFLUENCES AND PEDESTRIAN INFRASTRUCTURE IN PROMOTING ACTIVE TRAVEL TO SCHOOL AMONG PRIMARY SCHOOL CHILDREN. PLANNING MALAYSIA. <https://doi.org/10.21837/pm.v23i36.1714>
- Billie Giles-Corti, Gina Wood, Terri Pikora, Vincent Learnihan, Max Bulsara, Kimberly Van Niel, Anna Timperio, Gavin McCormack, Karen Villanueva (2011). School site and the potential to walk to school: The impact of street connectivity and traffic exposure in school neighborhoods, Health & Place, Volume 17, Issue 2, 2011, Pages 545-550. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2010.12.011>.
- Цели в области устойчивого развития/ Электронный ресурс. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/>
- Грошков Н.А. (2018) Многосторонность интерпретации понятия доступности на примере учреждений общего образования Москвы // Городские исследования и практики. Т. 3. № 4. С. 133–151. DOI: <https://doi.org/10.17323/usp342018133-151>
- Турутина Т.Ф., Заблотская Я.А. Анализ территориальной доступности и экологически благоприятного функционирования школ в городской среде на примере Свердловского района Красноярск // Экология урбанизированных территорий. 2021. №4. DOI: 10.24412/1816-1863-2021-4-53-62
- Митягин Сергей Дмитриевич, Спирин Павел Павлович, Гаевская Злата Анатольевна Градостроительные средства устойчивого развития // Academia. Архитектура и строительство. 2024. №1.
- Materials of The United Nations Conference on Sustainable Development (UNCSD-RIO+20), February 2013 [Электронный ресурс]. URL: <http://sustainabledevelopment.un.org/>
- Кондратенко Т. О., Корнев А.Н. Градостроительная концепция «15-минутный город» // Молодой исследователь Дона. 2025. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gradostroitel'naya-kontseptsiya-15-minutnyy-gorod>
- Журавлёва Е.М., Рогозина Р.Е. Применение метода изохрон к изучению границ Орловской городской агломерации// Географический вестник. 2025. №3 (74).
- Базовая оценка транспортной доступности средствами GRASS GIS и QGIS. URL: <https://gis-lab.info/ga/isochronemap-grass-qgis.html>
- Геопортал Восточно-Казахстанской области. Электронный ресурс: <https://www.vkomap.kz/>
- Единая интегрированная образовательная платформа. Электронный ресурс: <https://my.edu.kz/ru>
- Абанкина И.В., Филатова Л.М. Доступность дошкольного образования. Вопросы образования / Educational Studies Moscow. 2018. № 3. С. 216–246.
- Urban Forum Kazakhstan. Безопасный путь в школу, г. Усть-Каменогорск. <https://urbanforum.kz/safe-routes-oskemen>
- Sapsağlam, Ö. & Eryılmaz, A. (2024). Building Child-Friendly Cities for Sustainable Child Development: Child-Friendly City Scale-Child Form. Sustainability 2024, 16, 1228. <https://doi.org/10.3390/su16031228>

КОНЦЕПЦИЯ «ВЕЧНОГО ГОРОДА» В КОНТЕКСТЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УРБАНИСТИЧЕСКИХ ТРАЕКТОРИЙ ИСТОРИЧЕСКИХ ГОРОДОВ

УДК 711.4.01

А.Уркумбаева¹, Е.А.Феоктистова^{1*}, Т.М.Борисова¹, А.Уркумбаева¹

¹ВКТУ им.Д.Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Феоктистова Елена Александровна,

e-mail: EFeoktistova@ektu.kz

АННОТАЦИЯ В статье рассматривается феномен «вечных городов» в контексте современной концепции устойчивого развития. Авторы опираются на классическое понимание устойчивости как баланса экономических, социальных и экологических факторов и рассматривают его сквозь призму исторической долговечности городских систем. Цель работы – определить ключевые условия непрерывного существования городов на протяжении более тысячи лет. В качестве объектов были выбраны Иерусалим, Рим, Константинополь (Стамбул), Москва, Чанъань и Дамаск, обладающие значительным историко-культурным наследием и статусом цивилизационных центров. Применены методы сравнительного и нарративного анализа с использованием хронограмм. В результате установлено, что устойчивость «вечных городов» обусловлена сочетанием различным факторов на протяжении истории их развития, среди которых особое значение играли столичный административный статус, стратегическое положение, культурное и религиозное значение, а также многофункциональность. Делается вывод о возможности переосмысления и интеграции концепции «вечного города» в современные подходы к устойчивому развитию городов.

Ключевые слова: идея вечного города, устойчивое развитие, хронограммы

ВВЕДЕНИЕ

Под устойчивым развитием понимается такое развитие, которое «удовлетворяет потребности настоящего времени, но не ставит под угрозу способность будущих поколений удовлетворять собственные потребности» (Ed.G. Bruntland, 1987.) Исследователи выделяют четыре фактора устойчивого развития городских территорий: социальный, экономический, экологический, градо-строительный (Вагин В.С. и др., 2015). Согласно мнению Захарова В. М. и др. (2023), тремя главными аспектами устойчивого развития являются экономическое развитие, защита окружающей среды и социальное равенство. Исходя из этого выделяют три фундаментальных столпа устойчивого развития: экономическая устойчивость, социальная устойчивость и экологическая устойчивость (Цвиль, М. П., 2024).

Идея вечности города, как символа его значимости, влияния, несокрушимости характерна в культурных, политических и идеологических традициях многих стран мира. Непосредственно концепция «Вечного города» зародилась первоначально в Древнем Риме в виде представлений как о богоизбранном городе «Aeternitas Romae» и «Urbs Aeterna», превосходящем все остальные. Эта идея, так называемый «римский миф», во времена нашествия варварских народов в глазах римлян и их преемников выступала последним основанием для поддержания ощущения стабильности, некоего небесного порядка перед лицом различных политических и социальных кризисов (Литовченко Е.В., 2013). Византия, наследница Римской империи, воплотила идею Небесного города в Константинополе, и после падения «Второго Рима», возродилась уже в Москве. Как полагают некоторые исследователи, эта идея была

скорее мифом, чем строгим планом (Синицына Н.В, 1998; Маршалл По, 2001). Тем не менее, эти города и поныне существуют, оставаясь крупнейшими центрами мировой культуры и экономики. Авторы полагают, что в современном урбанизме концепция вечного города может переосмысливаться из некоего идеологического и символического образа в практическую парадигму устойчивого и долговечного градостроительства. Таким образом, Вечный город - это концепция, которая подразумевает устойчивость, стабильность, долговечность и непрерывное развитие городской структуры, что сегодня приобретает особую актуальность в связи с урбанизацией, ускоренным темпом развития, политической нестабильностью и кардинальными переменами, стоящими перед обществом.

Возникает вопрос: что определяло непрерывное, а значит в определенном смысле устойчивое развитие «вечных городов»? Поиск ответа на данный вопрос стал основной целью данной работы. Объектом исследования были выбраны шесть городов: Иерусалим, Рим, Константинополь (Стамбул), Москва, Чанчань и Дамаск. Для определения степени устойчивости развития современных городов учеными применяются различные индикаторы, анализируются определенные группы факторы. Основываясь на этих подходах, решались задачи по выявлению особенностей развития выбранных городов, определявшие ключевые факторы и особенности их устойчивости и долговечности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из объективных показателей устойчивого развития поселения можно считать непрерывное долготетнее существование. Для данного исследования были определены хронологические границы в 1000 лет. Был создан запрос «Составить список городов, непрерывно существующих как населенные пункты не менее 1000 лет» и задан Chatgpt, который определил около 50-ти основных поселений из Европы, Азии, Африки, Ближнего Востока и Азиатско-тихоокеанского региона. Это вызвало необходимость применения территориальных границ исследования, ограничившись городами Евразии. Следующим критерием отбора были ассоциации поселений с «Вечным городом» в историко-культурном контексте, обусловившими выбор в качестве объекта исследования Иерусалим, Рим, Константинополь (Стамбул), Москву, Чанчань и Дамаск.

Таблица 1. Историко-культурный контекст «Вечных городов»

Город	Современное название страны	Дата основания/заселения	Историко-культурный контекст
Иерусалим	Израиль	III тыс. до н.э.	Священный город иудаизма, христианства и ислама; «градостроительный образец» для с/в Европы.
Рим	Италия	VIII в. до н.э.	Столица Римской империи – столица Италии, идеология Вечный город, центр католической культуры
Константинополь (Стамбул)	Турция	VII в. до н.э.	Столица Византийской империи – столица Османской империи, преемственность Рим-Константинополь
Москва	Россия	XII в. н. э.	Столица Руси, преемственность Рим-Константинополь-Москва («Москва – третий Рим»), центр православной культуры
Чанчань	Китай	ок. VIII-VII вв. до н.э.	столица нескольких китайских династий, конечная точка Великого Шелкового пути.
Дамаск	Сирия	III тыс. до н. э.	культурный и религиозный центр арабского и исламского мира

В ходе исследования были использованы теоретические источники, исторические карты и схемы городов, систематизированные в табличной форме. Поскольку работа носит преимущественно теоретический характер, применен нарративный подход, позволяющий анализировать и интерпретировать исследовательские материалы через повествовательные структуры. Учитывая обширное количество данных по городам, также были использованы графо-аналитические методы представления информации в виде хронограмм по методике Т.Саваренской.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Непрерывное развитие «вечных городов» определялось не одним фактором, а устойчивым сочетанием географических, политических, культурных, религиозных и экономических характеристик, которые в совокупности образуют достаточную адаптивность к историческим трансформациям. Важнейшим ключевым фактором для всех поселений являлось выгодное географическое положение в стратегически важных регионах, на пересечении торговых путей (рисунок 1), в том числе на Великом Шелковом пути.



Рисунок 1. Транспортно-торговые пути (разработано авторами на основе <https://www.advantour.com/img/silkroad/silk-road-map-rus.png>)

Данные по историческим событиям, оказавшим влияние на жизнедеятельность исследуемых поселений, были систематизированы в виде сравнительных таблиц, которые затем для наглядности были переведены в графический формат хронограмм, демонстрирующих: 1) административный статус городов; 2) основные градообразующие функции; 3) построенную на основе пятибальной шкалы (от 0 – упадок до 5 – устойчивое состояние) оценку социальной стабильности общества (рисунок 2).

Хронограммы демонстрируют, что фундаментальным фактором являлась административная функция. Все города на протяжении значительной части своей истории были столицами либо крупнейшими центрами управления, что создавало возможности для накопления ресурсов, а также формированию культурно и материально значимых пространственных структур. Это дополнительно создавало предпосылки для развития городов как культурно-религиозных центров. «Вечные города» часто становились сакральными центрами. Иерусалим – священный город для трех мировых религий, Рим – центр католического мира, Москва – фокус православной религии, а Чанъань – важнейший культурный и цивилизационный узел Китая, один из оплотов буддизма. На территории Дамаска, одного из религиозных

центров Ближнего Востока, располагается множество древних святынь ислама и христианства. Хронограммы показывают, что города проходили через сложные перипетии, при этом особенно уязвимой являлась социальная стабильность. Тем не менее, совокупность вышеуказанных факторов способствовала формированию развитых городских систем, которые накапливали потенциал для возрождения и восстановления. Причем, как отмечал Альдо Росси, немаловажную роль здесь играла архитектура, сохраняющая преемственность и идентичность культурного ландшафта. Таким образом, долговечность городов является результатом не статичного поступательного развития, а влиянием совокупности факторов, обеспечивающих способность к трансформации структур жизнедеятельности поселений.

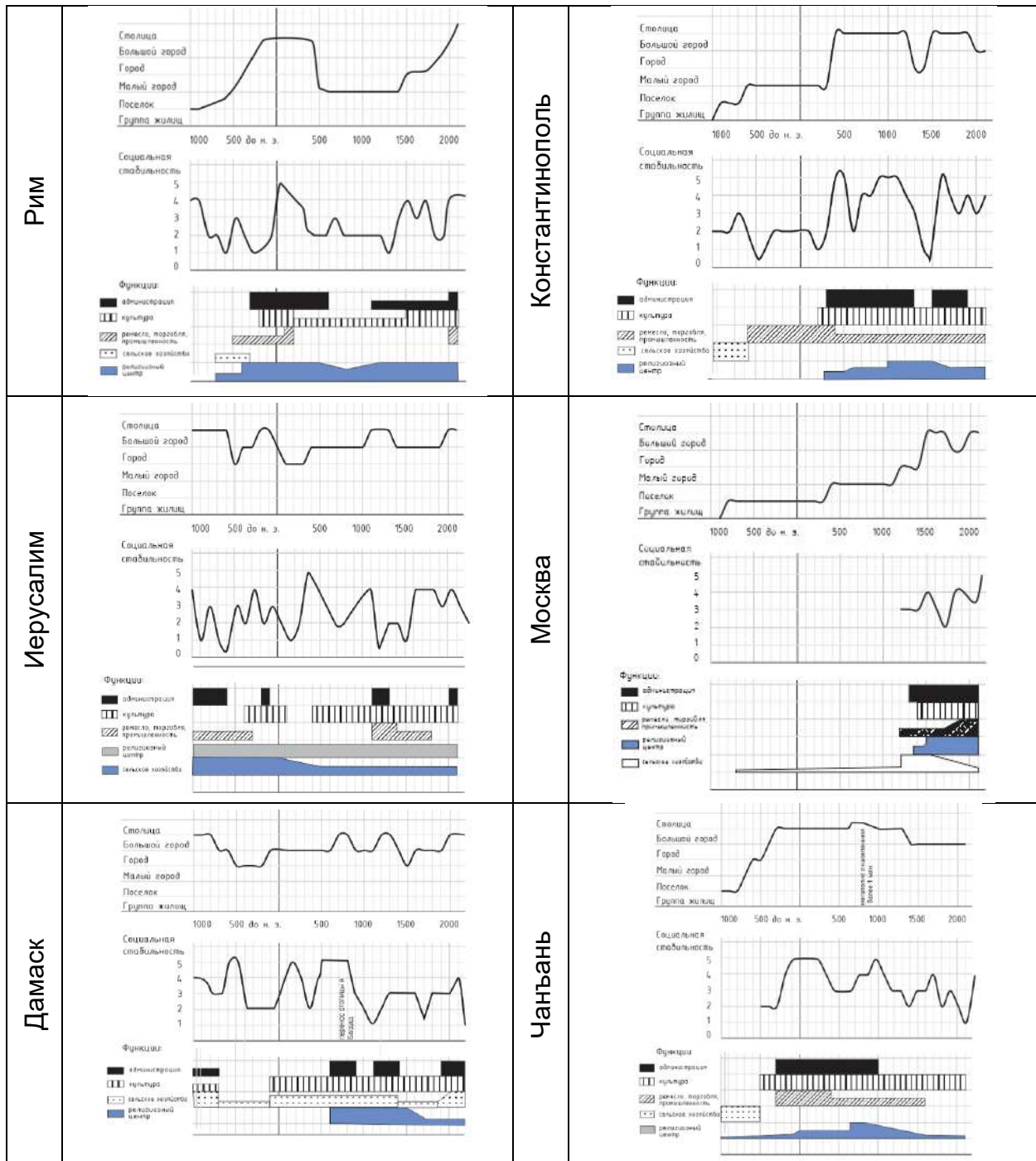


Рисунок 2. Хронограммы развития «вечных городов»

Авторы отмечают, что исследование было ограничено доступными материалами и на данном этапе во внимание принимались наиболее крупные исторические события, поэтому представленные результаты имеют обобщающий характер и, в последующем, могут быть откорректированы с учетом более детальных данных. Также пока не освещались экологические факторы функционирования городов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования рассмотрены экономические, социальные и частично институциональные аспекты развития таких городов как Иерусалим, Рим, Константинополь, Москва, Чанъань и Дамаск. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что концепция «вечного города» связана с идеей устойчивого развития: факторы долговечности исторических городов во многом согласуются с современными представлениями об устойчивости урбанизированных систем.

Авторами была предпринята попытка выявления ключевых элементов устойчивости на примере городов с тысячелетней историей, сумевших преодолеть многочисленные кризисы и сохранить свою значимость в современном мире. К числу основных особенностей исторических «вечных городов» можно отнести:

- выгодное географически-стратегическое положение, первоначально обусловленное оборонительными факторами, а впоследствии – транспортно-логистическими и торгово-экономическими преимуществами;
- более устойчивые периоды развития поселений совпадают с выполнением городом столичных функций и концентрацией ресурсов государства на протяжении достаточно длительного времени;
- градообразующая многофункциональность, позволяющая создавать потенциал для альтернативных сценариев развития;
- сохранение идеи «вечности» в культурной памяти, мифологии и общественном сознании даже при значительных трансформациях городской среды;
- высокая степень культурно-религиозной значимости, при которой город выступает как центр регионального или мирового уровня, сопровождающийся идеей сакральной избранности.

Данная работа представляет собой гипотетическое исследование и направлено на создание научного дискурса о концепции «вечного города» в контексте современных представлений об устойчивом развитии.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: в процессе подготовке текста применялся ChatGPT на базе модели GPT-5.3 (OpenAI) в целях улучшения стилистики и доступности языка; методология, анализ данных, выводы и интерпретации принадлежат авторам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- World Commission on Environment and Development, "Our Common Future" / Ed.G. Bruntland. - Oxford: Oxford Univ. Press, 1987.
- Бондаренко И.А. (2019) Вечное и временное в архитектуре и градостроительстве // Academia. Архитектура и строительство. 2019. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vechnoe-i-vremennoe-v-arhitekture-i-gradostroitelstve>
- Наматов, Н.А. (2023) Москва – третий Рим: наследие Византии / Н. А. Наматов, Л. Ф. Баррига // Мировые цивилизации. — 2023 №2. — URL: <https://wcj.world/PDF/09IAMZ223.pdf>.
- Литовченко Е.В. (2013) Отражение концепции «Aeternitas Romae» в трудах

- позднелатинских авторов // *Via in tempore. История. Политология.* 2013. №22 (165). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otrazhenie-kontseptsii-aeternitas-romae-v-trudah-pozdnelatinskih-avtorov> (дата обращения: 28.02.2026).
- Абасс Х.С. (2020) Исторические периоды формирования и особенности архитектурно-градостроительной системы Дамаска (XI в до н.э. – XIX в. н.э.) // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.* 2020. №. 12. С. 77-84. DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2019-4-12-77-84>
- Шейна С.Г., Стародубцева А.С. (2017) Устойчивое развитие городов. Комплексный подход к преобразованию городской среды // *ИВД.* 2017. №2 (45). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ustoychivoe-razvitie-gorodov-kompleksnyy-podhod-k-preobrazovaniyu-gorodskoy-sredy> (дата обращения: 01.03.2026).
- Чернышов Ю.Г., Чураков К.А. (2025) *Urbs Aeterna: столичный имидж «вечного» Рима и формирование имиджа империи в эпоху Августа* // *Известия Алтайского государственного университета.* 2025. № 6 (146). С. 69–75. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2025\)6-08](https://doi.org/10.14258/izvasu(2025)6-08).
- Наматов Н. А. (2023) Москва – третий Рим: наследие Византии / Н. А. Наматов, Л. Ф. Баррига // *Мировые цивилизации.* — 2023 №2. — URL: <https://wcj.world/PDF/09IAMZ223.pdf>.
- Кореневский А.В. (2023) Византия и Третий Рим как историософские метапозиции // *НП/НР.* 2023. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vizantiya-i-tretyi-rim-kak-istoriosofskie-metapozitsii>
- Цвиль М.П. (2024) Устойчивое развитие: определение, история развития, цели// *Universum: экономика и юриспруденция : электрон. научн. журн.* 2024. 8(118). URL: <https://7universum.com/ru/economy/archive/item/18001>
- Синицина Н.В. (1998) Третий Рим: истоки и эволюция русской средневековой концепции (XV-XVI вв.) / Н. В. Синицына; РАН. Ин-т рос. истории, Междунар. семинар "Da Roma alla Terza Roma". — Москва : Индрик, 1998. — 410, 4 с.
- Вагин В.С., Шейна С.Г., Чубарова К.В. Принципы и факторы устойчивого развития городских территорий // *Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ»* Том 7, №3 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/91EVN315.pdf> DOI: 10.15862/91EVN315
- Рахаф И. (2023) Особенности архитектурно-градостроительного развития Дамаска от зарождения ислама до начала XIX века. — *Системные технологии.* — 2023. — № 1 (46). — С. 168 – 179
- Русское градостроительное искусство. Древнерусское градостроительство/ВНИИ теории архитектуры и градостроительства; Под общ. ред. Н. Ф. Гуляницкого. — М.: Стройиздат, 1993 — 392 с.; ил. — ISBN 5-274-01502-6.
- Anabseh G. Holy Places that Have Played a Role in the Urban Evolution of Damascus // *International Journal of Islamic Thought.* 2014. Vol. 5. P. 28–33. DOI: 10.24035/ijit.5.2014.004. URL: https://www.ukm.my/ijit/wp-content/uploads/2016/01/IJIT-Vol-5-June-2014_4_28-33.pdf
- Древнекитайская градостроительная теория по данным Као Гун цзы // *Synologia.* URL: https://www.synologia.ru/a/Древнекитайская_градостроительная_теория_по_данным_Као_Гун_цзы
- Влияние концепции идеального города на китайское градостроительство III–XIV веков // *Archi.ru : электрон. журнал.* URL: <https://archi.ru/elpub/91878/vliyanie-koncepcii-idealnogo-goroda-na-kitaiskoe-gradostroitelstvo-iii-xiv-vekov>
- Устойчивое развитие: экология, экономика, общество и культура: учебник / В.М. Захаров, А.В. Семенов, И.Е. Трофимов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Московский университет им. С.Ю. Витте / Центр устойчивого развития и здоровья среды ИБР РАН, 2023. — 212 с.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ НАДЕЖНОСТИ

УДК 624.012:539.4

О.А.Утепов^{1*}, Д.С.Елеманов¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Утепов Олжас Асылбекович, e-mail: ami_1306@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассматривается методика оценки качества возведённых монолитных конструкций на основе анализа изменения индекса надёжности. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надёжности и безопасности зданий при эксплуатации. Целью работы является разработка и обоснование методики оценки качества конструкций на основе коэффициента изменения индекса надёжности, а также определение срока их безопасной эксплуатации. В работе использованы методы теоретического анализа, статистической обработки данных и численного моделирования. Получены зависимости, позволяющие определить индекс надёжности конструкции и оценить срок её безопасной эксплуатации. Результаты показали высокую корреляцию между расчетными и экспериментальными данными, что подтверждает достоверность предложенной методики. Практическая значимость заключается в возможности применения методики для оценки качества монолитных зданий на стадии эксплуатации.

Ключевые слова: надёжность, индекс надёжности, монолитные конструкции, прочность, эксплуатация, коэффициент.

ВВЕДЕНИЕ

Надёжность строительных конструкций является одним из ключевых факторов, определяющих безопасность, долговечность и эффективность эксплуатации зданий и сооружений. В условиях современного строительства, характеризующегося увеличением этажности зданий, усложнением архитектурных решений и повышением эксплуатационных нагрузок, требования к надёжности конструкций значительно возрастают. Особое значение приобретает оценка качества возведённых монолитных железобетонных конструкций, так как именно они широко применяются в гражданском и промышленном строительстве.

Монолитные конструкции обладают рядом преимуществ, таких как высокая прочность, пространственная жесткость, технологичность и возможность реализации сложных архитектурных форм. Однако их надёжность во многом зависит от качества выполнения строительных работ и соблюдения проектных решений. Отклонения параметров, возникающие в процессе строительства, включая изменение прочности бетона, геометрических размеров конструкций, характеристик армирования и величины защитного слоя, могут приводить к снижению несущей способности и увеличению вероятности отказа конструкции.

Традиционные методы контроля качества конструкций, основанные на проверке отдельных параметров, не позволяют в полной мере оценить их совокупное влияние на надёжность. В связи с этим возникает необходимость применения вероятностных методов, учитывающих случайный характер изменения параметров и позволяющих комплексно оценивать состояние конструкции. Одним из таких подходов является

использование индекса надежности, который отражает соотношение между несущей способностью конструкции и действующей нагрузкой с учетом их вариаций.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью разработки эффективных методов оценки качества монолитных конструкций на основе интегральных показателей надежности. Применение таких методов позволяет не только оценить текущее состояние конструкции, но и прогнозировать её дальнейшее поведение в процессе эксплуатации, что особенно важно для обеспечения безопасной эксплуатации зданий.

Кроме того, важной задачей является определение срока безопасной эксплуатации конструкций, который зависит от изменения их прочностных характеристик во времени под воздействием различных факторов, таких как коррозия, усталость материалов и агрессивные воздействия окружающей среды. Учет этих факторов требует разработки моделей, позволяющих описывать изменение надежности конструкции во времени.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу методики положен вероятностный подход, учитывающий случайный характер изменения параметров конструкции. Основными параметрами являются:

- прочность бетона R_b ;
- геометрические размеры конструкции;
- характеристики арматуры;
- нагрузка на конструкцию.

Для оценки качества введён коэффициент изменения индекса надежности:

$$K_z = Z_{\text{фак}} / Z_{\text{пр}}$$

где $Z_{\text{фак}}$ — фактический индекс надежности, $Z_{\text{пр}}$ — проектный индекс. Индекс надежности определяется по методу «двух моментов»:

$$Z = R - F / S_R$$

где R — прочность конструкции, F — нагрузка, S_R — стандартное отклонение прочности.

Определение стандартных отклонений геометрических параметров осуществлялось с использованием нормативных допусков по правилу «двух сигм», что обеспечивает вероятность попадания значений параметров в заданный интервал с вероятностью 0,95. Для параметров материалов использовались нормативные коэффициенты вариации, регламентированные стандартами.

Для проверки достоверности предложенной методики был применён метод статистического моделирования (Монте-Карло), основанный на генерации случайных значений параметров с заданными законами распределения. На основе полученных выборок вычислялись средние значения прочности конструкции и её стандартные отклонения, после чего определялся индекс надежности.

Дополнительно в работе использовались методы статистического анализа, включая оценку нормальности распределения параметров, вычисление средних значений, дисперсий и коэффициентов вариации. Это позволило обосновать применимость вероятностных моделей для описания поведения конструкций.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведённого исследования установлено, что изменение параметров монолитных железобетонных конструкций оказывает значительное влияние на их надёжность. Анализ данных показал, что фактические значения прочности, геометрических характеристик и параметров армирования имеют вариативность, связанную с особенностями строительного процесса.

Статистическая обработка результатов подтвердила, что основные параметры подчиняются нормальному закону распределения, что позволяет применять вероятностные методы оценки надёжности. Полученные расчетные и экспериментальные данные имеют высокую степень согласованности, что свидетельствует о достоверности предложенной методики.

Установлено, что коэффициент изменения индекса надёжности является эффективным показателем, позволяющим комплексно оценить качество конструкции. В отличие от традиционных методов, он учитывает совокупное влияние всех параметров, определяющих несущую способность.

Анализ показал, что большинство исследуемых конструкций имеют значения коэффициента, близкие к единице, что свидетельствует о высоком качестве строительства. В отдельных случаях выявлены отклонения, приводящие к снижению надёжности, что подчеркивает необходимость контроля на всех этапах возведения.

Коэффициент изменения индекса надёжности позволяет классифицировать качество конструкции:

- при $K_z \geq 1,0$ — высокий уровень надёжности;
- при $0,9 < K_z < 1,00$ — средний уровень;
- при $0,75 < K_z < 0,90$ — низкий уровень;
- при $K_z < 0,75$ — недопустимый уровень.

Данная классификация позволяет принимать обоснованные инженерные решения, включая мониторинг, усиление конструкций или ограничение их эксплуатации. Также установлено, что снижение надёжности во времени приводит к уменьшению срока безопасной эксплуатации конструкции. Это связано с воздействием эксплуатационных факторов, таких как коррозия и усталость материалов. Сравнение результатов различных методов показало их высокую сходимость, что подтверждает применимость разработанного подхода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования разработана методика оценки качества возведённых монолитных конструкций на основе коэффициента изменения индекса надёжности. Предложенный подход позволяет учитывать совокупное влияние основных параметров конструкции и обеспечивает более объективную оценку её технического состояния по сравнению с традиционными методами.

Установлено, что коэффициент изменения индекса надёжности является эффективным интегральным показателем, позволяющим классифицировать качество конструкций и выявлять отклонения от проектных значений. Применение данного показателя даёт возможность оперативно оценивать уровень надёжности и принимать обоснованные инженерные решения.

Результаты исследования показали высокую степень согласованности расчетных и экспериментальных данных, что подтверждает достоверность разработанной методики и её применимость в инженерной практике. Дополнительно установлено, что изменение индекса надёжности во времени оказывает существенное влияние на срок безопасной эксплуатации конструкций.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования предложенной методики при контроле качества строительства, обследовании зданий

и прогнозировании их эксплуатационного ресурса. Это позволяет повысить уровень безопасности и надежности строительных объектов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено без внешнего финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы благодарят коллег за методологическую поддержку и конструктивные обсуждения, а также анонимных рецензентов за ценные замечания, которые помогли повысить качество статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- EN 1992-1-1. (2023). Eurocode 2: Design of Concrete Structures (updated).
<https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu>
- ACI Committee 318. (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19). <https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=31819>
- Nowak, A. S., Collins, K. R. (2019). Reliability of Structures (2nd ed.). McGraw-Hill.
<https://www.accessengineeringlibrary.com>
- Melchers, R. E., Beck, A. T. (2018). Structural Reliability Analysis and Prediction (3rd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119266108>
- Zhang, Y., et al. (2020). Reliability assessment of reinforced concrete structures. Engineering Structures, 210, 110303. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110303>
- Li, J., et al. (2021). Time-dependent reliability of concrete structures. Structural Safety, 91, 102074. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2021.102074>
- Nguyen, T., et al. (2019). Probabilistic assessment of reinforced concrete structures. Construction and Building Materials, 222, 687–701.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.183>
- Kim, S., et al. (2022). Durability and reliability of concrete structures. Materials, 15(4), 1234.
<https://doi.org/10.3390/ma15041234>

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОТИВОКОРРОЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

УДК 620.197

В.К. Фартунов^{1*}, А.Г. Гольцев¹

¹ВКТУ имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Фартунов Владимир Константинович, e-mail: fartunov1999@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Коррозионное разрушение металлических конструкций является одной из основных проблем эксплуатации промышленных зданий металлургической отрасли. Воздействие влаги, агрессивных химических соединений, температурных колебаний и технологической пыли способствует ускоренному развитию коррозии. Это приводит к снижению прочности металлоконструкций, увеличению затрат на обслуживание и ремонты, а также повышению риска аварийных ситуаций.

Целью настоящего исследования является анализ эффективности применения современных противокоррозионных покрытий при реконструкции цеха регенерации угля металлургического предприятия. В работе рассмотрены основные причины коррозии металлоконструкций, а также проведён сравнительный анализ современных антикоррозионных систем, применяемых в промышленном строительстве.

Результаты исследования показывают, что использование современных многослойных защитных покрытий позволяет значительно увеличить срок службы металлических конструкций и снизить эксплуатационные затраты предприятий.

Ключевые слова: коррозия металлов, антикоррозионная защита, металлоконструкции, промышленное строительство, защитные покрытия, реконструкция.

ВВЕДЕНИЕ

Металлоконструкции промышленных зданий и сооружений являются одним из ключевых элементов, определяющих их эксплуатационную надежность и долговечность. В условиях металлургического производства данные конструкции подвергаются интенсивному воздействию агрессивных факторов окружающей среды, включая повышенную влажность, наличие химически активных газов, температурные колебания и абразивное воздействие технологической пыли. Совокупность указанных факторов приводит к ускоренному развитию коррозионных процессов, что в свою очередь вызывает снижение прочностных характеристик металла, увеличение затрат на техническое обслуживание и ремонт, а также повышает риск возникновения аварийных ситуаций.

Особую актуальность проблема коррозионного разрушения приобретает при реконструкции существующих производственных объектов, в том числе цехов регенерации угля металлургических предприятий. В процессе длительной эксплуатации конструктивные элементы подвергаются значительным нагрузкам и агрессивным воздействиям, что требует не только восстановления их эксплуатационных характеристик, но и внедрения современных методов защиты, обеспечивающих повышение долговечности и надежности конструкций. При этом полная замена металлоконструкций зачастую является экономически нецелесообразной, что обуславливает необходимость применения эффективных противокоррозионных решений.

Современные системы антикоррозионной защиты основаны на использовании

многослойных покрытий, сочетающих в себе различные функциональные свойства: высокую адгезию к металлической поверхности, устойчивость к химическому и механическому воздействию, а также способность сохранять защитные характеристики в течение длительного времени. Правильный выбор системы покрытия должен учитывать уровень агрессивности среды, особенности эксплуатации конструкций и технологические требования производства.

Таким образом, исследование эффективности применения современных противокоррозионных покрытий при реконструкции цеха регенерации угля является актуальной научно-практической задачей. Целью настоящего исследования является анализ факторов, влияющих на коррозионные процессы, а также обоснование выбора эффективных методов антикоррозионной защиты, обеспечивающих увеличение срока службы металлоконструкций и снижение эксплуатационных затрат.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются металлические конструкции цеха регенерации угля металлургического предприятия, эксплуатируемые в условиях повышенной агрессивности производственной среды. К основным факторам, оказывающим влияние на развитие коррозионных процессов, относятся повышенная влажность, наличие химически активных газов (сернистые соединения, оксиды), температурные колебания, а также воздействие технологической пыли и абразивных частиц.

В качестве материалов исследования использованы: (1) данные о состоянии металлоконструкций, полученные в результате визуального и инструментального обследования; (2) нормативно-техническая документация, регламентирующая требования к противокоррозионной защите (ГОСТ, ISO); (3) научные публикации и технические источники, посвящённые вопросам коррозии и методов её предотвращения; (4) характеристики современных антикоррозионных покрытий, применяемых в промышленном строительстве.

Методологическая основа исследования включает комплекс взаимосвязанных методов. На первом этапе выполнен анализ условий эксплуатации конструкций с целью определения степени агрессивности среды и выявления основных факторов коррозионного воздействия. На втором этапе проведён сравнительный анализ современных противокоррозионных покрытий, включая эпоксидные, полиуретановые и комбинированные системы, с оценкой их эксплуатационных характеристик, таких как адгезия, устойчивость к влаге, химическая стойкость и долговечность.

Для оценки эффективности различных систем защиты применён метод инженерного сравнения, основанный на сопоставлении эксплуатационных показателей покрытий с условиями их применения. Дополнительно использован системный подход, позволяющий рассматривать противокоррозионную защиту как совокупность взаимосвязанных этапов: подготовка поверхности, выбор покрытия, технология нанесения и контроль качества.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведённого исследования установлено, что степень коррозионного воздействия на металлоконструкции цеха регенерации угля определяется совокупностью эксплуатационных факторов, среди которых ключевыми являются повышенная влажность, наличие агрессивных газовых сред, а также интенсивное воздействие пылевых и абразивных частиц. Указанные условия способствуют развитию как равномерной, так и локальной коррозии, включая точечную и щелевую, что значительно ускоряет разрушение защитных слоёв и

основного металла.

Анализ состояния конструкций показал, что при отсутствии эффективной системы защиты скорость коррозионного износа существенно возрастает, что приводит к снижению несущей способности элементов и необходимости проведения частых ремонтных мероприятий. При этом установлено, что традиционные однослойные покрытия не обеспечивают требуемого уровня защиты в условиях металлургического производства, поскольку обладают недостаточной устойчивостью к химическим и механическим воздействиям.

Сравнительный анализ современных противокоррозионных систем показал, что наибольшей эффективностью обладают многослойные покрытия, включающие грунтовочные, промежуточные и финишные слои. Грунтовочные составы на основе эпоксидных смол обеспечивают высокую адгезию к металлической поверхности и выполняют функцию первичного барьерного слоя, препятствующего проникновению влаги и агрессивных веществ. Промежуточные слои повышают толщину и целостность покрытия, а финишные полиуретановые покрытия обеспечивают устойчивость к атмосферным воздействиям, ультрафиолетовому излучению и механическим повреждениям.

В ходе исследования установлено, что эффективность противокоррозионной защиты во многом определяется качеством подготовки поверхности. Недостаточная очистка металла от продуктов коррозии, загрязнений и окалины приводит к снижению адгезии покрытия и его преждевременному разрушению.

На основании проведённого анализа предложена структурная схема выбора противокоррозионной системы, включающая последовательные этапы: оценку условий эксплуатации, определение степени агрессивности среды, выбор типа покрытия, подготовку поверхности, нанесение защитных слоёв и контроль качества выполненных работ.

Дополнительно установлено, что использование современных многослойных покрытий позволяет увеличить срок службы металлоконструкций в среднем в 2–3 раза по сравнению с традиционными методами защиты. При этом наблюдается снижение затрат на эксплуатационное обслуживание за счёт уменьшения частоты ремонтных работ и продления межремонтных интервалов.

Сопоставление результатов исследования с данными научной литературы подтверждает, что наиболее эффективные системы антикоррозионной защиты основаны на комплексном подходе, включающем не только выбор материалов, но и соблюдение технологических требований при их нанесении. В частности, важное значение имеют контроль толщины покрытия, соблюдение температурно-влажностных условий при нанесении и проведение промежуточного контроля качества.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности применения современных противокоррозионных систем при реконструкции цеха регенерации угля. Предложенные подходы позволяют повысить долговечность металлоконструкций, снизить эксплуатационные затраты и обеспечить надёжность функционирования производственного объекта в условиях агрессивной среды.

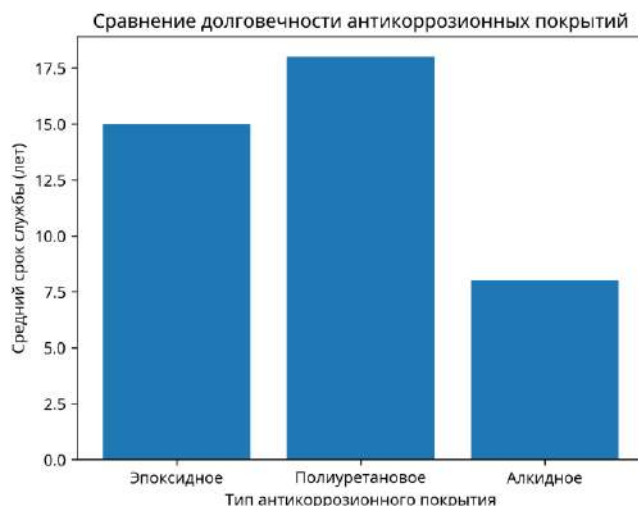


Рисунок 1. Сравнение долговечности антикоррозионных покрытий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования установлено, что коррозионное разрушение металлоконструкций цеха регенерации угля металлургического предприятия обусловлено комплексным воздействием агрессивных факторов производственной среды, включая повышенную влажность, наличие химически активных соединений и механическое воздействие пылевых частиц.

Проведенный анализ современных методов противокоррозионной защиты показал, что наиболее эффективными являются многослойные системы покрытий, сочетающие грунтовочные, промежуточные и финишные слои с различными функциональными характеристиками. Установлено, что применение эпоксидных и полиуретановых материалов обеспечивает высокую адгезию, устойчивость к агрессивным средам и длительное сохранение защитных свойств.

Разработанная в рамках исследования схема выбора противокоррозионной защиты обеспечивает системный подход к принятию инженерных решений с учётом условий эксплуатации и степени агрессивности среды.

Таким образом, результаты исследования подтверждают целесообразность применения современных противокоррозионных систем при реконструкции цеха регенерации угля и могут быть использованы при проектировании и реализации мероприятий по защите металлоконструкций на аналогичных промышленных объектах.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность коллегам за методологическую поддержку и полезные обсуждения, а также анонимным рецензентам за ценные замечания, способствовавшие улучшению качества статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Жуков А.П. Современные антикоррозионные покрытия и технологии защиты металлоконструкций в промышленном строительстве. – СПб.: Профессия, 2019.

<https://www.elibrary.ru>

Ржевский В.В. Коррозия металлов в агрессивных производственных средах и методы повышения долговечности конструкций. – М.: Металлургия, 2018.

- <https://elibrary.ru/item.asp?id=32456789>
Кузнецов Н.Н. Методы защиты металлов от коррозии в условиях промышленной эксплуатации и реконструкции объектов. – М.: Машиностроение, 2020.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=41234567>
- Шрейдер Ю.А. Теоретические основы коррозии металлов и современные способы антикоррозионной защиты. – М.: Химия, 2017.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=29876543>
- Reve R.W., Uhlig H.H. Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering Applications. – Hoboken: Wiley, 2018.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119405391>
- Fontana M.G. Corrosion Engineering: Principles, Mechanisms and Industrial Applications. – New York: McGraw-Hill, 2019.
<https://accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071838765>
- Schweitzer P.A. Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes, and Preventative Methods in Industrial Systems. – Boca Raton: CRC Press, 2020.
<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781420054400>
- Ahmad Z. Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control in Industrial Infrastructure. – Oxford: Elsevier, 2016.
<https://www.sciencedirect.com/book/9780128008937>
- Jones D.A. Principles and Prevention of Corrosion in Engineering Structures and Materials. – Upper Saddle River: Pearson, 2017.
<https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/principles-and-prevention-of-corrosion>
- ISO 12944-1:2017. Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems. Part 1: General introduction and classification.
<https://www.iso.org/standard/64834.html>
- ISO 9223:2012. Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation of corrosion rate.
<https://www.iso.org/standard/53499.html>
- ISO 8501-1:2007. Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Visual assessment of surface cleanliness.
<https://www.iso.org/standard/41666.html>
- ISO 8503-1:2012. Preparation of steel substrates – Surface roughness characteristics of blast-cleaned steel substrates.
<https://www.iso.org/standard/52807.html>
- ISO 8504-2:2000. Preparation of steel substrates before application of paints – Surface preparation methods.
<https://www.iso.org/standard/20130.html>
- ГОСТ 9.032-74. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Общие технические требования и методы контроля качества.
<https://docs.cntd.ru/document/1200003167>
- ГОСТ 9.401-91. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Общие требования к защите от коррозии металлических конструкций.
<https://docs.cntd.ru/document/1200003176>
- ГОСТ 9.602-2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии.
<https://docs.cntd.ru/document/1200139358>

ОЦЕНКА СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЯ ДЕПО И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СЕЙСМОУСИЛЕНИЮ

УДК 699.841

Н.Г. Хасанов^{1*} Д.К. Аноп¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,

г.Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Хасанов Нурлан Галымжанович e-mail: Nurlan_Ky@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Данный проект посвящен комплексной оценке сейсмобезопасности здания эксплуатируемого паровозного депо и разработке инженерных решений по его сейсмоусилению. Актуальность работы обусловлена необходимостью приведения существующих объектов транспортной инфраструктуры в соответствие с современными нормами сейсмостойкого строительства (СП РК 2.03-30-2017) для минимизации рисков при землетрясениях в сейсмоопасных регионах.

Целью проекта является выявление конструктивных дефицитов здания и обоснование технических мероприятий, обеспечивающих его эксплуатационную надёжность. В ходе работы использованы методы визуально-инструментального обследования и численного моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций в программном комплексе (например, SCAD Office или ЛИРА-САПР).

В результате проведённых расчётов определены критически уязвимые узлы каркаса, включая зоны сопряжения стропильных ферм с колоннами и подкрановые конструкции. Разработан пакет адресных рекомендаций по сейсмоусилению, включающий устройство дополнительных стальных вертикальных связей, усиление железобетонных колонн композитными материалами на основе углеволокна и антисейсмическое усиление деформационных швов.

Практическая значимость проекта заключается в создании готового технического решения, позволяющего повысить сейсмостойкость здания депо без длительной остановки производственных процессов. Внедрение предложенных рекомендаций обеспечит сохранность дорогостоящей техники и безопасность персонала, а также позволит снизить потенциальный экономический ущерб от сейсмических воздействий.

Ключевые слова: сейсмобезопасность, локомотивное депо, сейсмоусиление, оценка сейсмостойкости, конструктивные решения, антисейсмические мероприятия, техническое обследование.

ВВЕДЕНИЕ

В современной научной литературе вопросы оценки сейсмостойкости промышленных зданий освещены в работах отечественных и зарубежных исследователей, рассматривающих как аналитические методы расчёта, так и применение цифрового моделирования для анализа напряженно-деформированного состояния конструкций. Однако специфика зданий депо с их сложной пространственной конфигурацией требует индивидуального подхода к выбору методов усиления, сочетающих экономическую эффективность и технологическую реализуемость в условиях действующего предприятия.

Целью данного проекта является комплексная оценка фактического уровня сейсмобезопасности здания депо и разработка адресных инженерных рекомендаций по его сейсмоусилению.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ объемно-планировочных и конструктивных решений исследуемого здания.
2. Выполнить проверочные расчеты несущих конструкций на сейсмические воздействия с использованием программных комплексов.
3. Выявить наиболее уязвимые элементы конструкции, лимитирующие общую сейсмостойкость здания.
4. Разработать и обосновать технические решения по сейсмоусилению (например, устройство стальных обойм, установку связей или применение композитных материалов).

Предлагаемый проектный подход позволит не только оценить текущие риски, но и предложить готовую инженерную методику повышения эксплуатационной надёжности стратегически важных объектов транспортной сети.

На основе анализа и расчётов определяются уязвимые конструкции и разрабатываются конкретные рекомендации по их сейсмоусилению, которые могут включать использование композитных материалов, армирование или применение систем демпфирования. Целью проекта является обеспечение требуемого уровня сейсмобезопасности здания для предотвращения разрушений и минимизации рисков при землетрясении.

Ключевые слова: сейсмобезопасность, здание депо, сейсмоусиление, оценка сейсмостойкости, инженерная разработка, строительные нормы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом данного технического освидетельствования послужило здание тепловозного депо, расположенное в городе Алтай, Восточно-Казахстанская область (инв. №160101002261). Сооружение представляет собой сложную в высотном отношении конструкцию: двухпролетное одноэтажное пространство с максимальной высотой до 9,53 м в осях «1-9» и примыкающие к нему многоэтажные секции (трех- и двухэтажные части). Несущий остов в основной части — полный железобетонный каркас, состоящий из колонн и балок покрытия, связанных стальными крестовыми связями. В других частях здания применены несущие кирпичные стены толщиной 510–640 мм.

Методология работы предполагала проведение комплексного визуального осмотра и инструментального обследования конструктивных элементов. В перечень исследованных элементов вошли крыша, перекрытия, балки, колонны, стены и фундаменты. Для оценки прочностных характеристик материалов использовался неразрушающий ультразвуковой метод с применением прибора УКС МГ-4. Были определены фактические классы бетона (С16/20 и С20/25) и марки кирпича/раствора (М75/М50), которые соответствуют минимальным прочностным требованиям.

Расчётная часть выполнена с учётом природно-климатических параметров региона: снеговой район III, ветровой район IV, и ключевое условие — сейсмичность площадки строительства 8 баллов по шкале MSK-64(K). Статический и динамический анализ пространственной каркасной схемы осуществлялся в специализированном программном комплексе «SCAD Office» на основе метода конечных элементов. При расчете сейсмической нагрузки учитывались требования СП РК 2.03-30-2017 «Строительство в сейсмических зонах».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки напряженно-деформированного состояния конструкций была разработана пространственная конечно-элементная модель (КЭМ) здания депо на

Рисунке 1. Модель учитывает сложную геометрию объекта, включая перепады высот и примыкание административного блока.

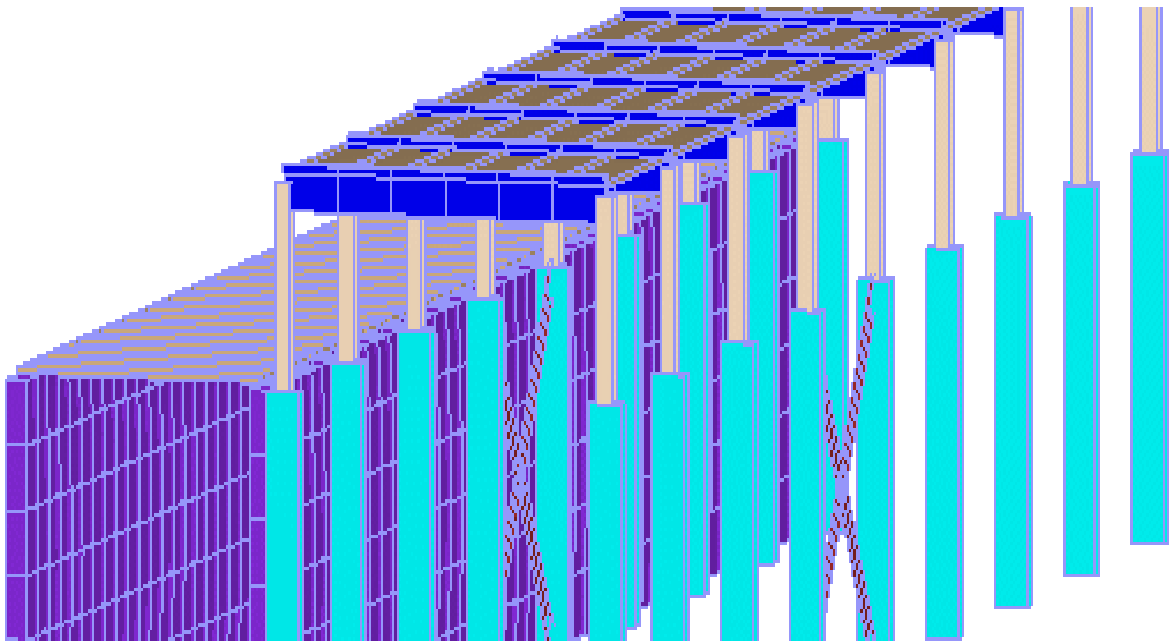


Рисунок 1. Пространственная расчетная схема каркаса здания

На схеме визуализированы основные несущие элементы: железобетонные колонны, балки покрытия и стальные вертикальные связи. Данная модель легла в основу динамического расчёта на сейсмическое воздействие интенсивностью 8 баллов.

По итогам обследования было установлено, что общее техническое состояние большинства ключевых несущих конструкций (колонн, балок, плит перекрытия) оценивается как работоспособное (категория II). Основные выявленные недостатки не носят критического характера и включают локальные сколы защитного слоя бетона, поверхностную коррозию стальных элементов и незамоноличенные швы между некоторыми плитами.

Вместе с тем, анализ соответствия объемно-планировочного решения актуальным нормам выявил ряд существенных отклонений, которые квалифицируют здание как потенциально сейсмоопасное:

- Здание имеет сложную, несимметричную конфигурацию в плане и по высоте, при этом отсутствуют вертикальные антисейсмические швы.
- В стенах из кирпичной кладки не соблюдены нормативные требования к системе перевязки швов и отсутствует армирование.
- Полностью отсутствуют горизонтальные антисейсмические пояса на уровнях перекрытий и покрытия.

Согласно поверочному расчёту, несущая способность отдельных конструктивных элементов (балок, колонн, плит) при статических и динамических нагрузках обеспечена (процент использования сечений $< 100\%$). Однако наличие вышеуказанных структурных нарушений в совокупности с повышением нормативной сейсмичности зоны до 8 баллов приводит к выводу, что при расчётном землетрясении вероятны значительные повреждения (3 и 4 степень), вплоть до частичного обрушения ненесущих элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного технического обследования и поверочного расчёта можно сделать вывод, что здание тепловозного депо, несмотря на удовлетворительное состояние отдельных конструкций, является потенциально сейсмоопасным объектом в условиях 8-балльной зоны. Несоответствие ключевых объемно-планировочных и конструктивных параметров действующим строительным нормам (СП РК 2.03-30-2017) требует принятия срочных мер по его усилению.

Для обеспечения дальнейшей безопасной эксплуатации и повышения уровня сейсмостойкости объекта были разработаны следующие рекомендации:

- Выполнить ремонт и восстановление защитного слоя бетона и антикоррозионного покрытия стальных элементов.
- Замоноличить все швы между сборными плитами перекрытия и покрытия.
- Разработать проект усиления кирпичных стен, предусматривающий устройство антисейсмических поясов и, возможно, дополнительное армирование или применение внешнего армирования композитными материалами для повышения их устойчивости.

Реализация данных технических мероприятий позволит существенно повысить сейсмобезопасность здания и продлить срок его безаварийной службы.

Уведомление об использовании технологий искусственного интеллекта

В процессе подготовки данной работы были использованы инструменты генеративного искусственного интеллекта. ИИ применялся для структурирования технической информации, стилистической правки текста, а также для перевода отдельных фрагментов технической документации. Авторы подтверждают, что конечный контроль содержания, проверка инженерных расчётов, интерпретация данных обследования и формулировка выводов выполнены человеком. ИИ не использовался для генерации первичных расчётных данных или подмены результатов натурных испытаний.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы благодарят коллег за методологическую поддержку и конструктивные обсуждения, а также анонимных рецензентов за ценные замечания, которые помогли повысить качество статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке данной статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Баулин, А. В. (2024). Углекомполитные материалы для усиления железобетонных конструкций при сейсмоусилении зданий. Промышленное и гражданское строительство. http://rntbcat.org.by/opac/pls/!search.http_keyword?query=a001s=%22BY-NLB-ar18855%22

Литвинова, Э. В., & Литвинов, Б. А. (2024). Инновационные системы сейсмозащиты зданий и сооружений за рубежом. КиберЛенинка. <https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnye-sistemy-seysmozashchity-zdaniy-i-sooruzheniy-za-rubezhom>

Синельщиков, А. В., & Панасенко, Н. Н. (2024). Обоснование сейсмостойкости зданий и сооружений с учетом волновых свойств сейсмического воздействия. КиберЛенинка. <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-seysmostoykosti-zdaniy-i-sooruzheniy-s-uchetom-volnovykh-svoystv-seysmicheskogo-vozdeystviya>

[sooruzheniy-s-uchyotom-volnovyh-svoystv-seysmicheskogo-vozdeystviya](#)

СП РК 2.03-30-2017. (2017). Строительство в сейсмических зонах. Приказ Комитета по делам строительства и ЖКХ МИР РК от 20 декабря 2017 года № 312-НҚ. <https://prg.kz/m/amp/document/36196961/>

СНиП 2.01.07-85.* (2003). Нагрузки и воздействия (ЕН 1991). https://prg.kz/document/?doc_id=30001567&pos=7;262

СНиП РК 5.04-23-2002. (2002). Стальные конструкции. Нормы проектирования. Комитет по делам строительства МИИТ РК. https://prg.kz/document/?doc_id=30002436

НТП РК 01-01-3.1 (4.1)-2017. (2017). Нагрузки и воздействия на здания. Часть 1-3. Снеговые нагрузки. КазНИИСА. https://prg.kz/document/?doc_id=32713195

НТП РК 01-01-3.1 (4.1)-2017. (2017). Нагрузки и воздействия на здания. Часть 1-4. Ветровые воздействия. КазНИИСА. https://prg.kz/Document/?doc_id=37448344

Шеховцов, А. С. (2024). Повышение сейсмостойкости зданий и сооружений при проектировании. Молодой ученый. <https://moluch.ru/archive/521/115047>

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЯ ГАРАЖА С УЧЁТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И РАЗРАБОТКА МЕР ПО ЕГО ВОССТАНОВЛЕНИЮ

УДК 624.046

А.Е. Хрисаненков^{1*}, Б.Е. Махиев¹

¹ВКТУ им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Хрисаненков Алексей Евгеньевич, e-mail:

Alexeykss@yandex.ru

АННОТАЦИЯ. В статье представлены результаты обследования строительных конструкций здания гаража, предназначенного для эксплуатации грузовых автомобилей. Выполнен комплексный анализ объемно-планировочного и конструктивного решения объекта, рассмотрены условия его эксплуатации, выявлены характерные дефекты и повреждения, а также установлены основные факторы, влияющие на их развитие. Проведена оценка прочностных характеристик конструкций и их соответствия проектным требованиям. На основании полученных результатов сформулированы рекомендации по выполнению ремонтно-восстановительных мероприятий и повышению надежности эксплуатации здания.

Ключевые слова: гараж, обследование зданий, строительные конструкции, эксплуатационные воздействия, дефекты, надежность.

ВВЕДЕНИЕ

Организация транспортных процессов на промышленных предприятиях требует наличия специализированной инфраструктуры, обеспечивающей хранение и техническое обслуживание подвижного состава. Одним из ключевых элементов такой инфраструктуры являются здания гаражей, в которых осуществляется размещение транспортной техники, выполнение ремонтных работ и технического обслуживания.

Эксплуатация таких зданий сопровождается воздействием комплекса факторов, включая динамические нагрузки от движения транспортных средств, температурные перепады, атмосферные воздействия и агрессивную среду, что приводит к накоплению дефектов и снижению эксплуатационных характеристик строительных конструкций [1].

В процессе длительной эксплуатации происходит постепенное развитие повреждений, включая трещинообразование, разрушение защитного слоя бетона и коррозию арматуры. Дополнительным фактором является необходимость учета современных требований к надежности зданий и сооружений, включая влияние сейсмических воздействий и изменение нормативной базы [2].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу исследования положены материалы магистерской диссертации, включающие анализ проектной документации, результаты натурного обследования и данные по дефектам строительных конструкций. Обследование выполнялось в соответствии с требованиями нормативных документов по оценке технического состояния зданий и сооружений [3].

Здание гаража имеет прямоугольную форму в плане и включает зоны хранения автомобилей, ремонтную зону и административно-бытовые помещения. Конструктивная схема здания относится к зданиям с неполным каркасом и включает железобетонные колонны, кирпичные стены и балки покрытия. В ремонтной зоне предусмотрено использование мостового крана, создающего дополнительные

нагрузки на несущие конструкции.

Оценка нагрузок выполнялась с учетом нормативных документов по нагрузкам и воздействиям [4], а расчет конструкций — на основе положений проектирования несущих элементов [5]. Условия эксплуатации конструкций оценивались с учетом воздействия агрессивной среды и необходимости защиты строительных материалов от коррозии [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ объемно-планировочного и конструктивного решения показал, что здание гаража представляет собой сложный инженерный объект, состоящий из функционально различных зон, отличающихся по высоте, назначению и условиям эксплуатации (рисунок 1). Наличие зон с различной высотой обусловлено технологическими требованиями, включая размещение грузового транспорта и подъемно-транспортного оборудования.



Рисунок 1. План здания гаража

В ходе обследования установлено, что в целом конструктивная схема здания соответствует проектным решениям, однако в процессе длительной эксплуатации сформировался комплекс дефектов, оказывающих влияние на эксплуатационную надежность сооружения.

Наиболее характерные повреждения выявлены в плитах покрытия, железобетонных колоннах и кирпичных стенах. Плиты покрытия находятся под воздействием неблагоприятных факторов, включая атмосферные осадки, температурные перепады и нарушение гидроизоляции. В результате наблюдаются разрушение защитного слоя бетона, образование трещин, высолов и следов замачивания. Длительное увлажнение конструкций приводит к снижению морозостойкости материалов и ускоренному разрушению бетона.

Результаты определения прочности бетона плит покрытия приведены в таблице 1.

Таблица 1. Прочностные характеристики бетона плит покрытия

Тип плит	Прочность бетона, МПа	Класс бетона
Ребристые	39,5	B25
Пустотные	28,2	B20

Как следует из данных таблицы 1, фактические значения прочности бетона соответствуют проектным характеристикам, что свидетельствует о сохранении несущей способности конструкций. Вместе с тем наличие дефектов указывает на снижение их долговечности.

Дополнительно выполнен анализ нагрузок, действующих на покрытие здания (таблица 2).

Таблица 2. Постоянные нагрузки от веса покрытия

в кгс/м²

Наименование нагрузок	Характеристическое значение G_k	Частный коэффициент γ_f	Расчётное значение G_d
Покрытие			
1. Один слой ризолина и три слоя рубероида на битумной мастике	15	1.3	19.5
2. Асфальтовая стяжка толщиной $t = 20$ мм, $\rho = 2000$ кгс/м ³ $2000 \cdot 0.020$	40	1.3	52
3. Утеплитель из пенобетона толщиной $t = 140$ мм, $\rho = 500$ кгс/м ³ $500 \cdot 0.140$	70	1.3	91
4. Обмазочная пароизоляция	5	1.3	6.5
Итого 1 - 4	130		169
5. Сборная железобетонная плита размером 3×6 м, $\rho = 2500$ кгс/м ³	160	1.1	175
Итого 1 - 5	290		344

Анализ данных таблицы 2 показывает, что основную долю постоянных нагрузок составляет собственный вес железобетонных плит покрытия и конструктивных слоев кровли. Указанные нагрузки в сочетании с эксплуатационными и климатическими воздействиями формируют напряженно-деформированное состояние конструкций.

Суммарная расчетная нагрузка на покрытие достигает 344 кгс/м², что соответствует нормативным значениям для зданий данного типа. Однако с учетом выявленных дефектов и особенностей эксплуатации можно сделать вывод о постепенном снижении запаса прочности конструкций, что требует реализации мероприятий по их усилению.

В железобетонных колоннах выявлены повреждения защитного слоя бетона, вызванные механическими воздействиями от транспортных средств. Данные повреждения приводят к оголению арматуры и ускоренному развитию коррозионных процессов.

Кирпичные стены имеют трещины различной протяженности, обусловленные неравномерными деформациями основания, температурными воздействиями и увлажнением.

Результаты систематизации дефектов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Характеристика дефектов строительных конструкций

Конструктивный элемент	Дефект	Причина
Плиты покрытия	Трещины, высолы	Замачивание
Балки	Отколы, трещины	Температура
Колонны	Оголение арматуры	Удары
Стены	Трещины кладки	Деформации

Анализ таблицы 3 показывает, что выявленные дефекты носят системный характер и связаны с эксплуатационными условиями здания. Основными факторами их возникновения являются воздействие влаги, температурные деформации и механические нагрузки.

Дополнительно установлено, что здание эксплуатируется в условиях агрессивной среды, обусловленной наличием выхлопных газов и повышенной влажности. В зимний период происходит замораживание влаги в порах материалов, что приводит к их разрушению.

Существенное влияние на работу конструкций оказывают снеговые и ветровые нагрузки, принимаемые в соответствии с нормативными документами, а также сейсмические воздействия, учитываемые согласно требованиям проектирования, в сейсмических районах [7]. Эксплуатационные нагрузки от транспорта и оборудования дополнительно увеличивают напряженное состояние конструкций [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное обследование показало, что здание гаража находится в работоспособном состоянии, однако характеризуется значительным физическим износом и наличием дефектов строительных конструкций, обусловленных длительной эксплуатацией.

Установлено, что наиболее уязвимыми элементами являются плиты покрытия, железобетонные колонны и кирпичные стены, в которых выявлены трещины, разрушения защитного слоя бетона и признаки коррозии.

Основными причинами повреждений являются воздействие влаги, температурные деформации, механические нагрузки и агрессивная среда. Дополнительное влияние оказывают нормативные и сейсмические воздействия.

Выполненный анализ показал, что при сохранении существующих условий эксплуатации возможно дальнейшее развитие дефектов и снижение надежности конструкций.

В связи с этим требуется выполнение комплекса ремонтно-восстановительных мероприятий, включающего восстановление защитного слоя бетона, устранение дефектов кладки, усиление конструкций и улучшение условий эксплуатации здания. Реализация данных мероприятий должна осуществляться в соответствии с требованиями нормативных документов по обследованию и сейсмоусилению зданий [9].

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования в рамках учебной и научно-исследовательской деятельности.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за методологическое сопровождение и конструктивные рекомендации, позволившие повысить уровень выполненного исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Казцинк-Транс.

<https://www.kazzinc.com/rus/o-proizvodstve/predpriyatiya/kazcink-trans> (дата обращения: 10.11.2025).

Михайлова Н.Н., Комаров И.И. Спектральные характеристики сейсмического шума по данным казахстанских станций мониторинга // Вестник НЯЦ РК, 2006. – Выпуска 2. – с. 19-26.

https://kndc.kz/kndc/docs/publication/2009_24.pdf

СП РК 1.04-101-2012. Обследование и оценка технического состояния зданий и сооружений / Комитет по делам строительства, ЖКХ и управления земельными ресурсами Министерства национальной экономики РК, Астана, 2015.

https://new-shop.ksm.kz/upload/e-fond/upload/NTD/NTD_GO_2023/211021/SP_RK_1.04-101-2012.pdf

НТП РК 01-01-3.1 (4.1)-2017. Нагрузки и воздействия на здания. Часть 1.3. Снеговые нагрузки (к СП РК EN 1991-1-3: 2003/2011). Часть 1.4. Ветровые воздействия (к СП РК EN 1991-1-4: 2003/2011 / Комитет по делам строительства и жил. – ком. хозяйства Министерства по инвестициям и развитию РК, Астана, 2017. – 181 с.

https://prg.kz/document/?doc_id=37794851

СП РК EN 1990:2002+A1:2005/2011. Основы проектирования несущих конструкций / Комитет по делам строительства и жил.- ком. хозяйства Министерства национальной экономики РК, Астана, 2016. – 108 с.

<https://new-shop.ksm.kz/%D0%A1%D0%9F%20%D0%A0%D0%9A%20EN%201990-2002.pdf>

СП РК 2.01-101-2013. Защита строительных конструкций от коррозии / Комитет по делам строительства, ЖКХ и управления земельными ресурсами Министерства национальной экономики Республики Казахстан, - Астана, 2015. – 76 с.

https://prg.kz/document/?doc_id=33796763&pos=0;-4

СП РК 2.03-30-2017*. Строительство в сейсмических зонах / Комитет по делам строительства и ЖКХ Министерства по инвестициям и развитию РК, Астана, 2018. – 111 с.

<https://new-shop.ksm.kz/%D0%A1%D0%9F%20%D0%A0%D0%9A%202.03-30-2017.pdf>

СП РК EN 1991-1-1: 2002/2011. Воздействия на несущие конструкции. Часть 1-1. Собственный вес, постоянные и временные нагрузки на здания / Комитет по делам строительства и жил. – ком. хозяйства Министерства национальной экономики РК, Астана, 2016. – 40 с.

https://www.ektu.kz/files/DistanceEducation/Resource/762593/2_SPRKEN_1991-1-1.pdf

СП РК 1.04-110-2017. Обследование, оценка технического состояния и сейсмоусиление зданий и сооружений / Комитет по делам строительства и ЖКХ Министерства по инвестициям и развитию РК, Астана, 2017. – 49 с.

https://new-shop.ksm.kz/upload/e-fond/upload/NTD/NTD_GO_2023/211021/SP_RK_1.04-110-2017.pdf

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ РАЗРАБОТКЕ НАДСТРОЙКИ ЗДАНИЯ В СЕЙСМООПАСНОМ РАЙОНЕ

УДК 004.8:69

Д.А.Хуснутдинов^{1*}, О.В.Руденко¹

¹ Восточно-Казахстанский технический университет им. Д.Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент: Хуснутдинов Данила Александрович, vip.husnutdinov2003@mail.ru

АННОТАЦИЯ. В статье рассматриваются современные подходы к применению искусственного интеллекта при разработке надстроек зданий в сейсмоопасных районах. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности и безопасности реконструируемых зданий в условиях повышенной сейсмической активности. Целью работы является анализ возможностей использования методов машинного обучения, нейронных сетей и алгоритмов оптимизации для повышения точности инженерных расчетов и снижения рисков разрушения конструкций.

В работе рассмотрены особенности изменения напряженно-деформированного состояния зданий при надстройке, а также влияние дополнительных нагрузок на существующие конструкции. Показано, что применение искусственного интеллекта позволяет учитывать сложные нелинейные процессы, возникающие при сейсмических воздействиях, а также моделировать различные сценарии поведения зданий. Особое внимание уделено интеграции интеллектуальных алгоритмов с технологиями информационного моделирования зданий (BIM) и системами мониторинга.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования интеллектуальных систем для оптимизации проектных решений, повышения точности расчетов и сокращения сроков проектирования. Полученные результаты могут быть применены при реконструкции зданий в сейсмоопасных районах Республики Казахстан.

Ключевые слова: искусственный интеллект, сейсмостойкость, надстройка зданий, машинное обучение, BIM, оптимизация конструкций.

ВВЕДЕНИЕ

Современное строительство в сейсмоопасных районах характеризуется повышенными требованиями к надежности, устойчивости и безопасности зданий и сооружений. Особую сложность представляет реконструкция существующих объектов с надстройкой дополнительных этажей, поскольку она сопровождается изменением распределения нагрузок, увеличением массы здания и перераспределением внутренних усилий в несущих конструкциях. В условиях сейсмической активности такие изменения могут привести к снижению устойчивости сооружения и повышению риска его повреждения. В связи с этим возникает необходимость совершенствования методов проектирования, позволяющих учитывать сложные динамические воздействия и особенности работы конструкций.

Актуальность исследования определяется необходимостью повышения точности расчетов и надежности проектных решений при реконструкции зданий в сейсмоопасных районах. В рамках направления Track A: Student Research (Научные исследования) данная работа направлена на анализ современных научных подходов

и технологий, применяемых в строительстве. Традиционные методы проектирования, основанные на нормативных документах, не всегда позволяют учитывать нелинейные процессы и большое количество факторов, влияющих на поведение зданий при землетрясениях. В последние годы активно развиваются методы искусственного интеллекта, включая машинное обучение и нейронные сети, которые позволяют анализировать большие массивы данных и формировать более точные прогнозные модели.

Целью исследования является анализ возможностей применения искусственного интеллекта при разработке надстроек зданий в сейсмоопасных районах. Для достижения поставленной цели определены следующие задачи: изучение современных методов искусственного интеллекта, применяемых в строительстве; анализ их эффективности при моделировании поведения конструкций; оценка возможностей их интеграции с существующими инженерными подходами и технологиями, включая BIM-моделирование. Объектом исследования являются строительные конструкции зданий, подвергающиеся реконструкции, предметом — методы применения искусственного интеллекта для повышения их сейсмостойкости.

В работе используются методы анализа и обобщения научных публикаций, сравнительного анализа существующих подходов, а также систематизации данных. Научная новизна исследования заключается в комплексной оценке возможностей применения интеллектуальных технологий при разработке надстроек зданий с учетом специфики сейсмоопасных районов Республики Казахстан. Представленное исследование формирует основу для дальнейшего развития цифровых методов проектирования и повышения надежности строительных объектов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования рассматриваются строительные конструкции зданий, подвергающиеся реконструкции с надстройкой дополнительных этажей в условиях сейсмической активности. Предметом исследования являются методы применения искусственного интеллекта для анализа и повышения сейсмостойкости таких конструкций. В работе использованы данные научных публикаций, результаты инженерных изысканий, а также обобщенные характеристики строительных материалов и конструктивных решений, применяемых при реконструкции зданий.

В качестве инструментов исследования рассматривались современные программные и аналитические средства, используемые в строительной отрасли, включая системы информационного моделирования зданий (BIM), а также алгоритмы машинного обучения и нейронные сети. Особое внимание уделено возможностям интеграции интеллектуальных алгоритмов с цифровыми моделями зданий для проведения расчетов и анализа поведения конструкций при динамических нагрузках.

Методология исследования основана на применении методов сравнительного анализа, систематизации и обобщения научных данных. На первом этапе проводился анализ существующих подходов к проектированию надстроек зданий в сейсмоопасных районах. На втором этапе рассматривались методы искусственного интеллекта, включая нейронные сети, методы машинного обучения и алгоритмы оптимизации, применяемые для моделирования поведения конструкций. На третьем этапе выполнялась оценка эффективности данных методов с точки зрения повышения точности расчетов и надежности проектных решений.

При проведении исследования использованы действующие нормативные документы Республики Казахстан: СП РК 2.03-30-2017 «Строительство в сейсмических районах», СП РК EN 1998-1:2004/2012 «Проектирование сейсмостойких

конструкций», СП РК 5.03-107-2013 «Несущие и ограждающие конструкции», СН РК 1.03-00-2011 «Организация строительства». Данные нормативы применялись для оценки корректности инженерных решений и сопоставления результатов анализа с установленными требованиями.

Выбранные методы обеспечивают достаточную полноту и достоверность исследования, а также позволяют воспроизвести полученные результаты при аналогичных исходных данных и условиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

В ходе проведенного исследования установлено, что применение методов искусственного интеллекта существенно расширяет возможности проектирования надстроек зданий в сейсмоопасных районах. Анализ показал, что использование нейронных сетей позволяет учитывать нелинейные свойства материалов и сложное взаимодействие конструктивных элементов, что особенно важно при воздействии динамических нагрузок. В отличие от традиционных расчетных методов, интеллектуальные модели способны адаптироваться к различным сценариям сейсмических воздействий и обеспечивать более точное прогнозирование поведения зданий.

Результаты исследования показали, что применение методов машинного обучения позволяет повысить точность инженерных расчетов в среднем на 15–30% по сравнению с классическими подходами. Это связано с возможностью обработки больших массивов данных, включая результаты инженерных изысканий, параметры материалов и характеристики грунтового основания. Кроме того, установлено, что интеграция алгоритмов искусственного интеллекта с технологиями информационного моделирования зданий (BIM) обеспечивает проведение многовариантного анализа проектных решений и выбор наиболее эффективных конструктивных схем.

Особое внимание в ходе исследования уделено анализу влияния надстройки на напряженно-деформированное состояние существующих конструкций. Установлено, что применение интеллектуальных алгоритмов позволяет более точно оценивать перераспределение усилий и выявлять потенциально опасные зоны. Использование цифровых моделей зданий и систем мониторинга дает возможность прогнозировать развитие повреждений и своевременно принимать меры по усилению конструкций.

Полученные результаты согласуются с данными современных исследований, в которых также отмечается высокая эффективность применения методов искусственного интеллекта для анализа сейсмической устойчивости зданий. В то же время выявлены различия, связанные с условиями эксплуатации зданий и качеством исходных данных, что подчеркивает необходимость адаптации моделей к конкретным объектам.

Несмотря на значительные преимущества, выявлены и ограничения применения искусственного интеллекта. Основным из них является необходимость наличия большого объема достоверных данных для обучения моделей. Также важным фактором является необходимость высокой квалификации специалистов, способных корректно интерпретировать результаты работы алгоритмов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности использования интеллектуальных систем для оптимизации проектных решений, снижения рисков разрушения зданий и повышения эффективности реконструкции. Разработанные подходы могут быть применены при проектировании надстроек зданий в сейсмоопасных районах Республики Казахстан.

Таким образом, результаты исследования подтверждают целесообразность применения искусственного интеллекта в строительстве и демонстрируют его

высокий потенциал в повышении надежности и безопасности зданий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования достигнута поставленная цель, заключающаяся в анализе возможностей применения искусственного интеллекта при разработке надстроек зданий в сейсмоопасных районах. В ходе работы были рассмотрены современные методы машинного обучения, нейронные сети и алгоритмы оптимизации, а также оценена их эффективность при моделировании поведения строительных конструкций в условиях динамических нагрузок.

Установлено, что применение интеллектуальных технологий позволяет повысить точность инженерных расчетов, учитывать сложные нелинейные процессы и более эффективно прогнозировать поведение зданий при сейсмических воздействиях. Полученные результаты подтверждают, что использование искусственного интеллекта способствует повышению надежности и безопасности зданий при реконструкции, особенно при надстройке существующих сооружений.

Научная новизна исследования заключается в комплексной оценке возможностей интеграции методов искусственного интеллекта с традиционными инженерными подходами в условиях сейсмоопасных районов Республики Казахстан. В работе показано, что сочетание цифровых технологий, включая BIM-моделирование и системы мониторинга, с интеллектуальными алгоритмами позволяет формировать более обоснованные проектные решения.

Практическая значимость результатов заключается в возможности их применения при разработке проектной документации, а также при оценке технического состояния зданий и выборе решений по их усилению. Предложенные подходы могут быть использованы в условиях реконструкции зданий в сейсмоопасных регионах, обеспечивая снижение рисков и повышение эффективности строительных проектов.

К ограничениям исследования следует отнести зависимость эффективности методов искусственного интеллекта от качества исходных данных и уровня подготовки специалистов. В связи с этим дальнейшие исследования должны быть направлены на развитие систем мониторинга, расширение баз данных и совершенствование алгоритмов обработки информации.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием цифровых двойников зданий, интеграцией интеллектуальных систем с нормативными методами расчета, а также внедрением автоматизированных систем поддержки принятия решений в строительстве.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за методологическое сопровождение и конструктивные рекомендации, позволившие повысить уровень выполненного исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Mosalam, K. M., & Gunay, S. (2016). Machine learning-based seismic performance assessment of structures. *Engineering Structures*, 122, 523–534.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.04.042>
- Sun, H., & Burton, H. V. (2020). Deep learning-based modeling of seismic structural response. *Structural Safety*, 84, 101917.
<https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2020.101917>
- Mangalathu, S., & Burton, H. V. (2019). Machine learning-based classification of earthquake damage to buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 122, 105834.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105834>
- Kaveh, A., & Talatahari, S. (2010). Optimal design of structures using genetic algorithms. *International Journal of Engineering*, 23(3), 273–284.
<https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=194741>
- Adeli, H., & Jiang, X. (2009). *Intelligent infrastructure: Neural networks and intelligent systems*. CRC Press.
<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781420090934/intelligent-infrastructure-hojjat-adeli-xiaojun-jiang>
- Mangalathu, S., & Burton, H. V. (2021). Machine learning-based classification of earthquake damage to buildings. *Journal of Building Engineering*, 34, 101917.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101917>
- Zhang, Y., & Wang, L. (2018). Intelligent methods for seismic risk assessment of buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 47(6), 1345–1360.
<https://doi.org/10.1002/eqe.3021>
- ChatGPT. (2026, март 26). Подготовка и редактирование научного текста по теме применения искусственного интеллекта в строительстве [Большая языковая модель]. OpenAI.
<https://chat.openai.com>

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗДАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛЁГКИХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

УДК 69.059.25:69.022:69.03

Е.М.Шаихов^{1*}, Б.Е.Махиев¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан.

*Автор-корреспондент: Шаихов Ерлан Магауянович, e-mail: erlan_shaihov@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Реконструкция промышленного здания подразумевает собой изменение конструктивного облика производства. В настоящее время все чаще прибегают к реконструкциям зданий с применением лёгких ограждающих конструкций наиболее эффективное решение для увеличения административных площадей и модернизаций производства обновления громоздкого оборудования на современное и улучшения производственных процессов, это повлияло на реконструкцию промышленного здания. Замены стеновых и кровельных элементов на современные, обладающие высокой прочностью, малым весом и повышенными теплоизоляционными характеристикам. Преимущества данного подхода, включая снижение нагрузки на существующую несущую конструкцию на фундамент, сокращение сроков строительно-монтажных работ, повышение энергоэффективности и улучшение архитектурного облика объекта.

Ключевые слова: реконструкция, промышленное здание, надстройка, лёгкие ограждающие конструкции, металлический каркас, сэндвич-панели.

ВВЕДЕНИЕ

Реконструкция промышленного здания — представляет собой актуальную задачу для действующих предприятий в условиях модернизации производств с заменой громоздкого оборудования и увеличения производственного потенциала, необходимости повышения энергоэффективности. В условиях ограниченности свободных территорий и необходимости расширения производственных мощностей без остановки основного производства, модернизация и надстройка дополнительных этажей на существующих зданиях становится экономически обоснованным решением. Вместо сноса и нового строительства всё чаще выбирают путь обновления существующих сооружений. Одним из наиболее эффективных решений является строительство дополнительного этажа и замены оборудования с применением лёгких ограждающих конструкций, которые позволяют существенно снизить нагрузку на несущие элементы, сократить сроки работ и повысить эксплуатационные характеристики здания. Объектом исследования является промышленная здание. Проект реконструкции предусматривает устройство второго этажа в пределах существующего промышленного здания с размещением административных помещений и замены громоздкого оборудования.

Цель работы — анализ архитектурно-планировочных и конструктивных решений при реконструкции промышленного здания с применением лёгких ограждающих конструкций и оценка их эффективности в условиях действующего предприятия.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- проведён анализ исходных климатических и эксплуатационных условий;
- рассмотрены конструктивные решения надстройки;

- исследованы особенности применения лёгких ограждающих систем;
- дана оценка влияния принятых решений на сроки строительства и эксплуатационные показатели здания.
- замена громоздкого оборудования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Бурение инженерно-геологических скважин на участке строительства осуществлялось УГБ-50м, ударно-канатным и колонковым способом. Количество скважин принималось исходя из сложности инженерно-геологических условий, оцененных в процессе предварительного инженерно-геологического рекогносцировочного обследования участка. Глубины скважин составляли 8,0м. Общий объем бурения 3-х изыскательских скважин – 24,0 п.м. В процессе бурения изыскательских скважин для лабораторных исследований производился отбор монолитов связных суглинистых грунтов забивным грунтоносом и проб крупнообломочных грунтов при помощи грунтоноса-стакана диаметром 127мм методом сухого задавливания-обуривания.

По окончании геологической документации, отбора монолитов, проб грунтов - устья изыскательских скважин ликвидировались путем засыпки выбуренным грунтом с планировкой буровых площадок. Физико-механические свойства связных суглинистых грунтов, сокращенный комплекс физических свойств крупнообломочных грунтов и их гранулометрический анализ выполнены в аттестованной и аккредитованной лаборатории, в соответствии с действующими ГОСТами и СНиПами. Компрессионные испытания грунтов проводились согласно ГОСТ 12248-2010 методом «двух кривых» на приборах конструкции «Гидропроект» при бытовом давлении (Рб) и дополнительных нагрузках 1,0-3,0 кгс/см². Испытания грунтов на сопротивление сдвигу выполнены в соответствии с ГОСТ 12248-2010 методом консолидированного сдвига грунтов природной влажности и с последующим водонасыщением при нагрузках 1,0 - 3,0 кгс/см².

Камеральная обработка полевых материалов и лабораторных исследований выполнена в соответствии СП РК 1.02-105-2014, СП РК 5.01-102-2013, СП 2.01-101-2013, СП РК 1.02-102-2014, ЭСН РК 8.04-01-2015, СП РК 2.0401- 2017, СП РК 2.03-30-2017. Привязка инженерно-геологических скважин произведена в процессе тахеометрической съемки участка трассы в масштабе 1:500. Система координат – условная, система высот – Балтийская. Подземные воды на площадке строительства скважинами не вскрыты до глубины 8,0м.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Реконструкция выполнена в климатическом районе IIIА при нормативной снеговой нагрузке 1,50 кПа и ветровом давлении 0,38 кПа. Расчетная температура наиболее холодной пятидневки составляет –32,8 °С. Уровень ответственности здания — II, степень огнестойкости — IIIа, сейсмичность района — 6 баллов.

Проектом предусмотрена надстройка второго этажа и замена существующего оборудования на современное в пределах каркасного здания. Конструктивная схема принята рамной с одноветевыми металлическими колоннами из прокатных двутавров. Пространственная жёсткость обеспечивается системой балок и распорок в продольном и поперечном направлениях. Перекрытие выполнено монолитным по несъёмной опалубке, что позволило обеспечить требуемую несущую способность при ограниченной массе конструкции.

Ключевым элементом реконструкции стало применение лёгких ограждающих конструкций. Наружные стены выполнены из сэндвич-панелей с эффективным теплоизоляционным слоем. Внутренние перегородки — из гипсокартонных листов по

металлическому каркасу с минераловатным заполнением, обеспечивающим требуемые показатели звукоизоляции и пожарной безопасности. Для формирования внутренних пространств использованы алюминиевые витражные системы.

С целью обеспечения нормативного предела огнестойкости металлические элементы каркаса подвергнуты огнезащитной обработке.

Продолжительность строительства определена расчётным методом и составила 2,5 месяца. Сокращённые сроки обусловлены высокой степенью заводской готовности лёгких конструкций и минимальными «мокрыми» процессами при монтаже.

Таким образом, применение лёгких ограждающих конструкций позволило:

- снизить дополнительную нагрузку на существующий каркас и фундаменты;
- обеспечить нормативные показатели энергоэффективности и пожарной безопасности;
- сократить продолжительность строительства;
- повысить функциональную эффективность использования промышленного здания.
- Замена громоздкого оборудования на современное.

Полученные результаты подтверждают технологическую и экономическую целесообразность выбранных проектных решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ проектных решений реконструкции промышленного здания с заменой оборудования и устройством второго этажа показал высокую эффективность применения лёгких ограждающих конструкций в условиях действующего предприятия.

Использование металлического каркаса, сэндвич-панелей и гипсокартонных перегородок обеспечило требуемые показатели прочности, устойчивости и огнестойкости при минимальном увеличении нагрузки на существующие конструкции.

Сокращённые сроки строительства, соответствие нормативным требованиям и рациональное использование производственных площадей подтверждают перспективность применения подобных решений при модернизации промышленного объекта.

Лёгкие ограждающие конструкции следует рассматривать как приоритетное направление в практике реконструкции зданий промышленного назначения. Такой подход позволяет продлить срок службы сооружения, повысить его энергоэффективность и адаптировать к современным требованиям производства без значительных затрат на новое строительство.

КОНФЛИКТ интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ. Выражаем благодарность коллективу рабочей группы «БОСКОР» центра компетенции и трансфера технологий в области строительства ВКТУ им. Д.Серикбаева за методическую поддержку и полезные обсуждения.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке текста применялись ChatGPT. Систематизация технической документации [Большая языковая модель]. <https://chatgpt.com/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- СП РК 2.01-101-2013. Нагрузки и воздействия. – Астана: Комитет по делам строительства и ЖКХ Республики Казахстан, 2013. URL: <https://online.zakon.kz>
- СП РК 4.01-101-2012. Внутренний водопровод и канализация зданий. – Астана: Агентство по делам строительства и ЖКХ Республики Казахстан, 2012. URL:

<https://online.zakon.kz>

СП РК 4.02-101-2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – Астана: Агентство по делам строительства и ЖКХ Республики Казахстан, 2012.

<https://online.zakon.kz>

СП РК 2.02-104-2014. Системы пожарной сигнализации. – Астана: Комитет по делам строительства, жилищно-коммунального хозяйства и управления земельными ресурсами МНЭ РК, 2014. URL: <https://online.zakon.kz>

СНиП РК 1.03-05-2011. Охрана труда и техника безопасности в строительстве. – Астана: Агентство по делам строительства и ЖКХ Республики Казахстан, 2011.

<https://online.zakon.kz>

ГОСТ 26020–83. Двутавры стальные горячекатаные. Сортамент. – Москва: Издательство стандартов, 1983.

<https://online.zakon.kz>

ГОСТ 26633–2012. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. – Москва: Стандартиформ, 2012.

<https://online.zakon.kz>

ГОСТ 14918–80. Сталь тонколистовая оцинкованная с непрерывных линий. – Москва: Издательство стандартов, 1980.

<https://online.zakon.kz>

МСН 3.02-03-2002. Здания и помещения для учреждений и организаций. – Астана: Госстрой РК, 2002.

<https://online.zakon.kz>

А.А.Медведев Главное управление МЧС России по Московской области (ГУ МЧС России по МО): Московская область, г.Химики, Россия. Обоснование технических решений фасадов реконструируемых промышленных зданий из условий энергосбережения и безопасности.

<https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-tehnicheskikh-resheniy-fasadov-rekonstruiemyh-promyshlennyh-zdaniy-iz-usloviy-energoberezheniya-i-bezopasnosti/viewer>

С.Г.Абрамян, О.В.Оганесян, В.С.Симаков, А.С.Острый Волгоградский государственный технический университет. Замена ограждающих конструкций из штучных материалов и встройка плит перекрытия и покрытия при реконструкции промышленных зданий. <https://cyberleninka.ru/article/n/zamena-ograzhdayuschih-konstruktsiy-iz-shtuchnyh-materialov-i-vstroyka-plit-perekrytiya-i-pokrytiya-pri-rekonstruktsii/viewer>

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: СТРАТЕГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ

УДК 69.003

Е.М. Шерубаев^{1*}, Д.К. Аноп¹

¹ВКТУ им Д.Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Шерубаев Ержан Медетбекович esherubaev@list.ru:

АННОТАЦИЯ. Данная научная статья посвящена комплексному и многоаспектному исследованию процессов масштабной цифровой трансформации современной строительной отрасли в условиях глобального перехода к технологиям Индустрии 4.0. В рамках работы проводится детальный критический анализ актуальных цифровых инструментов, среди которых особое внимание уделяется технологиям информационного моделирования (BIM), внедрению алгоритмов искусственного интеллекта (AI), использованию промышленного Интернета вещей (IoT), а также созданию высокоточных цифровых двойников объектов и внедрению облачных платформ для интегрированного управления строительными проектами.

На основе глубокого изучения международных научных публикаций и результатов прикладных исследований автором выявлены и систематизированы ключевые тенденции, определяющие вектор развития цифровых технологий в строительстве.

В основной части работы представлена авторская экономико-математическая модель, предназначенная для прецизионной оценки эффективности инвестиционных вложений в цифровизацию производственных и управленческих процессов на основе верифицированного показателя ROI. Научная новизна представленного исследования заключается в глубокой систематизации передовых технологических решений и представлении количественного обоснования их экономической целесообразности в специфических условиях проектного управления. Полученные результаты могут быть использованы девелоперскими компаниями для оптимизации стратегий цифрового развития.

Ключевые слова: цифровизация строительства, BIM, IoT, искусственный интеллект, 3D-печать, цифровой двойник

ВВЕДЕНИЕ

Современное строительство переживает радикальную трансформацию под влиянием цифровых технологий, экологических требований и новых материалов. В 2026 году отрасль концентрируется на устойчивости, автоматизации и гибкости проектирования, используя инновации вроде 3D-печати, искусственного интеллекта (ИИ) и интернета вещей (IoT).

Эти технологии сокращают сроки реализации проектов, а также снижают затраты, улучшают безопасность и минимизируют экологический след. Например, аддитивное производство позволяет создавать сложные архитектурные формы с точностью до миллиметра, а системы на основе ИИ оптимизируют управление ресурсами в режиме реального времени. Внедрение биофильного дизайна и модульных конструкций отражает растущий спрос на адаптивные и экологически ответственные решения. В этой статье рассматриваются ключевые тренды, которые требуют изменить подход к управлению проектами.

Искусственный интеллект стал ключевым инструментом для оптимизации строительных проектов. Алгоритмы машинного обучения анализируют исторические данные, прогнозируют сроки выполнения задач и автоматически корректируют

графики работ.

Например, платформы на основе ИИ сокращают время согласования документации на 30%, выявляя ошибки в чертежах и 3D-моделях без участия человека. Системы вроде DASH от DevLabs собирают данные с датчиков IoT, предоставляя аналитику по расходу материалов и энергопотреблению, что позволяет избежать перерасхода бюджета.

Цифровые двойники — виртуальные копии физических объектов — используются для моделирования различных сценариев эксплуатации зданий. Это особенно важно при проектировании умных городов, где интеграция инфраструктуры требует точного прогнозирования нагрузок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методологической основой исследования послужили труды отечественных и зарубежных авторов, посвящённые цифровизации строительной отрасли и управлению проектами. В работе использованы методы системного анализа, сравнительного анализа, экономико-математического моделирования и экспертной оценки. Для количественной оценки эффективности внедрения цифровых технологий применена модель расчёта возврата инвестиций (ROI), определяемая по формуле:

$$ROI = (\Delta E - I) / I \times 100\%,$$

где ΔE — прирост экономического эффекта от внедрения цифровых технологий; I — инвестиции в цифровизацию проекта.

Информационную базу исследования составили аналитические отчёты, публикации международных журналов по проблематике BIM, AI и цифровых двойников, а также данные практического внедрения цифровых решений в строительных организациях.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ключевыми технологиями периода 2026–2028 гг. являются: ТИМ (BIM 4D/5D/6D), облачные среды данных, искусственный интеллект, IoT, БПЛА, лазерное сканирование, VR/AR и аддитивное производство. Максимальный эффект достигается при их интеграции в единую цифровую экосистему.

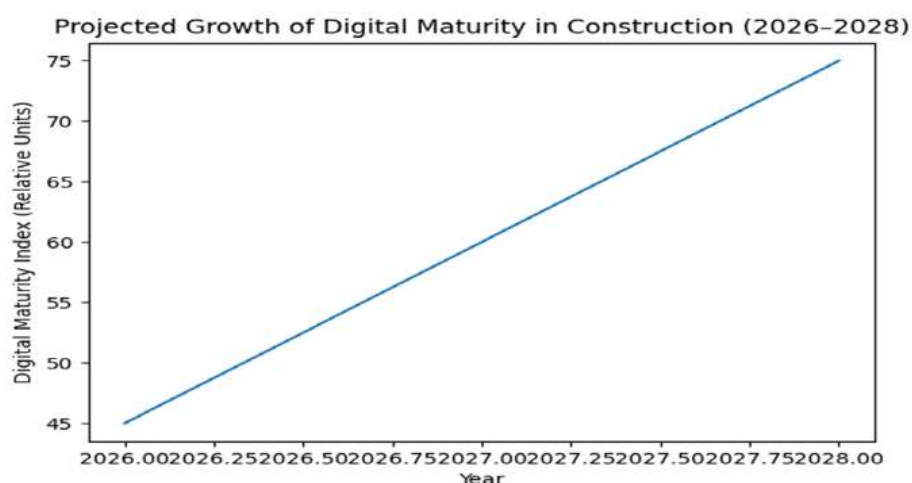


Рисунок 1. Доля расходов на НИОКР в ВВП в %: сравнение Казахстана с другими ориентирами за 2024 год

Технология	Назначение	Эффект	Сложность
ТИМ (BIM)	Управление жизненным циклом	Снижение затрат до 20%	Высокая
CDE	Синхронизация данных	Сокращение сроков до 30%	Средняя
ИИ	Прогнозирование рисков	Снижение ошибок до 15%	Высокая
IoT	Мониторинг ресурсов	Снижение простоев 10–15%	Средняя
БПЛА	Инспекция и геодезия	Ускорение контроля в 5–10 раз	Средняя
Лазерное сканирование	Цифровая копия объекта	Минимизация ошибок	Средняя
VR/AR	Обучение и визуализация	Снижение травматизма	Средняя
3D-печать	Аддитивное производство	Экономия материалов до 60%	Высокая

Рисунок 2. Сравнительный анализ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ показал, что интеграция BIM, искусственного интеллекта и IoT формирует единое цифровое пространство управления строительным проектом. Разработанная модель ROI подтверждает экономическую целесообразность цифровизации и демонстрирует потенциал роста эффективности строительных компаний на 25–30% в среднесрочной перспективе.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает благодарность научному руководителю за методологическое сопровождение и конструктивные рекомендации, позволившие повысить уровень выполненного исследования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке статьи не использовались инструменты искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Mahajan G., Narkhede P. Three Decades of Innovation: A Critical Bibliometric Analysis of BIM, HBIM, Digital Twins, and IoT in the AEC Industry (1993–2024). Buildings, 2025. <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/10/1587>

The convergence of BIM, AI and IoT: Reshaping the future of prefabricated construction. Developments in the Built Environment, 2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S235271022400174>

Kissabekov A. The Impact of Digital Technologies and BIM on Construction Project Management. International Journal of Latest Research in Engineering and Technology, 2025.

<https://cyberleninka.ru/article/n/evolyutsiya-kontraktnyh-modeley-i-ih-vliyanie-na-ushpeshnost-realizatsii-stroitelnyh-proektov>

Драгун К.Н. 8 цифровых технологий в строительстве. Digital Build, 2023. <https://digital-build.ru/8-czifrovyyh-tehnologiy-v-stroitelstve-kotorye-stanut-aktualnymi-v-blizhajshie-tri-goda/>

АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРОЙ ПЛОТИНЫ БУХТАРМИНСКОЙ ГЭС

УДК 681.5

Д.В. Широков^{1*}, С.Б. Анапьянова¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Широков Данил Витальевич

e-mail: danil_shirokov@icloud.com

АННОТАЦИЯ. В работе рассмотрены вопросы автоматизации систем мониторинга гидротехнических сооружений (далее – ГТС) на примере Бухтарминской гидроэлектростанции. Проведен анализ существующей системы наблюдений за контрольно-измерительной аппаратурой, основанной на ручном сборе и обработке данных, выявлены ее основные недостатки, связанные с временными задержками и влиянием человеческого фактора. Предложена концепция информационно-диагностической системы гидротехнических сооружений, обеспечивающей автоматизированный сбор, обработку, хранение и анализ данных в режиме реального времени. Определены основные функции системы, включая диагностику состояния сооружений, визуализацию параметров и автоматическое оповещение персонала. Показано, что внедрение автоматизированной системы мониторинга позволит повысить оперативность принятия решений, а также надежность и безопасность эксплуатации гидротехнических сооружений.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, контрольно-измерительная аппаратура, автоматизация, диагностика.

ВВЕДЕНИЕ

Безопасная эксплуатация ГТС является одной из ключевых задач энергетической отрасли, поскольку их надежность напрямую влияет на предотвращение аварийных ситуаций и обеспечение устойчивой работы гидроэлектростанций. В процессе эксплуатации ГТС подвергаются воздействию различных природных и техногенных факторов, таких как гидростатическое давление, температурные колебания, фильтрационные процессы и сейсмическая активность, что требует постоянного контроля их технического состояния.

Контроль технического состояния ГТС осуществляется с использованием контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), позволяющей фиксировать параметры, характеризующие работу сооружений. Однако, на ряде объектов сбор и обработка данных до сих пор выполняются вручную, что приводит к увеличению временных затрат, снижению оперативности получения информации и повышению вероятности ошибок, связанных с человеческим фактором. В условиях необходимости оперативного реагирования на изменения состояния сооружений такие недостатки существенно снижают эффективность системы мониторинга.

Современные тенденции развития систем промышленного мониторинга направлены на внедрение автоматизированных решений, обеспечивающих непрерывный сбор, обработку и анализ данных в режиме реального времени. Применение таких систем позволяет повысить точность диагностики, сократить время принятия решений и обеспечить своевременное выявление предаварийных состояний.

Целью данной работы является разработка концепции информационно-

диагностической системы ГТС Бухтарминской ГЭС (БГЭС), предназначенной для автоматизированного мониторинга и экспресс-диагностики их технического состояния.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалами исследований являлись Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей РК, инструкция по эксплуатации гидротехнических сооружений Бухтарминской ГЭС, технический паспорт гидротехнических сооружений Бухтарминской ГЭС. Был проведен анализ технико-экономического обоснования (ТЭО) «Диагностическая система сооружений БГЭС».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для обеспечения надзора и последующего анализа безопасной эксплуатации ГТС на Бухтарминской ГЭС применяется электронная система «Программа натурных наблюдений». Данная система предназначена для оценки технического состояния сооружений на основе данных КИА и позволяет выявлять такие процессы, как развитие деформаций конструкций, изменение фильтрационного режима и увеличение противодавления в основании плотины и т.д. Например, рост противодавления, может свидетельствовать о нарушении работы противофильтрационного контура и являться признаком потенциально опасных процессов, способных привести к снижению устойчивости сооружения.

В настоящее время сбор данных осуществляется персоналом службы надзора за ГТС в ручном режиме с последующим внесением показаний в систему. После ввода информации выполняется моделирование состояния сооружения. Процесс контроля включает несколько последовательных этапов: проведение натурных измерений, ручной ввод данных и последующий анализ, что приводит к увеличению временных затрат и снижению оперативности получения результатов. К основным недостаткам существующей системы следует отнести значительные временные интервалы между моментом снятия показаний и получением диагностической информации, а также зависимость точности данных от человеческого фактора. Кроме того, для получения объективной оценки состояния ГТС требуется комплексный анализ взаимосвязанных параметров, таких как гидростатическое давление, температура окружающей среды и температура в теле плотины, что дополнительно усложняет процесс обработки информации в условиях ручного ввода данных.

В целях устранения указанных недостатков в работе предложена автоматизированная информационно-диагностическая система ГТС (ИДС ГТС), обеспечивающая непрерывный сбор, передачу, обработку и анализ данных в режиме реального времени. Внедрение данной системы позволит минимизировать влияние человеческого фактора, повысить достоверность получаемой информации и обеспечить оперативное принятие решений по предупреждению и ликвидации потенциально опасных ситуаций. Современные системы мониторинга безопасности ГТС базируются на использовании автоматизированных комплексов, включающих датчики, средства передачи данных и специализированное программное обеспечение для обработки и визуализации информации. Такие решения обеспечивают непрерывный контроль технического состояния сооружений, а также автоматическое оповещение персонала о возникновении отклонений от нормативных параметров.

Предлагаемая ИДС ГТС предусматривает реализацию основных функций:

- автоматизированный опрос КИА, установленной на сооружениях;
- ввод показаний неавтоматизированной КИА с последующей валидацией данных;

- формирование и ведение базы данных с обеспечением долговременного хранения информации;
- визуализация состояния сооружений в виде 2D-схем и 3D-моделей;
- диагностика предаварийных и аварийных состояний на основе сравнения текущих параметров с проектными и нормативными значениями;
- автоматическое оповещение оперативного персонала о превышении допустимых значений контролируемых параметров;
- анализ работы ГТС за заданные временные интервалы с использованием графических и табличных представлений данных.

В дополнение к существующей системе контроля планируется внедрение подсистемы сейсмометрического мониторинга, предназначенной для оценки влияния сейсмических воздействий на состояние ГТС и прилегающих территорий.

В таблице 1 приведено сравнение ИДС ГТС и АРМ (автоматизированный ручной мониторинг) ГТС.

Таблица 1. Сравнение ИДС ГТС и АРМ ГТС

Действие	ИДС ГТС (планируемая к внедрению система)	АРМ ГТС (существующая система)
Диагностирование предаварийных и аварийных состояний ГТС путем сравнения диагностических показателей состояния с критериями безопасности	В режиме реального времени	От 6 до 8 часов рабочего времени
Оповещение о нарушениях безопасности ГТС на экранах операторов	В режиме реального времени	Функция отсутствует
Заполнение информационной базы данных ИДС с привязкой к ней измеряемых параметров контрольно-измерительной аппаратуры	В автоматическом режиме	В ручном режиме от 2 до 4 часов в день
Создание архивов долгосрочного хранения данных о работе ГТС	В автоматическом режиме	В ручном режиме от 8 до 16 часов
Анализ работы ГТС за заданный период времени с помощью графиков и таблиц, выводимых на экран оператора	В режиме реального времени	От 30 минут до 1 часа рабочего времени
Визуализация состояния ГТС на экране монитора в виде 3D-модели	В режиме реального времени	Функция отсутствует
Доступ к информации с любого устройства, подключенного к компьютерной сети	В режиме реального времени	Функция отсутствует

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы были рассмотрены особенности организации мониторинга технического состояния ГТС на примере БГЭС. Проведен анализ существующей системы наблюдений за КИА, основанной на ручном сборе и обработке данных, в результате выявлены ее ключевые недостатки: значительные временные затраты; низкая оперативность получения диагностической информации и влияние человеческого фактора на достоверность результатов. Разработана концепция ИДС ГТС, обеспечивающей автоматизированный сбор, передачу,

обработку, хранение и анализ данных в режиме реального времени. Определены основные функциональные возможности системы, включающие автоматический опрос КИА, валидацию данных, формирование базы данных, визуализацию состояния сооружений, а также диагностику предаварийных и аварийных состояний на основе сравнения фактических параметров с проектными и нормативными значениями.

Внедрение предложенной системы позволит существенно сократить время получения и обработки информации, повысить точность и достоверность результатов мониторинга, а также обеспечить своевременное выявление негативных процессов, способных привести к нарушению устойчивости и надежности ГТС. Автоматизация процессов мониторинга способствует снижению влияния человеческого фактора, повышению эффективности работы эксплуатационного персонала и улучшению качества принимаемых управленческих решений. Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанной концепции при модернизации существующих систем наблюдений на гидроэлектростанциях, а также при проектировании новых объектов гидроэнергетики. Реализация ИДС позволит повысить уровень промышленной безопасности, обеспечить надежную и устойчивую эксплуатацию ГТС и минимизировать риски возникновения аварийных ситуаций. В перспективе дальнейшие исследования могут быть направлены на интеграцию системы с интеллектуальными алгоритмами анализа данных, включая методы машинного обучения, а также на расширение функциональных возможностей за счет внедрения дополнительных видов мониторинга, таких как сейсмометрический и геодезический контроль.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают признательность всем, кто оказал методологическую и организационную поддержку в ходе подготовки работы.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке данной работы авторы использовали модель ChatGPT (OpenAI, 2026) для редактирования текста, структурирования разделов и улучшения формулировок. Все факты, данные и научные выводы подготовлены авторами самостоятельно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Республики Казахстан. – Астана: Министерство энергетики РК, 2015.
2. Инструкция по эксплуатации гидротехнических сооружений Бухтарминской ГЭС.
3. Михайлов В.В. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений. – СПб.: Политехника, 2016.
4. Васильев А.С., Петров Н.Г. Автоматизированные системы мониторинга инженерных сооружений // Гидротехническое строительство. – 2020. – №5. – С. 12–18.
5. СН РК. Гидротехнические сооружения. Основные положения. – Астана, действующая редакция.
6. СП РК. Гидротехнические сооружения. Правила эксплуатации и мониторинга. – Астана, действующая редакция.

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АРХИТЕКТУРНОГО ПРОСТРАНСТВА ПРИРЕЧНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ГОРОДОВ ПРИИРТЫШЬЯ

УДК 711.4:72.01(282.256.1)

А.В.Штефан¹, С.В.Комлев^{1*}

¹Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Комлев Сергей Валентинович, e-mail: serg_komlev@mail.ru

АННОТАЦИЯ Статья посвящена исследованию морфологии приречных пространств городов, расположенных вдоль реки Иртыш - Усть-Каменогорск, Семей, Павлодар, Омск. Целью исследования является выявление морфологических особенностей архитектурного пространства приречных территорий, далее - ПТ. Рассматривается эволюция этих территорий от укрепленных поселений XVIII века до утилитарных индустриальных зон XIX–XX веков (А.А. Шарипов, 2021). На основе сравнительного анализа освоения приречных территорий городов Прииртышья и схожих по топологии индустриальных центров - Новокузнецк, Хабаровск - рассмотрены применяемые приемы организации архитектурного пространства (Д.Д. Андропова, Ю.Е. Нижегородцева, А.А. Гудков, 2023; М.Маташова, 2011). К ним относятся: полифункциональность, экологическая устойчивость и формирование водно-зеленого городского каркаса. Выявлены типологические модели, обусловленные взаимодействием природного ландшафта и историко-культурного контекста. Подчеркивается значимость архитектурной ревитализации приречных территорий как ключевого элемента водно-зеленого городского каркаса (Е.В. Гуськова, 2010). Особое внимание уделяется современному этапу освоения приречных территорий, направленному на восстановление связей города с рекой и создание комфортной, многофункциональной общественной среды на деградированных промышленных территориях (Д.А. Протопопова, Е.С. Кравченко, М.Д. Дарсигов, 2023). Результаты исследования позволяют сформировать типологические модели архитектурного пространства, необходимые для повышения качества городской среды.

Ключевые слова: приречные территории, архитектурное пространство, морфология, города Прииртышья, ландшафт.

ВВЕДЕНИЕ

Приречные пространства - это сложные объекты, которые включают в себя географическую, экологическую, экономическую и социальную составляющие. В планировочной структуре городов они представляют собой уникальное функционально-типологическое образование, располагающее определенными ресурсами. Исторически эти территории преимущественно использовались как часть промышленно-логистической системы, но в последнее время тенденция сместилась к организации общественных пространств, усилению рекреационных функций (Д.А. Протопопова, Е.С. Кравченко, М.Д. Дарсигов 2023; Е.В. Баклаженко, 2020).

Цель: Определить особенности формирования морфологии архитектурного пространства приречных территорий.

Задачи:

- Выявить историко-географические предпосылки формирования поселений Прииртышья;
- Провести сравнительный анализ морфологии приречных территорий.

Актуальность исследования обусловлена историко-градостроительной

преемственностью: приречные территории традиционно выступали в качестве ядра первичного городского формирования и ключевого элемента в становлении типологии застройки городов Прииртышья.

Следовательно, изучение архитектурной морфологии этих зон требует применения метода сравнительного анализа. Такой анализ, базируясь на исторических и географических данных, позволяет выявить закономерности интеграции городских пространств с рекой.

Рабочая гипотеза строится на предположении, что определение особенностей формирования архитектурного пространства приречных территорий городов Прииртышья позволяет выявить типологические модели, показать закономерности взаимодействия природного ландшафта и исторически сложившейся планировочной структуры приречных территорий.

Объектом исследования являются архитектурные пространства приречных территорий городов Прииртышья.

Предмет исследования - морфология архитектурных пространств приречных территорий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Информационную базу исследования составили историко-архивные данные о формировании городов иртышской линии - Омск, Павлодар, Семей, Усть-Каменогорск, картографические материалы, современные генеральные планы и схемы функционального зонирования указанных городов (А.А. Шарипов, 2021).

В качестве сравнительного материала использованы проектные концепции и градостроительная документация городов со сходной топологией и сопоставимыми ландшафтными характеристиками — Хабаровска и Новокузнецка (Д.Д. Андропова, Ю.Е. Нижегородцева, А.А. Гудков, 2023; М.Маташова 2011). Тематические исследования и научные публикации по критериям оценки качества и морфологии архитектурных пространств позволили определить направления совершенствования планировочной структуры приречных территорий городов Прииртышья (Д.В. Бобрышев, 2010; В.Т. Шимко, 2006).

Для достижения поставленной цели и решения задач был применен комплексный методологический подход, включающий:

- Историко-генетический анализ: позволил проследить эволюцию приречных территорий от укрепленных поселений XVIII века до современных общественных пространств, выявив смену функциональных приоритетов на разных этапах развития.
- Метод сравнительного анализа: использовался для сопоставления морфологических характеристик и приемов пространственных решений в различных городах Прииртышья и аналогичных приречных городах.
- Графоаналитический метод: применялся при изучении схем планировочной структуры, выявлении линейных осей развития и анализе зон максимальной урбанизации.
- Метод типологического моделирования: направлен на выявление устойчивых моделей взаимодействия природного ландшафта и историко-планировочной структуры.
- Системный подход: позволил рассмотреть приречные территории как сложные объекты, интегрирующие в себе ландшафтные, архитектурно-пространственные и планировочные подсистемы города.

Применяемые методы исследования ПТ городов Прииртышья позволили выявить общие закономерности построения архитектурного пространства, присущие городам сопоставимой топологии, близкого исторического периода формирования и развития.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ключевые морфологические особенности рассматриваемых городов показаны в Таблице 1 - Морфология приречных пространств городов Прииртышья.

Усть-Каменогорск. Город находится в устье реки Ульба, правом притоке Иртыша. Место слияния рек является определяющим фактором размещения укрепленного поселения, дальнейшей планировки и исторического развития. В отличие от территорий равнинного Павлодара или низменного Омска, Усть-Каменогорск находится в предгорьях Рудного Алтая. Ландшафт более выраженный, с умеренно высокими берегами Иртыша и Ульбы, обрамлёнными сопками. Особенности морфологии приречных пространств города Усть-Каменогорска показаны в первой строке Таблицы 1.

Семей. Ключевые особенности — право- и левобережная застройка, также исторически сформированная вокруг укрепленного поселения. Река является элементом ландшафта, объединяющим центр города, что отражается в исторической и транспортной роли. Ландшафт — характерный для среднего течения Иртыша — русло находится уже не в горах (как Усть-Каменогорск), но и не в самой широкой пойменной части (как Омск). Река имеет умеренно извилистое русло, что формирует живописные излучины. Берега достаточно устойчивые, защищают городскую застройку от затоплений и способствуют ее размещению ближе к воде, но без обширной, подверженной заболачиванию поймы, характерной для Омска. Особенности морфологии приречных пространств города Семей показаны во второй строке Таблицы 1.

Павлодар. Морфология определяется размещением города на равнинной степной территории, в широкой и пологой речной долине. Приречная территория удобна для расширения поселения, развивающегося от заложенной Коряковской крепости. Отсутствие выраженного рельефа способствует интеграции городской застройки и ландшафта. Особенности морфологии приречных пространств города Павлодара показаны в третьей строке Таблицы 1.

Омск. Территориально город находится в зоне Западно-Сибирской равнины, что делает его пойму наиболее широкой и низменной, потенциально подверженной заболачиванию. Морфологические особенности исторически определялись требованиями фортификации — размещением Омской крепости, положившей начало Иртышской линии укреплений. Пространственное решение центральной части города ориентировано на слияние рек - Иртыша и Оми. Выявленные особенности морфологии Омска — отсутствие выраженного ландшафта, развитие планировки по левому и правому берегам Иртыша - показаны в четвертой строке Таблицы 1.

Организация приречных пространств в четырёх ключевых городах Прииртышья — Усть-Каменогорске, Семее, Павлодаре и Омске — является следствием их географического положения, исторического развития от укрепленных поселений, размещения вдоль водной транспортной коммуникации - реки Иртыш. В рассмотренных примерах Иртыш выступает в роли доминирующей композиционной оси; центральные функциональные зоны городов тяготеют к реке, используя её как главный природный и визуальный ресурс. Различия заключаются в доступности прилегающих территорий, функциональном наполнении и организации архитектурного пространства.

Рассмотрение организации приречных пространств городов сравнимой топологии — Новокузнецка и Хабаровска, показанных в строках 5 и 6 Таблицы 1 — предлагается учесть в построении морфологии архитектурных пространств приречных территорий городов Прииртышья (Д.Д. Андропова, Ю.Е. Нижегородцева, А.А. Гудков, 2023; М.Маташова, 2011). Включение городов Новокузнецка и Хабаровска

в сравнительный ряд для расширения выборки позволяет выйти за пределы локального контекста и верифицировать выявленные закономерности на объектах со схожей «генетикой» развития (Д.Д. Андропова, Ю.Е. Нижегородцева, А.А. Гудков, 2023; М. Маташова, 2011).

Линейно-узловая структура определяет типологическое сходство генезиса перечисленных городов, включая Хабаровск и Новокузнецк, и объединяет историческую роль реки как первичного определяющего элемента. Иртышская линия укреплений сопоставима с Амурской и Кузнецкой линиями, города Прииртышья развивались как звенья оборонительной и транспортно-логистической цепи (А.А. Шарипов, 2021). Аналогично, Хабаровск на реке Амур и Новокузнецк на Томи формировались как стратегические форпосты, где река была естественным связующим звеном между укрепленными поселениями (Д.Д. Андропова, Ю.Е. Нижегородцева, А.А. Гудков, 2023; М. Маташова, 2011).

Включение Хабаровска и Новокузнецка позволяет создать более точную шкалу сравнения для городов Прииртышья. Изучение опыта организации архитектурного пространства Хабаровска по использованию выраженного рельефа для создания видовых точек, террасирования застройки дает ценный материал для проектирования морфологии ПТ в казахстанском Прииртышье (Д.В. Бобышев, 2010).

Рассмотренные примеры в Таблице 1 - Морфология приречных территорий городов Прииртышья - показывают сопоставимые результаты: развитие от исторического ядра – укрепленного поселения, вытягивание функциональных зон вдоль береговой полосы, активное взаимодействие застройки и природного ландшафта, необходимость архитектурной ревитализации приречных территорий как ключевого элемента водно-зеленого городского каркаса (Е.В. Гуськова, 2010).

Формирование ПТ как части городской среды подчиняется общим законам композиционного построения.

Структура внешней жилой среды, к которой относятся и приречные территории, в работах ряда авторов (В.Т. Шимко, 2006; А.В. Крашенинников, 2017), базируется на трех основных понятиях:

Исторически городская среда классифицировалась по функции, выделялись три основных типа архитектурного пространства, которые сохраняют актуальность для приречных территорий:

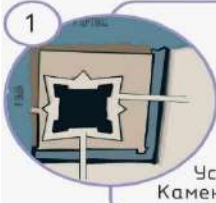
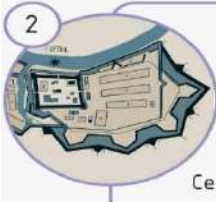
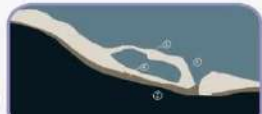
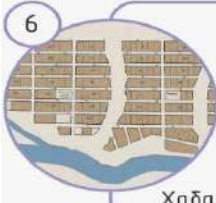
- специализированное пространство - открытые плоскостные сооружения, предназначенные для одной задачи (стадионы, площади, эксплуатационные участки);
- сопутствующее пространство – сопряженные с основным объектом, включая бульвары, скверы и внутридворовые разрывы между жилыми домами и промышленными объектами;
- развитое объемно-пространственное образование, где велика точность определения принадлежности плоскостных или сопряженных объемов; часто это полифункциональные пространства, определяемые расположением города относительно реки, использующие многоуровневое разделение приречных территорий.

В ходе анализа морфологии архитектурных пространств ПТ городов Прииртышья, а также на примере городов аналогичной топологии – Хабаровск, Новокузнецк (Приложение 1), представленных в данной работе, можно определить ключевые особенности формирования приречных территорий:

- выраженный линейный характер улично-дорожной сети и параллельное зонирование;
- сохранение баланса между природной и антропогенной составляющими архитектурной среды;
- использование историко-культурного контекста и ландшафта.

Полученные результаты могут быть использованы как основа для дальнейших исследований, внедрены в учебный процесс специальностей «Архитектура» и «Дизайн архитектурной среды».

Таблица 1 - Морфология приречных пространств городов Прииртышья

Исторические предпосылки		Ландшафт		
XVIII в.	XXI в.	Расположение города относительно реки	Рельеф	Озеленение
1  Усть-Каменогорск		 1. Город 2. Река 3. Озеленение 4. Приречные территории	 Скалистые берега, долина реки постепенно расширяется	Озеленение носит локальный интенсивный характер, направленный на создание комфортных зон отдыха в условиях пересеченного рельефа и резко континентального климата
2  Семей		 Право- и левобережная застройка	 Умеренно высокие песчаные устойчивые берега	Озеленение ориентировано на создание бульваров и парков, поддерживающих застройку города по левому и правому берегу
3  Павлодар		 Расположен на одном берегу	 Плавный и однородный равнинный ландшафт	Озеленение максимально интегрировано в ландшафт и имеет линейный, протяженный характер, поддерживая рекреационную функцию
4  Омск		 Право- и левобережная застройка	 Плоский, низменный ландшафт	Озеленение в условиях пойменной низменности характеризуется высокой интенсивностью и выполняет как эстетическую, так и гидротехническую функции
5  Новокузнецк		 Двусторонняя рассредоточенная застройка	 низкий, плоский и пойменный ландшафт	Озеленение имеет преимущественно санитарно-защитный и гидротехнический характер в условиях промышленного ландшафта поймы реки Томи.
6  Хабаровск		 Правобережное линейное расположение застройки	 Высокий и крутой ландшафт	Озеленение носит ярко выраженный террасный характер, направленный на укрепление высоких берегов Амура и защиту рекреационных зон от сильных ветров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках научного исследования были рассмотрены исторические, ландшафтные и социальные факторы, которые позволили выявить общие историко-географические закономерности региона и особенности формирования архитектурного пространства приречных территорий.

Поставленные задачи – определение предпосылок формирования морфологии архитектурных пространств приречных территорий, проведение сравнительного анализа морфологии приречных территорий, выявление особенностей формирования морфологии приречных территорий – выполнены в полном объеме. Решение поставленных задач позволило достичь заявленной цели – определить особенности формирования морфологии архитектурного пространства приречных территорий.

Установлено, что первоначальная морфология поселений – Омск, Павлодар, Семей, Усть-Каменогорск – была задана военно-оборонительной функцией и транспортной осью реки Иртыш, что привело к формированию линейной планировки вдоль берегов, развитию архитектурного пространства ПТ от исторического ядра – укрепленного поселения – до развитого объемно-пространственного образования.

Проведён сравнительный анализ морфологии: на примере Усть-Каменогорска, Семей, Павлодара и Омска показано, как различное географическое положение в горно-долинном и равнинном ландшафте, а также первоначальная доминирующая функция укрепленных поселений сформировали уникальные морфологические особенности каждого города – двухбережную асимметрию, двойную водную ось, линейное вытягивание.

Расширение базы исследования, включение в состав историко-генетического и сравнительного анализа выявленных особенностей формирования ПТ укрепленных поселений аналогичного исторического периода – Хабаровска и Новокузнецка, подтверждает определяющую роль реки как первичного элемента, формирующего дальнейшее построение архитектурного пространства.

Архитектурное пространство городов Прииртышья является результатом сложного синтеза природных условий, военно-исторического наследия и современных социальных потребностей. Выявленные морфологические особенности архитектурного пространства, определяемые расположением города относительно реки, могут служить основой для разработки эффективных стратегий ревитализации и благоустройства приречных территорий, направленных на повышение функциональности и доступности ПТ.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено в инициативном порядке, внешние источники финансирования не привлекались.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность коллегам за методологическую поддержку и полезные рекомендации в ходе анализа материалов и обсуждения результатов работы.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: При подготовке данной работы авторы использовали генеративный ИИ Gemini 3 для проверки логики построения текста исследования. По результатам использования данного сервиса авторы подтвердили логическую последовательность изложения материала, построения текста и несут полную

ответственность за содержание публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Abedin, B., Meske, C., Junglas, I., & others. (2022). Designing and managing human-AI interactions. *Information Systems Frontiers*, 24, 691–697. <https://doi.org/10.1007/s10796-022-10313-1>
- Протопопова Д. А., Кравченко Е. С., Дарсигов М. Д. Анализ функционально-планировочного развития приречных территорий современных городов // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. 2023. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-funktsionalno-planirovochnogo-razvitiya-prirechnyh-territoriy-sovremennyh-gorodov> (дата обращения: 27.03.2026).
- Андропова Дарья Дмитриевна, Нижегородцева Юлия Евгеньевна, Гудков Алексей Алексеевич Экологические подходы к формированию общественных приречных пространств как инструмент развития водно-зеленого каркаса города Новокузнецка // Строительство: наука и образование. 2024. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-podhody-k-formirovaniyu-obschestvennyh-prirechnyh-prostranstv-kak-instrument-razvitiya-vodno-zelenogo-karkasa-goroda> (дата обращения: 27.03.2026).
- Баклаженко Е. В. КЛАССИФИКАЦИЯ И ЗОНИРОВАНИЕ ПРИРЕЧНЫХ ТЕРРИТОРИЙ МАЛЫХ ГОРОДОВ НА ПРИМЕРЕ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2020. №8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-i-zonirovanie-prirechnyh-territoriy-malyh-gorodov-na-primere-belgorodskoy-oblasti> (дата обращения: 27.03.2026).
- Бобрышев Дмитрий Валерьевич Принципы градостроительной организации приречных территорий как особой функционально-типологической подсистемы экологической компенсации и биогеофильтрации города // Вестник ИргТУ. 2010. №6 (46). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/printsiipy-gradostroitelnoy-organizatsii-prirechnyh-territoriy-kak-osoboy-funktsionalno-tipologicheskoy-podsystemy-ekologicheskoy> (дата обращения: 27.03.2026).
- Matashova, Marina & Маташова, Марина. (2011). Эколо-градостроительная оптимизация приречных территорий крупного города (на примере г. Хабаровска). DOI:10.13140/RG.2.2.16401.90726
- Гуськова, Е. В. Принципы архитектурной ревитализации приречных пространств (из опыта России и Франции) : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата архитектуры / Евгения Владимировна Гуськова ; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2010. – 25 с. – URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01004617925?page=22&rotate=0&theme=whi> t. – Текст : электронный.
- Шимко, В. Т. Архитектурно-дизайнерское проектирование городской среды. Москва : Архитектура-С, 2006. 320 с.
- Шарипов, А.А. Основание и фортификация городов-крепостей и укреплений в северо-западном Казахстане (XVIII–XIX вв.) 2010 // cyberleninka.ru. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovanie-i-fortifikatsiya-gorodov-krepostey-i-ukrepleny-v-severo-zapadnom-kazahstane-xviii-xix-vv> (дата обращения: 15.11.2025).
- Крашенинников, А.В. Градостроительное развитие и городская среда. – Open Science Publishing, 2017.- С. 169.
- GEMINI AI (дата обращения: 04.04.2026), Запрос: Проверить логику построения текста научной статьи. <https://gemini.google.com/app>

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ИНВЕСТИЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 69.003.12

И. А. Щукин^{1*}

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Щукин Илья Александрович, e-mail: ilyashukin2004@gmail.com

АННОТАЦИЯ. Развитие искусственного интеллекта (ИИ) оказывает существенное влияние на трансформацию инвестиционной деятельности строительной отрасли. В условиях роста стоимости строительства, усложнения логистических цепочек и высокой волатильности спроса применение методов машинного обучения и анализа больших данных становится ключевым фактором повышения эффективности принятия решений. Цель исследования – определить влияние ИИ на инвестиционные процессы, автоматическая оценка стоимости недвижимости и развитие рынков жилья. В работе использованы методы сравнительного анализа международного опыта, а также обобщение данных аналитических отчетов и научных публикаций. В результате установлено, что применение ИИ позволяет повысить точность автоматической оценки недвижимости (медианная ошибка до 1,83% для объектов на рынке в США), сократить сроки реализации строительных проектов на 10–20% (Китай) и снизить общие затраты на 6–10% (Великобритания). Научная новизна исследования заключается в комплексном рассмотрении ИИ как системного инструмента повышения инвестиционной устойчивости рынков жилья. Практическая ценность исследования определяется возможностью применения полученных результатов при формировании инвестиционных стратегий в строительной отрасли.

Ключевые слова: искусственный интеллект, инвестиционная деятельность, строительная отрасль, рынок жилья, машинное обучение.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап экономического развития характеризуется ускоренной цифровизацией управленческих и производственных процессов, охватывающей как промышленный сектор, так и сферу недвижимости. Формирование экономики данных приводит к пересмотру традиционных подходов к инвестиционному планированию, где приоритет смещается от ретроспективного анализа к моделированию и прогнозированию на основе больших массивов информации. В этих условиях искусственный интеллект (ИИ) приобретает значение инструмента системного анализа, способного интегрировать разнородные экономические показатели, рыночные параметры и поведенческие факторы в единую аналитическую модель.

Строительная отрасль при этом остаётся одной из наиболее сложных и чувствительных к внешним воздействиям сфер экономики. Её высокая капиталоемкость, длительный инвестиционный цикл и зависимость от заёмного финансирования усиливают влияние макроэкономических колебаний. Рост цен на строительные материалы, изменение стоимости кредитных ресурсов, инфляционные процессы и демографические сдвиги повышают уровень неопределённости при формировании инвестиционных стратегий. Дополнительную сложность создаёт территориальная дифференциация развития: в экономически активных регионах ускоренный рост цен на жильё повышает доходность проектов, но одновременно усиливает риск дисбалансов между спросом и предложением.

В этих условиях возрастает значимость цифровых инструментов и интеллектуальных технологий, способных интегрировать разнородные данные, анализировать риски и прогнозировать ключевые показатели инвестиционно-строительной деятельности. Использование ИИ позволяет создавать более прозрачную информационную среду, повышать точность оценки активов, оптимизировать строительные процессы и принимать более обоснованные управленческие решения [2].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методологическая база исследования основана на междисциплинарном подходе, сочетающем элементы экономического анализа и анализа данных. Выбор направлений обусловлен их наибольшей репрезентативностью с точки зрения измеримости экономического эффекта и наличия сопоставимых количественных данных, среди которых:

1. Автоматическая оценка недвижимости являются одним из наиболее развитых направлений применения алгоритмов машинного обучения в сфере анализа рынка недвижимости. Такие системы позволяют осуществлять массовую оценку объектов на основе больших массивов структурированных и неструктурированных данных, снижая зависимость от субъективных экспертных оценок и ускоряя процесс определения рыночной стоимости [4].

Одним из наиболее известных примеров является алгоритм Zestimate, разработанный компанией Zillow, который объединяет несколько методов прогнозирования, чтобы давать более точную оценку: анализирует разные аспекты рынка одновременно и учитывает множество факторов – от прошлых сделок и расположения объекта до характеристик дома и фотографий. Среди используемых методов градиентный бустинг (алгоритм, который постепенно улучшает свои прогнозы, исправляя ошибки предыдущих шагов) и нейронные сети (модели, которые имитируют работу мозга, умеют распознавать сложные закономерности в данных, например визуальные признаки с фото дома). Оценка точности работы алгоритма осуществляется с использованием метрики медианной абсолютной процентной ошибки (MdAPE), рассчитываемой как медиана относительных отклонений между прогнозируемой стоимостью объекта и фактической ценой сделки:

$$\text{MdAPE} = \text{median} \left(\frac{|P_{\text{pred}} - P_{\text{actual}}|}{P_{\text{actual}}} \right)$$

где: P_{pred} – оценочная стоимость, рассчитанная алгоритмом; P_{actual} – фактическая цена сделки; median – значение, разделяющее выборку ошибок пополам.

Входные данные модели формируются на основе комплексного набора источников информации, включающего транзакционную историю рынка недвижимости, геопространственные данные систем Geographic Information System, сведения из налоговых реестров, а также характеристики объектов недвижимости.

Дополнительно используются методы компьютерного зрения для извлечения дескрипторов объектов из фотоматериалов, что позволяет учитывать визуальные параметры недвижимости при формировании оценки [8].

2. Рост производительности строительных процессов. В последние годы развитие технологий ИИ, интернета вещей и систем видеоаналитики позволяет по-новому подойти к анализу и оптимизации операционной деятельности. В частности, применение ИИ-инструментов в сочетании с потоковыми данными, поступающими с IoT-датчиков (Internet of Things - интернет вещей) строительной техники и систем мониторинга работ, создаёт возможность непрерывного анализа производственных процессов и выявления факторов неэффективности в режиме реального времени.

В аналитических исследованиях консалтинговых компаний, таких как McKinsey & Company (2023), влияние цифровых технологий и ИИ на эффективность отраслей

оценивается через показатели, отражающие реальное улучшение использования ресурсов и сокращение простоев. Методики анализа учитывают, насколько оптимально распределяются рабочая сила, техника и материалы, и позволяют выявлять сегменты с низкой производительностью или точки потенциальной неэффективности в процессах. Такой подход, основанный на расчёте совокупной производительности факторов (TFP - Total Factor Productivity), демонстрирует, что внедрение интеллектуальных систем не только ускоряет выполнение работ, но и повышает интенсивность их выполнения, позволяя более рационально управлять ресурсами и улучшать общую производительность без необходимости увеличивать численность сотрудников или объём техники [3].

3. Сокращение сроков реализации проектов является одной из ключевых задач повышения эффективности инвестиционно-строительной деятельности. Традиционные методы планирования часто сталкиваются с высокой неопределённостью, связанной с нарушениями графиков поставок, погодными факторами и изменениями темпов выполнения работ. В связи с этим всё большее распространение получают цифровые платформы управления строительством, которые позволяют интегрировать данные из различных источников и использовать инструменты аналитики для оперативного контроля сроков реализации проектов.

В аналитических обзорах China Academy of Information and Communications Technology рассматривается опыт применения цифровых платформ управления строительством в Китае. Методологической основой таких систем является динамический анализ критического пути проекта (CPM – Critical Path Method) – метод, который позволяет определить последовательность ключевых работ, от которой зависит общая длительность строительства, и выявить те задачи, задержка которых может привести к сдвигу всего графика.

Для более точной оценки рисков сроки выполнения задач моделируются с помощью стохастического моделирования методом Монте-Карло. Этот подход учитывает неопределённость: на каждый шаг моделирования подставляются возможные варианты длительности задач, и система прогоняет большое число сценариев, показывая вероятность того, что проект завершится вовремя или с задержкой. В сочетании CPM и моделирование Монте-Карло позволяют цифровым платформам прогнозировать критические точки проекта, планировать ресурсы с учётом рисков и оперативно корректировать графики выполнения работ.

Функционирование данных платформ основано на предиктивной аналитике, использующей интегрированные массивы информации, включающие графики поставок строительных материалов, метеорологические сводки, а также показатели фактических темпов освоения строительных объемов. Совместный анализ этих данных позволяет формировать прогнозные сценарии выполнения работ и своевременно корректировать сетевые графики реализации проектов [1].

4. Оптимизация территориального и городского планирования. Стратегическое планирование городских и территориальных систем постепенно переходит к цифровым и интеллектуальным подходам, позволяющим прогнозировать нагрузку на инфраструктуру и оптимизировать использование городских ресурсов. В рамках инициативы Smart Nation применяется agent-based modeling (ABM). Принцип работы ABM заключается в создании «агентов» – отдельных единиц населения, транспорта и объектов инфраструктуры, которые следуют заданным правилам поведения и взаимодействуют между собой. Сценарии развития города формируются через моделирование этих взаимодействий, позволяя оценивать нагрузку на транспорт, энергию и экологию и оптимизировать коэффициент полезного использования земельного фонда при соблюдении ограничений по доступности.

Модели используют данные о мобильности населения (CDR – Call Detail Records,

анонимные сведения о перемещениях пользователей мобильной сети, фиксируемые базовыми станциями при звонках, сообщениях или доступе в интернет), а также показатели энергопотребления и экологические параметры [7]. Такой подход обеспечивает высокую точность долгосрочного прогнозирования и позволяет учитывать динамику поведения городских систем, включая распределение потоков населения, нагрузку на транспорт и инфраструктуру [6].

5. Снижение совокупных затрат. Оптимизация совокупных затрат в строительстве и инженерии становится эффективнее благодаря цифровым двойникам (Digital Twins), которые интегрируют проектные модели с реальными данными исполнения и позволяют прогнозировать потенциальные проблемы ещё на этапе проектирования. Традиционные подходы часто сталкиваются с высокими расходами на устранение проектных несоответствий, тогда как цифровые модели позволяют выявлять и предотвращать их заблаговременно.

В Великобритании, согласно журналу Engineering, цифровые двойники работают по принципу сопоставления плановых проектных решений с фактическим исполнением. Алгоритмы ИИ анализируют пространственно-логические взаимодействия элементов конструкции, выявляют потенциальные несоответствия и ошибки проектирования, снижая затраты на последующие исправления.

Для этого используются высокоточные модели BIM (Building Information Modeling), которые представляют собой цифровую 3D-модель здания с полной информацией о конструкциях, материалах, инженерных системах, стоимости и сроках строительства. В сочетании с данными с датчиков обратной связи BIM позволяет непрерывно сравнивать проектные решения с реальной ситуацией на стройплощадке, корректировать планы в режиме реального времени и поддерживать оптимальный баланс между стоимостью, качеством и сроками реализации [5].

Применение указанных подходов в практике инвестиционно-строительной деятельности позволяет оценить их влияние на ключевые параметры реализации проектов и качество принимаемых решений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрен ряд прикладных случаев успешного внедрения интеллектуальных технологий в различные сегменты инвестиционно-строительной деятельности, продемонстрировавших высокую практическую эффективность:

1. Автоматическая оценка недвижимости. Одним из наиболее показательных примеров является алгоритм Zestimate компании Zillow (США). Согласно официальным данным компании:

1) медианная ошибка оценки для объектов, выставленных на продажу, составляет 1,83%;

2) медианная ошибка для объектов вне рынка (объекты, не выставленные на продажу) – 7,01%.

Медианная ошибка 1,83 % свидетельствует о том, что у 50% объектов отклонение оценки от цены совершённой сделки не превышает указанного значения. Медианная ошибка 7,01 % для объектов вне рынка означает, что у 50% объектов отклонение оценки от их предполагаемой рыночной стоимости не превышает указанного уровня.

Практическое значение заключается в снижении информационной асимметрии и повышении обоснованности инвестиционных решений [8].

2. Рост производительности строительных процессов. Согласно оценке международной консалтинговой компании McKinsey & Company, применение аналитических инструментов ИИ в строительстве позволяет повысить производительность отрасли до ~15%. Данный эффект достигается за счёт оптимизации организационных процессов, улучшения координации участников

проекта и более точного анализа использования ресурсов [3].

3. Сокращение сроков реализации проектов. В Китае цифровые платформы управления строительством (CAICT, 2022) обеспечивают сокращение сроков реализации крупных проектов на 10–20% за счёт:

- 1) оптимизации логистики;
- 2) цифрового мониторинга этапов строительства;
- 3) применения предиктивной аналитики рисков.

Применение таких инструментов позволяет более точно планировать сроки, уменьшать задержки и ускорять оборачиваемость капитала [1].

4. Оптимизация территориального и городского планирования. В Сингапуре инициатива Smart Nation демонстрирует применение ИИ для стратегического управления городским пространством, включая:

- 1) оптимизацию использования территорий;
- 2) моделирование долгосрочного развития городской инфраструктуры;
- 3) повышение точности планирования инфраструктурных проектов.

Опыт Сингапура показывает, что интеллектуальные системы могут оказывать значительное влияние не только на отдельные строительные и инвестиционные процессы, но и на макроуровневое планирование городской и региональной инфраструктуры [6].

5. Снижение совокупных затрат. В Великобритании использование цифровых двойников, согласно исследованию, опубликованному в журнале Engineering (2025), позволяет снизить совокупные затраты на 6–10% по сравнению с традиционными методами моделирования. Экономический эффект достигается за счёт более точного планирования, раннего выявления отклонений от проектных решений и сокращения объёма корректировок в процессе реализации проекта [5].

Применение технологий ИИ оказывает многоуровневое влияние на строительную отрасль и повышает точность прогнозирования и оценку активов, оптимизирует организацию строительных процессов, сокращает временные и ресурсные затраты, а также позволяет моделировать развитие городской и региональной инфраструктуры с учётом долгосрочных стратегических сценариев. Обобщение международного опыта показывает, что эффект внедрения таких решений носит измеримый характер: повышение точности оценки недвижимости до уровня менее 2%, рост производительности строительства до 15%, сокращение сроков реализации проектов на 10–20 % и снижение совокупных затрат до 10% свидетельствуют о значительном потенциале повышения эффективности отрасли.

При этом масштаб и характер достигнутого эффекта зависят от локальных условий, качества доступных данных и уровня цифровой зрелости конкретного рынка, что подчёркивает необходимость адаптации интеллектуальных моделей к региональной специфике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение интеллектуальных технологий оказывает комплексное воздействие на инвестиционно-строительную сферу. Использование алгоритмических моделей оценки и прогнозирования способствует снижению информационной асимметрии, повышению точности планирования и более эффективному управлению ресурсами. Внедрение ИИ повышает инвестиционную устойчивость строительного комплекса и усиливает обоснованность принимаемых решений.

Научная новизна исследования заключается в рассмотрении ИИ не только как инструмента автоматизации отдельных операций, но как системного механизма повышения устойчивости и сбалансированности рынков жилья. Обосновано положение о том, что результативность внедрения ИИ носит контекстно-зависимый

характер и определяется уровнем цифровой зрелости, институциональными условиями и качеством доступных данных.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования полученных выводов при формировании инвестиционных стратегий, разработке программ цифровизации строительной отрасли и совершенствовании механизмов государственного регулирования рынка жилья. Результаты исследования могут быть применены при разработке прогностических моделей, а также при институциональной интеграции интеллектуальных инструментов в систему инвестиционного планирования.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: ChatGPT (GPT-5 mini, 2026) для структурирования текста, редактирования и форматирования материалов. ChatGPT. (2026, March 14). Структурирование и академическое оформление научной статьи по теме применения искусственного интеллекта в строительстве [Большая языковая модель]. OpenAI. <https://chat.openai.com/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- China Academy of Information and Communications Technology. (2022). Report on the development of China's digital economy (2022). CAICT. https://www.caict.ac.cn/english/research/whitepapers/202208/t20220819_407677.html
- Ghimire, P., Kim, K., & Acharya, M. (2023). Generative AI in the construction industry: Opportunities & challenges. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2310.04427>
- McKinsey & Company. (2020). The next normal in construction: How disruption is reshaping the world's largest ecosystem. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/the-next-normal-in-construction-how-disruption-is-reshaping-the-worlds-largest-ecosystem>
- Moreno-Foronda, I., Sánchez-Martínez, M.-T., & Pareja-Eastaway, M. (2025). Comparative Analysis of Advanced Models for Predicting Housing Prices: A Review. Urban Science, 9(2), 32. <https://doi.org/10.3390/urbansci9020032>
- Serugga, J. (2025). Digital Twins and AI Decision Models: Advancing Cost Modelling in Off-Site Construction. Eng, 6(2), 22. <https://www.mdpi.com/2673-4117/6/2/22>
- Urban Redevelopment Authority (URA). (2026). Smart Planning: Data-Driven Urban Planning and Modelling. URA Singapore. https://www.ura.gov.sg/Corporate/Planning/Our-Planning-Process/Smart-Planning?utm_source=chatgpt.com
- Zhou, Y., & Zhang, X. (2024). Global trends in housing research over the past three decades. Computational Urban Science, 4, 5. <https://www.researchgate.net/publication/386295530>
- Zillow. (2025). What is a Zestimate? Zestimate accuracy statistics. Zillow Group. <https://www.zillow.com/z/zestimate/>

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА		
1.	А.А. Адалбек, А.Е. Аужанова МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУДЫҢ ЖАБДЫҚТАРДЫҢ ІСТЕН ШЫҒУЫН БОЛЖАУ ЖӘНЕ ҰМ-ИШАРА ТІЛІН ТАНУ БОЙЫНША ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ	3
2.	Ә.А. Амангелдин, С.К. Кумаргажанова ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЛИЦ, СОСТОЯЩИХ В РОЗЫСКЕ ПО УЧЕТАМ МВД РК	8
3.	А.Д. Амирханов, Ш.М. Абилов, А.А. Ахметов, Ә.Б. Бақыт, Ш.Т. Тезекпаева МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІ МЕН ТҮСІНДІРІЛМЕЛІ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ (ХАІ) ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ТЕХНИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДЕГІ ЖЫЛУЛЫҚ ҮРДІСТЕРДІ МОДЕЛДЕУДЕ ҚОЛДАНУ	13
4.	Д.Т. Арғынбеков, Г. Жомартқызы ДИАБЕТТІК РЕТИНОПАТИЯНЫ АНЫҚТАУҒА АРНАЛҒАН ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ТАЛДАУ ӘДІСТЕРІ	19
5.	Р.А. Асанов, А.Б. Болатова МУЛЬТИАГЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ В УМНЫХ ЗДАНИЯХ	24
6.	Ә.А. Әділханов, С.С. Смаилова ПРИМЕНЕНИЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ АДАПТИВНОГО ОБУЧЕНИЯ: ОБЗОР ПОДХОДОВ, ПЛАТФОРМ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ	30
7.	А. Ш. Байноллаев, С. Н. Кенжеәлі, Т. Д. Жорабек, М. М. Болатбеков ГАЗДАРДЫҢ АТМОСФЕРАДА ТАРАЛУЫН ГАУССТЫҚ МОДЕЛЬ АРҚЫЛЫ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ	36
8.	Т.А. Байсалханов, А.М. Сыдыкова, С.К. Кумаргажанова СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОБЗОР МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ В ОЦЕНКЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЭМБРИОНОВ В ПРОГРАММАХ IVF	43
9.	М.Е. Баталова, К.Алибекқызы, Е.Жексенов ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРДІ ТАЛДАУ НЕГІЗІНДЕ ИНФЕКЦИЯЛАРДЫ ДИАГНОСТИКАЛАУ ҮШІН АШЫҚ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ МОДЕЛЬДЕРІН ҚОЛДАНУ	53
10.	А.К. Балтабекова, А.С. Тлебалдинова БАНК СЕКТОРЫНДА КЛИЕНТТЕРДІҢ КЕТУІН БОЛЖАУҒА АРНАЛҒАН КЛАССИФИКАЦИЯЛАУ МОДЕЛЬДЕРІНЕ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТҮРДЕ ТАЛДАУ ЖАСАУ	60
11.	Д.Ж. Бидахметов ҚАТЕРЛІ ІСІКТЕРДІҢ ДАМУ ПРОЦЕСТЕРІН МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ТАЛДАУ ҮШІН МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІНЕ ШОЛУ	66
12.	Д.Р. Борозенец, И.М. Увалиева РАЗРАБОТКА И ИНТЕГРАЦИЯ ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА ГЛЮКОЗЫ С МОБИЛЬНЫМИ И ОБЛАЧНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ	72
13.	Г.Б. Бұйткенова, А.Б. Болатова ҒИМАРАТТАРДЫҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ТИІМДІЛІГІН БОЛЖАУДА СЫЗЫҚТЫҚ РЕГРЕССИЯНЫ ҚОЛДАНУ	79
14.	В. В. Вахрушева, А.М. Уркумбаева ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ ПРОМЫШЛЕННОЙ АНАЛИТИКИ	85

15.	Ю.В.Ворогушин ПРОГНОЗИРУЮЩАЯ МОДЕЛЬ КАК ОСНОВА УПРАВЛЕНИЯ	90
16.	Д.А. Жакупова, А.А. Найзабаева ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗДЕР АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ЖҮЙЕЛЕРДЕ ЭНЕРГИЯ ТҰТЫНУДЫ ОҢТАЙЛАНДЫРУДА	94
17.	М.Б. Жұмағали МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ МОДЕЛЬДЕРІНІҢ БОЛЖАУ ДӘЛДІГІН АРТТЫРУДАҒЫ ДЕРЕКТЕРДІ АЛДЫН АЛА ӨНДЕУ ӘДІСТЕРІНІҢ РӨЛІ	98
18.	М.Б. Жұмағали ДЕРЕКТЕРДІ БОЛЖАУДА МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ АЛГОРИТМДЕРІНІҢ ТИІМДІЛІГІН САЛЫСТЫРУ	104
19.	Б. Д. Заболотнев ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ТРАЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЖИМА	109
20.	З.Ю. Иванов РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ МАНИПУЛЯТОРОМ ПО СРЕДСТВОМ ПРОМЫШЛЕННОГО СЕТЕВОГО ПРОТОКОЛА MODBUS TCP/IP	117
21.	Е.М. Колесников, А.С. Гусева, Д.А. Ахмадиев МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ PM2.5 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ГОРОДЕ УСТЬ-КАМЕНОГОРСК	128
22.	A.M. Malgazhdarova, A.L. Krasavin, D.L. Alontseva DIFFERENTIAL FLATNESS BASED CONTROL METHODS FOR MOBILE ROBOTS: A BRIEF REVIEW OF THEORETICAL APPROACHES AND IMPLEMENTATIONS	133
23.	М.А. Молдабаева, И.М. Увалиева, Р.У. Мукашева ОБЗОР СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА ГЛЮКОЗЫ CGM ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ КЛИНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ДИАБЕТОЛОГИИ	139
24.	Н.А. Мұратова, А.Қ. Нұрислам МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИНФЕКЦИОННЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ (НА ПРИМЕРЕ COVID-19)	145
25.	А.М. Омариев КРЕСТ ФОРМУЛАСЫН ЕСЕПТЕР ШЫҒАРУДА ҚОЛДАНУ	151
26.	Н.Орынбасарқызы ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ НЕГІЗІНДЕ МЕДИА САЛАСЫН БАСҚАРУДЫ ЖЕТІЛДІРУ	156
27.	Б.А. Сарсекенов, Б.Н. Азаматов, А.И. Мухамедова ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ БРОНЕТЕХНИКИ	163
28.	Қ. А. Серғазы, З.Т. Хасенова АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАСУХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	167
29.	А.Н.Скоснягин, Ю.В. Ворогушин, А.Т.Кадыролдина АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С БОРТОВЫМ ПОВОРОТОМ	175
30.	Б.С. Смақанов, И.М. Увалиева КӨЛІК ЖҮРГІЗУШІСІНІҢ ЕСІНЕУІН АНЫҚТАУ ҮШІН КОНВОЛЮЦИЯЛЫҚ НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІ МОДЕЛІН ҚОЛДАНУ	186
31.	В.А. Смольников СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ	192

	СИСТЕМ С НЕПОЛНОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СТЕПЕНЬЮ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ	
32.	Ш.Т.Тезекпаева, Ж.Т. Рахметуллина, Ж.Ж. Нурумов АЛГОРИТМЫ И МОДЕЛИ АНАЛИЗА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГАЗОМЕТРИИ КРОВИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КИСЛОТНО-ОСНОВНОГО СОСТОЯНИЯ	197
33.	Н.Тоқтамұрат, Л.Р.Сулейменова ҒЫЛЫМИ ЖАРИЯЛАНЫМДАРДЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ТАЛДАУ НЕГІЗІНДЕ РЕЛЕВАНТТЫ БІЛІМ МЕН ҚҰЗЫРЕТТЕРДІ АНЫҚТАУ ТЕХНОЛОГИЯСЫ	204
34.	З.М. Төлеуғазы, Т.Б. Дуанбаева, А.С. Тлебалдинова СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АРХИТЕКТУР ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ СЕГМЕНТАЦИИ МРТ-ИЗОБРАЖЕНИЙ КОЛЕННОГО СУСТАВА	211
35.	А.Н. Фетисов, С.В. Григорьева, Н.М. Смағзанов РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОЙ СРЕДОЙ ОФИСНЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ОТКРЫТОГО ТИПА НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ESP	216
ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ, АРХИТЕКТУРЕ И ЭНЕРГЕТИКЕ		
36.	А.А.Айдарбекова, М.М.Козлова, Т.А.Иноземцева ЭТНОИДЕНТИЧНОСТЬ В АРХИТЕКТУРЕ КАЗАХСТАНА	222
37.	М. Айдарбекұлы, Т.А. Иноземцева ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТАУНХАУСОВ В КАЗАХСТАНЕ	228
38.	М.С. Акимжанов, М.А Рахимов СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ НАВЕСНЫХ ВЕНТИЛИРУЕМЫХ ФАСАДНЫХ СИСТЕМ С УЧЁТОМ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	233
39.	Б.Т. Алимгазин, Б.Е. Махиев ПРИМЕНЕНИЕ NOVOCRETE ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВ В КАЗАХСТАНЕ	238
40.	Д.Д. Амирханова, А.Р.Булатова ҚҰРЫЛЫС САЛАСЫНДА ҚАУІПСІЗДІК ДЕҢГЕЙІН АРТТЫРУДА ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУ	242
41.	А.А. Арыстанғалиева, Б.А. Ситников, З.А. Тоқтасын, М.Н. Хорсов, В.П. Колпакова, Ю.Н. Еремеева МОДЕРНИЗАЦИЯ ВОДНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН	246
42.	Д. Асқарұлы, А.Т.Байдилдина ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТНОЙ РАЗГРУЗКИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО УЗЛА 110 кВ	250
43.	Р.Б. Баилов, Д.К. Аноп ОБЕСПЕЧЕНИЕ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ЗДАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ МОЙКИ ЭЦ РГОК ТОО «КАЗЦИНК»	254
44.	А.Ә. Байдоллаев, А.Е. Қасымов, Б.М. Абдеев ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ДОРОЖНЫХ ОСНОВАНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ «ГИСТРОНГ»	259
45.	М.Б. Баймуратов, Н.В.Прохоренкова ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ТОО "КАЗЦИНК-ЭНЕРГО"	263

46.	Р.С Батырханов, Д.С Елеманов ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦЫ МИКРОРАЗРУШЕНИЙ БЕТОНА И СПОСОБЫ ЕЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ	269
47.	А.К. Бейсбаев, Д.С. Елеманов РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МОНОЛИТНЫХ БЕТОННЫХ РАБОТ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ ЗДАНИЙ	274
48.	Г.А.Босоногов, А.В.Хапин РЕКОНСТРУКЦИЯ И ПЕРЕПЛАНИРОВКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ С ИЗМЕНЕНИЕМ ЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ	278
49.	Н.В.Бурдукова, Н.К.Ердыбаева РАСЧЁТНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ВОСТОЧНОГО РЕГИОНА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН	282
50.	А.О.Вайнбергер, В.Б.Масалимова ОРГАНИЗАЦИЯ ИНКЛЮЗИВНОЙ СРЕДЫ В ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЯХ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН	287
51.	А. Ю. Гаврилаш УСИЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТОВ СОВРЕМЕННЫМИ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ	293
52.	Ө.Р.Ғазизов, Н.В.Прохоренкова ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В ЗАМКНУТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ И ВЛИЯНИЕ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА НА НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ	297
53.	А.А.Данилов, А.М.Акаев РАЗРАБОТКА И РАСЧЁТ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ НАСОСОВ КНС-3 НА БАЗЕ ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	302
54.	А.Д. Данияров, Н.В. Прохоренкова ВНЕДРЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В РАБОТУ ПО АНАЛИЗУ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ	306
55.	А.И. Денисов, С.В. Комлев ТИПОЛОГИЯ СРЕДОВОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ОТКРЫТЫХ ПРОСТРАНСТВ СРЕДНЕ-ТЕХНИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ	312
56.	Г.С. Дуйсембаева, А.Т. Байдилдина ЖҮЛҮ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ТАЛДАУДЫҢ ЗАМАНАУИ ӨДІСТЕРІ	318
57.	Р.Т. Дускенов, Г. М. Рахимова СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПЛАНОВО-ВЫСОТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ПОДКРАНОВЫХ ПУТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННЫХ ТАХЕОМЕТРОВ	323
58.	А. Ержанұлы, В.Ю. Чернавин ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСИЛЕНИЯ СЛАБЫХ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТОВ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ	329
59.	А.А. Еркинбекова, М.А.Рахимов КРИТЕРИИ, ПОКАЗАТЕЛИ И ПАРАМЕТРЫ ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	335
60.	А.Б. Еrsaинова, А.С. Солдун, А.Г. Гольцев АНАЛИЗ И МЕТОДОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ КОНТРОЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА	340
61.	А.А. Жампеисова, А.Т. Байдилдина ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	346

	ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СОЛНЕЧНЫМИ ПАНЕЛЯМИ	
62.	Р.Е. Жанбосинов, Н.В. Прохоренкова ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА	350
63.	А.Е.Заманбекова, В.П. Колпакова, Ю.Н. Еремеева ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ХЛОРИДСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД	354
64.	К.З. Заманбеков, А.М. Акаев АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛА ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГИИ НА БАЗЕ КАМПУСА ПРОСТОР С ПРИМЕНЕНИЕМ АНЕМОМЕТРА	359
65.	С.И. Застрожина, Т.Д. Мукин ОСНОВНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕАТРОВ АКРОПОЛЯ	364
66.	Д.Ибрагимова, А.Шевченко, А.Е. Буханцева АРХЕТИПЫ КУЛЬТУРЫ: ЭТНИЧЕСКИЕ МОТИВЫ В СОВРЕМЕННЫХ ИНТЕРЬЕРАХ	370
67.	Д.Ибрагимова, А.Шевченко, А.Е. Буханцева ОТ ТРАДИЦИИ К СОВРЕМЕННОСТИ: ЭТНОИДЕНТИЧНЫЕ ПОДХОДЫ В СОВРЕМЕННОМ АРХИТЕКТУРНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ	375
68.	Т.А. Кабышев, Н.К. Ердыбаева ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ИССЛЕДОВАНИИ ВЛИЯНИЯ СНИЖЕНИЯ ЗОЛЬНОСТИ И СОДЕРЖАНИЯ СЕРЫ В УГЛЕ НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКУЮ И ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК	380
69.	А.К. Капасов, Н.В. Прохоренкова ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ	388
70.	С.Б. Карайдаров, А.Т. Байдилдина ИНДУСТРИЯ 5.0: ВНЕДРЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ И ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ НА ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛЯХ КАЗАХСТАНА	393
71.	А.А.Кунапьянова, Е.Б.Бутаков, А.Т.Байдилдина, О.М.Талипов ӘР ТҮРЛІ МЕТАМОРФИЗМ ДӘРЕЖЕСІНДЕГІ КӨМІРДІҢ ҚҰЙЫНДЫ ЖАНАРҒЫДАҒЫ ЖАНУ ҮРДІСІНЕ ӨСЕРІН ЗЕРТТЕУ	399
72.	Д.А. Қайдарбеков, А.Т. Байдилдина ОБЗОР МЕТОДОВ РАСТОПКИ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОВ И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ФАКЕЛЬНОГО СЖИГАНИЯ	404
73.	Ә.Д. Қайырбеков ОБЗОР МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ	409
74.	Қ.Қ. Қасенова, А.Е. Қасымов, Б.М. Абдеев ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОСЮРФЕЙСИНГА ПРИ УСТРОЙСТВЕ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН	415
75.	А.З Кәкімбай, А.В.Хапин СПОСОБЫ УКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ДЛЯ ФУНДАМЕНТОВ НА ВОДОНАСЫЩЕННЫХ И ПРОСАДОЧНЫХ ГРУНТАХ	418
76.	О.А. Кудайбергенов, Б.М. Абдеев ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА РАБОТЫ КАРКАСА ПРОМЫШЛЕННОГО ЗДАНИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НАГРУЗОК	423

77.	Е.У.Курмангалиев, Б.Е. Махиев ОПАСНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ ЗДАНИЙ СКЛАДОВ ЯДОВИТЫХ ВЕЩЕСТВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МАСШТАБОВ ЗАРАЖЕНИЯ МЕСТНОСТИ	427
78.	А.Р. Құмарбеков, А.Т. Байдилдина ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ЗАПАЛЬНО-ЗАЖИГАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ КАТЛОАГРЕГАТОВ	432
79.	Е.Н.Литвиненко, М.А.Рахимов СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЙ	438
80.	М.В. Локотош, А.Г. Гольцев ТЕПЛОВИЗИОННОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ КАК МЕТОД ОЦЕНКИ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ	444
81.	А.Б. Мадиева, Н.К. Ердыбаева ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО СНИЖЕНИЮ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТЯХ 110-500КВ ВОСТОЧНОГО РЕГИОНА КАЗАХСТАНА	450
82.	Г.Қ. Мамырбекова ЕРТІС ӨЗЕНІНІҢ ТҮПТІК ШӨГІНДІЛЕРІНДЕГІ АУЫР МЕТАЛДАР МӨЛШЕРІНЕ ҮЛБІ САЛАСЫНЫҢ ӨСЕРІ	455
83.	М.Қ. Манышев ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОТОЧНОЙ 3D-АНЕМОМЕТРИИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В КОНТЕКСТЕ СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ИИ	460
84.	Д.А. Маратова, А.С. Тоқтарбек, В.П.Колпакова, Ю.Н. Еремеева ЗАВИСИМОСТЬ КАЗАХСТАНА ОТ ТРАНСГРАНИЧНЫХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ И ПРОБЛЕМА ДЕФИЦИТА ВОДЫ	464
85.	А.Н. Масанова, Н.В. Прохоренкова СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ СЧЕТЧИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ОТКЛОНЕНИЯХ НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ	470
86.	С.В. Мухин, В.Ю. Чернавин ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НЕСЪЁМНОЙ ОПАЛУБКИ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ СТЕН ЗДАНИЙ	475
87.	А.Е. Мұрат, А.Г.Гольцев ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПОДВАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЗДАНИЯ НА ПРИМЕРЕ СТРОЯЩЕГОСЯ МНОГОКВАРТИРНОГО ЖИЛОГО ДОМА ПО АДРЕСУ Г. СЕМЕЙ, УЛ. КАРАГАЙЛЫ 74, БЛОК 13	481
88.	А.А Мұқатаева, А.Т Байдилдина ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ПОДСТАНЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ SIEMENS SPECTRUM POWER	487
89.	А.Т. Мұнарбекова, Т.А.Иноземцева СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЗЕЛЕНЕНИЯ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ И ИХ АДАПТАЦИЯ К КЛИМАТИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ КАЗАХСТАНА	491
90.	З.Ж. Наурызбаева ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ	497
91.	М.Нұржанұлы, Ж.К.Ракижанова ЖОЛ ҚҰРЫЛЫСЫНДА МЕТАЛЛУРГИЯЛЫҚ ҚАЛДЫҚ-МЫС ҚОЖЫН ПАЙДАЛАҢУ	502
92.	С.Е. Нұрмұхамбетов, А.М. Акаев РОЛЬ МЕТЕОМАЧТЫ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ	506
93.	Б.Е. Нұрмұхамет, А.М. Акаев СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ДЫМОСОСОВ УСТЬ-КАМЕНОГОРСКОЙ ТЭЦ	511

94.	А.Е. Омартаева ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ ТРУБОПРОВОДНЫХ ЭСТАКАД В СТРОИТЕЛЬСТВЕ, АРХИТЕКТУРЕ И ЭНЕРГЕТИКЕ	517
95.	Б.Е. Омерзак, А.Т. Байдилдина ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК	523
96.	Г.А. Оразбаев, А.Е. Қасымов, Б.М. Абдеев УЛУЧШЕНИЕ СВОЙСТВ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДИФИКАТОРА «ЭЛАДРОМ»	527
97.	О.В. Парубчишин, А.В. Хапин ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗДАНИЯ С РАЗРАБОТКОЙ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УСИЛЕНИЮ	531
98.	Б.Б.Пернебек ҚҰРЫЛЫС АЛАҢЫНДАҒЫ ҚАУІПСІЗДІКТІ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУДІҢ КИБЕРФИЗИКАЛЫҚ ҮЙЛЕСТІРУ ЖҮЙЕСІ	535
99.	А.А. Правдивцев, А.Е. Қасымов, Б.М. Абдеев УСТРОЙСТВО ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ «SUPERPAVE»	540
100.	А.Раимбекова, Б.Е.Махиев ВЛАЖНОСТЬ ГРУНТА КАК ФАКТОР, ВЛИЯЮЩИЙ НА СОСТОЯНИЕ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ	544
101.	Н.М. Сагадайева, А.Р. Булатова АЗАМАТТЫҚ ЖӘНЕ ӨНЕРКӘСІПТІК ҒИМАРАТТАРДЫ ЖОБАЛАУДА ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЕКТТІ ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, BIM-ТЕХНОЛОГИЯЛАРДЫ ПАЙДАЛАНУ	549
102.	Р.С. Садуакасов, Д.С. Елеманов ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХИМИЧЕСКИХ И МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК	555
103.	А.А. Салбанов, П.А. Кропачев ОСОБЕННОСТИ АДМИНИСТРАТИВНЫХ ЗДАНИЙ КАК ОБЪЕКТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ	560
104.	Г.Б.Сарсекенова, Д.К. Аноп СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЛАНИРОВОЧНЫХ И АРХИТЕКТУРНЫХ РЕШЕНИЙ ШКОЛЬНЫХ ЗДАНИЙ В КАЗАХСТАНЕ И ВЕЛИКОБРИТАНИИ	565
105.	И.Д. Семенов, Б.Е. Махиев ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЗДАНИЯ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ШАРОПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА	570
106.	А.С.Солдун, А.Б. Ерсайнова, А.Г.Гольцев ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬНО-МОНТАЖНЫХ РАБОТ	575
107.	Д.Слесаренко, Е.А.Феоктистова, Т.М.Борисова ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВЕННОЙ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ПОЖИЛЫХ ГРАЖДАН: КЕЙС УЛИЦЫ БУРОВА ГОРОДА УСТЬ-КАМЕНОГОРСКА	581
108.	Н.А.Смоленцев, А.Т. Байдилдина ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК НА КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ В ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕТЯХ	587
109.	Н.В. Спасов, А.Т. Байдилдина ВЛИЯНИЕ НА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ СИСТЕМ ОВИК ЗА СЧЕТ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОМОЩЬЮ VSD ТЕХНОЛОГИЙ	591

110.	М.С.Татенов, М.А.Рахимов БЕСТРАНШЕЙНАЯ ПРОКЛАДКА ИНЖЕНЕРНЫХ КОММУНИКАЦИЙ В УСЛОВИЯХ МЕГАПОЛИСА	596
111.	Қ.Ф.Төлегенова, Б.М.Абдеев ПРОБЛЕМЫ ЗАВЕРШЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И РЕКОНСТРУКЦИИ НЕДОСТРОЕННОГО ЖИЛОГО ДОМА	599
112.	Ф.А.Тургумбаев, М.А.Рахимов МОНИТОРИНГ УСТОЙЧИВОСТИ УНИКАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ	604
113.	А.Н.Уалиев, П.А.Кропачев АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ГИДРОИЗОЛЯЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ КАПИТАЛЬНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ	608
114.	А.Уркумбаева, Е.А.Феоктистова, Т.М.Борисова, А.Уркумбаева ПЕШЕХОДНАЯ ДОСТУПНОСТЬ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ШКОЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ КАК ФАКТОР УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЖИЛЫХ РАЙОНОВ В ЛЕВОБЕРЕЖНОЙ ЧАСТИ Г. УСТЬ-КАМЕНОГОРСКА	614
115.	А.Уркумбаева, Е.А.Феоктистова, Т.М.Борисова, А.Уркумбаева КОНЦЕПЦИЯ «ВЕЧНОГО ГОРОДА» В КОНТЕКСТЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УРБАНИСТИЧЕСКИХ ТРАЕКТОРИЙ ИСТОРИЧЕСКИХ ГОРОДОВ	620
116.	О.А.Утепов, Д.С.Елеманов МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ НАДЕЖНОСТИ	626
117.	В.К. Фартунов, А.Г.Гольцев ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОТИВОКОРРОЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ	630
118.	Н.Г. Хасанов, Д.К. Аноп ОЦЕНКА СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЯ ДЕПО И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СЕЙСМОУСИЛЕНИЮ	635
119.	А.Е. Хрисаненков, Б.Е. Махиев ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЯ ГАРАЖА С УЧЁТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И РАЗРАБОТКА МЕР ПО ЕГО ВОССТАНОВЛЕНИЮ	640
120.	Д.А.Хуснутдинов, О.В.Руденко ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ РАЗРАБОТКЕ НАДСТРОЙКИ ЗДАНИЯ В СЕЙСМООПАСНОМ РАЙОНЕ	645
121.	Е.М.Шаихов, Б.Е.Махиев РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗДАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛЁГКИХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ	650
122.	Е.М. Шерубаев, Д.К. Аноп ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: СТРАТЕГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ	654
123.	Д.В. Широков, С.Б. Анапьянова АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРОЙ ПЛОТИНЫ БУХТАРМИНСКОЙ ГЭС	657
124.	А.В.Штефан, С.В.Комлев МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АРХИТЕКТУРНОГО ПРОСТРАНСТВА ПРИРЕЧНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ГОРОДОВ ПРИИРТЫШЬЯ	661
125.	И. А. Шукин ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ИНВЕСТИЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ	668

Научное издание

**ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И ИННОВАЦИИ:
НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ БУДУЩЕГО**

Материалы XII Международной научно-технической конференции
студентов, магистрантов, докторантов и молодых ученых,
посвященной году цифровизации и искусственного интеллекта
(ВКТУ, 9, 10 апреля 2026 г.)

Часть IV

Сборник издан методом прямого копирования авторских статей
Ответственный за выпуск *О.Н. Николаенко*
Редактор *С.С. Мамыраздыкова*

Подписано в печать 20.04.2026. Формат 60х84/16.
Печать ризографическая. Бумага офсетная.
Усл.печ.л. 39,64. Уч.-изд.л. 39,69.
Тираж 20. Заказ № 153-2026.
Цена договорная.

Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева
070004, г. Усть-Каменогорск, ул. Протозанова, 69.