



УДК 620.2

**Б.Н. Азаматов**

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

**А.Е. Тусупжанов, Б.Д. Захитов**

Восточно-Казахстанский государственный университет им. С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск

#### ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ Fe-Cr-Ni и Fe-Mn НА ПОДЛОЖКЕ ИЗ АМГ-6

Сплавы АМг имеют более высокие механические свойства. В качестве основного легирующего элемента содержат магний (от 2 до 6,8%) и марганец (от 0,15 до 0,8%) для разных марок. Структура сплавов состоит из зерен твердого раствора магния в алюминии. Дополнительное легирование ванадием и особенно титана совместно с бериллием (АМг-6: 0,02-0,1% титана и 0,0001-0,005% бериллия) значительно повышает прочность. Так, например в отожженном состоянии предел прочности сплава АМг-6 - 32кГ/мм<sup>2</sup> [1].

Сплав АМг-6, относящийся к системе Al-Mg, обладающий повышенной коррозионной стойкостью в различных средах и хорошей свариваемостью, имеет достаточно высокие пластические и удельные прочностные характеристики, что предопределило его применение в авиастроении, судостроении, автомобилестроении, а также в ракетостроении [2-3]. Несмотря на довольно значительное увеличение растворимости магния в алюминии при повышении температуры, упрочнение при закалке сплава АМг-6 весьма незначительно, поэтому такой сплав, как и другие магналии, относят к термически неупрочняемым [4-5].

В настоящее время АМг-6 сплавы рассматриваются как перспективные конструкционные материалы для гражданского авиастроения, ввиду их высокой прочности, пластичности, а также хорошей свариваемости и высокой коррозионной стойкости [6].

Обычно в процессе многочисленных опытов подбирают оптимальные обжатия для каждого прохода при соответствующей суммарной деформации, позволяющие получать относительно ровную поверхность под плакирующим слоем сплава АМг-6. Например, при суммарном обжатии в 50% количество проходов достигает 15-26, и частное обжатие в последних проходах составляет не более 2%. С увеличением толщины покрытия алюминиевого сплава при одном и том же суммарном обжатии количество проходов значительно увеличивается. Средние удельные давления, возникающие при выбранных режимах, позволяют вести прокатку листов шириной до 1400 мм и более на существующем оборудовании [7].

Цель научной работы - это получение покрытия на подложке из сплава АМг-6, которая улучшает эксплуатационные характеристики, а также исследование структуры и механических свойств.

В результате реализации проекта будут получены покрытия, улучшающие поверхностные эксплуатационные характеристики сплава АМг-6, исследована микроструктура и фазовое состояние сплава с покрытием. Проведены испытания покрытия на износостойкость и микротвердость. А также сформулированы предложения по использованию сплава АМг-6 с покрытием в производстве.

В качестве подложки для напыления был выбран сплав АМг-6 промышленного изготовления.

Химический состав: основа - Al - 91,1-93,68%, Fe - 0,4%, Si - 0,4%, Mn - 0,5-0,8%, Ti - 0,02-0,1%, Cu - 0,1%, Mg - 5,8-6,8%, Zn - 0,2%.

В настоящей работе в качестве основных методов исследования были использованы:

- механические испытания образцов на микротвердость, износостойкость, исследование микроструктуры, исследование коррозионной стойкости образцов, испытания их на одноосное растяжение при комнатных и повышенных температурах с измерением условного предела текучести, прочности и пластичности;

- изучение структуры с помощью световой и электронной микроскопии, рентгено-дифрактометрический фазовый анализ, а также микроанализ химического состава образцов на растровом электронном микроскопе.

С целью увеличения эксплуатационных характеристик на подложке из сплава АМг-6 нами получены покрытия на основе Fe-Cr-Ni и Fe-Mn. Покрытия получали терморезистивным методом на универсальном вакуумном посту ВУП-5. Толщина покрытий не превышает 10 мкм. В дальнейшем, для увеличения адгезионных характеристик данные образцы были подвергнуты термической обработке при температурах 200, 300 и 400 °С в течение часа. Во время термической обработки в рабочей части поддерживался вакуум форвакуумным насосом. Термическая обработка образцов проводилась со скоростью нагрева 2 градуса в минуту и 8 градуса в минуту (т. е. быстрый и медленный нагрев).

Образцы после термической обработки были подвергнуты испытаниям на микротвердость (рис. 1). Микротвердость исходного сплава АМг-6 была равна  $H_{\mu}=1013$  МПа, проведение отжига образца с покрытием из Fe-Cr-Ni в течение часа при 200 °С увеличивается на 358 МПа и достигает значения  $H_{\mu}=1371$  МПа. Дальнейшее повышение температуры отжига приводит к уменьшению микротвердости. А при медленном нагреве образцов значительного увеличения микротвердости не наблюдается (рис. 1,б).

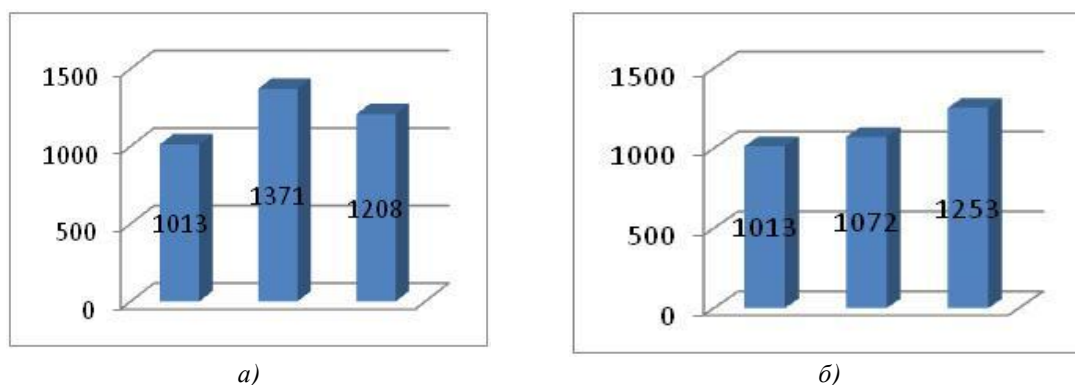


Рисунок 1 - Микротвердость образцов АМг-6 с покрытием из Fe-Cr-Ni и Fe-Mn:  
а - быстрый нагрев; б - медленный нагрев

Образцы с покрытием из Fe-Mn на подложке из сплава АМг-6: наибольшее увеличение микротвердости наблюдалось у образца после термической обработки при 300 °С (1 ч), значение которой было равно  $H_{\mu}=1208$  МПа, что на 195 МПа больше, чем у исходного образца. Микротвердость образцов с быстрым нагревом в зависимости от температуры отжига меняются скачкообразно и при 400 °С понижается до значения  $H_{\mu}=1105$  МПа. А у образцов с медленным нагревом изменяется плавно и при 400 °С достигает значения

$H_{\mu}=1253$  МПа. Поскольку при медленном нагреве расходуется больше энергоресурсов, и показатель микротвердости выше быстрого нагрева только на 51 Мпа, и это увеличение лежит в пределах погрешности, то нами для дальнейшего исследования был выбран образец с покрытием из Fe-Mn и отжигом при 200 °С в течение часа. Образец с наибольшим значением микротвердости был испытан на износостойкость (табл. 1, 2).

Таблица 1

*Условия проведения испытаний на износ при медленном нагреве*

	Общее число оборотов	Диаметр круга вращения индентора, мм	Диаметр шара (индентора), мм	Нагрузка, мН	Среда
АМг-6+Fe-Cr-Ni+отжиг при 200 °С (1 ч)	200	4	3	310	Воздух
АМг-6+Fe-Mn+отжиг при 200 °С (1 ч)	200	4	3	310	Воздух

Таблица 2

*Характеристики износостойкости сплава АМг-6 с покрытием Fe-Cr-Ni, Fe-Mn*

	Диаметр бороздки $d_{ср}$ , мм	Объем материала $V$ , мм <sup>3</sup>	Длина пути шара $L$ , мм	Интенсивность износа $I$ , мм <sup>2</sup>	Интенсивность износа $I$ , м <sup>2</sup>	Износостойкость, м <sup>-2</sup>
Исходный АМг-6	0,76966	$11,74 \cdot 10^{-3}$	1256	$9,34 \cdot 10^{-6}$	$9,34 \cdot 10^{-12}$	$1,06 \cdot 10^{11}$
АМг-6+Fe-Cr-Ni+отжиг при 200 °С (1 ч)	0,30818	$0,29 \cdot 10^{-3}$	1256	$2,36 \cdot 10^{-7}$	$2,36 \cdot 10^{-13}$	$4,24 \cdot 10^{12}$
АМг-6+Fe-Mn+отжиг при 200 °С (1 ч)	0,36282	$0,57 \cdot 10^{-3}$	1256	$4,53 \cdot 10^{-7}$	$4,53 \cdot 10^{-13}$	$2,2 \cdot 10^{12}$

В дальнейшем нами проведены испытания полученных покрытий на износостойкость (табл. 1). Испытание на износостойкость проводили на трибомашине MicronTribo с использованием индентора из сплава WC (табл. 1). Испытания на износостойкость проводили в соответствии с ASTMg99. При проведении испытаний на износостойкость в качестве индентора использовали шар диаметром 3 мм из карбида вольфрама (табл. 1). Шар диаметром 3 мм вращался по поверхности образца, описывая круг диаметром 4 мм, под нагрузкой в 319 мН. Износостойкость исходного сплава была на уровне  $1,06 \cdot 10^{11}$  м<sup>-2</sup>, а у образца с покрытием из Fe-Cr-Ni+отжиг при 200 °С (1 ч) -  $4,24 \cdot 10^{12}$ . При этом износостойкость образца Fe-Mn+отжиг при 200 °С (1 ч) была равна  $2,2 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>, что чуть ниже, чем у образцов с покрытием Fe-Cr-Ni. Таким образом, самый высокий показатель износостойкости был у образца с покрытием из Fe-Cr-Ni+отжиг при 200 °С (1 ч).

Образец с лучшими показателями микротвердости и износостойкости был исследован на изменения микроструктуры и химического состава на растровом электронном микроскопе (рис. 2). Структура границы образца с покрытием из Fe-Mn четкая, заметны трещины в покрытии, что, по нашему мнению, будет плохо сказываться на эксплуатационных характеристиках. Микроструктурные снимки границы раздела покрытия Fe-Cr-Ni с подложкой показывают более ровную границу раздела (рис. 2,а). Микроструктура покрытия

имеет зеренную структуру с размерами частиц порядка 3 мкм.

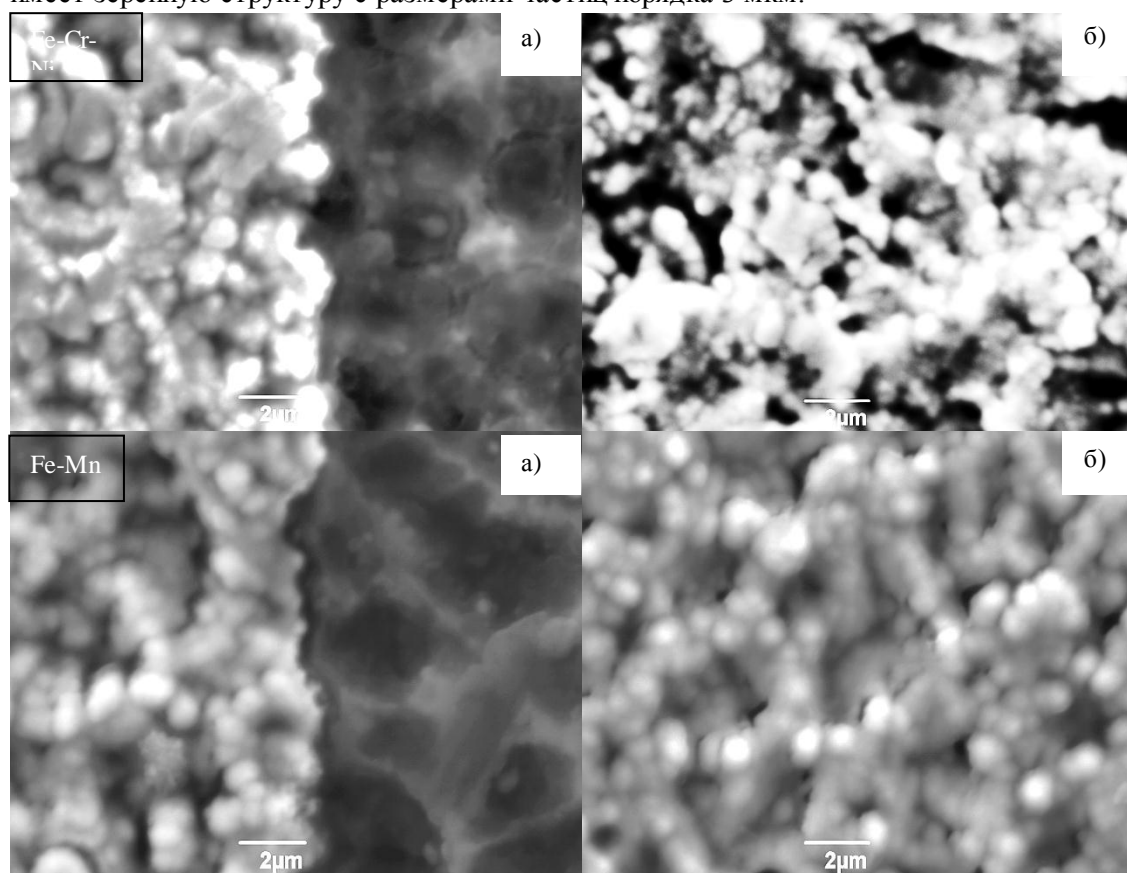


Рисунок 2 - Исследование микроструктуры образца с покрытием из Fe-Cr-Ni и Fe-Mn:  
а) граница раздела: слева – покрытие; справа – подложка; б) структура покрытия

Рентгенографический анализ исследуемых образцов показал следующие результаты. На рис. 3 изображена дифрактограмма рентгенофазового анализа исходного состояния сплава АМг-6 и посленапыленного Fe-Cr-Ni и Fe-Mn (в течение часа сделан отжиг при температуре 200 °С, 300 °С). По линии дифрактограммы можно определить, что у исходного сплава имеется гранецентрированная кубическая решетка. Из линий дифрактограммы напыленного Fe-Cr-Ni видно, что диффузия алюминия из матричного сплава с покрытием слабая и содержит в своей основе хром и никель. Результаты дифрактограммы напыленного Fe-Mn: температура обработки металла с покрытием ниже, чем температура изменения фазы, поэтому фазовый обмен полностью не пройден. Исходя из вышесказанного можно предположить, что в дальнейшем необходимо использовать повышение температуры обработки напыления для увеличения диффузии и адгезии напыляемых слоев.

Исследование изменения химического состава по линии показывает, что основу покрытия составляет железо, а марганец содержится в незначительном количестве. Эти данные подтверждают точечные исследования химического состава. Содержание железа в составе покрытия колеблется в пределах 81,27÷82,47, а марганца - от 0,89 до 4,35. В приграничной зоне содержание элементов покрытия уменьшается и увеличивается содержание элементов подложки. А также обнаружено присутствие ядер кремния, которые

в основном сосредоточены в подложке (рис. 4).

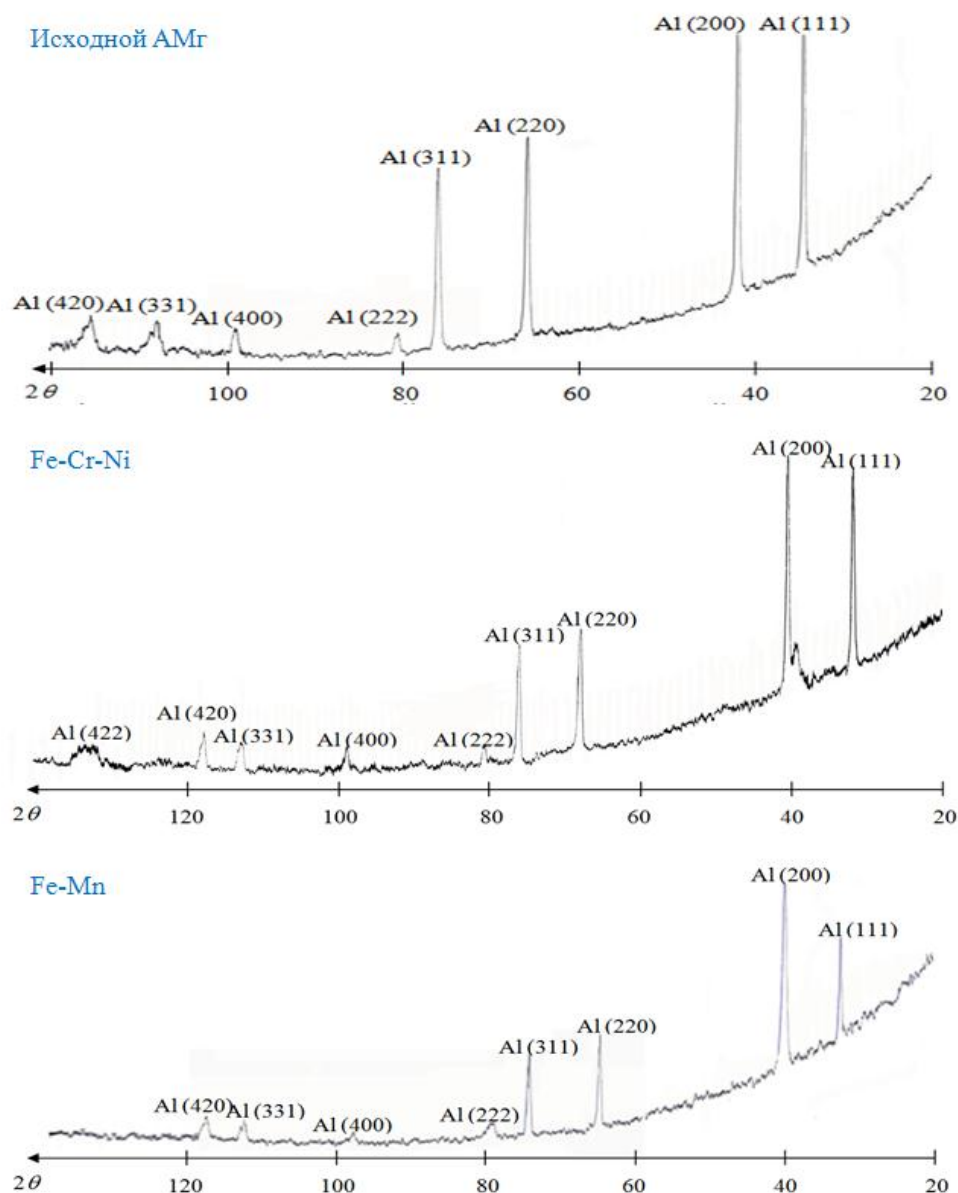


Рисунок 3 - Дифрактограмма сплава алюминий АМг-6 и после напыления Fe-Cr-Ni и Fe-Mn

Точечное исследование химического состава при помощи ЭДС-приставки показывает, что содержанием железа в покрытии находится в интервале 63,53÷75,83%. Хром в покрытии содержится в пределах от 13,35 до 14,69, а содержание никеля - от 7,59 до 9,12. Что характерно, содержание железа, хрома и никеля уменьшается ближе к границе раздела покрытие-подложка. Картирование поверхности также показывает четкую границу раздела между подложкой и покрытием. Также видно, что в покрытии в небольших количествах содержится Ti. А кислород более равномерно распределен по поверхности образца, чем у образца с покрытием из Fe-Ni-Cr, но со стороны покрытия его содержание

больше (рис. 5).

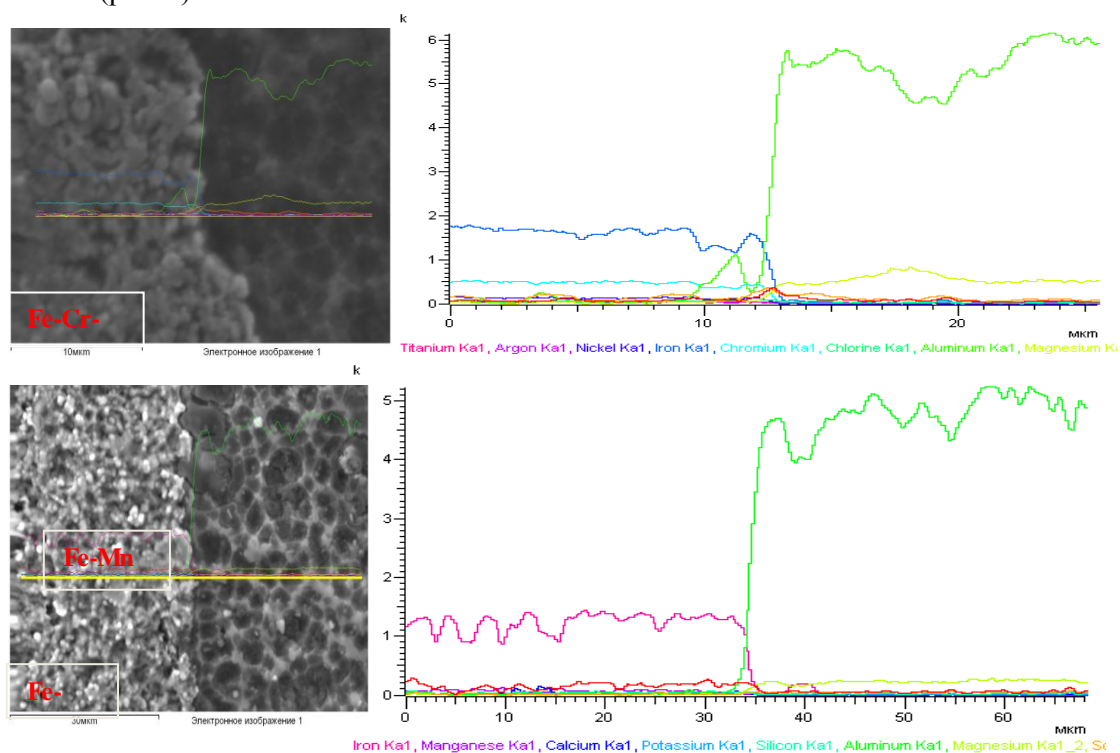


Рисунок 4 - Линейный анализ химического состава поверхности образца с покрытием из Fe-Cr-Ni и Fe-Mn

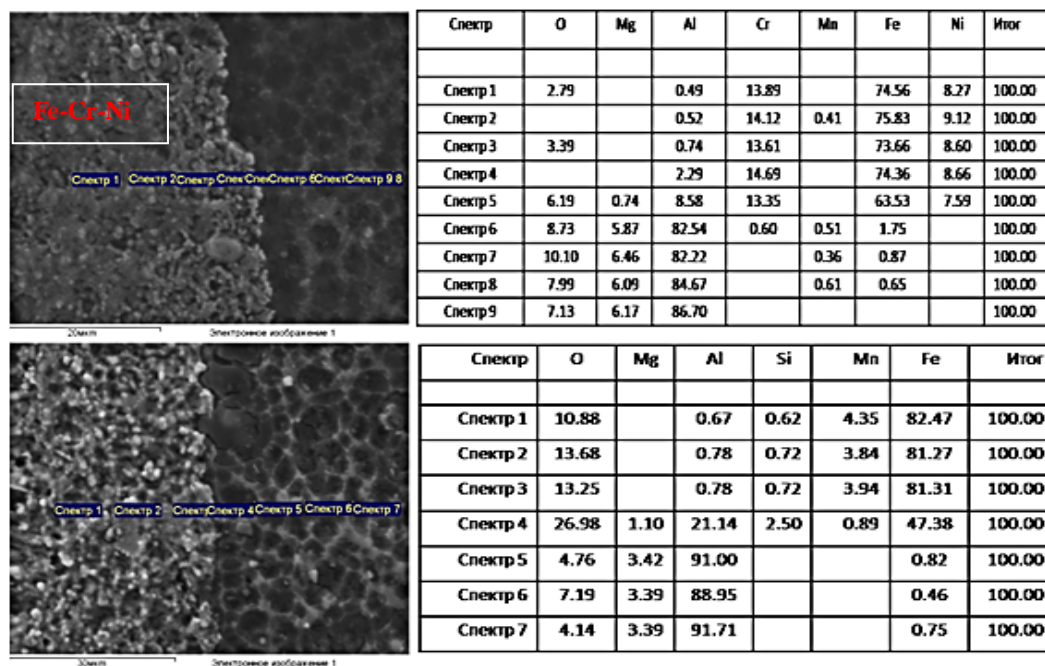


Рисунок 5 - Точечный анализ химического состава поверхности образца  
с покрытием Fe-Cr-Ni и Fe-Mn

Нами были проведены предварительные коррозионные исследования (табл. 3) для построения зависимостей тока от потенциала и тока от времени. На следующем этапе исследований планируется произвести детальный анализ полученных кривых измерений для оценки весовой потери массы при коррозии покрытий в растворе серной кислоты. Кроме того, планируется решить задачу выбора оптимального защитного покрытия, которое позволит уменьшить скорость коррозии материала относительно исходного состояния на начальной стадии испытаний.

Таблица 3

*Коррозионные испытания*

№	Покрытия	S (м <sup>2</sup> )	T (час)	m <sub>0</sub> (кг)	m <sub>1</sub> (кг)	K
1	АМг+Fe-Cr-Ni (200 °C)	90·10 <sup>-6</sup>	0,01	1,0632	1,0615	3,15·10 <sup>-4</sup>
2	АМг+Fe-Mn (300 °C)	56·10 <sup>-6</sup>	0,01	0,8034	0,8033	0,3·10 <sup>-4</sup>

Отличительной особенностью такой поверхности является низкая шероховатость подслоя АМг-6, на который в дальнейшем осаждались пленки различных сплавов. Например, слой Fe-Cr-Ni на матрице сплава АМг-6 - одинаковый по толщине на любом участке покрытия, поскольку по истечении времени исследований покрытие имеет практически равномерную желто-серую окраску. Считаем, что причина наличия областей локального поражения поверхности кроется в структуре подслоя АМг-6.

Нами получены два вида покрытия на сплаве АМг-6. На основе проведенных исследований по изучению свойств покрытия можно сделать следующие выводы:

1. Микротвердость исходного сплава АМг-6 равна  $H_{\mu}=1013$  МПа. После проведения термической обработки образцов с покрытием из Fe-Cr-Ni и Fe-Mn наибольший показатель микротвердости был у образца с покрытием из Fe-Cr-Ni+отжиг при температуре 200 °C (1 ч),  $H_{\mu}=1371$  МПа, что выше микротвердости исходного образца на 26%.

2. Износостойкость исходного образца без покрытия была на уровне  $1,06 \cdot 10^{11}$  м<sup>-2</sup>. Самый высокий показатель износостойкости у образцов с покрытием был достигнут после следующей обработки: покрытие из Fe-Cr-Ni+отжиг при 200 °C (1 ч) -  $4,24 \cdot 10^{12}$  м<sup>-2</sup>. Этот результат выше исходного на 96%.

Исследования химического состава покрытия на основе сплава АМг-6 из Fe-Cr-Ni и Fe-Mn показали следующие результаты:

1. В составе Fe-Cr-Ni покрытия имеется: Fe - 74,56%, Cr - 13,89%, Ni - 8,27%, O - 2,79%.

2. В составе Fe-Mn покрытия имеется: Fe - 82,47%, O - 10,88%, Mn - 4,35%, Si - 0,62.

3. Проведены испытания на коррозионную стойкость образцов с покрытием из Fe-Cr-Ni и Fe-Mn. Наилучший показатель коррозионной стойкости был у покрытия из Fe-Mn+отжиг при 300 °C (1 ч), который достиг  $K=0,3 \cdot 10^{-4}$ , что в 10 раз лучше, чем у образца с покрытием из Fe-Cr-Ni.

## Список литературы

1. Воронов С.М. Магниево-алюминиевые деформируемые сплавы // ВНИТОМАП1. - Машгиз, 1951.
2. Абраимов Н.В. Авиационное материаловедение и технология обработки металлов / Н.В. Абраимов, Ю.С. Елисеев, В.В. Крымков; Под ред. Н.В. Абраимова. - М.: Высш. шк., 1998. - 444 с.

3. Алиева С.Г. Промышленные алюминиевые сплавы: справ. изд. / С.Г. Алиева, М.Б. Альтман, С.М. Амбарцумян и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1984. – 528 с.
4. Новиков И.И. Металловедение: В 2 т.: Основы металловедения / И.И. Новиков, В.С. Золоторевский, В.К. Портной и др.; Под ред. В.С. Золоторевского. – М.: Издательский дом МИСИС, 2009. – Т. 1. – 496 с.
5. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. – М.: МИСИС, 1999. – 416 с.
6. Филатов Ю.А. Деформируемые сплавы на основе системы Al-Mg-Sc // Металл. – 1996. – № 6. – С. 33-36.
7. [http://metallicheckiy-portal.ru/marki\\_metallo/alu/AMg6](http://metallicheckiy-portal.ru/marki_metallo/alu/AMg6).

Получено 11.10.2016

УДК 621.18

**Е.В. Запасный**

ЗАО «Белоцерковская ТЭЦ», г. Киев

**Д.А. Асанов, В.В. Запасный, С.В. Галкин, Н.И. Черепанов**

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

**ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ КОТЛОВ  
С ЦИРКУЛИРУЮЩИМ КИПАЮЩИМ СЛОЕМ ВЗАМЕН УСТАРЕВШИХ  
С ФАКЕЛЬНЫМ СЖИГАНИЕМ УГЛЯ**

В настоящее время в Республике Казахстан на угольных ТЭС в основном используются пылеугольные топки с факельным методом сжигания угля. Данная технология достаточно хорошо отработана на ТЭЦ г. Усть-Каменогорска (ТОО «AES Усть-Каменогорская ТЭЦ» и ТОО «АЭС Согринская ТЭЦ»), которые достигли передовых экологических показателей в Казахстане среди угольных ТЭС. Тем не менее, технические нормативы эмиссий в атмосферу ТЭЦ г. Усть-Каменогорска превышают европейские значения в 2-10 раз. В связи с принятием концепции по переводу национальной экономики на «зеленые» рельсы развития [1], требуется вести поиск более перспективных путей развития отечественной теплоэнергетики.

На ТОО «AES Усть-Каменогорская ТЭЦ» установлены следующие котлоагрегаты высокого давления: четыре котла БКЗ-320-140-Ф каждый производительностью по пару 320 т/ч; один котел ТПЕ-430А (Е-500) паропроизводительностью 500 т/ч. Установленная мощность ТОО «AES Усть-Каменогорская ТЭЦ» составляет: тепловая – 1115,4 МВт/ч, электрическая – 241,5 МВт. Котлы БКЗ 320-140-Ф и ТПЕ-430А имеют следующие конструктивные характеристики: котел одnobарабанный, с естественной циркуляцией, П-образной компоновки, сжигание угля – камерное, в пылевидном состоянии. Котлоагрегаты БКЗ-320-140-Ф введены в эксплуатацию в 1953-1970 годы, а ТПЕ-430А (Е-500) - в 1991 г. В котлах осуществляется факельное сжигание углей казахстанских месторождений: Семипалатинского «Каражыра» и Майкубенского. Их расход составляет 1485 тыс. т/год. Очистка дымовых газов на ТЭЦ осуществляется в батарейных эмульгаторах с эффективностью по золе 99,1% и по SO<sub>2</sub> – 15%. Показатели выбросов вредных веществ с дымовыми газами в атмосферу приведены в табл. 1.

Сравнение концентраций выбросов вредных веществ с дымовыми газами от котлоагрегатов предприятия ТОО «AES УК ТЭЦ» с техническими удельными нормативами



эмиссий для действующих котельных установок в Республике Казахстан [2] показало, что они их не превышают. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 1  
*Выбросы вредных веществ от котлоагрегатов ТОО «АЭС УК ТЭЦ»*

Наименование вещества	Выбросы, т/год
Оксиды азота	4 327,445
Диоксид серы	8 688,724
Оксид углерода	170,669
Пыль золы	2 146,868
Итого по предприятию:	15 333,706

Таблица 2  
*Сравнение выбросов вредных веществ на ТОО «АЭС УК ТЭЦ»  
с техническими нормативами (для действующих котельных установок)*

Загрязняющее вещество	Массовая концентрация вредных веществ в сухих дымовых газах при нормальных условиях и $\alpha = 1,4$			
	Котлы БКЗ-320-140		Котел ТПЕ-430А (Е-500)	
	фактические значения, мг/м <sup>3</sup> (н.у.)	технический регламент, мг/м <sup>3</sup> (н.у.)	фактические значения, мг/м <sup>3</sup> (н.у.)	технический регламент, мг/м <sup>3</sup> (н.у.)
Оксиды азота	504	600 * 680**	744	600* 850**
Диоксид серы	818	2000	780	2000
Пыль золы	283	700-900***	260	600-1200***
Оксид углерода	12	400	0	400
Примечания: * - для бурого угля; ** - для каменного угля; *** - в зависимости от зольности угля				

На ТОО «АЭС Согринская ТЭЦ» в эксплуатации находятся три котла типа БКЗ-160-100Фб. Их основные конструктивные характеристики: котел однотрубный, с естественной циркуляцией, П-образной компоновки, сжигание топлива камерное, в пылевидном состоянии. Котлы введены в эксплуатацию с 1961 по 1987 годы. Установленная мощность ТОО «АЭС Согринская ТЭЦ» составляет: электрическая – 75 МВт; тепловая – 269,8 МВт/ч. Годовой расход угля составляет 345,8 тыс. т. Величины валовых выбросов вредных веществ в атмосферу от котлоагрегатов предприятия ТОО «АЭС СТЭЦ» представлены в табл. 3.

Таблица 3  
*Выбросы вредных веществ от котлоагрегатов ТОО «АЭС СТЭЦ»*

Наименование вещества	Выбросы, т/год
Оксиды азота	815,0
Диоксид серы	1486,923
Оксид углерода	3,496
Пыль золы	418,875
Итого по предприятию:	2724,292

Сравнение концентраций выбросов вредных веществ с дымовыми газами котлоагрегатов предприятия ТОО «АЭС СТЭЦ» с техническими удельными нормативами эмиссий, предусмотренными техническим регламентом для действующих котельных установок, приведено в табл. 4.

Таблица 4

*Сравнение выбросов вредных веществ на ТОО «АЭС СТЭЦ» с техническими нормативами (для реконструируемых котельных установок)*

Загрязняющее вещество	Массовая концентрация вредных веществ в сухих дымовых газах при нормальных условиях и $\alpha = 1,4$	
	фактические значения, мг/м <sup>3</sup> (н.у.)	технический регламент, мг/м <sup>3</sup> (н.у.)
Оксиды азота	471	535
Диоксид серы	859	2500
Пыль золы	242	670-870
Оксид углерода	2	400

Из представленных выше сведений следует, что концентрации загрязняющих веществ в дымовых газах котлов ТОО «АЭС УК ТЭЦ» и ТОО «АЭС СТЭЦ» соответствуют требованиям казахстанского технического регламента для котельных установок ТЭС [2]. Это было достигнуто благодаря планомерному внедрению доступных технологий снижения выбросов загрязняющих веществ. Снижение выбросов в атмосферу оксидов азота на ТЭЦ г. Усть-Каменогорска производится технологическими методами [3]. Была внедрена система подачи угольной пыли высокой концентрации под давлением с увеличением ее концентрации с традиционной 0,3-0,9 кг на кг первичного воздуха до 15-20 кг/кг. Это позволило уменьшить выбросы оксидов азота с 0,6-0,8 до 0,43-0,5 г/м<sup>3</sup> (н.у.). Очистка дымовых газов на ТЭЦ от котлов раньше производилась в скрубберах «Вентури», с эффективностью по золе 98% и по SO<sub>2</sub> – 3,1%. После их замены на батарейные эмульгаторы II поколения эффективность очистки повысилась до 99,1% и 15% соответственно.

В аспекте перехода Республики Казахстан в число 30 наиболее конкурентоспособных стран мира к 2050 году необходимо достичь мировых стандартов по выбросам загрязняющих веществ в атмосферу от ТЭС. Однако, несмотря на внедрение целого ряда режимных и конструктивных мероприятий на эксплуатируемых котлоагрегатах, достичь данных показателей не представляется возможным, так как они не соответствуют передовым промышленным технологиям, по которым разработаны новые стандарты. Значения предельных концентраций загрязняющих веществ в дымовых газах для угольных котельных установок в соответствии с директивой Евросоюза представлены в табл. 5 [4].

Таблица 5

*Значения предельных концентраций загрязняющих веществ в дымовых газах для котельных установок по Директиве 2010/75/ЕС*

Наименование загрязняющего вещества	Предельная концентрация (мг/м <sup>3</sup> ) при тепловой мощности котельной установки, МВт	
	100-300	> 300
Диоксид серы	250	200
Окислы азота	200	200
Твердые частицы	25	20

Итак, используемые в г. Усть-Каменогорске пылеугольные котлоагрегаты не оснащены системами серо- и азотоочистки, строительство которых в условиях плотной компоновки ТЭЦ затруднительно, а в ряде случаев невозможно. Строительство новых систем серо- и азотоочистки для выработавших свой ресурс энергоблоков нецелесообразно, и необходимо заменить их на энергоэффективные и маневренные, сжигающие местные угли с обеспечением экологических характеристик, удовлетворяющих нормативам, без строительства дорогостоящих систем серо- и азотоочистки. Для достижения указанных выше требований в результате поиска экологически чистых технологий сжигания различного качества твердых топлив рекомендуется технология сжигания угля в циркулирующем кипящем слое (ЦКС) при атмосферном давлении. В настоящее время фирма «B&W» («Бабкок и Вилкокс», США) разработала и активно внедряет на рынках США, Бразилии, Индии, Турции и ряда других стран четвертое поколение котлов с кипящим слоем ЦКС «B&W» [5]. Запроектированные Харьковским ЦКБ «Энергопрогресс» (по лицензии компании «B&W») и изготовленные ОАО «Харьковский котельно-механический завод» котлоагрегаты с ЦКС поставляются в страны СНГ.

Испытания по сжиганию угля марки АШ зольностью до 40% на опытно-промышленной установке по технологии ЦКС «B&W» (табл. 6) показали, что ее эффективность в диапазоне нагрузок от 50 до 100% достаточно высокая: потери с механическим недожогом составляют не более 4%, выбросы оксидов азота соответствуют стандартам ЕС, имеется возможность подачи в топку известняка для снижения выбросов диоксида серы.

Таблица 6  
Результаты испытаний на установке ЦКС («Babcock & Wilcox»)

Параметр	Режим полной нагрузки	
	Испытание 1	Испытание 2
Состав угля, %:		
- влага	3,68	
- летучие	5,38	
- связанный углерод	49,84	
- зола	41,1	
- сера	2,68	
Высшая теплотворная способность, МДж/кг	20,476	
Температура в нижней части топки, °С	879,4	882,8
Избыточный воздух, %	24	38
Соотношение первичного воздуха к общему воздуху, кг/кг	0,308	0,295
Эффективность сжигания углерода, %	96,5	96,1
Эффективность нейтрализации серы известняком, %	88	88
Выбросы, г/м <sup>3</sup> (н.у.):		
- CO	0,26	0,29
- SO <sub>2</sub>	1,0	0,96
- NO <sub>x</sub>	0,34	0,25

Отказ от громоздких металлоемких выносных циклонов, требующих качественного обслуживания при эксплуатации, дает технологии «B&W» значительные преимущества по сравнению с другими технологиями ЦКС по габаритам установки и простоте обслуживания. Наличие в контуре котла двухступенчатой системы очистки твердых частиц в швеллеровом сепараторе и батарейном циклоне обеспечивает высокую эффективность

использования твердого топлива. Котлы ЦКС В&W работают при сравнительно высоких плотностях твердых частиц в верхней части топки, по сравнению с некоторыми другими установками ЦКС. Это обеспечивает высокую интенсивность реакции газ – частицы при сжигании, хорошее связывание серы и высокую интенсивность теплопередачи между слоем и поверхностями нагрева топочной камеры.

Уголь и известняк подаются питателями в нижнюю часть топочной камеры (в первичную зону). Количество точек вводов угля и известняка зависят от производительности котла и особенностей используемых топлив. Частицы из батарейного циклона пневмоподачей или по аэрожелобам возвращаются также в нижнюю часть топки. Топочная камера оборудуется установками дренажа слоя через окна в подовом экране с последующим охлаждением частиц.

Котел оборудуется канальными горелками для нагрева воздуха при пусках и надслойными горелками, работающими на природном газе или мазуте, которые используются для дальнейшего подогрева слоя и розжига основного топлива. Колпачки, подающие воздух, расположены в поду топки и предназначены для равномерного распределения первичного воздуха. Остальная часть воздуха подается в систему дожигания через специальные сопла с целью обеспечения ступенчатого сжигания. Для защиты труб от эрозии и обеспечения заданной температуры слоя все поверхности нижней части топки футерованы специальным составом. Внутри топочной камеры при необходимости размещаются испарительные и перегревательные панели пароводяного тракта котла.

Одна из основных идей, реализуемых в котлах с ЦКС, состоит в том, что температура кипящего слоя оказывается невысокой – на уровне 820-930 °С. При таких температурах образование термических окислов азота значительно снижается. Заметим, что в факельных пылеугольных топках температура горения достигает 2000 °С, обуславливая интенсивное окисление атмосферного азота [6]. Снижение выбросов в атмосферу оксидов азота (NO<sub>x</sub>) достигается в результате низкотемпературного сжигания топлива, равномерного распределения уровня температур в топочном пространстве и ступенчатой подачи воздуха, что позволяет получить величину концентрации NO<sub>x</sub> в дымовых газах не более 200 мг/м<sup>3</sup> (н.у.).

Добавка в топку вместе с углем дешевого сорбента – известняка при совместном их сжигании с оптимальной температурой 850-870 °С приводит к внутритопочному связыванию оксидов серы (SO<sub>2</sub>) с эффективностью до 95%. Поглощение SO<sub>2</sub> за счет известняка в топке происходит с образованием сульфата кальция, который вместе со шлаком и золой выводится из кипящего слоя в бункер котла.

«Babcock&Wilcox» уже внедрил на ТЭС 27 котлов ЦКС, работающих на каменных и бурых углях, отходах углеобогащения, древесных отходах, коксовых остатках. Успешная эксплуатация котлов ЦКС обуславливается в основном устройством топки ЦКС и технологией сжигания. Большая часть твердых частиц в котлах ЦКС В&W, рециркулирует внутри топки. Только незначительная часть твердых частиц улавливается в батарейном циклоне, расположенном за конвективной шахтой котла, и частично возвращается в нижнюю часть топки. Внутритопочная и внешняя рециркуляция частиц обеспечивают интенсивное их перемешивание, увеличение времени нахождения частиц в топке, более полное сжигание топлива и использование известняка.

Совместно с применением современных высокоэффективных электрофильтров или рукавных фильтров энергоблоки с котлами ЦКС обеспечивают экологические показатели, удовлетворяющие мировым стандартам по выбросам вредных веществ в атмосферу.

Преимущества использования предприятиями котлов ЦКС по технологии «Babcock &

Wilcox»:

1. Применение технологии ЦКС на электростанциях и котельных позволит эффективно сжигать с высокой экономичностью широкий выбор твердого топлива с низкими требованиями к его качеству, организовать надежную работу котельного оборудования при достаточно гибкой организации регулирования топочного процесса.

2. Установка швеллеркового сепаратора прямо на выходе из топки обеспечивает наибольшую, по сравнению с другими технологиями, внутритопочную циркуляцию сжигаемого топлива с повышением теплообмена в верхней ее части. При этом степень связывания оксидов серы с вводимым в топку известняком больше, чем при использовании других технологий ЦКС.

3. Обеспечивается надежная работа котла в диапазоне нагрузок 30-100% в виду малых скоростей дымовых газов, не обуславливающих износ швеллеркового сепаратора частицами пыли золы.

4. Котел ВР-ЦКС «B&W» имеет минимальное количество внутренней футеровки за счет применения швеллеркового сепаратора и батарейного циклона для улавливания твердых частиц. Именно это отличие от других технологий ЦКС с выносными горячими и охлаждаемыми циклонами, встроенными циклонами (типа компакт), обеспечивает высокий коэффициент использования поверхностей нагрева котла и наиболее короткое время его пуска и остановки. Например, котел ЦКС ст. № 4 Старобешевской ТЭС (технология Лурги) из холодного состояния пускается в течение 26 часов, а котел ВР-ЦКС «B&W» пускается в течение 10 часов.

5. Двухступенчатая система улавливания пыли позволяет иметь высокую степень улавливания твердых частиц в швеллерковом сепараторе ударного типа и батарейном циклоне без громоздкого и сложного внешнего контура циркуляции твердых частиц. Это обеспечивает снижение нагрузки на электрофильтр или рукавный фильтр и возможность изготавливать их с меньшими габаритами или получить более высокую эффективность очистки дымовых газов от твердых частиц при сохранении размеров.

6. В отличие от других общепризнанных коммерческих технологий ЦКС, котлы ВР-ЦКС «B&W» отличаются наименьшими габаритами, что позволяет выполнить их установку в существующих станционных ячейках при перевооружении действующих ТЭС.

7. Снижение стоимости строительства технологии ЦКС «B&W» за счет исключения дорогостоящих узлов азото- и сероочистки с обеспечением снижения выбросов окислов азота до  $200 \text{ мг/м}^3$  за счет низкотемпературного сжигания топлива и связывания серы известняком до 90-95% (до  $200 \text{ мг/м}^3$ ).

8. Стоимость проектируемого для Белоцерковской ТЭЦ (Украина) котла ЦКС производительностью 500 т/ч с электрофильтром составляет около 88 млн USD, т.е. 260 USD/кВт. Такая стоимость является весьма приемлемой, т.к. в настоящее время наиболее дешевые котлы с ЦКС производят в Китае с удельными капитальными затратами на все оборудование около 300-350 USD/кВт, в Польше – 420 USD/кВт [7]. Котлы ЦКС производства «B&W» имеют меньшую стоимость в сравнении с альтернативами других компаний (ALSTOM, Foster Wheeler и т.д.) из-за конструктивных особенностей, связанных, в первую очередь, с меньшей металлоемкостью.

Применение котлоагрегатов типа ВР-ЦКС по технологии «B&W» позволяет эффективно использовать различные угли, в том числе рядовые, отходы углеобогащения и биотопливо. Данная технология обеспечивает наиболее высокие показатели по эффективно-

сти выгорания топлива, при этом достигаются высокие показатели по связыванию окислов серы в топке и низкое образование оксидов азота. Конструкция котлоагрегата надежна, проста в эксплуатации, требует минимального обслуживания. Для условий Казахстана удельные капитальные затраты в 260-300 USD/кВт являются наиболее привлекательными по сравнению с другими производителями, следовательно, более реализуемы.

Список литературы

1. Указ Президента Республики Казахстан. Концепция по переходу Республики Казахстан к «Зеленой экономике»; Утв. 30 мая 2013 года, № 577. – Астана, 2013. – 52 с.
2. Постановление Правительства Республики Казахстан с изменениями и дополнениями от 21.07.2010 г. Технический регламент «Требования к эмиссиям в окружающую среду при сжигании различных видов топлива в котельных установках тепловых электрических станций»; Утв. 14 декабря 2007 года, № 1232.
3. Галкин С.В. Современные технологии снижения выбросов оксидов азота на ТЭЦ / С.В. Галкин, Д.А. Асанов // Вестник КАСУ. – 2013. – № 6. – С. 39-45.
4. Директива 2010/75/ЕС «О промышленных выбросах» (о комплексном предупреждении и контроле загрязнений).
5. Технология котлов циркулирующего кипящего слоя по лицензии компании Babcock & Wilcox. – Филиал Харьковского ЦКБ «Энергопрогресс». – Харьков, 2012 // [http://www.niss.gov.ua/public/File/2012\\_table/Pr10\\_25\\_12\\_2012.pdf](http://www.niss.gov.ua/public/File/2012_table/Pr10_25_12_2012.pdf).
6. Трухний А.Д. Основы современной энергетики: в 2-х т. – Т. 1. – Современная теплоэнергетика. – М.: Изд-во МЭИ, 2008. – 470 с.
7. Рябов Г.В. Технология ЦКС имеет хорошую перспективу // [http://www.ng.ru/ng\\_energiya/2007-06-27/13\\_tech.html](http://www.ng.ru/ng_energiya/2007-06-27/13_tech.html).

Получено 15.12.2016

УДК 629.331.083:004.41

**С.Ж. Кабикенов**

Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда

**А.А. Макенов, А.А. Давыдов**

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

**РЕШЕНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ СРЕДСТВ ОБСЛУЖИВАНИЯ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ**

В целях повышения уровня экономического развития республики необходимо обеспечить интенсивное ускорение общественного производства и эффективную реализацию существующего технического потенциала. При этом особое внимание данная проблема приобретает в условиях значительных капитальных вложений, дефицита трудовых ресурсов и напряженности современной топливно-энергетической ситуации.

Издержки народного хозяйства Республики Казахстан от автомобильного транспорта вдвое превышают суммарные издержки от всех других видов транспорта.

Одним из основных факторов, которые обуславливают высокий уровень технической готовности подвижного состава и эффективности выполнения транспортной работы, является состояние производственно-технической базы транспортных предприятий. Средства обслуживания представляют собой объекты оснащенных технологическим оборудованием рабочих постов транспортных предприятий.

Современный уровень развития автомобильного транспорта республики характеризуется существенным отставанием производственно-технической базы транспортных предприятий от темпов роста парка автотранспортных средств. Например, удельный вес про-

изводственно-технической базы в общей стоимости производственных фондов по Республике Казахстан составляет 32%, что ниже нормативных требований. Обеспеченность производственными площадями для технического обслуживания и текущего ремонта автомобилей составляет 45%. Следует отметить, что износ основных фондов составляет более 65% от их общей стоимости. При этом доля активной части основных фондов (средств механизации) не превышает 8-10%.

Система технического обслуживания и ремонта автомобилей представляет комплексную интегрированную систему взаимосвязанных подсистем, которые отличаются характером и продолжительностью выполняемых работ с целью поддержания подвижного состава в исправном состоянии при минимальных затратах. Недостаточная пропускная способность средств обслуживания и ремонта автомобилей обуславливает большие простои автомобилей, что, в свою очередь, сказывается на эффективности использования подвижного состава автомобильного транспорта. Следовательно, в настоящее время задача оптимизации средств обслуживания и ремонта автомобилей является актуальной задачей. Для ее решения предлагается использовать закономерности систем массового обслуживания и имитационное моделирование.

Для применения имитационного моделирования при проектировании (техническом перевооружении или реконструкции) сервисного предприятия автомобильного транспорта разработана программа «Оптимизация средств обслуживания автомобильного транспорта». Данная программа обеспечивает моделирование работы сервисного предприятия в течение рабочего дня, рассчитывает численные показатели функционирования предприятия (вероятность безотказной работы, среднее число занятых постов обслуживания, средняя длина очереди, среднее время ожидания заявки в очереди, суммарное время обслуживания автомобиля и др.). На основе полученных данных вычисляются экономические показатели функционирования сервисного предприятия в течение года [1-3].

Для разработки программы «Оптимизация средств обслуживания автомобильного транспорта» нами выбран язык программирования Delphi, основу которого составляет язык Object Pascal (объектно-ориентированное расширение стандартного языка Pascal) в силу следующих причин [4]:

1. Delphi обеспечивает визуальное (а, следовательно, и скоростное) построение приложений из программных прототипов.
2. Объектно-ориентированная модель компонент.
3. Система Delphi обладает вполне развитыми возможностями СУБД.

В плане создания приложений различного назначения, в том числе приложений базы данных (БД), возможности Delphi не уступают возможностям специализированных СУБД, а зачастую и превосходят их.

Программирование на языке Delphi позволило нам создать программу с использованием баз данных с возможностью генерации отчетов в виде HTML-страниц, а также подготовить дистрибутив для максимального упрощения установки пользователем и распространения данного продукта.

Для инсталляции программы «Оптимизация средств обслуживания транспортной техники» необходимо запустить файл Setup.exe с диска Optimization, после чего появится окно приветствия и приглашения к установке программы. Далее следует стандартный диалог, который помогает установить программу на компьютер пользователя.

Задачей оптимизации средств обслуживания автомобилей методом статистического моделирования является определение числовых характеристик функционирования сервисного предприятия за один рабочий день. При этом варьируются число постов обслу-

живания  $n$  и число мест ожидания  $m$ . Параметры  $n$  и  $m$  являются одними из исходных данных, которые используются при решении транспортной задачи.

В качестве исходных данных принимаем, что в сервисное предприятие поступает простейший пуассоновский поток требований с плотностью  $\omega$  (авт./час). Считается, что время обслуживания автомобилей распределено по показательному закону и составляет в среднем  $\bar{t}_{обсл.}$  (час/авт.).

Величины  $\omega$  и  $\bar{t}_{обсл.}$  также задаются или определяются путем обработки статистических данных в реальных условиях эксплуатации.

Продолжительность работы сервисного предприятия в течение рабочего дня  $T_{сум}$  (час) также учитывается в исходных данных решения транспортной задачи.

В качестве исходных данных программы оптимизации средств обслуживания автомобилей используются:

- 1) количество дней работы сервисного предприятия в году;
- 2) стоимость 1 Гкал тепла;
- 3) продолжительность рабочей смены;
- 4) средняя температура внутри помещения;
- 5) тариф за 1 кВт·ч электроэнергии;
- 6) часовая тарифная ставка ремонтного рабочего;
- 7) среднее количество рабочих;
- 8) годовой фонд рабочего времени;
- 9) стоимость строительства 1 м<sup>3</sup> одноэтажного здания;
- 10) высота помещения сервисного предприятия;
- 11) площадь, занимаемая транспортом в плане;
- 12) коэффициент плотности расстановки постов;
- 13) стоимость 1 часа простоя транспорта в очереди;
- 14) стоимость 1 часа обслуживания транспорта в сервисном предприятии;
- 15) смета затрат на приобретение и монтаж технологического оборудования сервисного предприятия.

Все исходные данные заносятся в поля главной формы программы (рис. 1). После этого в меню «Смета» необходимо выбрать пункт «Открыть». При этом открывается база данных технологического оборудования сервисного предприятия (рис. 2), в окне которой при необходимости можно отредактировать, добавить или удалить необходимые наименования и количество оборудования [3, 5]. Все вышеперечисленные операции можно выполнить с помощью навигатора, который расположен в нижней части окна.

При заполнении базы данных необходимо обратить внимание на поля «Монтируемое» и «Коэффициент использования». Если оборудование является монтируемым и требует дополнительных затрат на его монтаж, то во всплывающем меню поля «Монтируемое» необходимо выбрать пункт «Да», иначе - «Нет». Поле «Коэффициент использования» необходимо для расчета потребного количества оборудования одной номенклатуры. Например, если коэффициент использования технологического оборудования равен 1, то данное оборудование используется на каждом посту и его потребное количество равно количеству постов предприятия, если 0,5, то необходимо обеспечить наличие одного экземпляра технологического оборудования на 2 поста и т.д. Для выбора технологического оборудования для использования его при проектировании, реконструкции или техническом перевооружении сервисного предприятия необходимо во всплывающем меню поля «Используется» выбрать «Да». По умолчанию выбирается значение «Нет».



Для базы данных технологического оборудования имеется возможность генерации двух видов отчета: 1) по всей базе данных технологического оборудования; 2) по оборудованию, которое используется в проектируемом (реконструируемом) сервисном предприятии.

После выполнения необходимых операций с базой данных и выбора оборудования, которое будет использоваться в сервисном предприятии, необходимо нажать на кнопку «Завершить». Окно сметы будет закрыто, и все изменения будут сохранены в базе данных.

После занесения всех исходных данных в соответствующие поля и редактирования сметы затрат на приобретение и монтаж оборудования необходимо в меню «Файл» выбрать пункт «Создать массивы» либо нажать на кнопку «Создать» на главной форме программы.

При этом с помощью генератора случайных чисел будет создан «статистический материал» в виде массивов времени поступления заявок на обслуживание и времени обслуживания каждой заявки в сервисном предприятии. Статистический материал будет зависеть только от плотности поступления заявок  $\omega$  и среднего времени обслуживания  $\bar{t}_{обсл.}$ . На главной форме будет отражено количество заявок, поступивших в систему в течение рабочего дня. После того, как статистический материал будет создан, необходимо в меню «Файл» выбрать пункт «Рассчитать» либо нажать на кнопку «Рассчитать» на главной форме программы. После чего будут рассчитаны и занесены в базу данных все численные показатели функционирования сервисного предприятия.

В процессе выполнения процедуры, обрабатывающей действие пользователя «Выбор пункта «Рассчитать» меню «Файл» или нажатие на кнопку «Рассчитать», создается 5 массивов данных.

*Массив 1.* Количество элементов массива равно количеству заявок, поступающих на сервисное предприятие в течение рабочего дня. Элементы массива имеют логический тип, учитывают нахождение заявки в процессе обработки и принимают значение True, если заявка принимается системой и начинает обслуживаться.

*Массив 2.* Количество элементов массива равно количеству заявок, поступающих на сервисное предприятие в течение рабочего дня. Элементы массива имеют логический тип, учитывают отказ заявок в обслуживании и принимают значение True, если заявка получает отказ.

*Массив 3.* Количество элементов массива равно сумме количества постов обслуживания и мест ожидания в сервисное предприятие. Элементы массива имеют логический тип, учитывают нахождение системы в определенном состоянии.

*Массив 4.* Количество элементов массива равно сумме количества постов обслуживания и мест ожидания в сервисное предприятие. Элементы массива имеют вещественный тип. В элементах массива ведется подсчет времени нахождения системы в каждом состоянии.

*Массив 5.* Количество элементов массива равно количеству заявок, поступающих на сервисное предприятие в течение рабочего дня. Элементы массива имеют вещественный вид. В элементах массива ведется подсчет времени обслуживания каждой заявки.

После создания массивов происходит присвоение переменным целочисленного и вещественного типов значений свойства Text соответствующих однострочных редакторов Edit.

Далее запускается цикл, который имитирует посекундное функционирование сервис-

ного предприятия. При этом переменная  $t$  меняет свое значение от 0 до  $T_{\text{сум}}$  (в секундах). При совпадении значений элемента массива `arrPotok` со значением переменной  $t$  запускается процедура `Priem`, имитирующая прием заявки на обслуживание. При этом в зависимости от состояния системы происходит: прием заявки на обслуживание, постановка заявки в очередь, отказ заявке в обслуживании.

При этом соответствующие элементы 5 вышеперечисленных массивов принимают соответствующие значения, а также происходит подсчет количества отказов.

Оптимизация средств обслуживания автомобильного транспорта

Файл Счета Результаты Помощь

Исходные данные статистического моделирования

Число постов обслуживания, n

9

Число мест ожидания, m

4

Плотность поступления требований в систему, авт/час

4.1

Среднее время обслуживания автомобилей, час/авт

4.5

Продолжительность работы мастерской в течение рабочего дня, час

17.1

Исходные данные оптимизации экономическим методом

Количество дней работы мастерской в году, дней

305

Стоимость 1 Гкал тепла, тенге

4500

Продолжительность рабочей смены, час

7

Средняя температура внутри помещения, С

20

Тариф за 1 кВт·ч электроэнергии

3.07

Часовая тарифная ставка рабочего, тенге/час

200

I разряда

185

II разряда

170

III разряда

1

Среднее количество рабочих

1

I разряда

1

II разряда

1

III разряда

1

Годовой фонд рабочего времени, час

1840

Стоимость строительства 1 м3 одноэтажного здания, тенге

5500

Высота помещения мастерской, м

6

Площадь, занимаемая автомобилем в плане, м2

9

Коэффициент плотности расстановки постов (6:7 при одностороннем расположении постов, 4:5 при двухстороннем расположении постов)

7

Стоимость 1 часа простоя автомобиля в очереди, тенге

108

Генерация случайных чисел

Создать массивы времени поступления заявок в систему и их выполнения

Создать

Количество заявок, поступивших в систему в течение рабочего дня

78

Результаты расчета

n	m	N заявок	P отказа	M(K)	M(S)	t ожидания	t суммарное	\$ удельные
1	4	63	0.7619	0.994	3.2222	4.703	9.203	10371
2	4	63	0.7619	1.8818	3.0358	5.371	9.871	11283
3	4	63	0.5873	2.8482	2.25	2.81	7.31	5534
4	4	63	0.1587	3.6998	1.6869	1.469	5.969	1870
5	4	63	0.1429	4.6988	1.6512	1.612	6.112	2086
6	4	63	0.1746	5.5309	1.5788	1.653	6.153	2481
7	4	63	0.1587	6.232	1.481	1.74	6.24	2709
8	4	63	0.1111	6.8306	1.127	1.424	5.924	2694
9	4	63	0.3492	7.4494	1.4888	2.283	6.783	4748
1	4	69	0.8261	0.9912	3.8478	6.893	11.393	17930
2	4	69	0.3333	1.9809	2.9161	1.81	6.31	2342
3	4	69	0.2609	2.9579	2.6608	1.805	6.305	2239
4	4	69	0.4328	3.89	2.795	3.059	7.559	4938
5	4	69	0.3043	4.8167	2.6229	2.461	6.961	3275
6	4	69	0.2899	5.6501	2.0555	2.254	6.754	3364
7	4	69	0.2029	6.4191	1.7926	1.983	6.483	3052
1	4	67	0.5224	0.998	3.3646	2.317	6.817	3833
2	4	67	0.4925	1.9686	3.271	2.605	7.105	3888

Рисунок 1 - Основная форма программы «Оптимизация средств обслуживания автомобильного транспорта»

Оборудование мастерской						
Используется	Наименование оборудования	Длина, мм	Ширина, мм	Мощность, кВт	Монтируемое	К использ.
	Моечное оборудование					
Да	Установка для мойки деталей, модель 195M	600	500	1,5	Да	0,1
Да	Установка для мойки мелких деталей, модель M-312M	500	450	1	Нет	0,5
Нет	Установка для мойки двигателей автомобилей (с подогревом воды), модель M-203	450	450	1,5	Да	0,1
Нет	Установка для мойки авто-агрегатов, модель M-216	700	500	2,2	Нет	0,1
	Маслосъемное оборудование					
Да	Фильтрационный модуль (маслоотделитель), модель ФМ	550	650	1,5	Да	0,5
Да	Установка маслораздаточная без счетчика, модель C-227	350	330	1,5	Да	0,5
Нет	Колонка маслораздаточная с дистанц. управлением с погружной насосной установкой	400	350	1,5	Да	0,2
Да	Нагнетатель смазки с электроприводом (бак 40 л), C-231M	380	300	1,5	Да	0,5
Нет	Нагнетатель смазки многоступенчатый с электроприводом, модель C-104M	450	400	2,2	Да	0,1
Да	Приемник (воронка) телескопический для отработки масел, модель C-507	1600	100	1	Да	1
	Компрессоры и подготовка воздуха					
Да	Компрессор пр-ть 0,26 м3/мин, давл. 10 атм, рес. 0,05 м3, 1,5 кат, 220 в, модель AB-50/246	550	350	1,5	Нет	0,5
Нет	Компрессор пр-ть 0,24 м3/мин, давл. 10 атм, рес. 0,1 м3, 1,5 кат, 220 в, модель AB-100/245	550	400	1,5	Нет	0,2
Нет	Компрессор пр-ть 0,33 м3/мин, давл. 10 атм, рес. 0,05 м3, 2,2 кат, 380 в, модель AB-50	600	400	2,2	Нет	0,2
Нет	Компрессор пр-ть 0,51 м3/мин, давл. 10 атм, рес. 0,05 м3, 3 кат, 380 в, модель AB-50/51	650	400	3	Нет	0,2
Нет	Компрессор пр-ть 0,55 м3/мин, давл. 10 атм, рес. 0,2 м3, 4 кат, 380 в, модель AB-200/4	650	420	4	Нет	0,2
	Подъемно-транспортное оборудование					
Нет	Подъемник эл.мех. передвиж. г/н 1,0 тн, 220 в, модель ПП-1	1300	1650	1,5	Нет	1
Нет	Подъемник эл.мех. передвиж. г/н 1,0 тн, 380 в, модель ПП-1-01	1300	1650	1,5	Нет	1
Нет	Подъемник гидравлич. с ручным приводом канав, г/н 3,0 тн, модель ПНК-1	2200	1650		Да	1
Нет	Подъемник гидравлич. с ручн. приводом канав, г/н 3,0 тн, раздв. 930-1250 мм, модель	1250	930		Да	1
Нет	Подъемник эл.мех.к-й, двухст г/н 3,3 тн, h=1,88 м, модель ПР-3	1500	1250	2,2	Да	1
Нет	Подъемник эл.мех.к-й, двухст г/н 3,3 тн, h=1,9 м (двухмоторный), модель ПЛД-3	1500	1250	2,2	Да	1
Нет	Подставка тел.к-я для подъемника П-97 (2 тн) (комплект 4 шт), модель ПП-334	300	300		Нет	1
Нет	Подъемник эл.мех. двухст г/н 3,3 тн (с наполраной) h=1,86 м, модель ПР-3-01	1500	1250	2,2	Да	1
Да	Подъемник эл.мех. двухст г/н 3 тн (подкатной) h=1,8 м, модель ПП-3	1500	1250	2,2	Нет	1
Да	Домкрат подкатной гидр. г/н 2,0 тн, высота подъема 480 мм, модель ПП Д-2	1200	430		Нет	0,7
Нет	Стойка гидр. для монтажа и демонтажа агрегатов г/н 300 кг, модель СТ-1	450	300		Нет	0,7
Да	Кран подвесной ГОСТ 7890-73, грузоподъемность 2 т			2,2	Да	0,7
Нет	Домкрат гидравлический, г/н 5,0 тн, модель ДГ-12,5	2000	280		Нет	0,7
	Шинномонтаж/балансировка					

Рисунок 2 - База данных технологического оборудования сервисного предприятия

Вне зависимости от совпадения значений элементов массива `arrPotok` со значением переменной `t` запускается процедура `Proverka`, которая проверяет завершение обслуживания заявки и, в случае возникновения данного события, выполняет следующие действия: вывод заявки из системы; нахождения заявки, стоящей в очереди на обслуживание; постановки заявки на обслуживание.

После завершения цикла в процедуре происходит расчет всех числовых характеристик функционирования сервисного предприятия в течение рабочего дня.

Далее вызывается процедура `Smeta`, которая выполняет расчет затрат на приобретение и монтаж оборудования, а также подсчитывает суммарную мощность (кВт) оборудования, питающегося от электрической сети.

После завершения процедуры `Smeta` выполняется расчет экономических показателей функционирования сервисного предприятия в течение года и занесение их в базу данных результатов расчета.

В данной программе для доступа к базам данных нами использован механизм BDE (Borland Database Engine - процессор баз данных фирмы Borland), предоставляющий развитый интерфейс API для взаимодействия с базами данных. BDE представляет собой совокупность динамических библиотек и драйверов, которые обеспечивают доступ к данным. Процессор BDE устанавливается на компьютер при общей установке программы «Оптимизация средств обслуживания автомобильного транспорта».

Приложение через BDE передает запрос к базе данных, а обратно получает необходимые данные. В качестве таблиц баз данных были использованы таблицы Paradox 7, так как они являются достаточно развитыми и удобными для создания БД. Можно отметить следующие их достоинства: большое количество типов полей для представления данных различных типов; поддержка целостности данных; организация проверки вводимых данных; поддержка парольной защиты таблицы.

Необходимо отметить интуитивно-понятный интерфейс программы и высокую точность расчетов и имитации работы сервисного предприятия.

В дальнейшем программа может быть усовершенствована путем добавления в программный код новых процедур для учета факторов, не принятых во внимание ранее и влияющих на работу сервисного предприятия и, соответственно, на конечные результаты.

Разработанное программное обеспечение позволяет существенно сократить время решения актуальной транспортной задачи.

#### Список литературы

1. Ибатов М.К. Эксплуатация автомобилей / М.К. Ибатов, С.Ж. Кабикенов, А.А. Несветеев: Учеб. пособие. – Астана: Фолиант, 2010. – 336 с.
2. Лукин В.П. Анализ факторов, влияющих на пропускную способность постов технического обслуживания и текущего ремонта / В.П. Лукин, С.Р. Назриев: Учеб. пособие / МАДИ. – М., 1988. – 55 с.
3. Кузнецов Е.С. Техническая эксплуатация автомобилей: Учеб. для вузов / Е.С. Кузнецов, В.П. Воронов, А.П. Болдин и др.; Под ред. Е.С. Кузнецова. – 3-е изд. – М.: Транспорт, 1991. – 413 с.
4. Хавьер Пашеку. Программирование в Borland Delphi 2006 для профессионалов. Delphi for .NET Developer's Guide. – М: Вильямс, 2006. – 944 с.
5. Технологическое оборудование для технического обслуживания и ремонта легковых автомобилей: Справ. – М.: Транспорт, 1988. – 176 с.

Получено 8.11.2016

УДК 621.01; 539.3; 539.62

**К.З. Сартаев**

Екибастузский инженерно-технический институт им. К.И. Сатпаева, г. Екибастуз

**С.Ж. Карипбаев, Е.Л. Нуспеков**

Академия гражданской авиации, г. Алматы

**К.К. Толубаева**

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

**Г.Ш. Сартаева**

Академия гражданской авиации, г. Алматы

#### КВАЗИСТАТИЧЕСКОЕ ИДС ОДНОСЕКЦИОННОГО ПЛОСКО-РЫЧАЖНОГО МЕХАНИЗМА

В настоящее время в промышленности находят применение в основном плоские рычажные механизмы II и III классов по классификации Ассура-Артоболевского, состоящие из различного числа звеньев с вращательными и поступательными кинематическими парами и предназначенные преобразовывать движение одного звена в плоское или пространственное движение других звеньев, выполняющих определенные функции. Благодаря наличию в рычажных механизмах только низших пар, они могут передавать значительные усилия при высоком коэффициенте полезного действия.

Плоские рычажные механизмы, благодаря своим структурным особенностям, обладают широкими динамическими возможностями. В работе [1] исследуется кинематика, а аналитические методы анализа положений, скоростей и ускорений, а также кинестатический анализ плоских рычажных механизмов, представляющих собой многоконтурные кинематические цепи со многими степенями свободы, представлены в работе [2]. В данной работе исследуется квазистатика плоско-рычажного механизма III класса с многофункциональной возможностью.

*Цель исследования.* Аналитическое и численное исследование, а также анализ квазистатики плоско-рычажного механизма с одной степенью свободы и шарнирным, поступательным соединением звеньев.

*Исходные данные.* Задано вращение звена ОА (рис. 1) с постоянной угловой скоростью  $\omega_1 z = \pi / (2\tau)$ , где  $\tau$  – время оборота этого звена. Заданы также внешние силы  $G, G_1, P$ , где  $P = P_0 \sin(\omega_1 z \tau)$  – переменная сила, приложенная в точке С. Колесо 6 движется по горизонтальной прямой без скольжения, и к его центру С шарнирно прикреплен шатун LC.

*Примечание:*

- все звенья (1,...,7) считать невесомыми;
  - трением в шарнирах и точках контакта тел можно пренебречь;
  - переменные вводятся с шагом по времени  $\Delta t$ ;
  - $\tau = 0,24$  с;  $\omega_1 z = 6,54$  с<sup>-1</sup>;  $\Delta t = 0,016$  с;  $G = 2$  кН;  $G_1 = 1$  кН;  $P = 2 \sin(\omega_1 z \tau)$  кН;
  - $R_1 = 0,21$  м;  $R_2 = 1,21$  м;  $R_3 = BD = 0,91$  м;  $R_4' = BE = ED = 0,81$  м;  $R_5' = ED = 0,405$  м;
  - $R_4 = 0,71$  м;  $R_5 = 0,35$  м;  $R_6 = 1,2$  м;  $R_1 = 0,25$  м;  $R_7 = 1,01$  м;
  - $\varphi_1(0) = 0$  рад;  $\varphi_2(0) = 2,47$  рад;  $\varphi_3'(0) = 0,92$  рад;  $\varphi_4'(0) = 5,7$  рад;
  - $\varphi_5(0) = 0,46$  рад;  $\varphi_6'(0) = 3,6$  рад;  $\varphi_7(0) = 5,62$  рад;  $\varphi_8(0) = 0,56$  рад.
- (1)

- здесь  $R_i$  – длины  $i$ -го звена ( $i=1,...,7$ ). Под длиной звена для колеса понимается его радиус  $R_6$ ;  $\varphi_i(0)$  – начальные углы поворота звеньев.

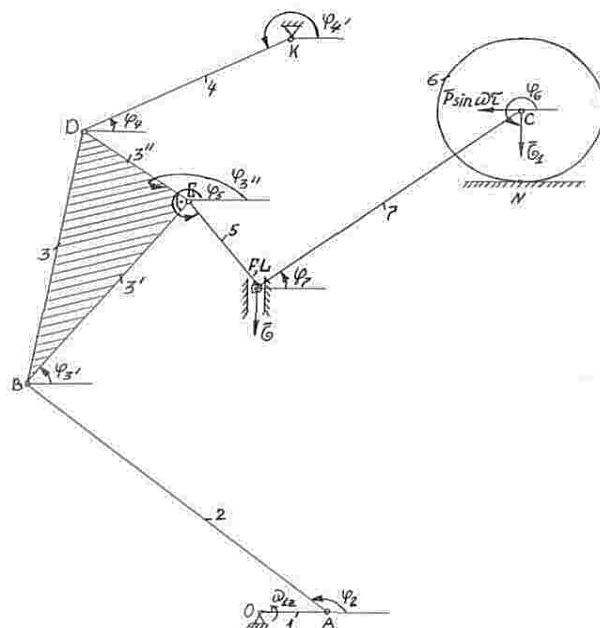


Рисунок 1 - Плоско-рычажной механизм с одной степенью свободы

*Силовой расчет механизма с применением ЭВМ.* Существует несколько равновесных положений плоско-рычажного механизма в плоскости при действии на них произвольной плоской системы сил (рис. 2).

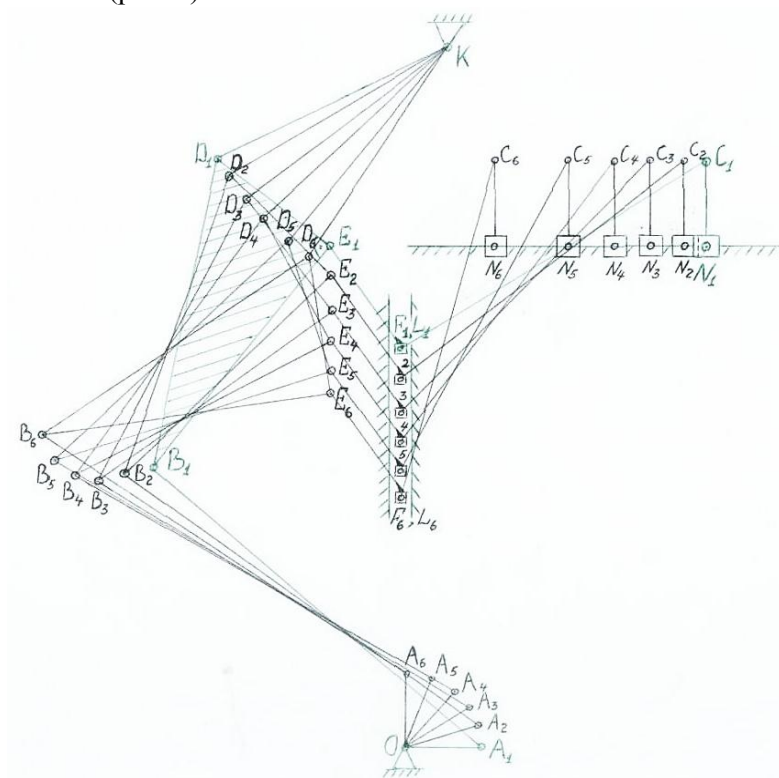


Рисунок 2 – Квзистатические положения плоско-рычажного механизма

Составим уравнение квазистатики, проведем силовой расчет плоско-рычажного механизма, находящегося в равновесии под действием заданных сил и наложенных связей. Определим реакции опор в кинематических парах для каждого малого момента времени при полном цикле движения ведущего звена. По полученным размерам и по исходным данным мы можем определить положения для любого момента времени и построить траекторию любой точки механизма (рис. 2).

Освободим систему от связей и обозначим реакции (рис. 3). Выберем оси неподвижной декартовой системы координат  $OXY$ . Составим уравнения равновесия произвольной плоской системы сил для каждого тела по первой форме и решим полученные уравнения относительно неизвестных. Их всего 18:

$$(\bar{X}_O, \bar{Y}_O, \bar{X}_A, \bar{Y}_A, \bar{X}_B, \bar{Y}_B, \bar{X}_D, \bar{Y}_D, \bar{X}_E, \bar{Y}_E, \bar{X}_F, \bar{Y}_F, \bar{X}_K, \bar{Y}_K, \bar{X}_C, \bar{Y}_C, \bar{R}, \bar{R}_K).$$

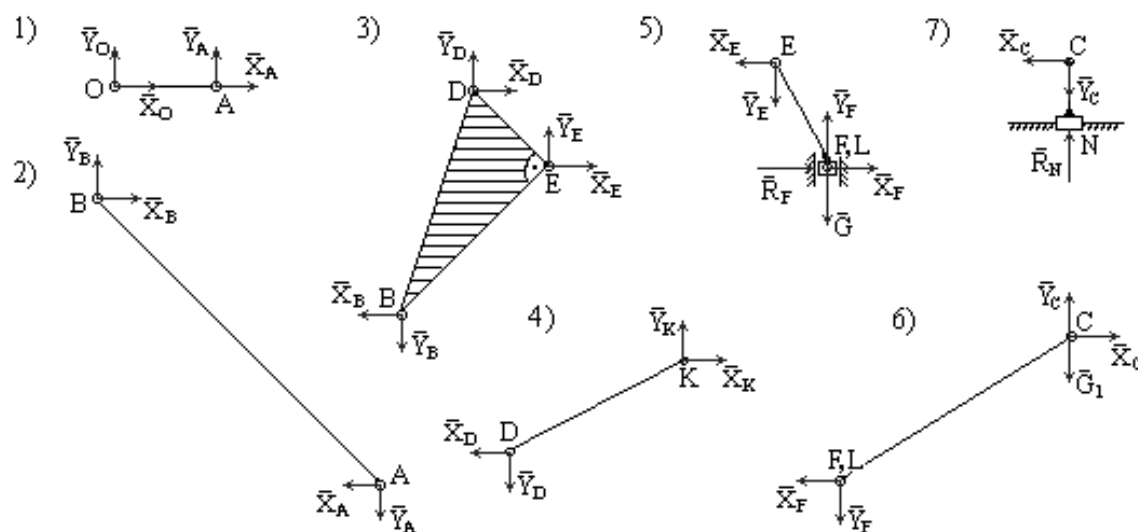


Рисунок 3 – Реакции в кинематических парах плоско-рычажного механизма

Решая совместно системы линейных алгебраических уравнений (3.1)-(3.7), определим неизвестные реакции в кинематических парах. Для этого полученная система линейных алгебраических уравнений приводится к стандартной матричной форме:

$$AX=B, \quad (2)$$

где  $A$  - матрица коэффициентов;  $X, B$  - матрицы-столбцы неизвестных и свободных членов. Матрица  $A$  (в программе одномерный массив  $A$ ) и столбец  $B$  (одномерный массив  $B$ ) содержат не только константы, но и переменные коэффициенты, зависящие от времени. Разработана программа вычисления реакции в кинематических парах шагом по времени для полного цикла движения ведущего звена.

**Силовой анализ.** Силовой анализ плоско-рычажного механизма заключается в проведении квазистатического расчета, т.е. определении реакции в кинематических парах для каждого равновесного состояния при каждом шаге по времени. Решение системы линейных алгебраических уравнений находится методом Гаусса [3]. Внешними силами являются сосредоточенные силы  $\vec{G}, \vec{G}_1, \vec{F}$  в точках  $F$  и  $L, C, N$ . Причем силы  $\vec{G}, \vec{G}_1$  являются



ся постоянными, а  $\vec{F}$  - переменной, зависящей от времени.

Анализ решения показывает, что внешние силы почти не оказывают влияние на кинематические пары  $O, A, B$ . Самые большие реакции появляются в парах  $D, E, K$  и они равны между собой

$$R_{D\max} = R_{E\max} = R_{K\max} = 3\kappa H. \quad (3)$$

Максимальные полные реакции в кинематических парах  $A$  и  $C$  таковы:

$$K_{F\max} = 0,75, R_{C\max} = 1,0\kappa H. \quad (4)$$

Величины составляющих, а также полных реакций приведены на рис. 4.

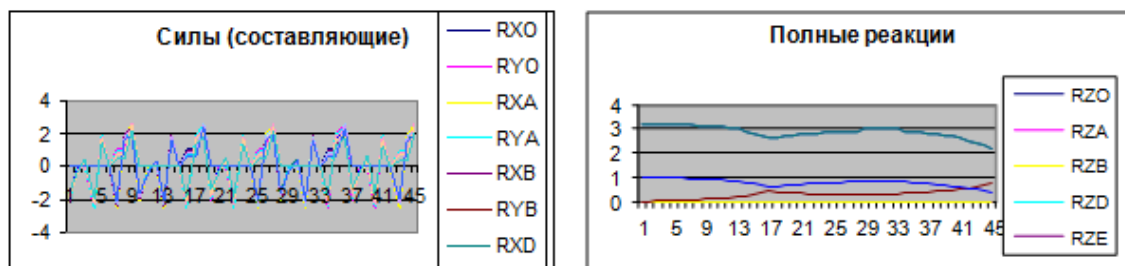


Рисунок 4 - Составляющие полные реакции в кинематических парах плоско-рычажного механизма

*Основные соотношения квазистатического напряженно-деформированного состояния плоско-рычажного механизма с деформируемыми звеньями.* Под действием внешних усилий каждая точка звеньев плоско-рычажного механизма деформируется. В каждой произвольной точке поперечного сечения плоского расчетного стержневого элемента появляются три составляющих перемещения: две составляющие линейного перемещения  $u_\xi, v_\eta$  в направлении главных локальных осей  $O_1\xi, O_1\eta$  системы координат  $O'\xi\eta$  и одна составляющая угла поворота  $\varphi_\xi$  соответствующего сечения вокруг одной оси.

МКЭ дает возможность строить разрешающую систему уравнений на основе рассмотрения каждого отдельного конечного элемента [3-5]:

$$[K]\{U\} = \{F\}, \quad (5)$$

где  $[K] = [K_{rs}]$ ,  $(r, s = 1, 2, \dots, 6N)$  - квадратная матрица порядка  $6N \times 6N$ , называется матрицей жесткости системы;  $\{U\}^T$  - вектор перемещений в глобальной системе координат (ГСК);  $\{F\}$  - вектор внешних сил.

Для определения узловых перемещений получаем систему линейных уравнений, для решения которой могут быть применены различные методы. Решением системы определяются узловые перемещения плоско-рычажного механизма в ГСК и далее по найденному вектору перемещения определяются напряжения и деформации в любой точке любого элемента в локальной системе координат (ЛСК). В настоящее время разработаны эффективные методы решения систем линейных уравнений, например итерационные методы - Якоби, Гаусса-Зейделя [3, 5] и др.

В методе Якоби итерационный процесс реализует формулы [5]:

$$K_{ii}U_i^{(n+1)} = \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^N K_{ir}U_r^{(n)} + F_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (6)$$

Если в формуле (6) для метода Якоби считать элемент  $K_{ir}$  блоком матрицы жесткости, то тем самым будет определен блочный метод Якоби.

Полезной модификацией метода Якоби, позволяющей увеличить скорость сходимости, является итерационный метод Гаусса-Зейделя, суть которого заключается в нижеследующем [5]:

- $n$ -е уравнение системы  $N$  уравнений может быть записано в виде

$$\sum_{i=1}^{n-1} K_{ni} U_i + K_{nn} U_n + \sum_{i=n+1}^N K_{ni} U_i = F_n; \quad (7)$$

- из этого уравнения можно найти

$$U_n = K_{nn}^{-1} \left\{ F_n - \sum_{i=1}^{n-1} K_{ni} U_i - \sum_{i=n+1}^N K_{ni} U_i \right\}; \quad (8)$$

- если процесс итераций таков, что в правой части используются последние приближения  $\delta_i$ , то для  $m$ -й итерации имеем

$$U_n^m = K_{nn}^{-1} \left\{ F_n - \sum_{i=1}^{n-1} K_{ni} U_i^m - \sum_{i=n+1}^N K_{ni} U_i^{m-1} \right\}. \quad (9)$$

Итерационный процесс Гаусса-Зейделя начинается с некоторого начального приближения. Основная идея модификации состоит в том, чтобы при вычислении очередного  $m$ -го приближения к неизвестному  $U_n^m$  при  $n > 1$  использовать уже найденные  $m$ -е приближения к неизвестным  $U_1^m, \dots, U_{n-1}^m$ , а не  $(m-1)$ -е приближения, как в методе Якоби. За счет этого достигается ускорение итерационного процесса. Итерационный метод Гаусса-Зейделя легко программируется.

Для описания конечно-элементной модели плоско-рычажного механизма (рис. 1) разбиваем их на естественные прямолинейные стержневые элементы, соединенные в узлах. Узлы плоско-рычажного механизма имеют нумерацию в ГСК, которая служит для их идентификации в перечне узлов. Элементы имеют свои номера – начальный и конечный, с помощью которых в свою очередь производится их идентификация.

Силами и моментами трения в кинематических парах пренебрегают. Каждому элементу плоско-рычажного механизма присваивается набор упругих постоянных материала, характеризующих их физические свойства: модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность материала.

Считаем, что звенья плоско-рычажного механизма изготовлены из стальных стержней с поперечным сечением. Заданы форма и размеры поперечного сечения. Размерами и конструкцией узлов пренебрегают.

Плоско-рычажный механизм состоит из различных кинематических пар. Элементы и узлы нумеруются. Координаты  $X, Y, Z$  узлов расчетной модели определены в ГСК, жестко соединенной неподвижным звеном.

После определения искоемых узловых перемещений в ГСК через них можно найти перемещения  $(u_\xi, u_\eta, \varphi_\xi)$  в любой точке элементов.

Далее, по найденному вектору узлового перемещения для пространственного призматического стержня плоско-рычажного механизма в любом сечении определяют внутренние силовые факторы и напряжения в ЛСК.

Все полученные выше формулы систематизированы в последовательный алгоритм. По этому алгоритму реализована программа для исследования квазистатического НДС для упругого плоско-рычажного механизма. Моделирование проводится на компьютерах,

программа для исследования НДС упруго-деформируемого плоско-рычажного механизма реализована на профессиональной версии языка Fortran 90 MP с математической библиотекой IMSL фирмы Visual Numerics, Inc на персональных компьютерах серии IBM PC.

*Краткие выводы.* Получена линейная система линейных алгебраических уравнений равновесия плоско-рычажного механизма с учетом внешних постоянных и переменных по времени сосредоточенных сил, приложенных в кинематических парах, в матричной форме. Проводится силовой расчет механизма, численно определены неизвестные реакции в кинематических парах для каждого шага по времени при полном обороте ведущего звена. Основные алгоритмы доведены до программной реализации на языке высокого уровня, основные результаты приведены в виде числовых данных и графиков. Проведен квазистатический анализ механизма для любого момента времени и определены наиболее и наименее нагруженные кинематические пары исследуемого механизма.

Разработаны механико-математическая модель, алгоритмические и программные основы исследования квазистатического НДС упругого плоско-рычажного механизма с помощью МКЭ. Использование разработанных программных средств позволяет выявить наиболее нагруженные звенья, наихудшие положения плоско-рычажного механизма в плоскости, новые эффекты в закономерностях распределения напряжений, перемещений, усилий.

#### Список литературы

1. Джолдасбеков У.А. Аналитическая кинематика плоских рычажных механизмов высоких классов / У.А. Джолдасбеков, Ж.Ж. Байгунчиков. – Алма-Ата, 1980. – 102 с.
2. Джолдасбеков У.А. Аналитическая кинематика и динамика плоских рычажных механизмов высоких классов с вращательными и поступательными кинематическими парами / У.А. Джолдасбеков, Ж.Ж. Байгунчиков. – Алматы: Гылым, 1993. – 152 с.
3. Агалов В.П. Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости пространственных тонкостенных подкрепленных конструкций. – АСВ, 2000. – 152 с.
4. Масанов Ж.К. Анализ сил и колебаний конструкций механизмов высоких классов пространственной топологии / Ж.К. Масанов, Е.С. Темирбеков, Е.А. Биртанов. – Деп. в КазГосИНТИ. – №6871-КА96. – Деп. от 12.04.96 г. – 254 с.
5. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
6. Шаньгин В.Ф. Программирование на языке ПАСКАЛЬ / В.Ф. Шаньгин, Л.М. Поддубная. – М.: Высшая школа, 1991.
7. Сборник научных программ на ФОРТРАНе. Матричная алгебра и линейная алгебра. – М., 1974. – Вып. 2.

Получено 15.12.2016

---

УДК 621.01; 539.3; 539.62

**К.З. Сартаев**

Екибастузский инженерно-технический институт им. К.И. Сатпаева, г. Екибастуз

**С.Ж. Карипбаев, Е.Л. Нуспеков**

Академия гражданской авиации, г. Алматы

**К.К. Толубаева**

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

**Ж.М. Мырзагельдиева**

Алматинский технологический университет, г. Алматы

#### УПРУГАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ОДНОСЕКЦИОННОГО МЕХАНИЗМА

При исследовании механизмов актуальность приобретают проблемы их напряженно-

деформированного состояния (НДС) и устойчивости [1-4]. Поэтому проведение расчета и полной оценки квазистатического НДС, устойчивости механизмов с упругими звеньями на основе их конечно-элементной модели требует дальнейшего исследования.

Конечные элементы механизмов объединены в одну глобальную систему координат (ГСК), удовлетворяя условиям равновесия для всех узлов [4-6]:

$$[K]\{U\} = \{F\}, \quad (1)$$

где  $[K] = [K_{rs}]$ ,  $(r, s = 1, 2, \dots, 6n)$  - матрица жесткости системы (МЖС) порядка  $6n \times 6n$ ,  $n$  - общее количество узлов,  $\{U\}^T = (u_1, v_1, w_1, \varphi_{x1}, \varphi_{y1}, \varphi_{z1}, \dots, u_n, v_n, \dots, \varphi_{zn})$  - вектор перемещений в ГСК,  $\{F\}^T = (F_{x1}, F_{y1}, F_{z1}, \dots, F_{xn}, F_{yn}, F_{zn})$  - вектор внешних узловых сил.

Неизвестные  $\{U\}$  в уравнении (1) определяются наиболее эффективным и широко используемым итерационным методом для решения СЛАУ - методом Гаусса-Зейделя последовательной верхней релаксации (SQR-метод) [4-6].

После определения из уравнения (1) узловых перемещений в ГСК через них можно найти перемещения, внутренние силовые факторы и напряжения в любой точке элементов механизмов в локальной системе координат (ЛСК).

При выпучивании интенсивность внутренних продольных усилий считается в  $\lambda$  раз больше интенсивности внешних сил, действующих на ППМ [4-6]:

$$([K] + \lambda[C])\{U\} = \{F_{\Delta F}\} + \{F_{\Delta p}\}. \quad (2)$$

Здесь  $[C]$  - матрица устойчивости системы,  $\{F_{\Delta F}\}$ ,  $\{F_{\Delta p}\}$  - консервативные объемные и поверхностные узловые нагрузки.

Наименьшее значение  $\lambda$ , при котором система (2) имеет нетривиальное решение, является критическим параметром для заданных внешних нагрузок.

Система (2) приведена к стандартной задаче нахождения собственных значений и собственных векторов в виде

$$[H]\{U\} = \lambda\{U\}, \quad (3)$$

где  $[H] = [C]^{-1}[K]$ ;  $\{U\}$  - нормированные собственные векторы.

Для определения узловых перемещений от действия найденных критических сил могут быть применены различные методы решения. Решением системы (1) определяются узловые перемещения механизмов в ГСК и далее по найденному вектору перемещения определяются напряжения и деформации в любой точке любого элемента в ЛСК. В настоящее время разработаны эффективные методы решения систем линейных уравнений, например итерационные методы - Якоби, Гаусса-Зейделя [4-6] и др.

В методе Якоби итерационный процесс реализует следующие формулы [5]:

$$K_{ii}U_i^{(n+1)} = \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^N K_{ir}U_r^{(n)} + F_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (4)$$

Если в формуле (4) для метода Якоби считать элемент  $K_{ir}$  блоком матрицы жесткости, то тем самым будет определен блочный метод Якоби.

Полезной модификацией метода Якоби, позволяющей увеличить скорость сходимости, является итерационный метод Гаусса-Зейделя, суть которого заключается в следующем [5]:

-  $n$ -е уравнение системы  $N$  уравнений может быть записано в виде

$$\sum_{i=1}^{n-1} K_{ni} U_i + K_{nn} U_n + \sum_{i=n+1}^N K_{ni} U_i = F_n; \quad (5)$$

- из этого уравнения можно найти

$$U_n = K_{nn}^{-1} \left\{ F_n - \sum_{i=1}^{n-1} K_{ni} U_i - \sum_{i=n+1}^N K_{ni} U_i \right\}; \quad (6)$$

- если процесс итераций таков, что в правой части используются последние приближения  $\delta_i$ , то для  $m$ -й итерации имеем

$$U_n^m = K_{nn}^{-1} \left\{ F_n - \sum_{i=1}^{n-1} K_{ni} U_i^m - \sum_{i=n+1}^N K_{ni} U_i^{m-1} \right\}. \quad (7)$$

Итерационный процесс Гаусса-Зейделя начинается с некоторого начального приближения. Основная идея модификации состоит в том, чтобы при вычислении очередного  $m$ -го приближения к неизвестному  $U_n^m$  при  $n > 1$  использовать уже найденные  $m$ -е приближения к неизвестным  $U_1^m, \dots, U_{n-1}^m$ , а не  $(m-1)$ -е приближения, как в методе Якоби. За счет этого достигается ускорение итерационного процесса. Итерационный метод Гаусса-Зейделя легко программируется.

Конечно-элементным подходом разработан алгоритм. Реализована прикладная программа для расчета на упругую устойчивость конкретных механизмов (крепь механизированная, односекционный механизм параллельной структуры), которая позволяет найти значения критических сил при нескольких квазистатических их положениях и определить прогибы, наиболее и наименее нагруженные элементы механизмов, а также анализировать квазистатическое НДС от действия найденных критических сил, установить законы распределения упругих перемещений, напряжений.

*Крепь механизированная* [7] – устройство для управления горным давлением, поддержания кровли в рабочем пространстве лавы и ограждения его от проникновения обрушающихся пород кровли (рис. 1).

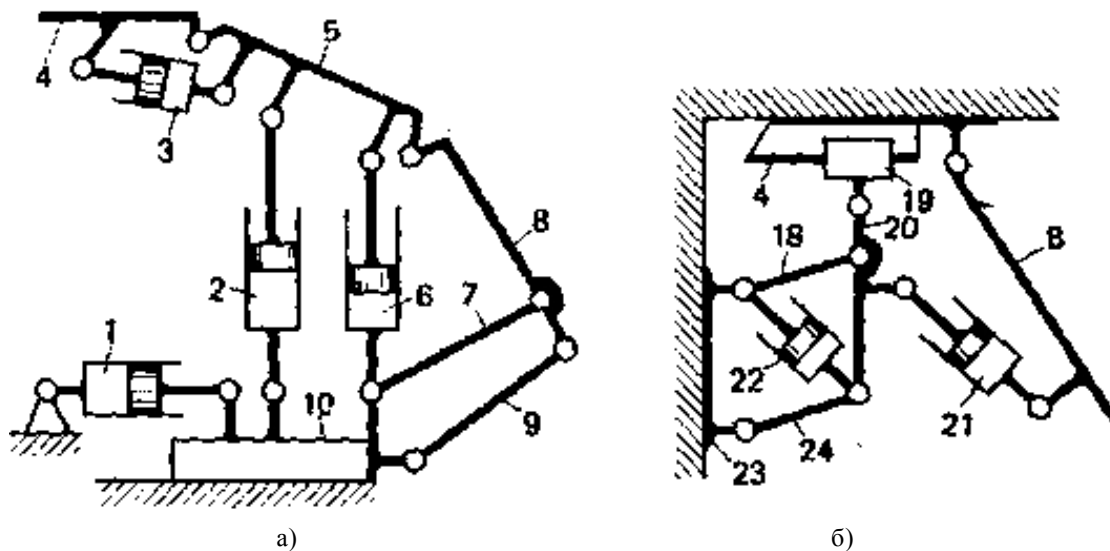


Рисунок 1 - Крепь механизированная

Крепь механизированную можно моделировать с помощью стержневых элементов с различными геометрическими и упругими характеристиками.

Расчет крепи механизированной с упругими элементами должен удовлетворять всем требуемым условиям прочности, жесткости и ряду других дополнительных технико-экономических критериев. Такие расчеты могут возникнуть в процессе работы крепи механизированной, в частности в квазистатическом их положении при действии внешних воздействий. Задача сводится к нахождению напряжений  $\sigma_\xi, \tau_{\xi\eta}, \tau_{\xi\zeta}$ , деформаций  $\varepsilon_\xi, \varepsilon_{\xi\eta}, \varepsilon_{\xi\zeta}, \chi_\xi, \chi_\eta, \chi_\zeta$  и перемещений произвольных точек элемента крепи механизированной  $u_\xi, u_\eta, u_\zeta$  и углов поворота произвольных сечений элемента  $\varphi_\xi, \varphi_\eta, \varphi_\zeta$ . Для их определения необходимо располагать системой уравнений, связывающих искомые функции с заданными функциями и величинами.

Расчет крепи механизированной в целом, состоящей в основном из множества пространственных стержневых элементов, приводит к практической возможности их решения известными точными или приближенными математическими методами. Большой эффективностью обладает МКЭ, базирующийся на рассмотрении транспортных конструкций в виде совокупности отдельных конструктивных элементов, соединенных в конечном числе узловых точек.

Ключевая идея МКЭ при анализе поведения упругой крепи механизированной заключается в следующем: крепь механизированная в целом моделируется путем разбиения ее на конечные элементы (КЭ), в каждом из которых поведение объекта описывается с помощью отдельного набора выбранных функций, представляющих перемещения в указанных элементах; построение матриц жесткости элемента (МЖЭ) и объекта в целом и приведение местной нагрузки к узловой для каждого КЭ; построение канонических уравнений; решение канонических уравнений и определение значений компонентов НДС (перемещений, напряжений) элементов крепи механизированной.

Для описания конечно-элементной модели крепи механизированной разбиваем их на прямолинейные стержневые элементы, соединенные в узлах. Узлы крепи механизированной имеют нумерацию в ГСК, которая служит для их идентификации в перечне узлов. Элементы имеют свои номера – начальный и конечный, с помощью которых в свою очередь производится их идентификация. Каждому элементу крепи механизированной присваивается набор упругих постоянных материала, характеризующих их физические свойства: модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность материала.

Считаются, что звенья крепи механизированной изготовлены из стальных стержней с поперечным сечением. Заданы форма и размеры поперечного сечения. Размерами и конструкцией узлов пренебрегают.

Крепь механизированная состоит из различных кинематических пар. Элементы и узлы нумеруются. Координаты  $X, Y, Z$  узлов расчетной модели определены в ГСК, жестко соединенной неподвижным звеном.

При расчете статически неопределимых систем МКЭ в форме метода перемещений неизвестными являются перемещения узлов в ГСК, компонентами которых являются перемещения вдоль координатных осей  $OX, OY, OZ$  и углы поворота узловых сечений вокруг этих осей, а остальные параметры, характеризующие НДС крепи механизированной, определяются через найденные значения узловых перемещений.

Решением системы (1) определяются узловые перемещения крепи механизированной в

ГСК и далее по найденному вектору перемещения определяются напряжения и деформации в любой точке любого элемента в ЛСК.

*Манипулятор параллельной структуры.* При следующих значениях длин звеньев манипулятора (рис. 2) [8] определяются координаты точек в ГСК  $XYZ$ , совпадающей при  $t = 0$  с системой  $x_1 y_1 z_1$ :  $l_1 = l_8 = l_{10} = 0,3 \text{ м}$ ,  $l_2 = l_5 = l_7 = l_{11} = l_1 \sqrt{2} \text{ м}$ ,  $l_4 = l_6 = 2l_2 \text{ м}$ ,  $l_{c1} = l_{c2} = l_{c3} = 2l_1 \text{ м}$ .

Каждому элементу рассматриваемого манипулятора присваивается набор упругих постоянных материала, характеризующих их физические свойства:

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}, \quad \rho = 7900 \text{ кг/м}^3, \quad \nu = 0,25, \quad (8)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $\rho$  – плотность материала.

Конкретные расчеты проводились для манипулятора (рис. 2) из стальных стержней круглого поперечного сечения диаметром 0,006 м. Форма и размеры поперечного сечения, упругие свойства материалов постоянны. Размерами и конструкцией узлов пренебрегают. Расчетная модель манипулятора состоит из 13 узлов и 15 элементов, включая верхнюю неподвижную платформу.

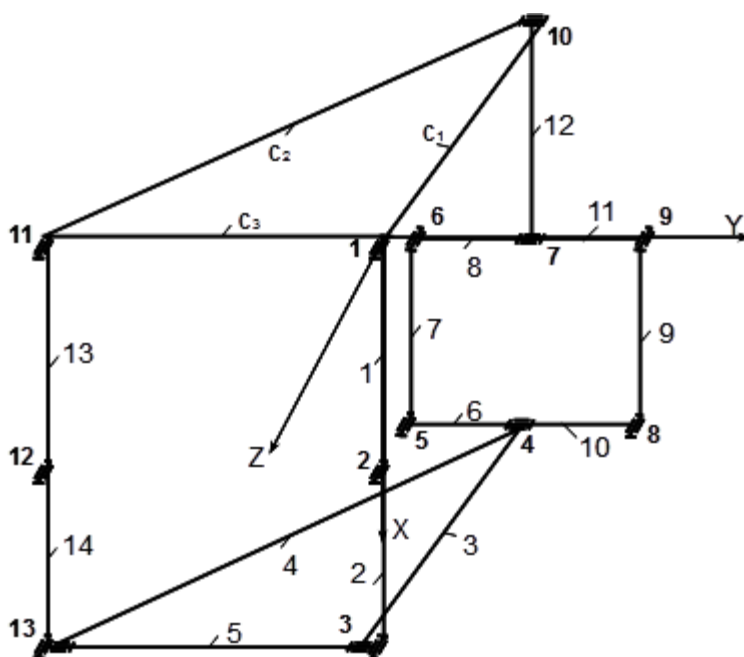


Рисунок 2 – Односекционный манипулятор параллельной структуры

Исследовано НДС манипулятора при различных вариантах приложения нагрузок и квазистатических положениях.

При приложении найденных критических сил в узлах 3, 7, 9 манипулятора наибольшие прогибы элементов показаны на рис. 3,а. При добавлении к  $w(1,3,j) \dots w(14,3,j)$  – прогибы элементов (первый индекс – номер элемента, второй – номер упругих перемещений, третий – номер положений ППМ);  $dl$  – шаг по длине элемента;  $k$  – число малых отрезков по длине элемента  $l$  вышеуказанным силам горизонтальной критической силы, совпада-

ющей с направлением оси  $OZ$ , на рис. 3,б показаны максимальные прогибы звеньев в квазистатическом положении манипулятора. На этих графиках по горизонтали приведено число шагов по длине звеньев (шаг равен отношению длины звеньев к числу шагов), а по вертикали – прогибы.

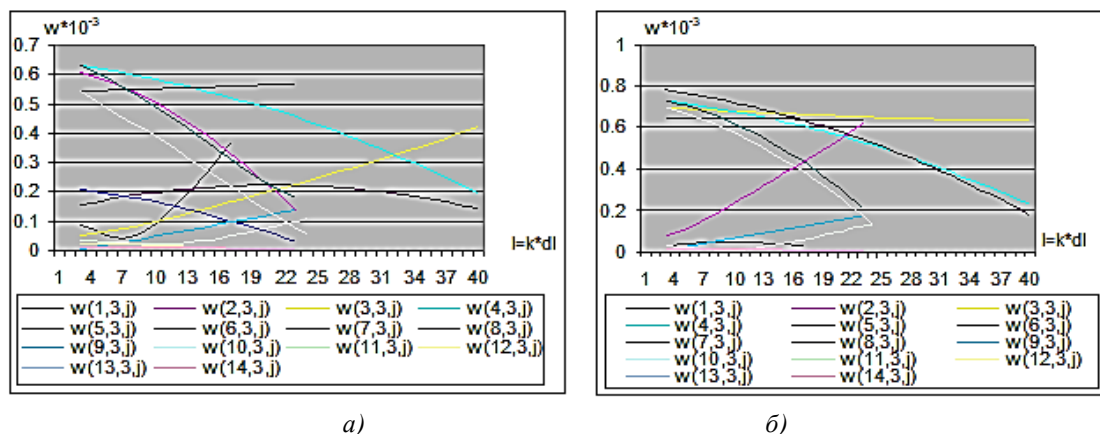


Рисунок 3 – Прогибы элементов манипулятора

**Краткие выводы.** Все полученные выше формулы систематизированы в последовательный алгоритм. По этому алгоритму реализована программа для решения задач упругой устойчивости, квазистатического НДС механизмов с упругими и геометрическими характеристиками, подверженных различным статическим и динамическим нагрузкам (крепь механизированная, манипулятор параллельной структуры). Моделирование проводится на компьютерах, и программа для исследования НДС механизмов реализована на профессиональной версии языка Fortran 90 MP с математической библиотекой IMSL фирмы Visual Numerics, Inc на персональных компьютерах серии IBM PC. Они позволяют произвести полный количественный анализ критических сил, закономерностей распределения перемещений, напряжений в точках любых пространственных двухузловых стержневых расчетных элементов изучаемых объектов при известном кинематическом анализе.

#### Список литературы

1. Хван Д.В. Устойчивость цилиндрических стержней при сжатии с кручением. – Воронежский гос. тех. ун-т. – Техника машиностроения, 2000. – № 1. – С.78-79.
2. Агапов В.П. Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости пространственных тонкостенных подкрепленных конструкций. – «АСВ», 2000. – 152 с.
3. Масанов Ж.К. Анализ сил и колебаний конструкций механизмов высоких классов пространственной топологии / Ж.К. Масанов, Е.С. Темирбеков, Е.А. Биртанов. – Деп. в КазГосИНТИ. – №6871-КА96. – Деп. от 12.04.1996. – 254 с.
4. Еременко С.Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемых тел. – Ч.: Изд-во «Основа» при Харьковском ун-те, 1991. – 272 с.
5. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
6. Мяченков В.И. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: Справ. / В.И. Мяченков и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 520 с.
7. Крайнев А.Ф. Словарь-справочник по механизмам. – М.: Машиностроение, 1987. – 560 с.
8. Liu X., Tang X., Wang J. Singularity Analysis of a Parallel Manipulator with Revolute Actuators //Proceedings of the 11th World IFToMM Congress. 1-4 April, -2004, pp. 1977-1981, Tianjin, China.

Получено 15.12.2016



