Научный журнал
Сентябрь, 2018 г.
№ 3. Том 1. Часть 3

Совместный выпуск

ВЕСТНИК
Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
Институт вычислительных технологий Сибирского отделения РАН



СибГУТИ
СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ

Novosibirsk State Technical University

HLRS High-Performance Computing Center | Stuttgart

ИВТ

ҚазИТУ

Новосибирский государственный университет
*НАСТОЯЩАЯ НАУКА

University of Pristina Kosovska Mitrovica

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании»



25–28 сентября

Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19, 2018 г.

Научный журнал Сентябрь 2018

ВЕСТНИК

Восточно-Казахстанского государственного
технического университета
им. Д. Серикбаева

Главный редактор
доктор биологических наук, профессор
Ж.К. Шаймарданов

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Институт вычислительных технологий
Сибирского отделения РАН

Главный редактор
академик
Ю.И. Шокин

по материалам Международной конференции
«Вычислительные и информационные технологии
в науке, технике и образовании»
(CITech-2018)
25-28 сентября 2018 года

Том I. Часть Ш

Усть-Каменогорск-Новосибирск, 2018

Вестник ВКГТУ им. Д. Серикбаева

Главный редактор: к.ф.-м.н. С.Ж. Рахметуллина
Заместитель главного редактора: к.г.-м.н. О.Д. Гавриленко
Ответственный секретарь: О.Н. Николаенко

Члены редколлегии: Адрышев А.К., д.т.н., проф.; Алексеенко А.Н., д.и.н., проф.; Алонцева Д.Л., к.ф.-м.н., проф.; Баталов Ю.В., д.э.н., проф.; Веригин Ю.А., д.т.н., проф.; Дьячков Б.А., д.г.-м.н., проф.; Дудкин М.В., д.т.н., проф.; Егорина А.В., д.г.н., проф.; Жуманазар С.А., к.э.н., доцент; Ипалаков Т.Т., д.т.н., проф.; Квасов А.И., д.т.н., проф.; Колос Е.А., д.э.н., доцент; Колпакова В.П., д.т.н., доцент; Кульсеитов Ж.О., д.т.н., проф.; Кумыков В.Х., д.т.н., проф.; Малышев Н.П., к.э.н., проф.; Манцуров О.А.; Назбиев Ж.Д., д.ф.н., проф.; Плотников С.В., д.ф.-м.н., проф.; Погребняк А.Д., д.ф.-м.н, проф.; Скаков М.К., д.ф.-м.н., проф.; Сырнев Б.В., д.т.н., проф.; Томилин А.К., д.ф.-м.н., проф.; Турганбаев Е.М., PhD; Тыныбекова С.Д., д.п.н., проф.; Хисамиев Н.Г., д.ф.-м.н., проф.; Чернавин В.Ю., к.т.н., проф.; Шапошник Ю.Н., д.т.н., проф.

Вычислительные технологии

Главный редактор: д.ф.-м.н., академик Ю.И. Шокин
Ответственный секретарь: к.ф.-м.н. А.В. Юрченко

Члены редколлегии: Абдибеков У.С., д.ф.-м.н., чл.-к. НИА РК (Казахстан); Баутин С.П., д.ф.-м.н., проф. (Россия); Бонту П., проф. (Франция); Бычков И.В., д.т.н., академик РАН (Россия); Вонг Р.-Х., проф. (Китай); Голушко С.К., д.ф.-м.н., проф. (Россия); Жайнаков А., д.ф.-м.н., проф., академик НИА РК (Киргизия); Жумагулов Б.Т., д.ф.-м.н., проф., академик НИА РК (Казахстан); Ковеня В.М., д.ф.-м.н., проф. (Россия); Краузе Е., проф. (Германия); Крейнович В., проф. (США); Милошевич Х., д.т.н., проф. (Сербия); Москвичев В.В., д.т.н., проф. (Россия); Панченко В.Я., д.ф.-м.н., академик РАН (Россия); Потатуркин О.И., д.т.н., проф. (Россия); Рознер К., проф. (Германия); Рябко Б.Я., д.т.н., проф. (Россия); Рэш М., проф. (Германия); Смагин С.И., д.ф.-м.н., чл.-к. РАН (Россия); Сойфер В.А., д.т.н., чл.-к. РАН (Россия); Стемпковский А.Л., д.т.н., академик РАН (Россия); Тайманов И.А., д.ф.-м.н., академик РАН (Россия); Темирбеков Н.М., д.ф.-м.н., проф., академик НИА РК (Казахстан); Турицын С.К., д.ф.-м.н., проф. (Великобритания); Федорук М.П., д.ф.-м.н., чл.-к. РАН (Россия); Федотов А.М., д.ф.-м.н., чл.-к. РАН (Россия); Хабаши В.Ж., проф. (Канада); Четверушкин Б.Н., д.ф.-м.н., академик РАН (Россия); Чубаров Л.Б., д.ф.-м.н., проф. (Россия); Шайдуров В.В., д.ф.-м.н., чл.-к. РАН (Россия); Шокина Н.Ю., к.ф.-м.н. (Германия); Шрёдер В., проф. (Германия); Юлдашев З.Х., д.ф.-м.н., проф. (Узбекистан)

ISSN 1561-4212
ISSN 1560-7534

© ВКГТУ им. Д. Серикбаева 2018
© ИВТ СО РАН 2018

Научный комитет
Международной конференции
«Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании 2018»

Сопредседатель – Юрий Шокин, действительный член РАН, Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия

Сопредседатель – Жасулан Шаймарданов, профессор, Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, Казахстан

Сопредседатель – Бакытжан Жумагулов, действительный член НАН РК, Национальная инженерная академия РК, Казахстан

Максат Калимолдаев, действительный член НАН РК, Институт информационных и вычислительных технологий, Казахстан

Галимкаир Мутанов, действительный член НАН РК, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан

Нурлан Темирбеков, действительный член НИА РК, Казахстанский инженерно-технологический университет, Казахстан

Аманбек Жайнаков, действительный член НАН КР, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Кыргызстан

Игорь Бычков, действительный член РАН, Институт динамики систем и теории управления СО РАН, Россия

Виктор Сойфер, действительный член РАН, Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева, Россия

Александр Стемповский, член-корреспондент РАН, Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Россия

Градимир Милованович, действительный член САНУ, Математический институт САНУ, Сербия

Уалихан Абдибеков, член-корреспондент НИА РК, Н.А. Ясавский международный казахско-турецкий университет, Казахстан

Михаил Федорук, член-корреспондент РАН, Новосибирский государственный университет, Россия

Анатолий Федотов, член-корреспондент РАН, Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия

Сергей Кабанихин, член-корреспондент РАН, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Россия

Владимир Шайдуров, член-корреспондент РАН, Институт вычислительного моделирования СО РАН, Россия

Сергей Смагин, член-корреспондент РАН, Компьютерный центр ДВО РАН, Россия

Игорь Бессмертный, профессор, Университет ITMO, Россия

Вальдемар Войчик, профессор, Люблинский технический университет, Польша

Самир Рустамов, доцент, Институт систем управления НАНА, Азербайджан

Павел Венгерик, Люблинский технический университет, Польша

Юрий Крак, профессор, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Украина

Януш Партыка, профессор, Люблинский технический университет, Польша

Георг Георг, профессор, Университет Обуда, Венгрия

Бо Эйнарссон, профессор, Университет Линчёпинг, Швеция

Сергей Баутин, профессор, Уральский государственный университет путей сообщения, Россия

Эгон Краузе, профессор, Рейнско-Вестфальский технический университет Ахена, Германия

Сергей Черный, профессор, Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия

Пейман Гиви, профессор, Университет Питтсбурга, США

Вагди Жорж Хабаши, профессор, Университет Макгилла, Канада

Андреас Гриеванк, профессор, Берлиинский университет имени Гумбольдта, Германия

Маттиас Мейнке, профессор, Рейнско-Вестфальский технический университет Ахена, Германия

Хранислав Милошевич, профессор, Университет Приштины, Сербия

Владимир Москвичев, профессор, Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» ИВТ СО РАН, Россия

Вадим Потапов, профессор, Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия

Олег Потатуркин, профессор, Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия

Майкл Реш, профессор, Высокопроизводительный вычислительный центр в Штутгарте, Германия

Карл Рознер, профессор, Технологический университет Дармштадта, Германия

Борис Рябко, профессор, Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия

Владимир Садовский, профессор, Институт вычислительного моделирования СО РАН, Россия

Вольфганг Шредер, профессор, Рейнско-Вестфальский технический университет Ахена, Германия

Сергей Турицын, профессор, Университет Астон, Великобритания

Рен-Хун Вонг, профессор, Даляньский технологический университет, Китай

Зиявиддин Юлдашев, профессор, Национальный университет Узбекистана им. Мирзы Улугбека, Узбекистан

Юрий Захаров, профессор, Кемеровский государственный университет, Россия

Дархан Ахмед-Заки, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан

Томас Бёниш, Высокопроизводительный вычислительный центр в Штутгарте, Германия

Денис Есипов, Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия

Денис Дутых, Университет Савойи, Франция

Нина Шокина, Университет Фрайбурга, Германия

Андрей Юрченко, Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия

Олег Жижимов, Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия

Организационный комитет Международной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании 2018»

Денис Есипов, Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия - секретарь

Алексей Редюк, Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия

Сергей Рылов, Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия

Олег Сидельников, Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия

Олег Гавриленко, ВКГТУ им. Д. Серикбаева, Казахстан

Наталья Денисова, ВКГТУ им. Д. Серикбаева, Казахстан

Назгуль Ердыбаева, ВКГТУ им. Д. Серикбаева, Казахстан

Time series in forecasting the volumes of air transportation in Kazakhstan

J. Jumabayeva, S. Burgumbayeva, and A. Iskakova

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Jamilya_ast@mail.ru

Abstract In this paper, methods of mathematical statistics, namely, methods of regression and variance analysis construct and verify the quality of additive and multiplicative models of the time series predicting the volumes of air transportation in Kazakhstan. The methods of forecasting and planning the volume of passenger transportation are analyzed from the point of view of justifying the choice of the most expedient of them.

Keywords: forecasting, time series, additive model, multiplicative model, AirAstana

Introduction

The growth of air transportation around the world is one of the reliable indicators of economic growth. Improving the state of the world economy leads to an increase in the activity of the population of all countries and, ultimately, an increase in passenger flows. Air transport has always played and plays an important role in the economic and social development of all countries. Therefore, the availability of a developed ground infrastructure for civil aviation is a necessary condition for economic growth. And for the constant readiness of the infrastructure, it is important to determine the dependence of the future value on the past value within the process itself, and on the basis of this dependence make a forecast of its future value, formed as a result of their alignment and alignment.

The key task of the analytical department of the modern airline is the preliminary assessment and further qualitative forecast of the volume of own transportation and transportation of competitors. The pre-planned number of flights allows you to rationally distribute the company's resources without affecting the interests of the passenger at the same time. Such a policy leads to the exclusion of unprofitable "idle"flights and to an increase in the company's rating due to full compliance with the needs of customers.

Forecasting the volume of traffic is an integral part of the decision-making process; this is a systematic check of the company's resources, which allows to more fully use its advantages and to identify potential threats in a timely manner. The company must constantly monitor the dynamics of traffic volume

and alternative opportunities for the development of the air transportation market situation in order to best allocate available resources and choose the most appropriate areas of its activities.

The task of forecasting the volumes of passenger traffic is the basis for solving many problems of optimizing the air transportation system by the criteria directly related to the profitability index (revenues, costs, profits), since the optimality of plans obtained in solving these tasks depends primarily on the accuracy of forecasts.

The aim of the work is the development of decision-making models for air transport management, which, based on the analysis of the passenger's passenger statistics, will make forecasts on the size of passenger traffic, revenue and profitability. Thus, these models will enable the airline management to make decisions on the number of flights carried out, transport requests, ticket prices, etc.Time series models are mathematical prediction models that seek to determine the dependence of a future value on a past value within the process itself, and on the basis of this dependence make a forecast of its future value.

The main task in the construction of economic time series is the identification and statistical evaluation of the main trend of development of the studied process and deviations from it. The most common methods for analyzing time series are spectral, regression and correlation analysis, moving average and autoregressive models.

In this paper, methods of mathematical statistics, namely, methods of regression and variance analysis, construct and verify the quality of additive and multiplicative models of the time series predicting the volumes of air transportation in Kazakhstan.

There are data on the passengers of the company "AirAstana"for 2016-2017 (table 1) [1]-[2].

Table 1.

months	1	2	3	4	5	6	7	8
Number of passengers	405	351	422	402	462	578	669	730
months	9	10	11	12	13	14	15	16
Number of passengers	460	500	480	470	441	373	445	426
months	9	10	11	12	13	14	15	16
Number of passengers	451	531	646	680	530	510	460	490

It is necessary, with the use of these statistics, to construct additive and multiplicative time-series models.

The additive model

We proceed to construct an additive model that has the form [3]-[6]

$$Y = T + S + E. \tag{1}$$

Here, each level of the time series represents the sum of the trend (T), seasonal (S), and random (E) components.

1. We align the initial levels of the series using the moving average method. For these purposes:
1.1. Define the moving averages. The values found so aligned now do not contain the seasonal component.
1.2. Define the average of two successive moving averages - the centered moving averages, and then bring these values into line with the actual time points. The period of the seasonal period will be determined in 6 months, averaging will be performed for four months.

2. Using the difference between the actual levels of the series and the centered moving averages, we determine the estimates of the seasonal component and then apply these estimates in calculating the values of the seasonal component S. To this end, we calculate the average for each season of the seasonal component assessment S_i (Table 2). It is assumed that in models with a seasonal component, seasonal effects for the period are generally intertwined. This is expressed in the fact that in the additive model the sum of the values of the seasonal component over all periods is zero.

Table 2. Seasonal component data

Indicators	1	2	3	4	5	6
1	-	-	-14,67	-78,67	-81,83	27,83
2	102,5	160,5	-91,5	-13,5	26	18,5
3	1,833	-61,33	0,5	-52,67	-78,83	-13
4	88	120,5	-22,67	-	-	-
Total for the period	192,33	219,67	-128,33	-144,83	-134,67	33,33
The average estimate of the seasonal component	64,11	73,22	-32,08	-48,28	-44,89	11,11
Adjusted seasonal component S_i	60,25	69,36	-35,95	-52,14	-48,76	7,25

As a result, in this model we get:
64,111+73,222-32,083-48,278-44,889+11,111=23,194 The correction factor was: $k = 23,194/6 = 3,866$. Determine the corrected values for the seasonal component S_i and also input the data into the table.

3. Further exclude the impact of seasonal component by subtracting its value of each level of the original time series. Let us find the quantities $T + S = Y - E$.

These values are determined at each point in time and include a trend and a random component.

4. We calculate the component T of this model, for which it is necessary to perform analytical alignment of the series $(T + E)$ using the linear trend. We obtain the following results of analytical equalization:

$$T = 442,55 + 4,303t. \tag{2}$$

5. We find the values of the levels of the series obtained from the additive model. To do this, we add to the levels T the values of the seasonal component for the respective quarters. The average error of approximation was $A = 13,799\%$. Because less 20%, and thus the model is considered matched with good accuracy. Coefficient of determination $R^2 = 0,69$. Consequently, it can be said that the additive model accounts for 69% of the total variation in the levels of the time series. $F_H = 6,05$, which indicates the statistical significance of the equation.

6. Now let's make a prediction from the obtained model. The predicted value Y_t of the time series level in the additive model is the sum of the trend and seasonal components. Let's use the trend equation to determine the trend component: $T = 442,55 + 4,303t$.

The forecast for the first period is:
$T_{25} = 442,55+4,303*25 = 550,117$. The value of the seasonal component for the same period is: $S_1 = 60,245$. Thus, $Y_{25} = T_{25}+S_1 = 550,117+60,245 = 610,362$. This value will allow "AirAstana"Airlines to plan the number of passengers using their services for January 2018. Now forecast for the second period: $T_{26} = 442,55 + 4,303 * 26 = 554,419$. The value of the seasonal component for the same period is: $S_2 = 69,36$. Thus, $Y_{26} = T_{26} + S_2 = 550,117 + 69,36 = 619,477$. This value will allow AirAstana Airlines to plan the number of passengers using their services as of February 2018.

The multiplicative model

We now proceed to construct a multiplicative model, which has the form [3]-[6]

$$Y = T * S * E \tag{3}$$

According to this model, each level of the time series is represented as a product of trend (T), seasonal (S), and random (E) components.

1. Using the moving average method, we perform alignment of the initial levels of the series for what:
1.1. Define the moving averages. From the calculated aligned values, the seasonal component is now excluded.
1.2. In accordance with the actual time points, we give these values. For this purpose, we determine the average of two successive moving averages, the so-called centered moving averages.

2. Estimates of the seasonal component are defined as the quotient of dividing the actual levels of the series by the centered moving averages. When calculating

the seasonal component S, these estimates are used. For this purpose, we determine the average for each season of seasonal component assessment S_i (Table 3). Seasonal effects over the period necessarily mutually extinguished. This is expressed in the fact that in the multiplicative model the sum of the values of the seasonal component over all quarters is equal to the number of periods in the cycle. In our case, the number of periods of one cycle is 6.

Table 3. Seasonal component data

Indicators	1	2	3	4	5	6
1	-	-	-	0,88	0,9	1,06
2	1,2	1,29	0,82	0,94	0,99	1,04
3	0,99	0,85	1,01	0,92	0,89	0,99
4	1,17	1,22	0,95	-	-	-
Total for the period	3,36	3,36	2,79	2,74	2,79	3,08
Average seasonal component estimate	1,12	1,12	0,93	0,91	0,93	1,031
Adjusted seasonal component S_i	1,11	1,11	0,92	0,91	0,92	1,02

For our model, we have: 1,12 + 1,119 + 0,929 + 0,913 + 0,93 + 1,028 = 6,038. Correction factor: $k = 6/6,038 = 0,994$.

Now calculate the adjusted values for the seasonal component S_i and add the data to the table.

3. Each level of the original series is divided into the corresponding values of the seasonal component. As a result, we get the values $T * E = Y/S$, which contain only a trend and a random component.

4. We calculate the component T of our model. To do this, we use the linear trend to perform an analytical alignment of the series $(T + E)$. The results of analytical equalization take the form:

$$T = 448,172 + 3,916t \tag{4}$$

Substituting in this equation the values $t = 1, \ldots, 24$, we find the levels T for each moment of time.

5. Multiplying the values T by the corresponding values of the seasonal component, we find the levels of the series. Coefficient of determination $R^2 = 0,71$. Thus, we can say that the multiplicative model explains 71% of the total variation in the levels of the time series. $F_H = 5,76$ which indicates the statistical significance of the equation.

6. Let's make a prediction on the constructed multiplicative model. The predicted value F_t of the time series level in the multiplicative model is calculated as the product of the trend and seasonal components.

To determine the trend component, let's use the trend equation (4).

Forecast for 1 period:
$T_{25} = 448,172 + 3,916 * 25 = 546,073$. The value of the seasonal component for the corresponding period is: $S_1 = 1,113$. Thus, $F_{25} = T_{25} * S_1 = 546,073 * 1,113 = 607,905$. This value will allow AirAstana Airlines to plan the number of passengers using their services for January 2018.

Forecast for the 2nd period: $T_{26} = 448,172 + 3,916 * 26 = 549,989$. The value of the seasonal component for the corresponding period is: $S_2 = 1,112$. Thus, $F_{26} = T_{26} * S_2 = 549,989 * 1,112 = 611,419$. This value will allow AirAstana Airlines to plan the number of passengers using their services for February 2018.

Conclusion

In the article, mathematical methods and algorithms for predicting time series have been developed and adapted taking into account the specifics of the tasks being solved in the interests of the airline "AirAstana and the creation of a system for forecasting the volumes of air transportation in Kazakhstan on their basis. Based on the forecast information obtained, the airline management will be able to increase the validity, objectivity and effectiveness of decision-making in business processes related to contracting and planning in forecasting the volume of air transportation in Kazakhstan, and also to use the company's resources most efficiently while not affecting the interests of passengers.

References

1. www.kГrsГж.kz.
2. Kazakhstan in 2017. Statistical yearbook. Astana (2018).
3. Noskov V.P. Econometrics, Vol. 1,2. "À business"RANH&GS, Moscow (2011).
4. Draper I., Smith G., Applied regression analysis, Vol. 1,2. Finance Statistics, Moscow (1987).
5. Ferster E., Rents B., Correlation and regression analysis methods. Finance Statistics. Moscow (1982).
6. Loskutov A.Y., Mikhailov A.S., Fundamentals of the theory of complex systems. Regular and chaotic dynamics. Moscow (2007)

Conceptual model of information system for resources storage *

M. A. Sambetbayeva[1], O. A. Fedotova[1,2], A. M. Fedotov[1,3], A. G. Batyrkhanov[4]

[1] Novosibirsk State University, Pirogova 1, 630090 Novosibirsk, Russia
[2] State Public Scientific-Technological Library of SB RAS Voshod 15, 630102 Novosibirsk, Russia
[3] Institute of Computational Technologies of SB RAS ak. Lavrentieva Ave., 6, 630090 Novosibirsk, Russia
[4] L. N. Gumilyov Eurasian National University Satpaeva 2, 010000 Kazakhstan, Astana
{Madina_jgtu,o4f8,batyr.khan78}@mail.ru
http://www.ict.nsc.ru/

Abstract One of the main current trends in the socio-economic development of society is the informatization of all areas of human activity. The tool for implementing this comprehensive process is information systems (IS) — systems for collecting, storing, processing, converting, transmitting and updating information. The article is devoted to the description of conceptual model of Information System. The model has to describe which entities can be represented at the IS, set the rules and relations (links) between entities. In particular it assumes the entity classification, abstraction, generalization. The purpose of Information Systems is to provide the end-user with necessary information. Depending on specific application area, the information systems may vary greatly in their functions, architecture and implementation. There is, however, one property, which is common to all IS. Any information system is intended for the collection, organization, storage and processing the information. The work is devoted to the problems of description and creation of information models of the IS intensively developing class — digital libraries (DL).

Keywords: information system, digital library, model, metadata, data, information, knowledge

Introduction

The article is devoted to the description of conceptual model of Information System (IS). The model has to describe which entities can be represented at the

* This research is supported by RFBR Grant of the Russian Federation (grant No. 18-07-01457) and Grant funding for scientific and scientific and technical research for 2018-2020 MES RK (№ AP 05133546).

IS, set the rules and relations (links) between entities. In particular it assumes the entity classification, abstraction, generalization. The purpose of Information Systems is to provide the end-user with necessary information.

It is obvious that automated or computerized information processing is possible only in case when it can be described with some algorithm, i.e. in terms of formal data model and some system that perceives it. As noted by A. A. Lyapunov, "the information is always relative, it depends on what kind of IS it is perceived" [1].

IS for the purpose of research support operate with publications, electronic documents, electronic collections, ontological descriptions, etc. The resources may be inaccessible due to problems with their search and identification. Semantic relations between information resources increase their value and provide additional opportunities for information retrieval and identification. The data integrated into the semantic space is a set of knowledge about a subject area as a semantic structure. This is the basis for structure investigations of scientific knowledge. One of the main tasks of integration is to set the links between certain scientific facts (for example, "what does the term cybernetics mean" or "who is the author of this article" and information system entities (persons, facts, data, documents, publications, key terms, etc.) [2].

Depending on specific application area, the information systems may vary greatly in their functions, architecture and implementation. There is, however, one property, which is common to all IS. Any information system is intended for the collection, organization, storage and processing the information. That is why, any IS, including digital libraries, is based on data storage and data access environment [3].

The environment has to provide the level of storage reliability and access efficiency, corresponding to the area of IS application.

Thus, IS are intended for:

- organization of information storage (organization of repositories, support of data storing systems);
- information management (addition, modernization, changing the data);
- data access management (monitoring of fulfilment of the data access rules and regulations), data identification;
- search for information;
- information retrieval and provision to the user (computer application) in the required format;
- visulization (provision) of the information according to the user's requirements.

Digital Library Reference Models (DLRM) are of great interest. Let us note that the Russian term "electronic library"does not quite accurately reflect the content of the definition, it might be more precise to call this class of IS as "digital library"(English equivalent).

The conceptual reference models of the digital library (for example, DLRM [4] or OAIS RM [5]) are based on world experience and include concepts such as content, functionality, user, policy, quality and architecture, which leads to a

general understanding of the essence of digital libraries [6]. The main aim of the development of the DL model is to describe the fundamental concepts, essential objects and relationships, the standard functional and structural blocks and processes that make up the universe of DL. The reference model is designed to develop narrower models with a specific architecture for subsequent implementation in the form of a software system.

Definition of IS

In the case of IS definition, there is no unanimity of views. In daily use, information systems are usually referred to as various software and hardware complexes allowing to work with data, structured with a particular formal model.

At the same time, there is still some confusion as to the concepts of "information system"(IS) and "IS architecture"; it is not at all harmless and in practice it often prevents us from clear understanding what the subject of development is in a particular project: IS, or only its AC (automation complex) or an automated system (AS) entirely. As an example, let us consider two different definitions from GOST's:

Information system: A complex consisting of processes, technical and software tools, devices and personnel, capable to meet the required demands [7].

Information system: A system designed for the collection, transmission, processing, storage and delivery of information to consumers and it includes such main components as software, information support, technical facilities and maintenance personnel [8].

It is worth recalling that in the 1950s and 1960s the information sciences in the USSR occupied a prominent place, although their development was hampered by the specifics of the social structure of society. The turn in the subsequent years to work with data and the blurring of the term "informatics"led to the fact that much of the accumulated information was rendered, if not lost, then unclaimed, and the culture of working with information was lost. Today, for most users, the consumption of information services is more important, than its providing technologies.

But the most serious problem is the crisis in the sphere of information representation. The destructive moment is the absence of common generally accepted definitions in the field of information technology when it comes to "information"processing. First of all, since the time of Kolmogorov and Claude Shannon, at the engineering level, there occurred a confusion of concepts, the unification of representations about information and data or signals that encode this information, and in fact the "information"was understood as data sets.

Until recently, when IS were relatively simple, the lack of a clear distinction between "data"and "information"was not of practical significance. But with the advent of complex IS, where functions are distributed between a person and a machine, and with the development of disciplines such as decision support and knowledge management, more precise definitions of basic concepts "data "information"and "knowledge"are needed.

Today, there are two definitions of IS (technological and engineering):

Information system is a set of technologies aimed at supporting the life cycle of "information". It includes three main components of the process: data processing and management, information management and knowledge management [9].

Information system is a software and hardware complex, including computational and communication equipment, software and linguistic support, information resources, as well as serving (system) personnel.

Part of the real world, which is modeled by IS, is called its subject domain. Since the domain model, supported by the information system, is materialized in the form of properly organized information objects, it is called the information model (see Figure 1). Information objects are characterized by metadata describing the real object, and may be supplied with annotations. Information objects may have information content.

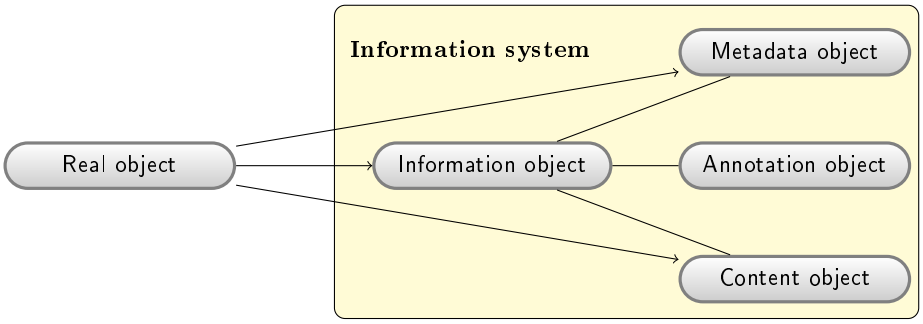


Figure 1. Information Model of IS

The above definition covers all IS classes, in particular factographic systems, which are based on database technologies and operate on structured data, and document systems that operate on documents in natural languages.

Information resource

An information resource is a concept that includes any essence of IS or DL. In the information space, all entities (documents, publications, persons, events, facts, programs and any other entities of the real or virtual world) exist only in the form of some information objects. An information resource is an abstract concept expressed by instances of one of its specializations. In particular, instances of the information resource concept are instances of an information object of any type.

So, basically, functionally, any IS presents functionally a system of managing information resources with its inherent functions (methods), relationships and links [2].

The implementation of an information resource (information object) is a unit of information, presenting a uniquely named set of data (see Figure 2) structured in the form of its inherent named attributes and methods that characterize its properties and relationships with other resources. Thus, each information resource must:

- have an identifier;
- be organized in accordance with the description of the resource (resources can be complex and structured, and in terms of their organization, they can be grouped into sets of resources that are treated as a single entity);
- be regulated by functions that manage its life cycle, characterized by a set of inherent attributes and methods describing its properties and connections with other resources;
- be expressed through an information object.

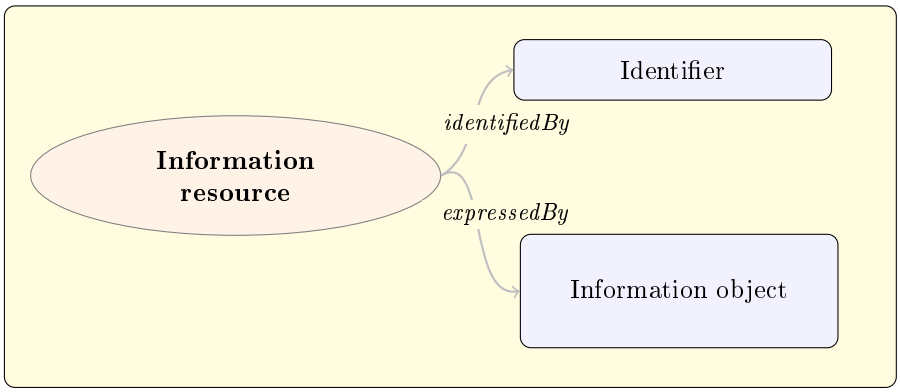


Figure 2. Determination of the Resource in IS

Each information resource is stored in some repository as a globally and uniquely named set of structured data (information about the resource, its properties, attributes, links) and, possibly, information content, for example, one or more presentation formats of the cataloged resource. These structured data describing the resource, and therefore called metadata, are used to get an idea of its properties, content, structure, search organization, ways of using, and so on.

Let us give the definitions.

In the IS, each information resource corresponds to the information object that is a traditional secondary information object containing a description of the primary resource, that is, an information object is an object that stores information about IS objects (physical objects, resources, information objects) (see Figure 3).

Each information object in the IS consists of the following objects:

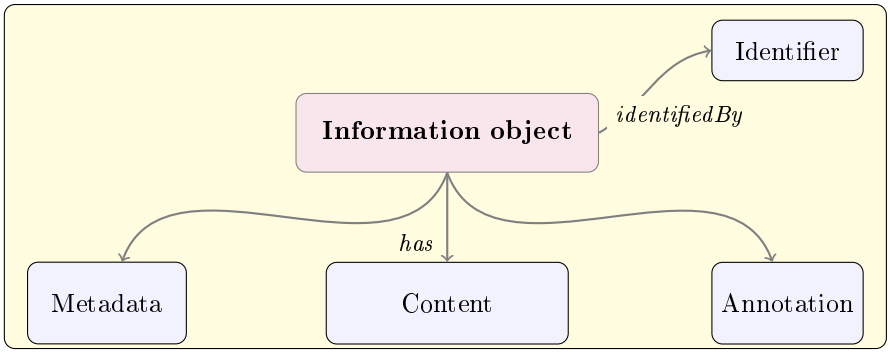


Figure 3. Information Object Model in IS

- *metadata* is an object providing information about the resource;
- *annotations* is an object annotating the resource or its part. Examples of such annotations include notes, structured comments and links. Annotation objects help to interpret the resource, contain detailed explanations, or information on how to use the resource.
- *information content* is an object that can be absent and can be used independently as a primary information object: for example, an image, a full text, etc. (primary resource) [2].

The information object is the most common concept in the system, representing an arbitrary unit of information in the IS. Information objects can also be complex objects and can be grouped into collections of information objects, which, in turn, are also information objects. Collections inherit all aspects of modeling information objects and the means of their maintenance, for example, they can be annotated.

Information objects describe all the classes of essences of the scientific information space, such as publication, person, key term or concept, dictionary entry, fact, function, organization, user, etc., and the links between them [10],[11].

Definition of the document

A document is a complete information object, presented in digital form, supplied with structured metadata, having some standard set of attributes and functions and allowing unambiguous identification.

Accordingly, the definition of the Digital Library (DL) can be given as follows: A set of structured cataloged collections of disparate electronic (digital) documents, equipped with navigation and search tools.

DL is able not only to provide a multilateral search in the catalog, but also to provide the user with a directly found resource (publication, document, photo, fact description, etc.), as well as additional information resourse, for example, authors, bibliography, organization, etc. And a great interest in the systems

of this class is explained by the actual needs of society and the availability of developing opportunities to meet them. In this regard, it is possible to formulate the main goals facing digital libraries:

- providing access to information;
- preservation of scientific and cultural heritage;
- increase the effectiveness of scientific research and training.

In most cases, the DL is a website where various texts (literary, scientific and technical, including publications, computer programs, digital maps, etc.) and media files are accumulated. The difference between DL and the magazine website is that the DL is not divided into numbers (issues) and is updated as new materials appear. The difference between DL and the site of free publications is that DL is usually selected by the project administrator according to certain rules and does not always provide a communicative environment around the published texts.

In existing developments of digital libraries, as a rule, the search and access to information are provided only through visual graphical user interfaces. This is good for a human user, but very bad for a user-system. To provide search functions outside graphical interfaces, special network services and query languages are required. Ideally, all information systems should support a single search profile and a single query language.

A digital library can be called a system of network services that provide access to digital content, united by a single system for managing this access [11]. In addition, some organizations that take responsibility not only for the implementation of the functions of managing digital content, but also for providing access to it for all interested parties. This definition of the digital library fully corresponds to the definition of the traditional library as an organization in the system, for example, of the Ministry of Culture [12].

Let us single out three concepts for distinguishing what is usually understood by the term "digital library"(see Figure 2):

- Digital Library (DL) is a specific DL with its users, policy, content and responsible organization, which can be virtual.
- DL system (DLS) is a software system (for example: DSpace [13]), which is based on a certain (possibly distributed) architecture and provides all the functionality required by a particular digital library. Users interact with the digital library through the appropriate digital library system interfaces.
- DL Management System (DLMS) is a generalized system software (for example: DLMS ICT SB RAS [2]), that provides the appropriate software infrastructure (I) for administering a digital library system, including a set of functionality that is considered fundamental for digital libraries and (II) allowing to integrate additional software offering specialized or enhanced functionality for creating and managing DL.

In DL each resource is defined as follows (see Figure 2):

– has an identifier;
– organized in accordance with the format of the resource, the format is described here by structural metadata that are an ontology (the resource can be complex and structured, since it, in turn, can consist of less resources and have links to other resources);
– described by structured metadata and annotations;
– can be characterized by quality parameters;
– can be regulated by policies, the policy of managing its life cycle;
– expressed through an information object;
– can be described or supplemented by an information object.

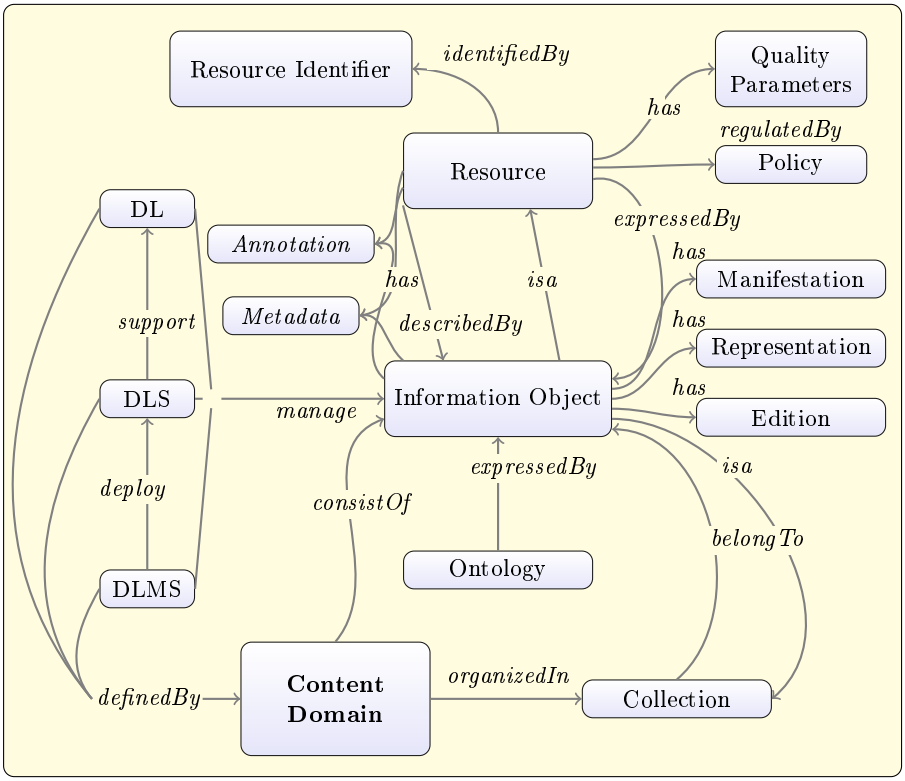


Figure 4. The content domain of DL

From an organizational point of view, resources can be grouped into collections of resources that are treated as a single entity.

Information model of DL

Based on the goals of DL and the analysis of existing IS aimed at supporting scientific research, the following functional requirements for the model of a scientific digital library can be formulated as follows [14]:

- Reliable long-term and non-stop storage of information.
- The relevance, completeness, reliability of origin of documents.
- Historicity of information.
- Geo-referencing of information.
- Availability of a large number of dictionaries-classifiers (directories), to ensure the identification and classification of resources.
- Support for heterogeneous and poorly structured information resources.
- Support of interrelationships of information resources. Identification of information resources.
- Providing information to the user in the form chosen by the user.
- Availability of intelligent services to service user requests.
- Presence of program interfaces for support of analytical work of the user with the help of software applications.
- Support for interoperability requirements at both program and semantic levels.
- Support of work with external sources (for example, catalogs of libraries and magazines, digital depositories of information resources, etc.). The most important conclusion from the foregoing is that the information model of the DL should be multilevel and consist of at least the following components [10]:
- data store — repository,
- a metadata server,
- application server (dispatcher),
- dictionaries — directories.

The repository is an independent system of long-term, reliable storage and access to heterogeneous digital objects, which is intended to provide electronic (digital) versions of documents (books, scientific articles, reprints, letters, images and other materials presented electronically), and providing a clearly specified method of management (data schema, model of operations), which includes, to some extend, the ways of accessing, sampling and manipulating information resources.

A collection is a collection of information objects (information resources), united by common properties (for example, belonging to the same class of objects, the same structure, the general thematic focus, etc.).

The metadata server must ensure the work with metadata — the cataloging of all information resources in accordance with generally accepted international standards. The application server must provide the basic services of DL. It provides the services necessary to generate information resources using and not using interactive user interfaces. Services allow you to use the metadata of other information systems in dialog mode and batch modes. Their functionality should

provide search and retrieval of metadata from other systems, converting received metadata into schemes and structures of the local system.

Directories — managed dictionaries (key signs, key terms) is a special kind of metadata reflecting the most essential properties of an information object and having the most importance from the DL's point of view. Specificity of words is determined by the terminology of the specific subject area, to which the DL is devoted. It is necessary to consider different types of key terms (key terms in the standard understanding, key terms describing the person, key terms describing the organization, key terms describing the time periods, key terms describing geographical concepts). This is a set of databases (normative dictionaries) containing information about authors and other persons (authoritative records), geographical points, cities, publishers relevant to a particular topic or section of DL (for example, to a scientific school), thematic classifiers, thesauri, rubricators, descriptions of the subject area and classifiers of documents.

The basis of the content of information security is information objects that represent the main types of entities:

- subjects: actor, person, organization, application, etc.;
- objects: publication, journal, document, fact, scientific result, event, project, photography, etc.;
- relationships: concept, key term, event, time, place, etc.

As a rule, the DL storage systems provide storing documents that are objects of works — the main type of information content objects (content), as well as some other objects related to them:

- descriptions of organizations, departments of organizations and publishers, where objects were created or published;
- description of people (in the scheme it is the person's essence), working in these organizations (departments) — authors of objects-works;
- a description of projects within which objects are created;
- scientific journals (periodicals) and conferences that publish them. A special type of object is an object collection can be applied to any aggregate (grouping, aggregation) of information objects. Information objects here can be of any type, i.e. collections can be both sets of subjects, and objects, for example, a set of organizations, journals, etc. The criteria for such collections can be determined, for example, by the generality of the location, the generality of the authors, the chronology, the theme, the origin or the membership, etc. Collections can contain any number of objects and the criteria for selecting these objects may change with time.

Metadata

The key moment in working with documents (information objects) is the use of metadata. Metadata is structured information that describes, explains and locates an information resource [15]. Metadata is needed to solve the following tasks:

- provision of information about documents, to get an idea of their properties, content, structure, ways of using, etc.;
- systematization of information about documents and system catalog maintenance;
- selection from a document set of a certain subset by formal characteristics and document comparison on formal grounds;
- intrasystem technological tasks related to supporting the document preparation, placing documents in the information environment, etc.;
- external technological tasks, first of all, related to data exchange with external information systems.

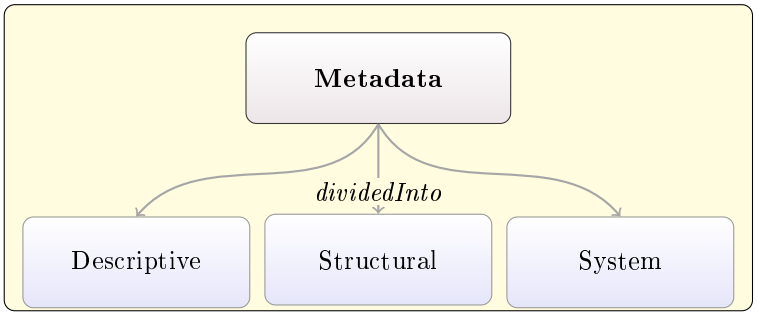


Figure 5. Basic Types of Metadata

Metadata reflects the most significant properties of the object, which have the greatest significance from the point of view of information system. Metadata is divided into three types: descriptive, structural and system (see Figure 5).

Descriptive metadata are metadata that describe the content and properties of an information resource, for example, bibliographic data the main task of which is an unambiguous representation of a digital object for the outside world and in various applications.

Structured metadata are metadata that characterize the overall structure of the information resource and its components, volume and other properties of the information resource.

System or administrative metadata serve to provide a system for managing information resources and administering information resources, for example, the date of creation or modification of the resource, the owner's identifier, and so on.

The composition of attribute names, the restrictions imposed on their values, the set of rules that determine the structuring of attributes, their semantics are specified by a metadata schema. The rules for metadata streucturing in a certain sense are similar to the rules suggested by the ontology for constructing relationships between concepts. The rules that define the representation of

metadata in the information system, as well as the rules for their interpretation, form a metadata format.

A metadata schema is a set of metadata elements, each of which has a certain name and semantics, takes values with the set semantics or values from a managed dictionary, called an encoding scheme. In accordance with the recommendations of Dublin Core (DCMI) [16], the information object must have a basic set of attributes. The set of attributes of the object is expanded depending on its class.

The encoding scheme is the recording system or the rules for analyzing the values of the elements of the metadata. The value defined by the encoding scheme is a code (symbol) selected from a controlled dictionary (for example, a classification system index or a value from a set of subject headings) or a string of a specific structure (for example, "2000-01- 01 "as the standard date designation).

Controlled Vocabulary is a list of predefined codes, terms, words, phrases or notations designed to indicate subject headings or the composition of valid metadata element attribute values. All codes (terms) in the dictionary must have a unique definition.

A particular kind of metadata is metadata that unambiguously characterize (identify) documents that are necessary for the systematization of documents and for effective search, called authoritative.

Authoritative control (authority controls) is the provision of access to documents through a special class of metadata elements (proper nouns, subject headings, classification indices, activities, geographical names, names of document creators, etc.). The values of the elements of these metadata (which are keywords) are selected according to the encoding schemes from the managed dictionary.

There are problems in using authoritative data: first, authoritative monitoring must ensure the use of repeated geographical names and the names of document creators that are written identically, but denote different places or different people, and secondly, names can vary in time and space: for example, Germanized or Anglicized names and denominations are not authentic (authentic), so to study history you must also know the real names.

A particular class of metadata is the metadata describing the relationships and links between information resources — documents.

A link is a relationship between an instance of a certain entity and what it has been coordinated with. According to Aristotle, "there is what it is,"only "in connection with another, or in some other relation to another."The number of types of relationships in the information system is determined by specific goals. In the real world, their number tends to infinity. From the point of view of the information needs of users, we will be interested only in relationships between documents, for example, "Publication - Publication "Publication - Person "Publication - Vocabulary "Publication - Keyword "Persona - Vocabulary"and so on. Links exist between all classes of documents.

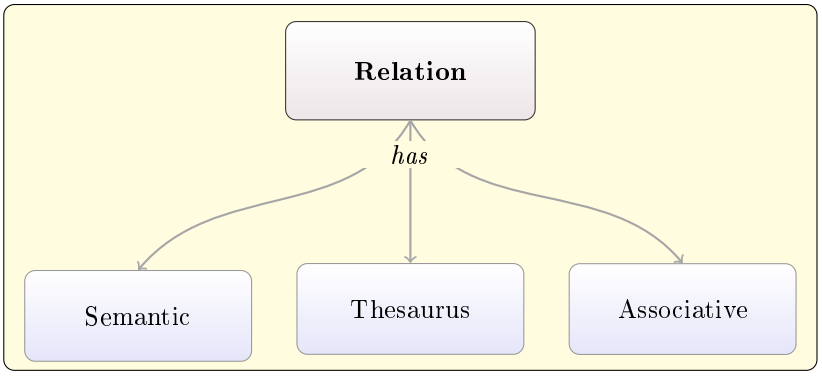


Figure 6. Types of Links

Depending on the conditions of use, the relationships between documents are subdivided into the following types: thesaurus relationships, semantic relationships and associative relationships (see Figure 6):

- thesaurus links: the relationships used in the description of information-subject thesauri are hierarchical relationships and the relationship of association. The basic hierarchical relationship is the subsumption relationship (parent-child, wider-narrower, higher-lower, part-entire). The main purpose of establishing associative relationships between documents is to indicate additional links [17]. Thesaurus relationships are specific for the relationship between key terms. They are much less frequently used when assigning relationships between publications and dictionary entries.
- Semantic links: named relationships between documents, for example, "Person is the author of Publication"; "The Publication is dedicated to Person"; "The Publication is devoted to the Fact described in the Dictionary article."
- Association links: relationships between two documents that are close in content, for example, keywords in the description of Publications, Persons, Dictionary articles.

In the information system, there are two possible ways of realizing the links (relationships) between the documents: hard and soft. Hard links are realized using DBMS by means of references to primary keys of record. Unfortunately, this type of communication is not protected against integrity violation (in case of incorrect modification or deletion of the record). Soft links are implemented through the matching procedure. This way of establishing links is protected from any violations of the integrity of the database and is quite convenient for users, since visual mnemonic definitions are used to indicate the need for communication.

Conclusion

As a result of the analysis of user needs, existing models and technological solutions, the main (basic) entities used in the model, as well as their classes and subclasses, types of metadata and relationships are specified and discussed in detail. The advantages of this model are the support of multilingual thesaurus and the ability of using different classification schemas.

References

1. Lyapunov A.A. On the relation of concepts matter, energy and information // In book: Problems of theoretical and applied cybernetics. — Moscow: Nauka, 1980. — P. 320–323 (in Russian).
2. Shokin Yu.I., Fedotov A.M., Zhizhimov O.L., Fedotova O.A. The evolution of information systems: from websites to information resource management systems // Vestnik NSU: Information Technologies, 2011. — Vol. 13. — N 1. — P. 117-134 (in Russian).
3. Fedotov A.M., Shokin Yu.I. Electronic Library of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences // Information Society. — 2000. — N 2. — P. 22–31 (in Russian).
4. The Digital Library Reference Model / Candela L., Athanasopoulos G., Castelli D., Raheb K.El., Innocenti P., Ioannidis Y., Katifori A., Nika A., Vullo G., Ross S., Thanos C. // D3.2b DL.org Project Deliverable, April 2011 (in English).
5. ISO 14721:2012 Reference Model for an Open Archival Information System (RM OAIS) // Recommended Practice, CCSDS 650.0-M-2 (Magenta Book) Issue 2, June 2012 (in English).
6. Reznichenko V.A., Proskudina G.Yu., Kudim K.A. Conceptual Model of Digital Library [Electronic text] // Proceedings of the 11th All-Russian Scientific Conference RCDL, Russia, Petrozavodsk, September 17-21, 2009. — P. 23–31 (2009) (in Russian).
7. GOST R ISO/IEC 12207-99. Information technology. The life cycle processes of software. — Moscow, 1999 (in Russian).
8. GOST 34.003-90. Information technology. Set of standards for automated systems. Terms and definitions. – Moscow, 1990 (in Russian).
9. Sovetov B.Ya. Information technology: a textbook for high schools. — Moscow: Vysshaya Shkola, 2005 (in Russian).
10. Fedotov A.M. Methodologies of the distributed systems buildup // Computational Technologies: Special Issue. — 2006. — Vol. 11. — P. 3-16 (in Russian).
11. Shokin Yu.I., Fedotov A.M., Zhizhimov O.L., Guskov A.E., Stolyarov S.V. Digital Libraries — the path of integration of information resources of the SBRAS // Vestnik KazSU: Special Issue. — Almaty, Kazakhstan, Al-Farabi Kazakh National University, 2005. —N 2. — P. 115-127 (in Russian).
12. Zhizhimov Î.L., Mazov N.À., Fedotov À.Ì. Some notes on the evolution of digital repositories of traditional libraries for a full-featured digital libraries // Vestnik VSUES. — 2010. — Vol. 7. —N 3. — P. 55-63 (in Russian).
13. DSpace: an open source solution for accessing, managing and preserving scholarly works // MIT Libraries, HP Labs. 2007 (in English). Available at: `http://www.dspace.org/`
14. Fedotov, A.M., Barakhnin, V.B., Zhizhimov, O.L., Fedotova, O.A. A model of information system to support scientific and educational activities // Vestnik NSU: Information technology. — 2014. — Vol. 12. — N. 1. — P. 89-101 (in Russian).

15. National Information Standards Organization: Understanding Metadata // NISO Press, Bethesda, MD, 2004 (in English).
16. DCMI — Dublin Core Metadata Initiative (in English). Available at: `http://www.dublincore.org`
17. Lukashevich N.V. Thesauri in problems of information retrieval. Moscow: MSU, 2011. — 512 p. (in Russian).

Applying spatial analysis methods in addressing city understanding issues

D. Shakenov[1], S. Smailova[1], and A. Nugumanova[2]

[1] D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University,
Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
[2] S. Amanzholov East Kazakhstan State University,
Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
Damir18yo@gmail.com,Saule_Smailova@mail.ru,yalisha@ya.ru

Abstract In this paper, we use spatial analysis and data mining methods for constructing a comfort index of urban districts. For this purpose, we use several indicators which determine the strength of the impact of various factors on districts of an urban space. We combine all these indicators into a single table and apply special procedures for data mining. Then we transfer the obtained results to the GIS and form spatial comfort index for each urban district of a given city. The result of this process is a heat map. The red color indicates the most attractive and comfort districts, the yellow – average districts, and the white color - the least attractive ones. The proposed approach is invariant to the purpose of application and provides exploring the city from different points of view making decisions in different areas of urban development.

Keywords: Data mining, spatial analysis, big data, comfort index

Introduction

As it shown in the work [1], now is the exciting time to be an urban scientist because "an increasing amount of aspects of human life can be traced back through diverse digital footprints and, when aggregated, can reveal emerging patterns". Big data available today can be defined as a side effect or consequence of economic transactions which reflect livelihoods in cities. For example, data important for our research is revealed by parsing the site krisha.kz that is recognized as Kazakhstan's leading real estate vertical [2]. Similarly, many urban researchers can access the data of their interest from various open sources. First, unlike a statistical review or an economic report, specifically created for decision making, these sources were not originally intended for this end, their nature is accidental [1]. Second, these sources are available for free download or for crawlers. Finally, they have permeated almost all economic operations, so we can talk about their ubiquity.

Open sources representing information for urban understanding become especially valuable when they incorporate the spatial coordinates where the event occurs. Actually the problem of urban development is intimately linked

to the spatial organization of cities. Therefore, spatial models lead to a more realistic analysis, yielding more reliable regression estimates. In this paper, we use spatial analysis and data mining methods for constructing a comfort index of urban districts. We use several indicators which determine the strength of the impact of various factors on a given point of an urban space and transfer these indicators to the GIS. Therefore, we form spatial comfort index for each district of a given city. In the following, Section 2 describes the context of our study; Section 3 describes the experimental work; Section 4 draws the main conclusions of the study.

Background

One of the valuable parameters that determines real estate price is the standard of living or comfort. The higher it is, the higher the real estate price. The standard of living is determined by high availability of urban services, by good economic and ecology factors and by opportunities to quick access to social facilities, i.e. schools, hospitals, parks, shops, walking areas and sports centers, cafes and so on. All these factors can be combined in what is known as the hedonic pricing model. The model is used to estimate quantitative values for ecosystem or environmental services that directly impact market prices for real estates [3,4]. However, the opposite argument can also be made: the standard of living in a certain city district can be determined by comparing real estate prices in this district and other ones. In other words, we can try to use the open data from real estate market to estimate the index of living standard.

Authors of work [5] divide the real estate data on three traditional categories: 1) financial, 2) transactional and 3) physical. Financial data refers to information on real estate-related stocks. Transactional data refers to information on real estate purchases, mortgages, leases, expenses etc. Physical data refers to information about the actual real estate structure or characteristics and locational data. And, according to these authors, with the development of geo-information systems (GIS), new kinds of data could be efficiently utilized in the real estate industry. These are extra-locational spatial data which represent information on spatial phenomena outside of the physical boundaries of a property. Examples of extra-locational data include neighbourhood information, traffic sheds and street flow patterns, analyses of proximity to amenities and disamenities, viewsheds, accessibility metrics, etc. [5] In other words, extra-locational spatial data describes how properties relate with each other. Spatial modeling for real estate market is a very promising field of research since it allows to more precisely determine district's overall grades.

One of the very relevant work in this field is the "Walk Score" project [6]. The project is aimed "to promote walkable neighborhoods" and to include walkability as a typical characteristic of a house. They use a special index named as Walk Score (WS) that includes several marks of walkability such as accessibility and street network characteristics to offer an overall measure of the walkability of a district, as defined by its latitude and longitude coordinates. They provide a

heatmap of WS for some cities. The data are available on the project's website and via API. Another work focused on the problem of spatial modelling of active accessibility is [7]. As the authors of the work say, "the measurement of active accessibility is not straightforward and it can represent significantly different features of the built environment". They present a review of published research and argue that almost all of analyzed methods have conceptual and computational limitations. In conclusion they present some guidelines that might improve the value and clarity of active accessibility research, theory, and practice.

Spatial prediction models for real estate market analysis are proposed in the work [8]. The authors confirm that "the inclusion of the spatial aspect of the analysis may result in improvement in the quality of models". They compare the quality of prediction for several models: a classical linear model estimated with OLS, linear OLS model including geographical coordinates, Spatial Expansion model, spatial lag and spatial error models, and geographically weighted regression. For their opinion, best fit to the data among the presented models has proved a geographically weighted regression.

Nevertheless, as noted in the work [1], "although very promising, the scientific use of data of this nature for urban purposes is still at a very early stage". First applications do not come from traditional urban and engineering practices but from computer science researchers. And our study is not an exception. We are not urban experts but we hope that our work will provide them with a more informed basis for achieving the optimal development of cities.

For example, as it shown in work [9], one of the significant shortcomings of modern real estate portals is that they apply non-spatial methods to analyze and visualize rental price data. To quote the authors of this work, "portal operators neglect real estate agents' mantra that exactly three things are important in real estates: location, location and location". Although real estate portals represent the spatial reference of their listed apartments, in many cases geo-information data is just used to "pin" map the listings.

In this paper, as we mentioned earlier, we collect and analyze data from the Kazakhstani real estate portal krisha.kz. Here, people who want to buy real estate can meet with those who want to sell their property. In addition, on this site one can find the full range of household services, contact the specialists in housing law and insurance, find a good furniture store and learn about the latest news of the real estate market. The site has been functioning since April 30, 2006, but its history began almost 10 years earlier, from the first issue of the newspaper "Krisha"(Roof). According to attendance the krisha.kz site ranks first in the category "Real Estate"in Kazakhstan. On average, 1,400,000 unique visitors visit the site per month, and they which view over 60,000,000 pages.

The number of visitors and registered users of the site is growing daily. And if earlier the majority of visitors came to the site from Almaty and Astana, recently there has been a real boom of announcements from the other regions of Kazakhstan. Thus, to date, krisha.kz is one of the most effective portals for advertising and private ads related to real estate.

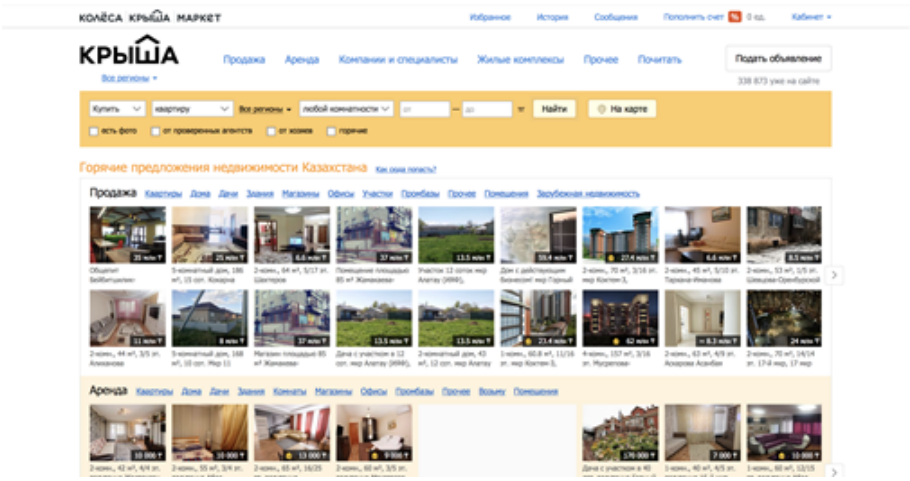


Figure 1. The home page of the krisha.kz site

Experimental work

In this Section, we follow the classical "path from data to understanding" described in [3] (see Figure 2). The 7 stages of this path are:

1. acquiring;
2. parsing;
3. filtering;
4. mining;
5. representing;
6. refining;
7. interacting.

Acquiring and parsing

At first we obtain the structure of HTML page, which contains the necessary raw data (see Figure 3). A Python script was written for parsing HTML-pages and acquiring data about each of the ads presented on these pages (one page contains 20 ads).

The following data was extracted for each ad:

– date – a date when an ad was submitted;
– city – a city where a property is located;
– address – an address of a property;
– lat, lon – geographical latitude and longitude of a property;

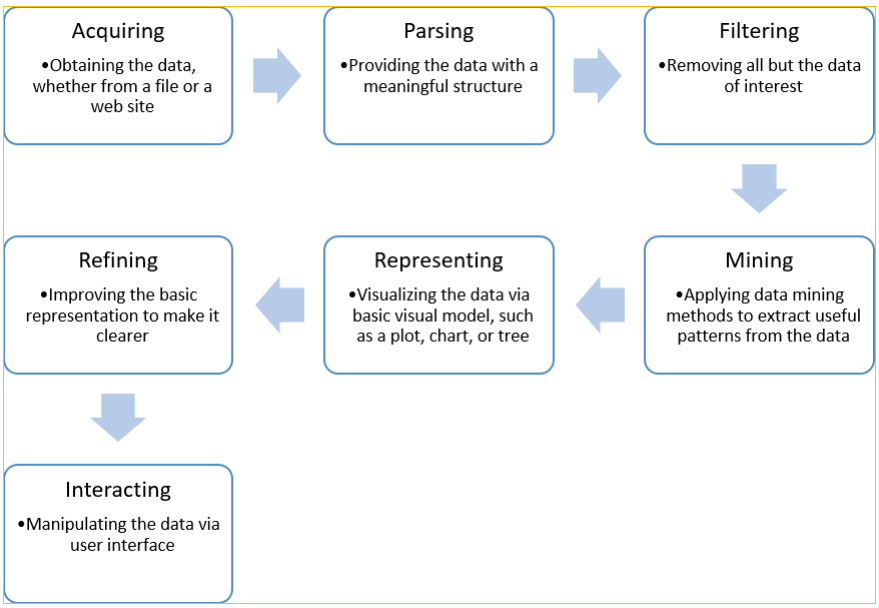


Figure 2. The path from data to understanding

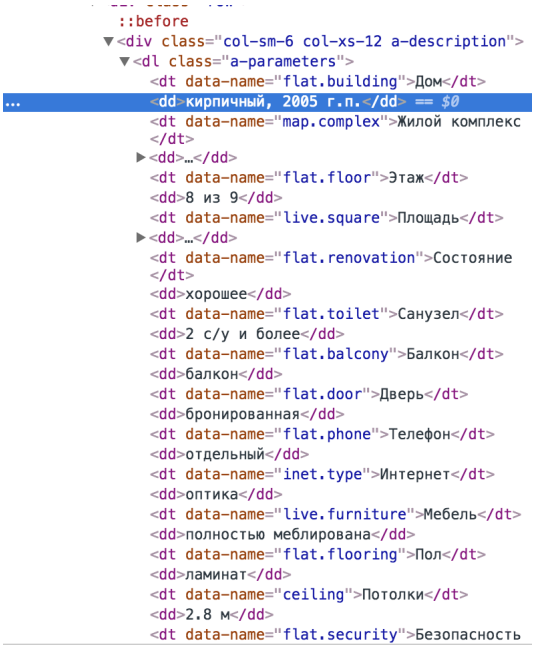


Figure 3. HTML DOM of an advertisement

- price – a property's price;
- room_count – a number of rooms;
- area_total – a total area;
- floor – a floor;
- other secondary fields.

The data was saved in a csv files. Then with the help of R system this data was loaded in a dataframe.

Filtering and mining

Data filtering consists in removing ads which are mistakenly recorded as from Ust-Kamenogorsk. For this purpose we check a longitude and latitude of all selected ads. In addition we remove all duplicate records. The code and first 6 records of our dataset are represented in Figure 4. Data mining procedures allow us to reveal patterns in the sale-purchase process. For example, we identify the relation between number of ad views and characteristics of a property. So we can determine that a 2 room apartment in the Strelka district and with a good overhaul was the most interesting.

```
data <- filter(original_data,
      49.868578 <= lat & lat <= 50.037816,
      82.403912 <= lon & lon <= 82.863279,
      price > 0)
data <- data[!duplicated(data$id),]
head(data)
```

id	date	city	address	lat	lon	price	room_count
20968131	03.12.2017	Усть-Каменогорск	Сатпаева 15/2	49.90189	82.62717	4500000	1
27321578	03.12.2017	Усть-Каменогорск	Михаэлиса 17	49.96534	82.60470	7200000	2
21558528	03.12.2017	Усть-Каменогорск	Маяковского 18	49.96754	82.58084	6600000	3
26601786	03.12.2017	Усть-Каменогорск	Дружбы Народов 2/2	49.90238	82.66024	27000000	4
27445157	03.12.2017	Усть-Каменогорск	Бажова 544	50.02068	82.50954	5000000	1
24887249	03.12.2017	Усть-Каменогорск	Космическая 13	49.96270	82.60845	5800000	2

Figure 4. A filtering code and results of filtering

Representing and refining

We provide some charts and plots for representing data. The chart in Figure 5 shows how often the site users add real estate ads. A pie chart in Figure 6 displays the number of ads served by the day of the week. This pie chart clearly shows that users are most active in submitting ads on weekends. The histogram in Figure 7 shows that the most sold apartments are two- and three room apartments. The boxplot in Figure 8 shows the relationship between the price of an apartment and the number of rooms.

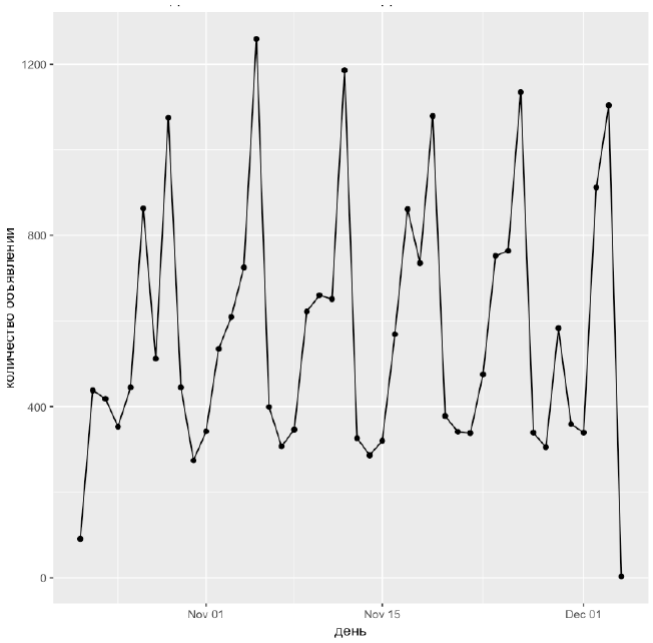


Figure 5. A plot "ads number by days"

Interacting

Using the graphical tools of R system we can create a huge amount of diagrams and graphs, including interactive ones. Below, Figure 9 presents an interactive map of the city with the indicated properties on the market.

Spatial analysis

The heatmap tool is at the core of our analytics. We create a heatmap using the data about real estate purchases. The red color indicates the most attractive

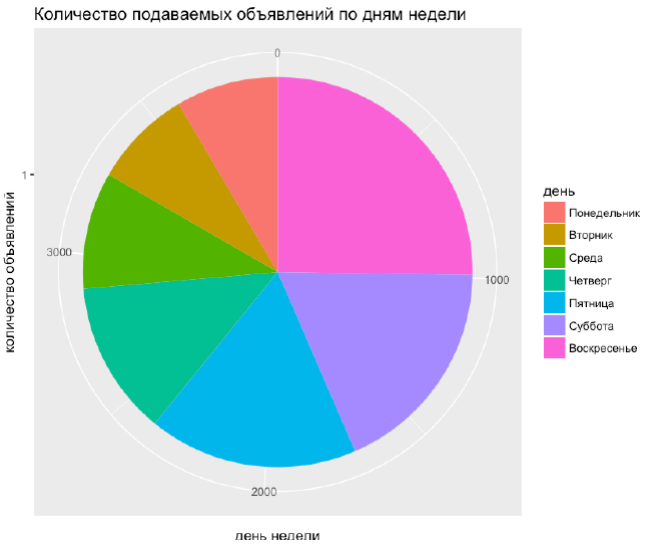


Figure 6. A pie chart "ads umber by week days"

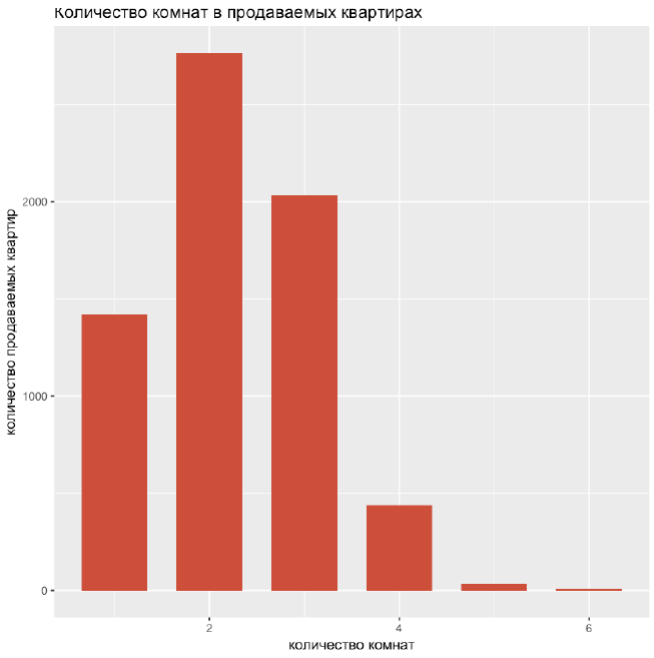


Figure 7. A histogram "sails by room numbers"

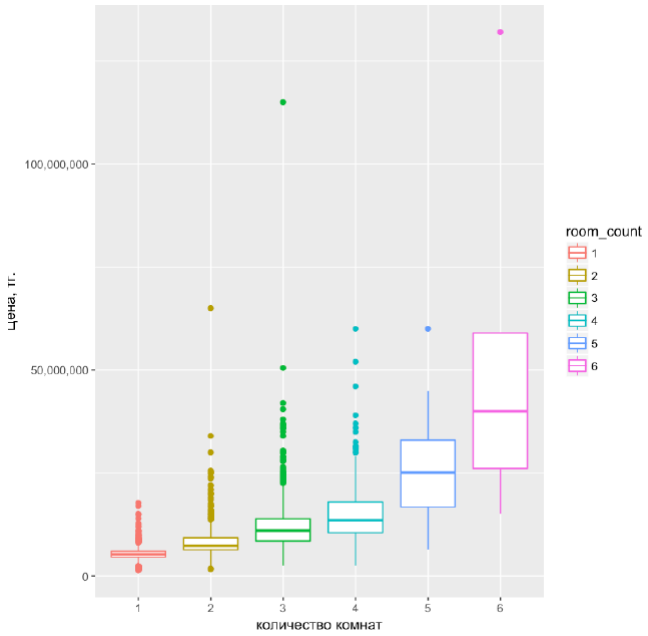


Figure 8. A boxplot "price by room numbers"

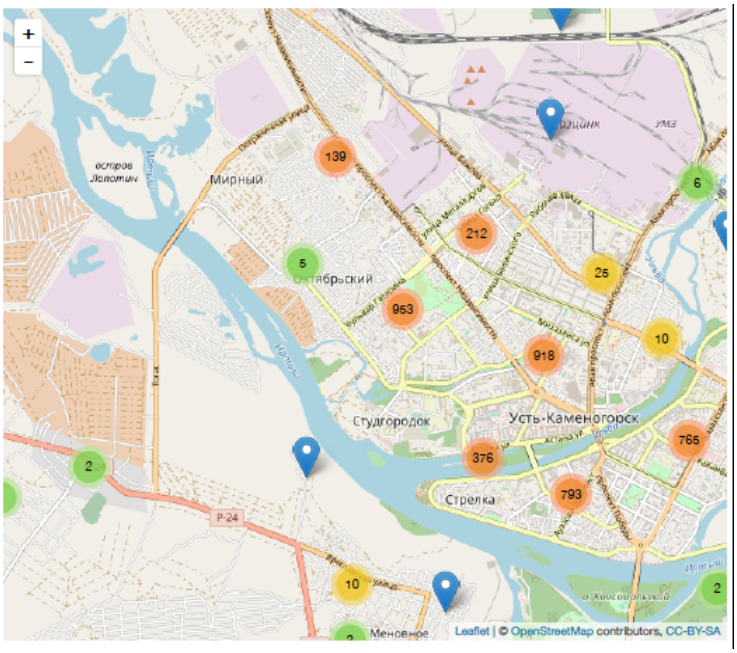


Figure 9. An interactive map of real estate objects

and comfort districts, the yellow – average districts, and the white color - the least attractive ones. The received map clearly shows three area of demand for apartments in the city of Ust-Kamenogorsk. This shows in favor of polycentric development of the city, which is a fairly good sign. Polycentric development of the urban environment prevents the emergence of economically backward, and as a consequence, socially and economically depressed areas.

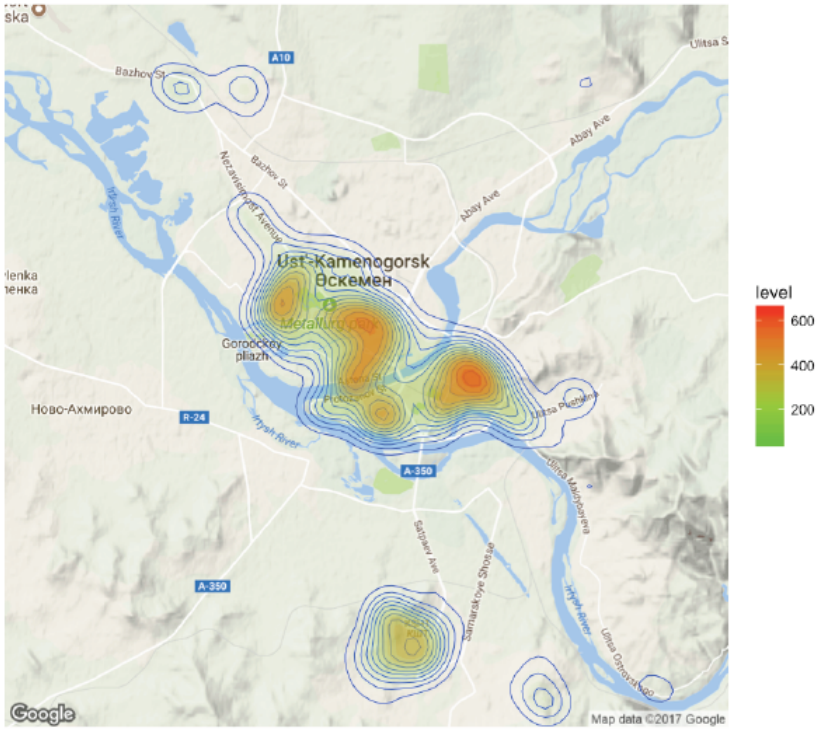


Figure 10. A heatmap of demand for apartments

Conclusion

The conducted review analysis showed that there is a large amount of open data from which it is possible to extract information and properly use them for city understanding. Possible methods of analysis were examined to obtain a model. For data manipulation, visualization, processing and further training, the language R.

References

1. Arribas-Bel D. Accidental, open and everywhere: Emerging data sources for the understanding of cities //Applied Geography. – 2014. – Vol. 49. – P. 45-53.
2. krisha.kz | The specialized site about real estate in Kazakhstan. // Digital resource. URL: krisha.kz (date of access: 24.04.2018).
3. Tyrväinen L. The amenity value of the urban forest: an application of the hedonic pricing method //Landscape and Urban planning. – 1997. – Vol. 37. – №. 3-4. – P. 211-222.
4. Noor N. M., Asmawi M. Z., Abdullah A. Sustainable Urban Regeneration: GIS and Hedonic Pricing Method in determining the value of green space in housing area //Procedia-Social and Behavioral Sciences. – 2015. – Vol. 170. – P. 669-679.
5. Winson-Geideman K., Krause A. Transformations in Real Estate Research: The Big Data Revolution //Presentation at the 22nd Annual Pacific-Rim Real Estate Society Conference. – 2016. – P. 17-20.
6. Brewster M. et al. Walkscore.com: A New Methodology to Explore Associations Between Neighborhood Resources, Race and Health: Report of American Public Health Association. – Boston, 2009.
7. Vale D. S., Saraiva M., Pereira M. Active accessibility: A review of operational measures of walking and cycling accessibility //Journal of transport and land use. – 2016. – Vol. 9. – №. 1. – P. 209-235.
8. Chrostek K. et al. Spatial prediction models for real estate market analysis //Ekonomia. – 2013. – Vol. 35. – P. 25-43.
9. Schernthanner H. et al. Spatial modeling and geovisualization of rental prices for real estate portals //International Conference on Computational Science and Its Applications. – Springer, Cham, 2016. – P. 120-133.

Mathematical model of the monitoring system of university development

L. Suleimenova, Ju. Vais, and S. Rakhmetullina

D.Serikbayev EKSTU,
Serikbayev str. 19, 070010 Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
suleimenovalr@gmail.com

Abstract The proposed system for predicting the indicators that characterize the results of university activities is developed on the basis of J. Forrester's system dynamics system. Based on the results of the analysis of cause-effect relationships, a set of mathematical models was developed to monitor the quality of training in a higher education institution. An algorithm for constructing a model is given on the example of one of the simulated variables. The model is a system of non-linear differential equations, from the solution of which the simulated characteristics of the educational process are determined. The proposed approach is focused on solving complex problems of managing the educational process in universities. The structure of the proposed model repeats the structure of cause-effect relationships in the system, and also provides the person responsible for managing quality control, the ability to quickly and adequately assess the performance of the system.

Keywords: system dynamic model, university development, monitoring, mathematical model

Introduction

It is generally believed that university's core activities are providing high-quality education and conducting researches. Appropriate management strategies are able to ensure the effective performance of higher education institutions. Since university appears to be a complex social system, it is argued that there are considerable challenges in its managing. The system seems to be non-linear and, thereby, it becomes difficult to predict the implications of applied managerial policies in the future. The system thinking approach could serve as a method to support decision-making processes in higher education [1].

There is a variety of studies devoted to university's decision-making processes and policies. However, dynamic model-based approach to university management seems to be paid less attention, especially, in a real life where policy-makers normally use linear statistical tools and models [12]. The interest in System Dynamics modelling in higher education has been constantly growing; however, there is no unified and accurate model for the university system.

The existing monitoring systems do not allow covering the whole range of university activities, as well as external and internal factors that are influencing

on the activity. Despite the fact that indicators and performance criteria designed to monitor the universities activities play a significant role in assessing the performance of educational institutions, they are regularly reviewed and adapted to the changing conditions of the external environment. Therefore, an urgent task today is the development of an analytical tool for monitoring and forecasting the dynamics of indicators, taking into account the interaction of indicators and factors (internal and external). It should be noted that strategic management of the university performance is a complex task and requires consideration of internal (including inverse) interrelationships between the various characteristics of the institution. To solve this problem, it is proposed to design an analytical monitoring tool based on the use of system dynamics methods.

$$\frac{dy}{dx} = y^+ + y^- \tag{1}$$

where y^+/y^- - is the positive/negative rate of the variable y, which includes all the factors that cause to increase/decrease the y variable. Positive and negative rates determine the existing instantaneous incoming and outgoing flows between the levels of the system and reflect their interaction, and the levels measure the state of the system, which is achieved as a result of the addition of factors influencing. As decision procedures here are decisions of decision-makers on changes in the values of factors that affect the dynamics of indicators. The rate is a product of functions that depend on the combinations of the main variables (2):

$$y^{\pm} = g^{\pm}(y_1, y_2, ..., y_n) = f^{\pm}(F_1, F_2, ..., F_k) = f_1^{\pm}(F_1) \cdot f_2^{\pm}(F_2)...f_k^{\pm}(F_k) \tag{2}$$

where $F_i = g_i(y_{i1}, y_{i2}, ..., y_{im})$ - influencing factors, $m = m(j) < n$, $k = k(j) < n$ (number of simulated variables), $i = \overline{1,n}$. Thus, there are fewer factors than the main variables, and each factor does not depend on all the system levels, but only on some part of them. This allows simplifying the task of modelling.

Then a system of non linear differential equations is compiled, from which the values of the simulated variables $y_i(t), i = \overline{1,n}$ are determined for a given time interval.

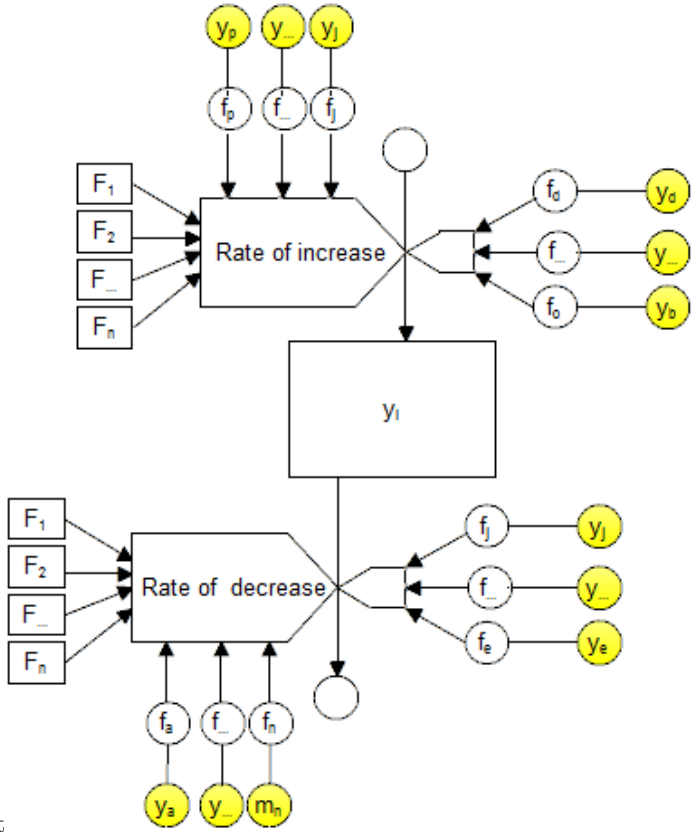
Thus, to solve the task, it is necessary to carry out the following studies:

- determine the set of the most significant factors $F_i(t), i = \overline{1,v}$ that influencing the simulated variables $y_i(t), i = \overline{1,n}$;
- construct a graph of cause-effect relationships G, reflecting the relationship between variables $y_i(t), i = \overline{1,n}$ and factors $F_i(t), i = \overline{1,v}$;
- write the equations of system dynamics, the solution of which allows us to determine the values of variables $y_i(t), i = \overline{1,n}$ at different time intervals.

Based on the analysis of the cause-effect relationships existing between the predicted indicators, an oriented graph is developed. Fig. 1 shows an example of a subgraph that characterizes cause-effect relationships that affect the magnitude of the system variable $y_i(t), i = \overline{1,n}$. The predicted characteristics are the

vertices of the graph, and the outgoing and incoming arcs characterize the functional connections between them.

When forming the graph of cause-effect relationships, great difficulties arise with the definition of relevant links that are taken into account in the future of the mathematical model synthesis for system functioning process monitoring. According to the principle of universal interconnection of objects, phenomena and processes of the surrounding world, between the simulated variables there is a huge number of different relationships, both direct and inverse, which can not be fully accounted for. In connection with this circumstance, only those cause-effect relationships are selected which, in the opinion of experts, significantly affect the magnitude of the simulated variables [4]-[2].



weightweight

Figure 1. Subgraph of cause-effect relations

Indicators can be: absolute and relative.

Absolute - an indicator in the form of an absolute value, reflecting the time or cost characteristics of processes.

Relative - economic indicators, defined as the ratio of the absolute indicator to the baseline value or as a ratio of two disparate indicators.

Taking into account all functional dependencies from other system levels, the final equation for the variable $y_i(t), i = \overline{1,n}$ takes the form depending on the value:

For absolute value:

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = x_i(t)(x_i^+ - x_i^-) = \cdot x_i(t)(f_1^+(F_1) \cdot f_2^+(F_2) \cdot ... \cdot f_k^+(F_m)) -$$

$$-x_i(t) \cdot (f_1^-(F_1) \cdot f_2^-(F_2) \cdot ... \cdot f_k^-(F_m)) \quad (3)$$

For relative value:

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = x_i(t)(x_i^+ - x_i^-) =$$

$$= x_i(t) \cdot \left(\frac{\Pi_n}{x_i(t)} \cdot \left(f_1^+(F_1) \cdot f_2^+(F_2) \cdot ... \cdot f_k^+(F_m)\right) - \right. \quad (4)$$

$$\left. - \frac{\Pi_k}{x_i(t)} (f_1^-(F_1) \cdot f_2^-(F_2) \cdot ... \cdot f_k^-(F_m)) \right)$$

Development of a system dynamics model for university indicators

The evaluating system for the university activity is constantly changing, but at the same time, they are mainly focused on accreditation indicators. Developed on the basis of the apparatus of system dynamics, the system will allow the decision-maker (DM) to build a mathematical model of the system's behavior for selected indicators and determine the university characteristics change at different time intervals.

For effective work of university promotion and its inclusion in academic ratings, management must have at its disposal analytical tools for forecasting the dynamics of the university basic performance indicators. The constructed mathematical model on the basis of system dynamics will allow to carry out researches of a similar kind.

The developed tool allows experts to construct a graph of cause-effect relationships used in constructing a mathematical model and, according to the graph, construct and solve a system of differential equations according to the algorithm described above. The following is an example of constructing a system of differential equations for the group indicators that characterize the publication activity of the faculty members [4]-[7], [9]-[5].

Graph and formation of differential equations system

Indicators are used mainly as a basis for making specific decisions and reporting to ministries and other external stakeholders. In the process of developing a new university strategy and preparing for accreditation, the university's top management acknowledged the need to use indicator (KPI) to improve the effectiveness of the institution, in which case the indicators should be directly related to strategic objectives. A set of indicators is used to evaluate and make decisions. On the example of several basic indicators, a graph and a system of equations will be constructed.

The table shows the main indicators for creating the system of equations.

$$\frac{\partial X_1}{\partial t} = X_1(t)(\frac{(O_b + S_b) \cdot P_b}{P_{av}} \cdot f_1^+(X_5) f_2^+(X_6) f_3^+(X_7) - \\ -\frac{(O_e + S_e) \cdot P_e}{P_{av}} \cdot f_4^-(X_5) f_5^-(X_6) f_6^-(X_7)) \tag{5}$$

$$\frac{\partial X_2}{\partial t} = X_1(t)(PT_b \cdot (f_7^+(X_1) f_8^+(X_4) f_9^+(X_5) f_{10}^+(X_7)) - \\ -PT_e \cdot (f_{11}^-(X_1) f_{12}^-(X_5) f_{13}^-(X_6))) \tag{6}$$

$$\frac{\partial X_3}{\partial t} = \frac{PTI_b}{X_3(t)}(\cdot f_{14}^+(X_1) f_{15}^+(X_2) f_{16}^+(X_4) f_{17}^+(X_5) f_{18}^+(X_6)) - \\ -\frac{PTI_e}{X_3(t)}(\cdot f_{19}^-(X_1) f_{20}^-(X_2) f_{21}^-(X_4) f_{22}^-(X_5) f_{23}^-(X_6)) \tag{7}$$

where, X_1 - average annual volume of scientific research, X_2 - the amount of publication, X_3 - % of publications indexed in international databases, $_4$ - number of projects, X_5 - number of doctoral students, X_6 - % of teaching staff with academic degrees, X_7 - mid-annual volume of financing per unit of personnel, O_b, O_e - average annual volume of financial assets at the beginning and end of the settlement period, S_b, S_e - the amount of financial resources for the development of scientific grants at the beginning and end of the calculation period, P_b, P_e - number of scientific and pedagogical personnel at the beginning and end of the calculation period, PT_b, PT_e - the total amount of publication at the beginning and end of the billing period, PTI_b, PTI_e - the number of publications indexed in international databases at the beginning and end of the billing period.

Conclution

As a result of the work: - a complex of mathematical models is constructed that allow to obtain in the wide range of time intervals the predicted values of the main indicators characterizing the results of the university's activity, to determine the general approach to the construction of this set of models; - for

forecasting the university performance indicators, the procedure for constructing a system of nonlinear differential equations based on the use of mathematical apparatus of cause-effect complexes theory and system dynamics of Forrester was proposed and justified.

References

1. Galbraith, P.: Systems thinking: a missing component in higher educational planning?. Higher Education Policy, 12(2), 141–157 (1999)
2. Kennedy, M.: Towards a Taxonomy of System Dynamics Models of Higher Education. In: 18th International Conference of the System Dynamics Society. Bergen (2000)
3. Forrester J.M.: World Dynamics. Cambridge (Mass.). Wright-Allen Press, Inc. XIII. 142 (1973)
4. Wolstenholme, E.: System Enquiry. A system dynamics approach,John Wiley and Sons. 1 (1990)
5. Richardson, G.: Problems for the future of system dynamics. System Dynamics Review 12 (2), 141-–157 (1996)
6. Iandybaeva N. V., Kushnikov V. A.: Matematicheskaia model' dlia prognozirovaniia akkreditatsionnykh pokazatelei vuza.Upravlenie bol'shimi sistemami 40 314-343 (2012)
7. Tikhonova O. M., Kushnikov V. A., Rezchikov A. F., Ivashchenko V. A.:The development of the mathematical model of predicting the indicators of accreditation of technical universities in the Russian Federation: In: Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics. Issue 2, pp27-38. Astrakhan (2017)
8. Benedict Oyo: Integration of System Dynamics and Action Research with Application to Higher Education Quality Management, Radboud University Nijmegen, Nijmegen (2010)
9. Al Hallak L; Pakstas A ., Oriogun P., Novakovic D.: Decision Support Systems for University Management Processes: An Approach towards DynamicSimulation Model. In: 2nd International Conference on Computer and Electrical, pp. 556. IEEE Press, Dubai (2009)
10. Rad, MF., Seyedesfahani, MM., Jalilvand, MR.: An effective collaboration model between industry and university based on the theory of self organization A system dynamics model. JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY POLICY MANAGEMENT. 1,2–24 (2015)

Mathematical modeling of the cylinder rotation system in a turbulent air flow

N. K. Tanasheva[1], B. R. Nusupbekov[2], A. N. Dyusembaeva[1,2], T. Kunakbaev[3], and M. Bazarbek[1,2]

[1] Institute of applied mathematics, Karaganda, Kazakhstan
[2] Karagandy State University. E.A. Buketova, Karaganda, Kazakhstan
[3] Kazakh National University. al-Farabi, Almaty, Kazakhstan
nazgulya_tans@mail.ru

Abstract The article is devoted to the modeling of aerodynamics of wind turbine blade in 3D space. To solve the problem numerically, we use the finite volume method and the nonstationary Navier-Stokes equation. The resulted results of numerical modeling, indicating a monotonous increase in the drag force and lifting force from the speed of the oncoming flow, and their empirical relationships were obtained. On the basis of numerical simulation and the experiment, universal dependences of aerodynamic characteristics on the velocity of the incoming flow at a constant angular velocity were obtained. Also shown are the flow patterns of two rotating cylinders in the air flow, which can explain the behavior of the aerodynamic characteristics.

Keywords: numerical modeling, Navier-Stokes, rotating cylinders, velocity, 3D space

Introduction

Calculating methods of wind turbines of various types of apparatus have long and actively developed with impressive results. With the help of numerical modeling, it became possible to solve the related problem of dynamics and aerodynamics of a wind turbine with a horizontal axis of rotation. The essence of this method is solutions of the nonstationary Navier-Stokes equations in mobile curvilinear coordinates realized on the basis of an implicit scheme. In [1]-[6], wind turbine models have been developed and predicted the performance of the wind turbine and the estimation of the model's capabilities, as well as its aerodynamic characteristics. To solve the problem numerically, we use the finite volume method and the nonstationary Navier-Stokes equation. The partial derivatives are approximated with the second order of accuracy, the derivatives with respect to time - according to the implicit Euler scheme of the second order. The model belongs to the family of two parametric models of turbulence, contains transport equations for the kinetic energy of turbulence and its dissipation.

The model of turbulence

The Boussinesq hypothesis states that the turbulent stress tensor is related to the velocity gradients by the dependence (1)

$$\tau_{turb} = \mu_{turb}\left(\nabla\overrightarrow{V} + \nabla\overrightarrow{V}^T\right) - \frac{2}{3}\left(\rho k + \mu_{turb}\nabla\overrightarrow{V}\right)U\ . \tag{1}$$

To find the turbulent viscosity μ_{turb}, we use the $k-\varepsilon$ Launder-Spalding model (2)

$$\mu_{turb} = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}\ . \tag{2}$$

Where k is the kinetic energy of turbulent pulsations; ε is the rate of dissipation of turbulent kinetic energy.

Boundary conditions. Boundary conditions *on the wall.*

The condition of sticking and do not leak (3), (4)

$$\overrightarrow{V} = 0\ . \tag{3}$$

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0,\ \ \varepsilon_p = \frac{C_\mu^{3/4}\cdot k_p^{3/2}}{k\cdot y_p}\ . \tag{4}$$

where $k = 0.4187$ is the Karman constant; index P refers to the center of the wall cell of the difference grid.

Boundary conditions at *the input* (5).

$$U = U_{in};\ \ V = 0\ . \tag{5}$$

The turbulent flow parameters are determined by specifying the intensity of the turbulent pulsations I and the hydraulic diameter D_{hyd} (6)

$$k = \frac{3}{2}\left(I\cdot V_{in\,let}\right)^2;\ \ \varepsilon = C_\mu^{3/4}\cdot\frac{k^{3/2}}{\ell};\ \ \ell = 0.07\cdot D_{hyd}\cdot I = 3\%\ . \tag{6}$$

The boundary *conditions at* the exit boundary (7)

$$\frac{\partial\varphi}{\partial x} = 0\ . \tag{7}$$

The first stage of modeling the flow around a cylinder is the construction of a computational grid in the GAMBIT program. In this case, the flow around the blade is considered to be a flow of air.

A uniform grid was used with a thickening to the surface of the cylinder, and the cylinder was shifted to the left boundary of the design area, so as not to arise in the region of the return flow and there was a good resolution for the resulting vortex zones:

1. the coefficient of condensation of the finite-difference grid in the radial direction (the ratio of the dimensions of two neighboring cells) is 0.85;

2. The size of the first cell in the radial direction relative to the radius of the cylinder is 0.01;

3. The number of cells in the entire integration area is 200,000.

It is known that when a cylinder flows, like any other body, with a potential (irrotational) flow, the resultant of all forces acting on the streamline body is zero [7]-[8].

When a real fluid flows around a rotating cylinder with a real fluid, the presence of friction forces and positive pressure gradients to the right of the maximum flow restriction points (the ends of the vertical diameter of the cylinder) lead to the detachment of the boundary layer from the surface of the cylinder, the formation of vortices that generate a pressure decrease in the rear region, the pressure distribution becomes asymmetrical and leads to the appearance of a force of drag and a lifting force due to the effect of Magnus.

The flow pattern (the position of the separation point of the boundary layer, the distribution of pressures, the intensity of the formation of the vortices behind the cylinder) depend essentially on the velocity (the Reynolds number) of the flow. At very low Reynolds numbers ($Re < 1$), the flow is fairly close to ideal and, conversely, the greater the Reynolds number, the more intense the vortexing behind the body, the closer the point of separation of the boundary layer to the maximum flow restriction section.

The purpose of this paper is a mathematical simulation of the cylinder rotation system in a turbulent air flow.

The area surrounding the windmill corresponds to the dimensions of the T-1-M wind tunnel.

For modeling, a 3D axisymmetric geometric grid flow model for the cylinder in the GAMBIT package was constructed.

One circulation zone is located at the bottom of the cylinder, because It moves clockwise, and the second at the top of the second cylinder, because that moves counter-clockwise. We can say that they have a symmetrical character with respect to the axis of symmetry passing through the centers of the cylinders. And also it can be assumed that between the two circulation zones, an irrotational zone will appear.

Figure 1 shows the flow pattern of a two-bladed wind turbine obtained in the program Ansys Fluent.

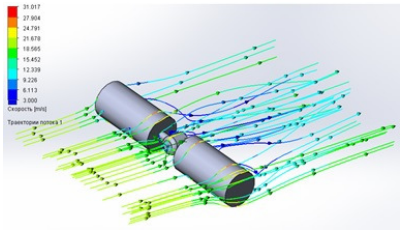


Figure 1. The picture of the flow past the air speed

Figures 2 and 3 show the dependence of the drag force and lifting force on the speed of the oncoming stream with a turbulence intensity of 10% and a constant angular velocity of 1000 rpm.

The data of the numerical experiment (Fig. 2) are approximated by a power law: $F_x = 0.1116 \cdot V^{1.5289}$. As the speed of the oncoming flow increases, the drag force increases.

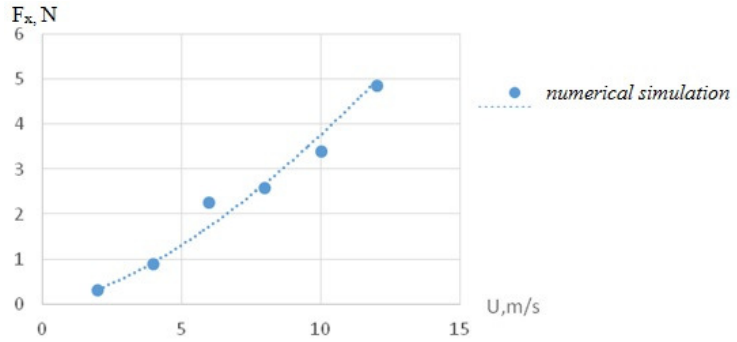


Figure 2. Dependence of the drag force on the air flow velocity at an angular velocity of 1000 rpm.

The data of the numerical experiment shown in Figure 3 are approximated by the polynomial dependence: $F_y = -0.2257V^2 + 4.9479V - 3.7068$. It can be seen from the graph that the lifting force increases with increasing speed of the oncoming stream, but having reached its maximum value at 10 m / s, it begins to decrease.

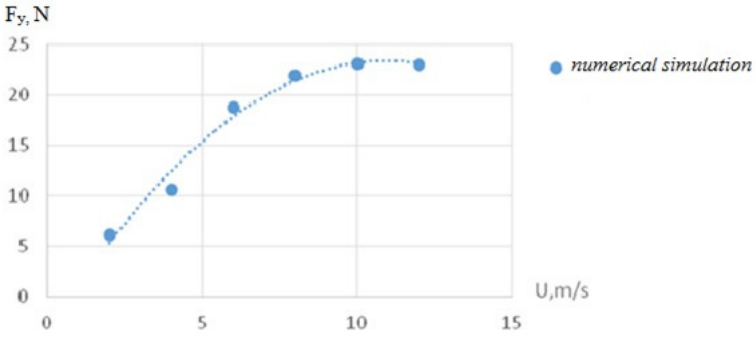


Figure 3. Dependence of the lifting force on the air flow velocity at an angular velocity of 1000 rpm.

Based on theoretical and experimental data, a comparative analysis was carried out.

Figure 4 shows the dependence of the drag coefficient on the Reynolds number at a constant angular velocity of 1000 rpm. It can be seen that the data of the numerical experiment are approximated by a power law: $C_x = 160.81 \cdot Re^{-0.471}$. The drag coefficient decreases with an increase in the Reynolds number.

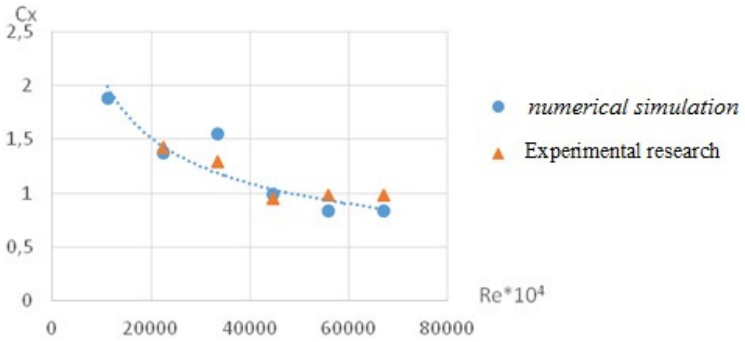


Figure 4. Dependence of the drag coefficient on the Reynolds number at an angular velocity of 1000 rpm.

Figure 5 shows the dependence of the lift coefficient on the Reynolds number at a constant angular velocity of 1000 rpm. The data of the numerical experiment are approximated by the power law: $C_y = 3e + 0.6Re^{-1.202}$. The lift coefficient, with an increase in the Reynolds number, decreases, but with a further increase in Re, it can be assumed that the lift coefficient will reach its minimum value and will not decrease further.

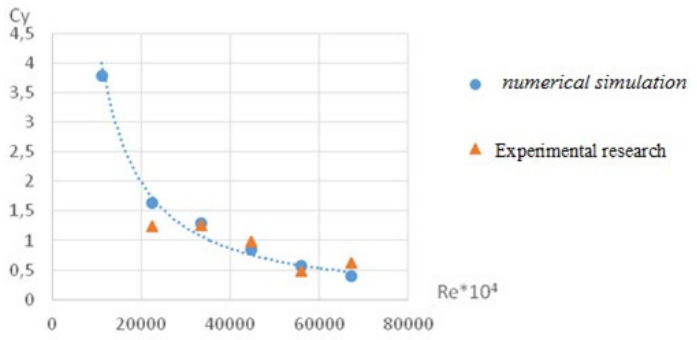


Figure 5. Dependence of the lift coefficient on the Reynolds number at an angular velocity of 1000 rpm.

It is established that when two rotating cylinders flow around the air streams, an area of increased pressure occurs at the point of contact of the pressure fields of each cylinder, and a rarefaction zone forms behind the cylinders. On the basis of numerical simulation and the experiment, universal dependences of aerodynamic characteristics on the velocity of the incoming flow at a constant angular velocity were obtained. Also shown are the flow patterns of two rotating cylinders in the air flow, which can explain the behavior of the aerodynamic characteristics.

The work was carried out at the expense of grant No. AP05131520 - Development and creation of a sample of a wind power plant for alternative power supply using an electrical generator of domestic production.

References

1. Prikhodko, A.A., Redchits, D.A.: Mathematical modeling of aerodynamics and dynamics of vertical - axial wind turbines. Bulletin of Kharkov National University. Series "Mathematical modeling. Information Technology. Automation of control systems ". 703, 178–197 (2005)
2. Gurinov, A.S., Gaponov, V.L.: Mathematical model of the rotation dynamics of the wind turbine and the rotation of a small wind power plant for farms through an automatic orientation system. Bulletin of the DGTU. vol. 11, No.10 (61), 1763–1770 (2011)
3. Yakovlev, A.I., Zatuknaya, M.A., Merkushev, V.A., Pashkov, V.N.: Calculation and design of wind power plants with a horizontal axial wind turbine and a permanent magnet generator. Kharkov (2001)
4. Valiev, M.Zh.: Calculation studies of a low-speed wind turbine with a high coefficient of wind energy use. In: International Youth Scientific Conference "XX Tupolev Readings pp. 23–26. Kazan (2013)
5. Isaev, S.A., Baranov, P.A., Usachov, A.E., Mitrofovich, V.V., Kolosov, A.D., Ponomarev, M.V.: Numerical modeling of turbulent flow inside a wind turbine with allowance for forces on the impeller. Engineering and Physics Journal. vol. 76, No.6, 45–48 (2003)
6. Baturin, O.V., Baturin, N.V., Matveyev, V.N.: Construction of computational models in the Gambit preprocessor of the universal software complex Fluent. Samara (2009)
7. Baturin O.V., Baturin, N.V., Matveyev, V.N.: Calculation of flows of liquids and gases with the help of the universal software complex Fluent. Samara (2010)
8. Kusaiynov, K., Tanasheva, N.K., Turgunov, M.M., Alibekova, A.R.: Analysis of aerodynamic characteristics of rotating porous cylinders. Technical Physics. Pleiades Publishing. vol.60, No. 5, 656–659 (2015)

Iterative method for solving non-linear Navier-Stokes equations in complex domains taking into account boundary conditions with uniform accuracy

N. Temirbekov[1] and Zh. Zhaksylykova[2]

[1] Kazakhstan Engineering Technological University,
93 A, Al-Farabi ave., 050060, Almaty, Kazakhstan
[2] Abay Kazakh National Pedagogical University,
13, Dostyk, 050010, Almaty, Kazakhstan
temirbekov@rambler.ru,zhaksylykova0507@mail.ru

In a bounded domain $\Omega \subset R^2$, we consider the initial-boundary value problem for the non-stationary flow of a viscous incompressible fluid. The problem reduces to solving a system of nonlinear Navier-Stokes equations [1]

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v = \mu \Delta v - \nabla p + f, \tag{1}$$

$$\operatorname{div} v = 0, \tag{2}$$

$$v\Big|_{t=0} = v_0(x), \quad v\Big|_S = 0 \tag{3}$$

where $v(x)$ is a velocity field, $p(x)$ is pressure, $f(x)$ is a field of mass force, $\mu > 0$ is a coefficient of viscosity, $\operatorname{div} v = 0$ is the continuity equation for an incompressible fluid, for which the velocity field is described by a solenoidal (divergent-free) vector field.

The Navier-Stokes equations are a system of partial differential equations describing the motion of a viscous incompressible fluid.

An analytic solution of the system (1)-(3) is conjugate to insurmountable difficulties. Up to now, the solution of these equations has been found only in certain special cases. Known results refer to the simplest cases of motion. In other cases, different numerical methods for solving the Navier-Stokes equations are used.

In this paper, the method of fictitious domains is used to solve the system (1)-(3). For simplicity, we assume that $v_0(x) = 0$. An auxiliary problem with a parameter ε, corresponding to the method of fictitious domains, reduces to solving a system of differential equations in $D = D_1 \cup \Omega$ with boundary S_1 [2]:

$$\frac{\partial v^\varepsilon}{\partial t} + (v^\varepsilon \cdot \nabla) v^\varepsilon = \operatorname{div}(\mu^\varepsilon \nabla v^\varepsilon) - \nabla p^\varepsilon + f, \tag{4}$$

$$\operatorname{div} v^\varepsilon = 0, \tag{5}$$

$$v^\varepsilon\Big|_{t=0} = 0, \quad v^\varepsilon \cdot \tau\Big|_{S_1} = 0, \quad p^\varepsilon\Big|_{S_1} = 0, \tag{6}$$

$$\mu^{\varepsilon} = \begin{cases} \mu \text{ in } \Omega, \\ \frac{\mu}{\varepsilon} \text{ in } D_1, \end{cases}$$

$$\left[\left(\mu^{\varepsilon}\nabla v^{\varepsilon} - p^{\varepsilon}\cdot\delta\right)n\right]\Big|_S = 0, \;\; \left[v^{\varepsilon}\right]\Big|_S = 0. \tag{7}$$

n, τ are the normal and tangent vector to the boundary S_1. f is continued in D_1 with the preservation of the norm in $L_2(\Omega)$.

We introduce the set $M(D)$ of infinitely differentiable vector-valued functions $v(x)$ solenoidal in D with tangential components vanishing on S:

$$M(D) = \{v(x) \in C^{\infty}(D), \;\; \operatorname{div} v = 0, \;\; v(x)\cdot\tau(x) = 0, \;\; x \in S\}$$

where τ is the tangent vector to the boundary S. The spaces obtained by the closure of $M(D)$ in the norms $L_2(D)$ and $\mathring{W}_2^1(D)$ are denoted by $V(D)$ and $V_1(D)$, respectively, and their conjugate spaces by $V^*(D)$ and $V_1^*(D)$, and $V(D)$ and $V^*(D)$ are identified.

Let us introduce the following definition.

Definition. A generalized solution of problem (4)-(7) is a function v^{ε} of the class $L_2(0,T;\, V_1(D)) \cap L_{\infty}(0,T;\, L_2(D))$ satisfying the integral identity

$$-\int_0^T (v^{\varepsilon}, \Phi_t)_D\, dt - \int_0^T \left((v^{\varepsilon}\cdot\nabla)\Phi, v^{\varepsilon}\right)_D dt + \int_0^T \int_{S_1} (v^{\varepsilon}\cdot\Phi)\, v^{\varepsilon}\cdot n\, ds\, dt +$$

$$+\frac{\mu}{\varepsilon}\int_0^T \int_{S_1} k(x)\,(v\cdot\Phi)\, ds\, dt + \int_0^T \left(\mu^{\varepsilon}\nabla v^{\varepsilon}, \nabla\Phi\right)_D dt = \int_0^T (f,\Phi)_D\, dt \tag{8}$$

for any $\Phi \in C^1(0,T;\, V_1(D))$, $\Phi(T) = 0$, $(u,v)_D = \int_D u\cdot v\, dx$, where $k(x)$ is a non-negative function.

Let ω_1, ω_2, ..., ω_N is an arbitrary basis in $V_1(D)$, and v_N^{ε} is an approximate solution of the problem (4)-(7):

$$v_N^{\varepsilon} = \sum_{m=1}^{N} \alpha_{Nm}(t)\,\omega_m. \tag{9}$$

$\alpha_{Nm}(t)$ is found from the system of ordinary differential equations with respect to $\alpha_{Nm}(t)$:

$$\frac{d}{dt}\left(v_N^{\varepsilon}(t), \omega_j\right)_D + \left((v_N^{\varepsilon}\cdot\nabla)\, v_N^{\varepsilon}, \omega_j\right)_D + \frac{\mu}{\varepsilon}\int_{S_1} k(x)\cdot\left(v_N^{\varepsilon}, \omega_j\right)_D ds +$$

$$+\left(\mu^{\varepsilon}\nabla v_N^{\varepsilon}, \omega_j\right)_D = (f,\omega_j)_D, \quad j = 1,2,...,N \tag{10}$$

with initial conditions

$$v_N^{\varepsilon}(t)\Big|_{t=0} = 0, \quad \alpha_{Nm}(t)\Big|_{t=0} = 0, \;\; m = 1,2,...,N. \tag{11}$$

The solvability of (10)-(11) in a small time is known from the general theory of ordinary differential equations [3]. Global solvability follows from a priori estimates of the solution

$$\max_{0\le t\le T} \|v_N^{\varepsilon}(t)\|_{V(D)} \le C < \infty \tag{12}$$

which is obtained from multiplication of (10) by $\alpha_{Nm}(t)$ and summing over $m = 1, 2, ..., N$.

Multiply (10) by $\alpha_{Nm}(t)$:

$$\frac{d}{dt}\left(v_N^{\varepsilon}(t), \omega_m\right)_D \alpha_{Nm}(t) + \left(\left(v_N^{\varepsilon} \cdot \nabla\right) v_N^{\varepsilon}, \omega_m\right)_D \alpha_{Nm}(t) +$$

$$+\frac{\mu}{\varepsilon}\int_{S_1} k(x) \cdot \left(v_N^{\varepsilon}, \omega_m\right)_D ds\, \alpha_{Nm}(t) + \left(\mu^{\varepsilon} \nabla v_N^{\varepsilon}, \omega_m\right)_D \alpha_{Nm}(t) =$$

$$= (f, \omega_m)_D \alpha_{Nm}(t).$$

Sum the resulting equation over m from 1 to N, taking (9) into account and applying the Holder inequality:

$$\frac{1}{2}\frac{d}{dt}\left\|v_N^{\varepsilon}(t)\right\|_{V(D)}^2 + \left(\left(v_N^{\varepsilon} \cdot \nabla\right) v_N^{\varepsilon}, v_N^{\varepsilon}\right)_D + \mu \left\|v_{Nx}^{\varepsilon}\right\|_{L_2(\Omega)}^2 +$$

$$+\frac{\mu}{\varepsilon}\left\|v_{Nx}^{\varepsilon}\right\|_{L_2(D_1)}^2 + \frac{\mu}{\varepsilon}\int_{S_1} k(x)\left(v_N^{\varepsilon}(x)\right)^2 ds \le \|f\|_{V_1^*(D)} \cdot \left\|v^{\varepsilon}\right\|_{V_1(D)}. \qquad (13)$$

Further, for the second term of the inequality (13), we apply the estimate

$$\left|\int_D \left(\left(v_N^{\varepsilon}(t) \cdot \nabla\right) v_N^{\varepsilon}(t),\, v_N^{\varepsilon}(t)\right) dx\right| = \left|\int_{S_1} \left(v_N^{\varepsilon}(t)\right)^2 v_N^{\varepsilon}(t)\, dS\right| \le$$

$$\le \int_{S_1} \left|v_N^{\varepsilon}(t)\right|^3 ds \le C_0 \left\|\nabla v_N^{\varepsilon}(t)\right\|_{L_2(D_1)}^2 \left\|v_N^{\varepsilon}\right\|_{L_2(D_1)}.$$

Hence we obtain the inequality

$$\frac{1}{2}\frac{d}{dt}\left\|v_N^{\varepsilon}(t)\right\|_{L_2(D)}^2 + \mu \left\|v_{Nx}^{\varepsilon}\right\|_{L_2(\Omega)}^2 +$$

$$+\left(\frac{\mu}{\varepsilon} - \left\|v_N^{\varepsilon}(t)\right\|_{L_2(D_1)} \cdot C_0\right) \cdot \left\|\nabla v_N^{\varepsilon}(t)\right\|_{L_2(D_1)}^2 \le$$

$$\le \|f(t)\|_{V_1^*(D)} \left\|v^{\varepsilon}(t)\right\|_{V_1(D)}. \qquad (14)$$

Let $\frac{\mu}{2\varepsilon} - \left\|v_N^{\varepsilon}(t)\right\|_{L_2(D_1)} C_0 \ge 0$. Then we obtain

$$\max_{0 \le t \le T} \left\|v_N^{\varepsilon}(t)\right\|_D \le \int_0^T \|f(t)\|_{V_1^*(D)}\, dt.$$

If ε is chosen such that

$$\frac{\mu}{2\varepsilon} - C_0 \int_0^T \|f(t)\|_{V_1^*(D)}\, dt \ge 0 \qquad (15)$$

then the following estimate yields from (14):

$$\max_{0 \le t \le T} \left\|v_N^{\varepsilon}(t)\right\|_{L_2(D)} + \int_0^T \left\|\nabla v_N^{\varepsilon}(t)\right\|_{\Omega}^2 dt + \frac{1}{\varepsilon}\int_0^T \left\|\nabla v_N^{\varepsilon}(t)\right\|_{D_1}^2 dt +$$

$$+\frac{1}{\varepsilon}\int_0^T\int_{S_1} k(x)\left|v_N^\varepsilon(t)\right|^2 ds\,dt \le C\int_0^T \left\|f(t)\right\|^2_{V_1^*(D)} dt \le C<\infty \qquad (16)$$

where the constant C does not depend on ε.

Let $D_t^{1/4-k}v_N^\varepsilon(t)$ is the narrowing of the inverse Fourier transform on $(0,T)$ by τ from $\tau^{1/4-k}\hat{v}_N^\varepsilon$, $\hat{v}_N^\varepsilon$ is the Fourier transform of the function $\tilde{v}_N^\varepsilon$ by t, which is obtained by extending v_N^ε with zero outside of $(0,T)$.

Lemma. The estimate

$$\left\|D_t^{1/4-k}v_N^\varepsilon\right\|_{L_2(0,T,V(D))} \le C<\infty$$

holds for any $k>0$, C does not depend on ε.

By the definition of the generalized derivative [3], we obtain the following equation for $\tilde{v}_N^\varepsilon(t)$ from (10):

$$\frac{d}{dt}\left(\tilde{v}_N^\varepsilon(t),\omega_j\right)_D + \left(\left(\tilde{v}_N^\varepsilon(t)\cdot\nabla\right)\tilde{v}_N^\varepsilon(t),\omega_j\right)_D + \left(\mu^\varepsilon\nabla\tilde{v}_N^\varepsilon(t)\nabla\omega_j\right)_D +$$

$$+\frac{\mu}{\varepsilon}\int_{S_1} k(x)\left(\tilde{v}_N^\varepsilon(t),\omega_j\right)ds = \left(\tilde{f},\omega_j\right) - \left(\tilde{v}_N(T),\omega_j\right)\delta_T$$

where δ_T is a Dirac measure concentrated at $t=T$.

Note that

$$\left(\left(\tilde{v}_N^\varepsilon(t)\cdot\nabla\right)\tilde{v}_N^\varepsilon(t),\omega_j\right)_D \le \left\|\nabla\tilde{v}_N^\varepsilon(t)\right\|_{L_2(D)}\left\|\tilde{v}_N^\varepsilon(t)\right\|_{L_4(D)}\left\|\omega_j\right\|_{L_4(D)} \le$$

$$\le C\left\|\tilde{v}_N^\varepsilon(t)\right\|_{V_1(D)}\left\|\omega_j\right\|_{V_1(D)}. \qquad (17)$$

Hence,

$$\left(\left(\tilde{v}_N^\varepsilon(t)\cdot\nabla\right)\tilde{v}_N^\varepsilon,\omega_j\right)_D = \left(u_N\left(\tilde{v}_N^\varepsilon\right),\omega_j\right)_D. \qquad (18)$$

Let $u_N\left(\tilde{v}_N^\varepsilon\right)=u_N(t)$, $\hat{u}_N(t)$ is the Fourier transform of $u_N(t)$, $\hat{v}_N^\varepsilon(t)$ is the Fourier transform of $\tilde{v}_N^\varepsilon(t)$. Then by (17) we have

$$2\pi i\tau\left(\hat{v}_N^\varepsilon(\tau),\omega_j\right)_D + \left(\hat{u}_N(\tau),\omega_j\right)_D + \left(\mu^\varepsilon\hat{v}_N^\varepsilon(\tau),\omega_j\right)_D +$$

$$+\frac{\mu}{\varepsilon}\int_{S_1} k(x)\left(\hat{v}^\varepsilon,\omega_j\right)ds = \left(\hat{f},\omega_j\right)_D - \left(v_N^\varepsilon(T)\,\omega_j\right)e^{-2\pi i\tau T}. \qquad (19)$$

However, $\hat{v}_N^\varepsilon(t)\in[\omega_1,\omega_2,...,\omega_N]$, therefore it follows from (19) that

$$2\pi i\tau\left\|\hat{v}_N^\varepsilon(\tau)\right\|^2_{L_2(D)} + \left(\mu^\varepsilon\nabla\hat{v}_N^\varepsilon(\tau),\nabla\hat{v}_N^\varepsilon(\tau)\right)_D =$$

$$= \left(\hat{f}(\tau),\hat{v}_N^\varepsilon(\tau)\right)_D - \frac{\mu}{\varepsilon}\int_{S_1} k(x)\,\hat{v}_N^\varepsilon(\tau)\,\hat{v}_N^\varepsilon(\tau)\,ds =$$

$$= \left(\hat{v}_N^\varepsilon(\tau),\hat{v}_N^\varepsilon(\tau)\right)_D e^{-2\pi i} - \left(\hat{u}(\tau),\hat{v}_N^\varepsilon(\tau)\right)_D. \qquad (20)$$

Taking the imaginary part of (20) and estimating the right-hand side from above, we obtain:

$$|\tau|\left\|\hat{v}_N^\varepsilon(\tau)\right\|^2_{L_2(D)} \le \left\|\hat{u}_N(\tau)\right\|_{V_1^*(D)}\left\|\hat{v}_N^\varepsilon(\tau)\right\|_{V_1(D)} + \left\|\hat{f}\right\|_{V_1^*(D)}\left\|\hat{v}_N^\varepsilon(t)\right\|_{V_1(D)} +$$

$$+\left\|v_N^\varepsilon(T)\right\|_{L_2(D)}\left\|\hat{v}_N^\varepsilon(\tau)\right\|_{L_2(D)}. \tag{21}$$

By the properties (17), (18):

$$\int_{-\infty}^{\infty}\left\|\hat{v}_N^\varepsilon(t)\right\|_{V_1^*(D)}d\tau \le C\int_0^T\left\|v_N^\varepsilon(t)\right\|_{V_1(D)}dt \le C<\infty,$$

$$\left\|\hat{u}_N^\varepsilon(\tau)\right\|_{V_1^*(D)} \le C.$$

Moreover, it follows from (16) that $\left\|v_N^\varepsilon(T)\right\| \le C < \infty$. Given these estimates, rewrite the inequality (21) in the form

$$|\tau|\left\|\hat{v}_N^\varepsilon(\tau)\right\|_{V(D)}^2 \le C\left\|\hat{v}_N^\varepsilon(\tau)\right\|_{V_1(D)} + \left\|\hat{f}(t)\right\|_{V_1^*(D)}\left\|\hat{v}_N^\varepsilon(t)\right\|_{V_1(D)} +$$

$$+C_1\left\|\hat{v}_N^\varepsilon(\tau)\right\|_{V(D)}.$$

Let σ be an arbitrary constant and $2\sigma > 1$. Then

$$\int_{-\infty}^{\infty}\frac{|\tau|\left\|\hat{v}_N^\varepsilon(\tau)\right\|_{V(D)}^2}{1+|\tau|^\sigma}d\tau \le C_1\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\left\|\hat{v}_N^\varepsilon(\tau)\right\|_{V_1(D)}}{1+|\tau|^\sigma}d\tau +$$

$$+C_2\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\left\|\hat{f}(\tau)\right\|_{V_1^*(D)}\left\|\hat{v}_N^\varepsilon(\tau)\right\|_{V_1(D)}}{1+|\tau|^\sigma}d\tau + C_3\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\left\|\hat{v}_N^\varepsilon(\tau)\right\|_{V^*(D)}}{1+|\tau|^\sigma}d\tau. \tag{22}$$

Note that $\frac{1}{1+|\tau|^\sigma} \in L_2(R_\tau)$ and $\hat{v}_N^\varepsilon(\tau) \in L_2(R_\tau, V_1(D))$ by (16). Hence, using the Holder inequality, it can be easily shown that

$$\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\left\|\hat{v}_N^\varepsilon(\tau)\right\|_{V_1(D)}}{1+|\tau|^\sigma}d\tau \le C<\infty.$$

Using the Cauchy inequality, the boundedness of the second integral in the right-hand side of (22) can be shown:

$$\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\left\|\hat{f}(\tau)\right\|_{V_1^*(D)}\left\|\hat{v}_N^\varepsilon(\tau)\right\|_{V_1(D)}}{1+|\tau|^\sigma}d\tau \le C<\infty.$$

The boundedness of the last integral in (22) follows from the inequality

$$\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\left\|\hat{v}_N^\varepsilon(\tau)\right\|_{V^*(D)}}{1+|\tau|^\sigma}d\tau \le \int_{-\infty}^{\infty}\frac{\left\|\hat{v}_N^\varepsilon(\tau)\right\|_{V_1(D)}}{1+|\tau|^\sigma}d\tau \le C<\infty.$$

Hence, using the lemma of compactness, we have the relations

$$v_N^\varepsilon(t) \to v^\varepsilon(t) \quad * \text{ weakly in } L_\infty(0,T;V(D)),$$

$$v_N^\varepsilon(t) \to v^\varepsilon(t) \quad \text{weakly in } L_2(0,T;V_1(D)),$$

$$v_N^\varepsilon(t) \to v^\varepsilon(t) \quad \text{strongly in } L_2(0,T;V(D))$$

as $N \to \infty$. Now, after passing to the limit in (10) and integrating by parts, we see that $v^{\varepsilon}(t)$ is a generalized solution of the problem (4)-(7).

The following convergence theorem holds.

Theorem. Let $f(t) \in L_2(0,T; V_1^*(D))$, and ε satisfies the condition (15). Then there exists at least one generalized solution of problem (4)-(7), and the estimate (16) holds for the solution. Moreover, the solution of the problem (4)-(7) converges to the solution of the problem (1)-(3).

Proof. Since the existence of the solution has already been proved, it remains to prove the convergence of the solution. Note that the obtained a priori estimates (16) and the estimate of the lemma above are uniform in ε. Therefore, it is possible to select subsequences $\{v^{\varepsilon_i}\}$ from the sequence $\{v^{\varepsilon}\}$ for which the following relations hold as $\varepsilon_i \to 0$:

$$v^{\varepsilon_i} \to v \quad * \text{weakly in } L_{\infty}(0,T; V(D)),$$

$$v^{\varepsilon_i} \to v \quad \text{weakly in } L_2(0,T; V_1(D)),$$

$$v^{\varepsilon_i} \to v \quad \text{strongly in } L_2(0,T; V(D)).$$

Now we put $\Phi = 0$ in D_1 in the integral identity (8), and passing to the limit, we obtain

$$-\int_0^T (v, \Phi_t)_{\Omega} dt - \int_0^T [((v \cdot \nabla)\Phi, v)_{\Omega} - \mu(\nabla v, \nabla \Phi)_{\Omega}] dx = \int_0^T (f, \Phi)_{\Omega} dt$$

for all $\Phi \in C^1\left(0,T; \mathring{V}_1(\Omega)\right)$.

It remains to show that $v|_S = 0$. Let us show that $\|v^{\varepsilon}\|_{L_2(0,T; L_2(D_1))} \to 0$ as $\varepsilon \to 0$. To this end, we use the inequality

$$\|v^{\varepsilon}\|_{L_2(0,T; L_2(S))} \le C\left(\|v_x^{\varepsilon}\|_{L_2(0,T; L_2(D_1))} + \|v^{\varepsilon}\|_{L_2(0,T; L_2(D_1))}\right) \to 0$$

as $\varepsilon \to 0$. The theorem is proved.

Next, a difference scheme of the second order of approximation is constructed for the problem (4)-(7). For a numerical solution of this difference problem, a special iterative method is constructed that determines approximate solutions on the boundary S with uniform accuracy for a limited number of arithmetic operations.

To develop a new numerical implementation algorithm, the idea of the fictitious unknowns method with a two-step iterative process [4] and a method for solving the Poisson difference equation in a square with the right-hand side different from zero only at nodes that are a distance of the order of the grid distance from a given piecewise smooth curve are used [5].

References

1. Temirbekov, N.M.: Priblizhennye metody reshenija uravnenij vjazkoj zhidkosti v oblastjah so slozhnoj geometriej. Almaty (2000)

2. Smagulov, Sh.S., Danaev, N.T., Temirbekov, N.M.: Modelirovanie kraevyh uslovij dlja davlenija i polnogo napora v zadachah gidrodinamiki s pomoshh'ju metoda fiktivnyh oblastej. Doklady Akademii Nauk Rossii 374, 333–335 (2000)
3. Tihonov, A.N., Vasil'eva, A.B., Sveshnikov, A.G.: Differencial'nye uravnenija. FIZMATLIT (2005)
4. Kaporin, I.E., Nikolaev, E.S.: Metod fiktivnyh neizvestnyh dlja reshenija raznostnyh jellipticheskih kraevyh zadach v nereguljarnyh oblastjah. Differenc. uravnenija 16, 1211–1225 (1980)
5. Volkov, E.A.: O metodah reshenija raznostnyh uravnenij dlja kusochno-odnorodnoj sredy i s pravoj chast'ju, zadannoj vdol' krivoj. Doklady Akademii Nauk SSSR 283, 274–277 (1985)

Using the CUDA technology to accelerate calculations in problems of chemical kinetics

B. Urmashev[1], M. Sarsembayev[1], A. Temirbekov[1], and M. Frenklach[2]

[1] al-Farabi Kazakh National University, 71,
al-Farabi ave., 050040 Almaty, Republic of Kazakhstan
[2] Berkeley University, Berkeley, California, USA,
Baidaulet.Urmashev@kaznu.kz,Sarsembayev.Magzhan@gmail.com,Almas.Temirbekov@kaznu.kz,Mfrenklach@gmail.com

Abstract In this article, the problem of chemical kinetics, calculation of changes in the concentration of substances in the reaction by time and creation of a massive kinetic solver for solving the problem using modern parallelization technologies are considered. A mathematical model of the change in the concentration of substances in a system with one-dimensional approximation and the possibility of accelerating the calculations with the use of CUDA technology is described. The performed calculation on NVIDIA GPUs showed that with an increase in the number of reactions, the computational time decreases significantly in comparison with the calculation time on CPUs.

Keywords: combustion, combustion mechanisms, parallel computation, graphic processors, CUDA, Runge-Kutta method.

Introduction

Burning has been used by humanity for many years and is one of the oldest technologies. Currently, the combustion process provides about 90% of all energy.

In the past, the study of combustion was mainly aimed at studying the mechanics of a continuous medium, including heat release due to chemical reactions. This heat release was often described by thermodynamics, which involves infinitely fast chemical reactions. In certain extent, this approach turned out to be productive for describing stationary combustion processes, but it is not enough to understand transients such as ignition and damping, as well as to explain the formation of harmful emissions. Moreover, the problem of the formation of harmful emissions in the combustion of fossil fuels will be one of the most important task in the future [1].

The physical description of the combustion process is very difficult in connection with the diversity of phenomena derived from the time of ignition until the combustion process. Despite recent achievements, the need to study the burning process continues to be a very pressing problem. The process of fuel combustion is the main process in which the heat of fuel is converted into mechanical work [2], [3], [5], [6].

Using numerical simulation methods, focused on the use of supercomputers, greatly expands the possibilities of mathematical modeling, allowing to include in the model factors not taken into account earlier. Detailed analysis of the dynamics of combustion of fuels assumes a rigorous account of all physical processes, including the processes of convective heat transfer between fresh gas and combustion products and structural elements of the shell [4], [7].

CUDA technology, that is, the use of GPUs for parallelizing data in calculations, widely used in various fields in recent years, including video and image processing, computational biology and chemistry, fluid dynamics modeling, restoration of images obtained by computed tomography, seismic analysis, ray tracing and much more. Using this technology of parallelization in solving the equation of chemical kinetics makes it possible to reduce the time and computational costs.

During the implementation of a massively parallel-computational kinetic solver for modeling the kinetics of chemically reacting systems in zero-dimensional approximations, the software "Chemical Calculator"was developed. Using this software, the calculation time was reduced to 17.5 times.

CUDA parallel computing platform

CUDA (Compute Unified Device Architecture) is a parallel computing architecture from NVIDIA that can significantly increase computational performance by using GPUs [8]. A feature of the equipment supporting CUDA technology is the ability to provide a large-order throughput (in comparison with clusters) when working with memory [9]. This technology appeared in graphics accelerators of NVIDIA since the eighth series, and parallel computing architecture is implemented in them, which provides a specialized programming interface for non-graphic computing.

CUDA-enabled logical processors can be viewed as a set of multi-core processors. The main computational blocks of such video chips are multiprocessors, which consist of eight cores, several thousand 32-bit registers, 16 KB of shared memory, texture and constant caches.

Before the official launch of CUDA technology, experiments were conducted on the use of desktop graphics cards to implement streaming computing. It was possible to achieve triple increase in productivity in experiments with the help of graphic hardware and software interfaces and data representation as texture arrays. It should also be noted that one of the key advantages of CUDA technology is the absence of the need to develop programs, follow the graphical "metaphors data types and principles of computation, which are characteristic only for vertex and pixel processing when building a frame.

The implementation of computations with the combination of CUDA and OpenMP and the parallelism of the central processors at the level of the programming language and the hardware-software interface creates another level of performance growth.

The literature concerning not only CUDA, but also previous hardware implementations of parallel computations of chemical tasks on graphics cards demonstrate an acceleration ranging from 2 to 15 [10],[11],[12].

Mathematical statement of the problem

Let us consider the problem of chemical kinetics to calculate the change in the concentration of substances during the reaction. The law of the rate of chemical reaction by the example of a reaction written in a general form is as follows:

$$A_1 + A_2 + A_3 + ... \rightarrow A_4 + A_5 + A_6 + \cdots \tag{1}$$

where $A_1, A_2, A_3, ...$ are the various components involved in the reaction, k is the rate constant. The reaction rate can be written as follows:

$$\frac{dC_1}{dt} = -kC_1^{a1}C_2^{a2}C_3^{a3}\cdots \tag{2}$$

where $C_1, C_2, C_3, ...$ and $a1, a2, a3, ...$ are the concentrations and orders of the reaction with respect to the components $A_1, A_2, A_3, ...$, respectively. Here:

$$\frac{dC_k}{dt} = \sum_{i=1}^{Nr}(\nu_{ik}^{+}[-k_i^{+}\prod_{j=1}^{Nc}C_j^{\nu_{ij}^{+}} + k_i^{-}\prod_{j=1}^{Nc}C_j^{\nu_{ij}^{-}}] - \nu_{ik}^{-}[-k_i^{+}\prod_{j=1}^{Nc}C_j^{\nu_{ij}^{+}} + k_i^{-}\prod_{j=1}^{Nc}C_j^{\nu_{ij}^{-}}]) \tag{3}$$

where Nr is the number of the reaction, Nc is the number of components.

Since, the change in the concentration of substances in such a system over time depends directly on the rate of the reaction, we need to determine the rates of direct and reverse reactions

$$\sum_{k=1}^{K}\nu_{ki}^{'}\chi_k \Leftrightarrow \sum_{k=1}^{K}\nu_{ki}^{''}\chi_k \qquad (i = 1, \cdots, I) \tag{4}$$

The stoichiometric coefficients ν_{ki} are integers and χ_k is the chemical symbol of the k-th substance, $\nu_{ki}^{'}$ are the stoichiometric coefficients of the reagents, $\nu_{ki}^{''}$ are the stoichiometric coefficients of the products. Usually, three or four substances participate in elementary reactions.

The rate of formation ω_k of the k-th substance is calculated by the following formula:

$$\omega_k = \sum_{i=1}^{I}\nu_{ki}^{'}q_i \qquad (k = 1, \cdots, K) \tag{5}$$

where $\nu_{ki} = \nu_{ki}^{''} - \nu_{ki}^{'}$

The rate of change in the course of the reaction of the -th reaction is determined by the formula

$$q_i = k_{fi} \prod_{k=1}^{K} [X_k]^{\nu''_{ki}} - k_{\gamma i} \prod_{k=1}^{K} [X_k]^{\nu'_{ki}} \tag{6}$$

$$K_{ci} = \frac{k_{fi}}{k_{\gamma i}} \tag{7}$$

The rate of direct reactions is determined by the Arrhenius formula

$$K_{fi} = A_i T^{\beta i} exp(\frac{-E_i}{R_c T}) \tag{8}$$

where R is the universal gas constant; A_i is a pre-exponential factor that does not depend on temperature, but is determined only by the type of reaction; β_i is temperature exponent, E_i is the activation energy of the i-th reaction which can be characterized as a certain threshold energy; roughly speaking, if the energy of the colliding particles is smaller than E_i, then the reaction does not occur in the collision, if the energy exceeds E_i the reaction will occur. The activation energy does not depend on temperature Fig.1

The graphical dependence of $k_{fi}(T)$ is as follows:

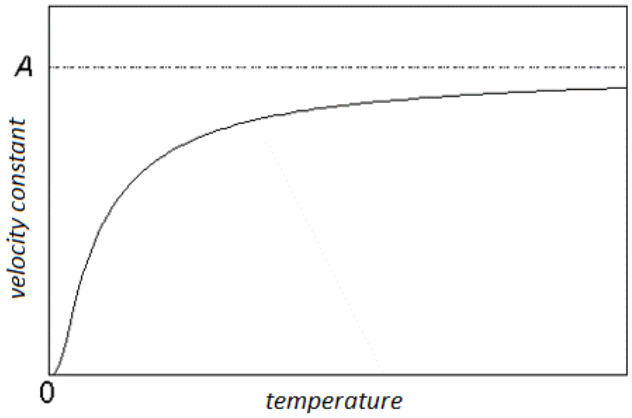


Figure 1. The graphical dependence $k_{fi}(T)$

Chemical reactions proceed very slowly at low temperatures. At very high temperatures, the rate constant tends to the limiting value: $k_{fi} \to A_i$. This corresponds to the fact that all molecules are chemically active and each collision leads to a reaction.

The rate of the reverse reaction is determined by the formula

$$K_{c_i} = \frac{k_{f_i}}{K_{c_i}} \tag{9}$$

$$K_{c_i} = K_{p_i}(\frac{P_{fi}}{K_{c_i}})^{\sum_{k=1}^{K}\nu_{ki}} \tag{10}$$

The equilibrium coefficient K_{p_i} is determined by the following formula

$$K_{p_i} = exp(\frac{\triangle S_i^0}{R} - \frac{\triangle H_i^0}{RT}) \tag{11}$$

$\triangle$ describes the change occuring when going completely from reactants to products in the i -th reaction:

$$\frac{\triangle S_i^0}{R} = \sum_{k=1}^{K}\nu_{ki}\frac{S_k^0}{R} \tag{12}$$

$$\frac{\triangle H_i^0}{RT} = \sum_{k=1}^{K}\nu_{ki}\frac{H_k^0}{RT} \tag{13}$$

In Chemkin software, these coefficients are divided into two groups for two intervals of the temperature interval (low and high temperature region). In this case, the following formulas are used to calculate the thermodynamic properties (enthalpies and entropies) of a given substance:

$$\frac{H_k^0}{RT_k} = a_{1k} + \frac{a_{2k}}{2}T_k + \frac{a_{3k}}{3}T_k^2 + \frac{a_{4k}}{4}T_k^3 + \frac{a_{5k}}{5}T_k^4 + \frac{a_{6k}}{6}, \tag{14}$$

$$\frac{S_k^0}{R} = a_{1k}ln(T_k) + a_{2k}T_k + \frac{a_{3k}}{2}T_k^2 + \frac{a_{4k}}{3}T_k^3 + \frac{a_{5k}}{4}T_k^4 + a_{7k} \tag{15}$$

The coefficient a_i for the k-th substance is taken from the file of thermodynamic data of substances Fig. 2

After determining the rates of changes in substances in the reaction, the above system of differential equations is solved. Solving the system of differential equations with initial conditions by numerical Runge-Kutta methods for determining the concentrations of substances from the Aramco mechanism, the following results were obtained (Fig. 3).

This formulation of the determination of the reverse reaction rate for a reaction involving electrons is usually not correct. The Saha equation in solving such problems is sometimes used, which is used for the function of the ionization and recombination of the third body electron [1].

Methods and algorithms

Runge-Kutta methods of the 4th and 5th order were used for simulation of the kinetics of chemical reacting systems. The code for the C++ program was written for sequential computation on the central processing unit using this method, and CUDA technology was used for parallel calculation.The results

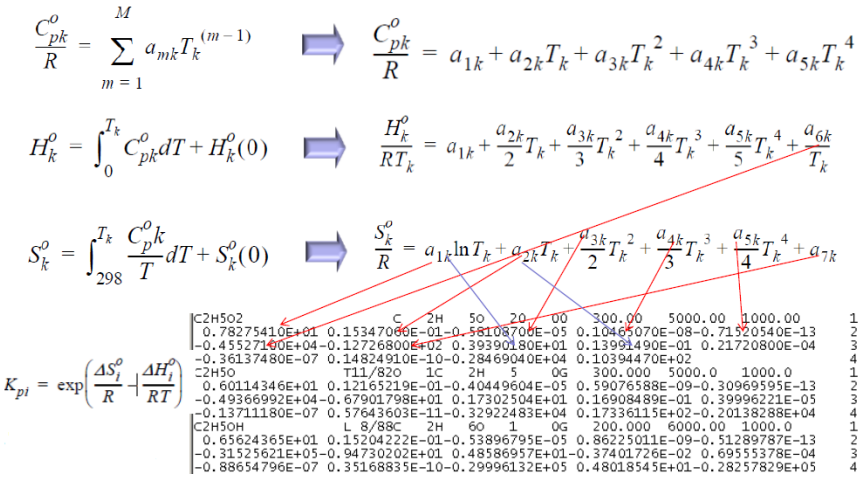


Figure 2. Location of thermodynamic data in the Chemkin file

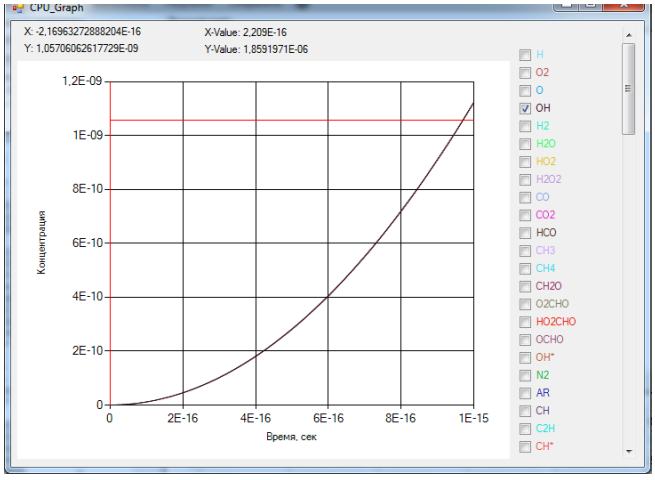


Figure 3. The process of changing OH concentrations by time

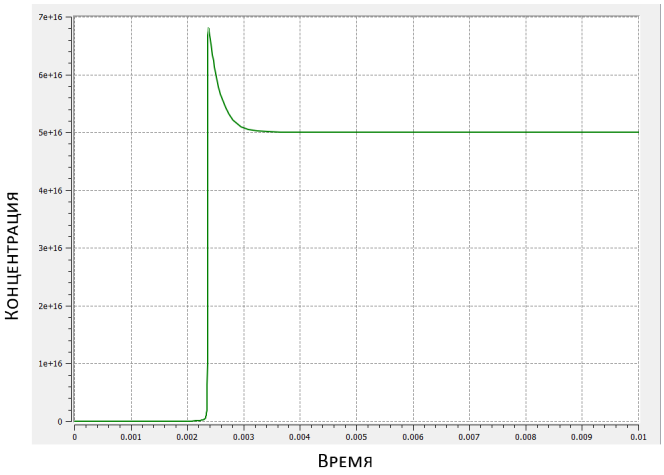


Figure 4. The process of changing OH concentrations by time in the Chemical Workbench

obtained were compared with the results of the Chemical Workbench chemical process simulation software (Fig. 4).

Algorithm for calculating the concentration change by the Runge-Kutta method of the 4th and 5th order:

1. Allocating memory for arrays;
2. Reading the input data of forward and reverse reaction rates, concentrations, left and right matrix of the reaction mechanism(Fig. 5);
3. Calculation of the change in concentration for each element of the reaction mechanism at a given time point;
4. Recording new concentration values to the file;
5. Checking the condition of the time: if the time in this step is less than the total calculation time, then return to step 3, otherwise stop the calculation.

Algorithm of data parallelization during calculations on a graphical device using the Runge-Kutta method of the 4th and 5th order:

1. Reading input data from a file (a file of direct and reverse reaction rates, concentrations, the left and right matrix of the reaction mechanism);
2. Memory allocation on the graphic device to copy the input data;
3. Copying data from RAM into the memory of the GPU;
4. The determination of the number of threads on a block and the number of blocks on the grid;
5. The calculation of the change in concentration for each element of the reaction mechanism at a given time point.
   (a) Calling the calculation function on the GPU of the Runge-Kutta method;

(b) Calling the function of computing the second coefficient of the Runge-Kutta method on the GPU and calculating the change in concentration at a given time step;
(c) Calling the function of computing the third coefficient of the Runge-Kutta method on the GPU and calculating the change in concentration at a given time step;
(d) Calling the function of computing the fourth coefficient of the Runge-Kutta method on the GPU (for the fourth-order Runge-Kutta method) and calculating the change in concentration at a given time step;
(e) Calling the calculation function on the GPU of the fifth coefficient of the Runge-Kutta method (for the 5th order Runge-Kutta method) and calculating the concentration change in this time step;
(f) Calling a function on the GPU to replace all values of substance concentrations with new values;
(g) Copying data from GPU memory to CPU memory and writing new concentration values to a file.

6. Checking the condition of the time: if the time in this step is less than the total calculation time, then go back to step 5, otherwise stop the calculation.

The table below shows a comparative analysis of the CPU and GPU calculation times. Each thread calculates how much the concentration of a given substance has changed in a reaction in a given time interval. Since, the parallelization is performed by the reactions, the calculation on the GPU gives a noticeable gain over time with the increase in the number of reactions in the mechanism (Table 1, Fig. 6).

From Table.1 and Fig.3, it can be seen that performing calculations using graphics processors gives a noticeable increase in the computational speed and will take quite a bit of time.

The interface of the program

In the course of the implementation of the massively parallel kinetic solver, the software product "Chemical Calculator" for simulatation of the kinetics of chemically reacting systems in zero-dimensional approximations was developed. The work of the program combines the process of calculation, both on the central processor and on NVIDIA graphics processors using CUDA technologies. The graphical interface of the program is developed using the C# programming language. The program interface is designed in such a way that it is most convenient for the user to solve the problems of chemically reacting systems. The screenshot of the software is shown in Fig. 7.

Table 1. Comparative analysis of the calculation time on CPU and GPU for different sizes of the input mechanism.

During the calculation in the developed program, the abbreviated files of the Chemkin mechanism are used. This allows the user to easily transfer their bulk mechanisms to the Chemkin format. The user can download these files

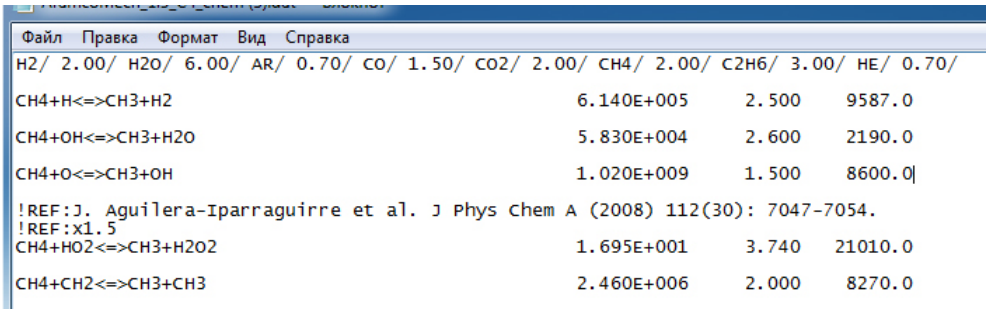


Figure 5. The data used in the Aramco mechanism

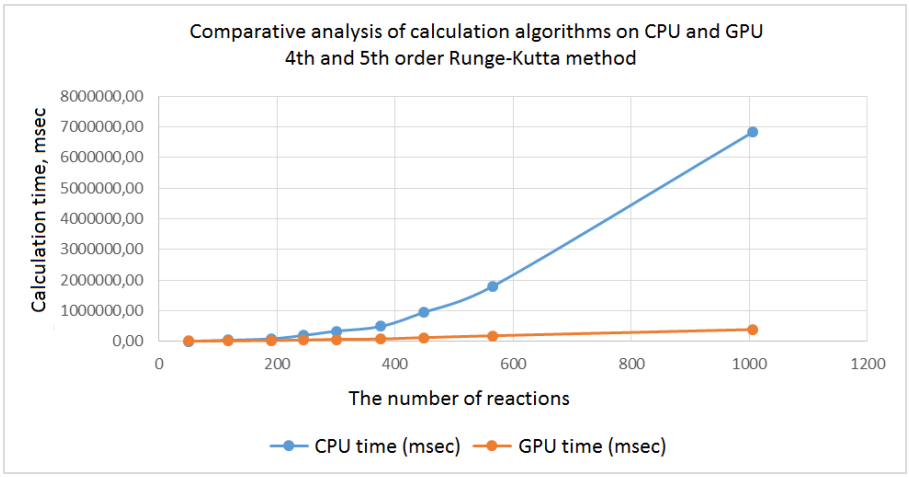


Figure 6. Change in the calculation time depending on the size of the mechanism with the distribution of the reaction to individual threads, in calculating the change in concentration in a given time interval of a certain substance

Table 1. Comparative analysis of the calculation time on CPU and GPU for different sizes of the input mechanism

Mechanism: Aramco Mech				
Time step, dt, sec:		1,00E-19		
Time of calculation: 1000*dt, sec		1,00E-16		
The Runge-Kutta method is of order 4				
Number of elements	Reaction number	CPU time, msec	GPU time, msec	Acceleration
21	51	6901,00	9080,24	0,76
33	118	39081,00	20204,50	1,93
39	191	87735,00	29619,10	2,96
52	245	199169,00	49747,80	4,00
61	301	336749,00	67557,10	4,98
66	376	491811,00	83188,70	5,91
84	448	946439,00	125339,00	7,55
103	565	1795548,00	186175,00	9,64
162	1006	6832052,80	390403,00	17,5

using the File → Reactions and File → Thermodynamic Properties menu items. After downloading, the input file appears in the "Input file" program area. The separator between reactions and thermodynamic properties of substances is a string containing the words "THERM". Reading data from the "Input file" area is done line by line, and the reading results are written to the "Reading results" area. As a result of reading, the amount of reagents and reactions found in this mechanism, the Arrhenius formula coefficients, the direction of the reaction, the derivation of the left and right matrix for the reaction mechanism, and the thermodynamic data for each element in the mechanism are determined. The definition of this data is made only with one click of the Read → Read data from a file menu item. After that, the input data for the calculation is entered, choosing a certain method from the drop-down list. Calculations can be carried out both on the central processor and on the graphic processor. The calculation performed on NVIDIA GPUs showed that with the increase in the number of responses, the computation time is much reduced, in comparison with the calculation time on the central processors.

Conclusion

In carrying out the calculation in the program developed by the abbreviated file Chemkin mechanism. This allows the user to easily use their own bulk mechanisms in the format of the Chemkin software package. Calculations can be carried out both on the central processor and on the graphic processor. When performing calculations on NVIDIA GPUs, with the increase in the number of responses, the calculation time is much reduced compared to the calculation time on the CPUs. The program implements automated reading of data from input

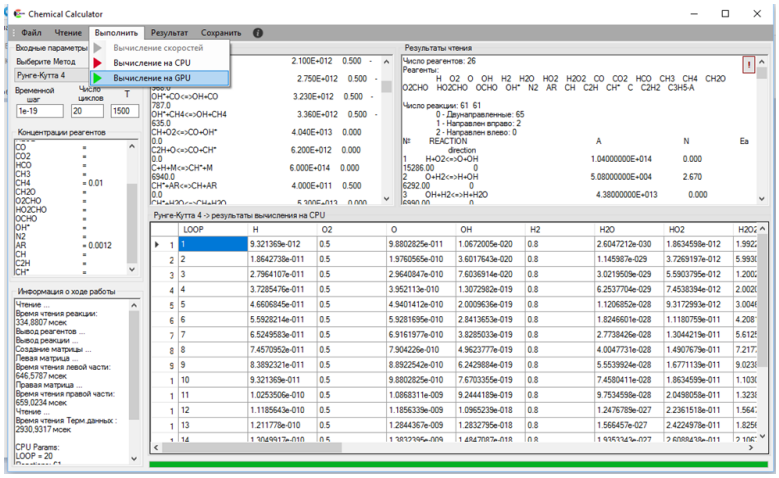


Figure 7. The main interface of the "Chemical calculator" software

files on the Chemkin software package format, computational algorithms for calculating reaction rates, calculating changes in the concentration of substances over time. The main calculations can be carried out using Runge-Kutta methods of the 4th and 5th order. The computation on the central processor is performed using a sequential algorithm. Calculation on NVIDIA graphics cards using CUDA parallelization technology is performed in a parallel way.

A comparative analysis was performed on the calculation time on the central processor and the graphics processor using the created software product. As a result, it was established that speeding up the calculation process using graphics cards gives a massive time gain.

Acknowledgement

This work was supported by the grant of the Committee of Science of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (AP05132915) "'Development and implementation of the cloud information-computational system for automated development and optimization of pharmacokinetics and pharmacodynamics'"

References

1. Varnatts, Maas, U., Dibble, R.: Burning physical and chemical aspects, modeling, experiments, formation of pollutants. / Trans. With the English. G.L. Agafonova. Ed. P.A. Vlasov. FIZMATLIT, Moscow 352 (2003).
2. Vibe, I. I.: The theory of internal combustion engines: a summary of lectures. Publishing house of Chelyabinsk. Polytechnic institute, 252 (1974).

3. Under, Ed., Orlina, A. S., Kruglova , M. G.: Internal combustion engines: Design and operation of reciprocating and combined engines. Mechanical Engineering, 288 (1980).
4. Ilyina, M. A., Senachin, P.K., Sverdlov, M. Yu.: Modeling of convective and radiative heat transfer in an ICE with spark ignition. Problems of hydrodynamics and heat and mass transfer, 155, 54-57 (1999).
5. Klepov, Yu. V.: Self-ignition of a methanol-air mixture in front of the flame front in the combustion chamber of an ICE. Kinetics and combustion. Mater. VIII All-Union. Simpos. For combustion and explosion, Chernogolovka, Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 54-57 (1986).
6. Petrichenko, P. M.: Physical foundations of intra-cylinder processes in internal combustion engines:Textbook. L. Leningr.University, 244, (1983).
7. Zhapbasbaev, U. K., Makashev, E. P.: Diffusion combustion of a system of plane supersonic hydrogen jets in a supersonic flow. Combustion explosion and shock waves. Sci., 415-422 (2003).
8. `http://www.nvidia.ru/object/cuda-parallel-computing-ru.html`
9. Harris, M.: Mapping Computational Concepts to GPUs. GPU Gems 2., 493-508 (2006).
10. Hall, J.D., Carr, N. A., Hart, J. C.: Cache and Bandwidth Aware Matrix Multiplication on the GPU. Technical Report (2012).
11. Horn, D.: Stream Reduction Operations for GPGPU Applications. Addison Wesley, 573-589 (2006).
12. Sosutha, Sa., Mohana, Db.: Heterogeneous parallel computing using CUDA for chemical process, ScienceDirect. Procedia Computer Science 47., 237-246 (2015).

Automated visual inspection in the endoprosthesis production

M. Yemelyanova and O. Baklanova

D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
Mariya_Yemelyanova@mail.ru,O_E_Baklanova@mail.ru

Abstract The stage of the technological process is the evaluation of the product quality. Modern production involves highly efficient automated visual quality inspection. It is important to develop algorithms and programs providing automatic image processing, recognition, and defect detection. The studied object is the head of the femoral endoprosthesis used in orthopedics and traumatology. The experimental samples were obtained by turning and milling machining (CNC machine). Segmentation is one of the important parts of image processing. There are edge detection techniques, which have advantages and disadvantages. The estimation and comparative analysis of known techniques were performed. Morphological image processing was investigated. A computer experiment was carried out.

Keywords: Automated Visual Inspection, Image Segmentation, Edge Detection, Mathematical Morphology

Introduction

Increased attention to the quality of products in modern production involves effective automated visual inspection at various stages of production. Creation of effective visual quality inspection systems of products based on machine vision systems is associated with modern achievements of computer technology. In general, the tasks of machine vision systems include acquiring a digital image, processing the image to highlight significant information on the image and analysis of the data to solve the problems.

There are three main goals for automated visual inspection: to check the quality of the components and products, to reject those that are dimensionally inaccurate or defective; to assess the general quality of production in order to provide feedback to earlier stages of the production and thereby to correct erroneous trends; to gather logistics on the operation of the production to help with advance planning [1].

The visual inspection process of products may include: inspection of shapes, dimensions and other parameters of parts; inspection of surface defects, inspection of the installation process.

The wide use of machine vision systems in the field of visual quality inspection requires the development of methods, algorithms and programs that provide

automatic image processing, measurement, analysis for image recognition, and defect detection.

There are many companies, research groups specializing in machine vision and image processing. Among the companies that represent solutions for automated visual quality inspection in production are Siemens [1], SICK [1], Cognex [2], Isra Vision [5], Matrix Vision [6], MVtec [7], Altami [8], etc.

Description of the Technological Process

The object for the study is the head of the femoral endoprosthesis. Such endoprostheses are used in orthopedics and traumatology.

Three-dimensional models of endoprosthesis components are created using CAD/CAM-design techniques. Then components are made on the CNC turning and milling center. Experimental samples were obtained. Samples had defects. There may be a mismatch of the geometric dimensions, the presence of surface defects in components production.

Components with a simple shape will be processed on one machine. Some components will be processed in several stages due to their complex spatial shape. The first stage is on the CNC turning and milling center. The next stage is on the 5-axis CNC milling machine. The use of CNC machines can reduce the percentage of defects in the finished component. The defects can occur for the various reasons. The preparation of the future component was of poor quality initially. The algorithm of the work process was incorrectly calculated. There were defects in machine operation. The main objective is quality inspection and defect detection, produced components of endoprosthesis. To do this, it is necessary to use a visual quality inspection system.

When using automated visual inspection in production, various tasks are solved. In general, there are four steps (figure 1).

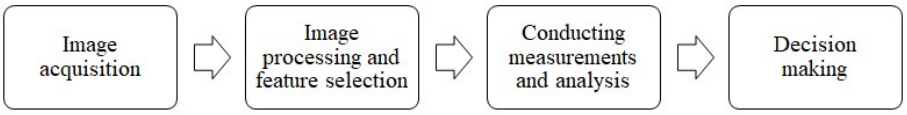


Figure 1. Basic steps of automated quality inspection

It is important to get an image. Any deficiencies of the original images can cause great problems with image analysis and interpretation. An example is that of the detail lack of due to insufficient contrast or poor focusing of the camera. Much depends on illumination in image acquisition [1]. The next step is to improve the image quality and feature selection. This is followed by measurement of physical characteristics, analysis of the obtained data. The last step is the decision making on the classification (permissible or defective component).

Mathematical Methods

The method of recognition based on contour analysis is used to achieve the objective. Figure 2 shows the general scheme of the contour analysis.

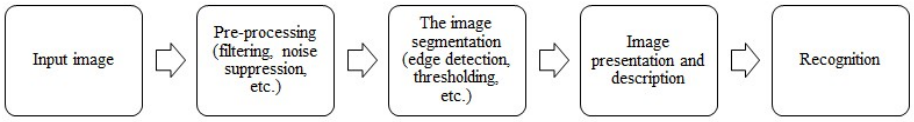


Figure 2. The general scheme of the contour analysis

Different mathematical methods are used at each step of the contour analysis.

Image segmentation is an essential step in image analysis. Image segmentation is the process of partitioning a digital image into multiple regions or sets of pixels. Segmentation algorithms for images generally based on the discontinuity and similarity of image intensity values.

Edge detection is a fundamental tool for image segmentation. Edge detection techniques transform original images into edge images benefits from the changes of grey tones in the image [2].

Edge detection is the most familiar approach for detecting significant discontinuities in intensity values. Edges are local changes in the image intensity. Edges typically occur on the boundary between two regions. The main features can be extracted from the edges of an image.

The effectiveness of many image processing also computer vision tasks depends on the perfection of detecting meaningful edges. There are some problems of fake edge detection, edge localization, missing true edges, problems due to noise, etc. It is necessary to compare different edge detectors and analyze the performance of various techniques [3].

There are many edge detection techniques in the literature for image segmentation [1,2,12,13].

The edge detection techniques can be classified based on first order derivative and second order derivative. First technique is using gradient vector and estimate the gradient direction e.g. Roberts, Sobel, Prewitt. The second technique is using zero-crossing of the Laplacian or non-linear differential expression.

The significantly differential change at the image gradient can be used to detect any edge of each region. A well known algorithm is the Sobel operator which detects the vertical and horizontal changes in image. The operator is using two 3x3 kernels which are convolved with grayscale image. The convolution masks for the Sobel operator shown in Figure 3. The two masks are separately applied on the input image to yield two gradient components G_x, and G_y, in the horizontal and vertical orientations respectively [4].

The gradient magnitude is usually computed as

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

(a)

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

(b)

Figure 3. Sobel masks to compute (a) gradient G_x and (b) gradient G_y

$$G\left[f\left(x,y\right)\right] = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}. \tag{1}$$

The Laplacian is a second derivative operator, and it is sensitive only to changes in intensity gradient. In 2-D its standard (mathematical) definition is given by [1]:

$$\bigtriangledown^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}. \tag{2}$$

The Canny operator has become one of the most widely used edge detection operators. Intrinsic to the method is that of specifying the spatial bandwidth within which it is expected to work, and also the exclusion of unnecessary thresholds, while permitting thin line structures to emerge and ensuring that they are connected together as far as possible and indeed are meaningful at the particular scale and bandwidth. The method involves a number of stages of processing: low-pass spatial frequency filtering, application of first-order differential masks, non-maximum suppression involving sub-pixel interpolation of pixel intensities, hysteresis thresholding.

Binary images may contain imperfections. Morphological image processing follows the goal of eliminating imperfections and maintaining structure of image.

Mathematical morphology is an approach to image processing based on set operations typically describing the algebra of nonlinear operators operating on object shape [1,15,16,17].

Morphological operations work by performing a logical test in every possible position in an image between a structuring element and the corresponding portion of the image. In other words, the structuring element is effectively translated to each possible position in the image, the logical operation is applied (comparing the structuring element to the image in some fashion) and the result is stored in a separate output image [18].

Dilation and erosion are the two fundamental operations in mathematical morphology.

Consider two sets A and B that are subsets of the 2-D integer space Z^2.

Dilation of A by B denoted as $A \oplus B$ is defined as [19]

$$A \oplus B = \{Z \mid (\hat{B})_z \cap A \neq \varnothing\}. \tag{3}$$

In the equation, the reflection of B is shifted from its origin by z. Thus, the dilation of A by B is the set of all the z displacements of the origin of $\hat{B}$ such that $\hat{B}$ and A overlap by at least one nonzero element.

Dilation is a technique for expanding the number of object pixels, typically in all directions simultaneously. This operation results in small holes being filled and fills in narrow gaps between larger groups of set points. It also increases the size of objects (i.e. the number of points in the set) [18].

Erosion of A by B denoted $A \ominus B$ is defined as [19]

$$A \ominus B = \{Z \mid (B)_z \subseteq A\}. \tag{4}$$

The equation means that the erosion of A by B is the set of all points z such that the translated version of B is contained in A.

Erosion is a technique for shrinking object shapes by removing pixels from the boundary. This operation results in any small points of noise and any narrow features being removed. It also reduces the size of objects (i.e. number of points in the set) [18].

Opening and closing are important morphological operations based on dilation and erosion.

The opening of set A by structuring element B is defined as [19]

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \tag{5}$$

that is, the opening of A by B is the erosion of A by B, followed by a dilation operation between the result and B. An opening removes noise (i.e. eliminates image details smaller than the structuring element), narrow features (such as bridges between larger groups of points), and smoothes the object boundaries. Unlike erosion and dilation though, it maintains the approximate size of the objects [18].

The closing of set A by structuring element B is defined as [19]

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \tag{6}$$

that is, the closing of A by B is the dilation of A by B, followed by the erosion of the result by B.

A closing joins objects which are close together and fills in holes within objects. Like opening, closing roughly maintains the size of objects.

Results

A computer experiment was carried out to determine the best way of edge detection of the analyzed images. The edge detection techniques and morphological operations were implemented in C# using Emgu CV.

Figure 4 shows the original images and the images obtained by using edge detection techniques.

It is observed from the figure 4, Canny result is superior to the other results.

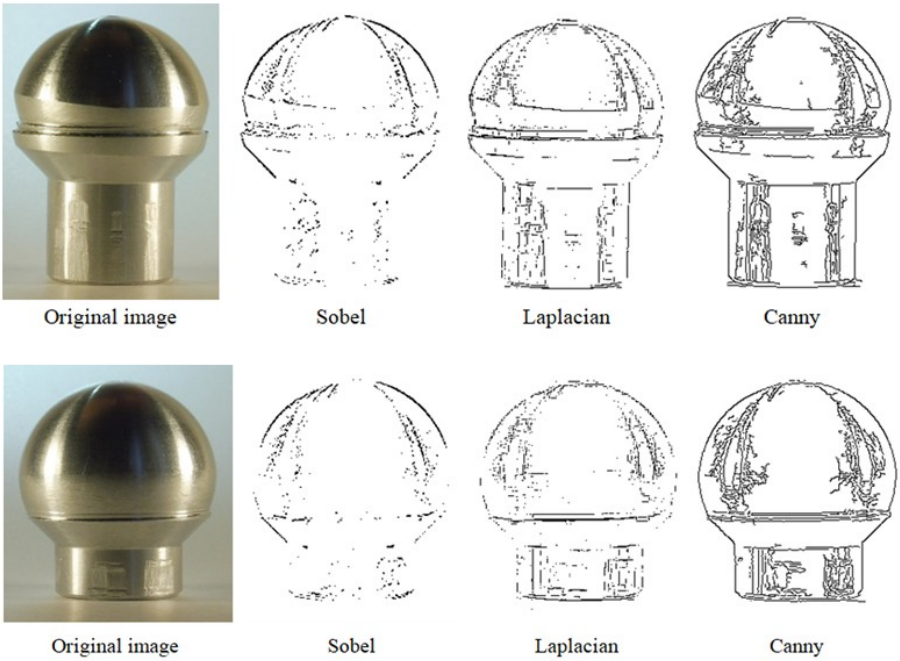


Figure 4. Original images with the result of various edge detection techniques

There might be gaps in the contours after using edge detection techniques. This will hinder correct processing in subsequent step. Morphological operations can be used to eliminate gaps. The Canny edge detection and morphological operation Opening or Closing proposed to use for contour segmentation of the analyzed images.

Figure 5 shows the images obtained by using morphological operation Opening after Canny edge detection.

Conclusion

The development of a visual quality inspection system includes various stages.

It is necessary to choose mathematical methods that provide reliable results at the stage of image processing. Contour analysis, which includes image segmentation, can be used for recognition.

The analysis of Sobel edge detection, Laplacian edge detection, Canny edge detection, and also morphological operations were carried out. Among various technique of edge detection technique Canny operator gives better output than Sobel operator and Laplacian operator. Canny edge detection and morphological operation Opening or Closing give better output for contour segmentation of the analyzed images.

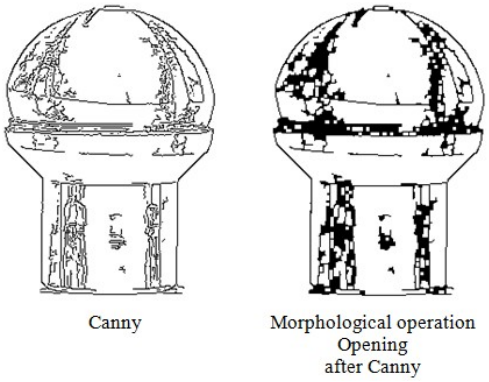


Figure 5. The result of using Canny edge detection and morphological operation Opening

Acknowledgement

The study has been conducted with the support of the Science Committee of RK MES in the framework of the program target financing for the 2017-2019 biennium by the program 0006/PTF-17 "Production of titanium products for further use in medicine".

References

1. Davies, E.R.: Computer and Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities. Fourth Edition. Elsevier Inc.(2012)
2. SIMATIC - The Product Family for Automation by Siemens. https://w3.siemens.com/mcms/topics/en/simatic/Pages/Default.aspx
3. Lysenko, O. N.: Machine Vision from SICK/IVP. Components and Technologies, 1 (2007)
4. Machine Vision: Cognex Website. https://www.cognex.com/products/machine-vision
5. ISRA Vision. http://www.isravision.com
6. Matrix Vision. https://www.matrix-vision.com
7. MVTec Software GmbH. Inspection. http://www.mvtec.com/services-solutions/technologies/inspection/
8. Altami Software. http://altamisoft.ru/
9. Senthilkumaran, N., Rajesh, R.: Edge Detection Techniques for Image Segmentation – a Survey of Soft Computing Approaches. International Journal of Recent Trends in Engineering, 2 (2009)
10. Muthukrishnan, R., Radha, M.: Edge Detection Techniques for Image Segmentation. International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT), 6, (2011)
11. Acharya, T., Ray, A.K.: Image Processing. Principles and Applications. Wiley (2005)

12. Shapiro, L., Stockman, G.: Computer Vision. Moscow: Binom Publisher (2006)
13. Parker, J.R.: Algorithms for Image Processing and Computer Vision. 2nd ed. Wiley (2011)
14. Akbar, H., Prabuwono, A. S.: Webcam Based System for Press Part Industrial Inspection. IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, 10 (2008)
15. Najman, L., Talbot, H.: Mathematical Morphology: from Theory to Applications: 1nd ed. Wiley-ISTE (2010)
16. Soiled, P. Morphological Image Analysis: Principles and Applications: 2nd ed. Berlin: Springer (2004)
17. Vizilter, Yu.V., Zheltov, Su.Y., Bondarenko, A.V., Ososkov, M.V., Morzhin, A.V.: Image Processing and Analysis in Technical Vision Applications, Moscow: Fizmatlit (2010)
18. Dawson-Howe, K.: A Practical Introduction to Computer Vision with OpenCV. Wiley (2014)
19. Gonzales, R.C., Woods, R.E.: Digital Image Processing. 3d ed., Pearson Prentice Hall (2008)

Mathematical modeling of elastic wave propagation in a homogeneous media

S. Zhuzbayev and D. Sabitova

L.N.Gumilyov Eurasian National University,
Astana, Kazakhstan
juzbayev@mail.ru,dianasabitova@yahoo.com

Abstract The article is devoted to the mathematical modeling of elastic wave propagation in a homogeneous media. As an example, we considered a plane deformation of an elastic half-strip of finite width using the bicharacteristic method with the addition of ideas of the splitting method. In the working process mathematical model of wave process was constructed, scattering scheme was defined and a template was selected. Resolving system of equations for the for internal, edge and angular points of the investigated body are obtained. Software has been developed and stability of numerical calculation is checked. The results of calculations in the form of isolines of normal stresses, performed for different instants of time, are obtained.

Keywords: mathematical modeling of elastic waves, half-strip, bicharacteristic method, defining equation, the characteristic cones, difference equation, scatter diagram, the stress tensor

Introduction

In the design and construction of the economic dimension of the rational use of materials is one of the most important. Static imposed load and its influence in the process of construction or design can be calculated. While dynamic loads can bring significant financial costs in case they are not taken into account on time. Calculation of dynamic loads to reduce costs as well as risks that may arise in the process of construction. As a result of dynamic loads, elastic waves appear in the body, the exact calculation of which makes it possible to assess the strength and reliability of the technology and the entire structure as a whole.

To study dynamic loads, it is necessary to investigate the body in the space-time projection, in order to analyze the wave processes in it. This leads to high complexity of modeling and forecasting of all indicators.

The need of analyze of wave processes in a deformed body and predicting the laws of its behavior led to the improvement of mathematical methods. In connection with the development of information technologies and accessibility to computing power of computers, numerical methods of solving have been developed: the method of spatial characteristics [1-6], the method of finite differences [7], the method of boundary integral equations [8, 9], etc.

In this paper, to solve the problem of plane deformation of an elastic half-strip, the bicharacteristic method is applied with the addition of ideas of the splitting method.

Statement of the problem

Plane deformation of an elastic half-strip of finite width of $2l$is considered, which in a Cartesian coordinate system $x_1\ O\ x_2$ occupies an area $0 \le x_1 \le \infty$, $|x_2| \le l$ (Figure 1).

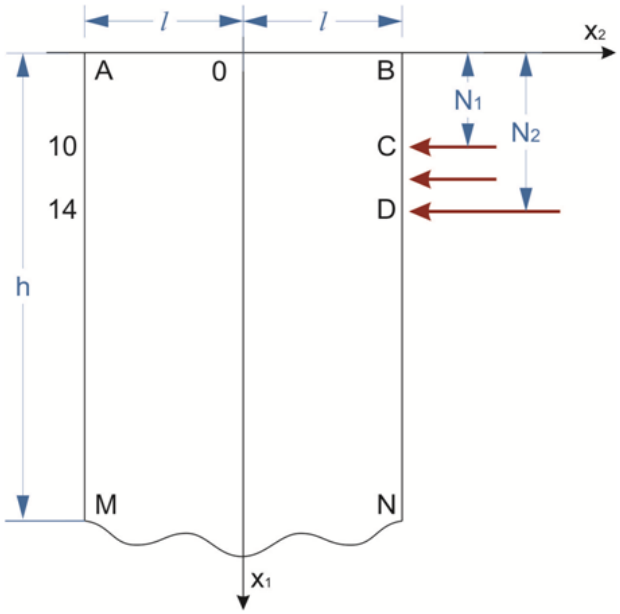


Figure 1. Study area

In the initial time the body is at the state of rest

$$v_\alpha = \sigma_{\alpha j} = 0 \tag{1}$$

At any other time $t_n + \tau$, $(n = 1,\ 2, ...,\ \mathrm{N})$ in section $N_1 \le x_1 \le N_2$, $x_2 = l$ of bound of BN a uniformly distributed nonstationary normal load operates$f(t)$, changing according to since law, i. e.

$\sigma_{22}\ (t) = A\sin(\omega t)$, if $0 \le t \le S_1$ and 0 if $t > S_1$,

$$\sigma_{12}(t) = 0 \tag{2}$$

Here S_1 – load time, in addition $\omega = \frac{\pi}{S_1}$. The rest of half-strip boundary is free from any impact:

$\sigma_{11}(t) = 0$, $\sigma_{12}(t) = 0$, if $x_1 = 0$ and $|x_2| \leq l$

$$\sigma_{22}(t) = 0, \sigma_{12}(t) = 0, if 0 \leq x_1 \leq N_1, x_1 \geq N_2 and |x_2| \leq l \tag{3}$$

It is necessary to investigate the stress state of an elastic body D where t>0.

Bicharacteristics methods with the ideas of the splitting method

To solve this problem with given initial and boundary conditions, use a system of equations in a dimensionless form, consisting of the equations of motion and the relations of the generalized Hooke's law [10]:

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = \sigma_{11,1} + \sigma_{12,2} \\ \dot{v}_2 = \sigma_{21,1} + \sigma_{22,2} \\ \dot{\sigma}_{11} = v_{1,1} + \gamma_{11} v_{2,2} \\ \dot{\sigma}_{22} = \gamma_{11} v_{1,1} + v_{2,2} \\ \dot{\sigma}_{12} = \gamma_{12}^2 \left(v_{1,2} + v_{2,1}\right) \end{cases} \tag{4}$$

where $(v\ )_\alpha$, $\sigma_{\alpha j}$ are components of the velocity and stress tensor; γ_{11} and γ_{12} are calculated by the formula $\gamma_{12} = \frac{c_2}{c_1}$, $\gamma_{11} = 1 - 2\gamma_{12}^2$, where $c_1 = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}$, $c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$ are datum speeds; the lower indices after the comma denote derivatives with respect to the corresponding spatial coordinate; the points from above denote the derivatives with respect to time.

System (4) is a hyperbolic type system, in which the characteristic surfaces in three-dimensional space (x1, x2, t) represent a hypercone with axes parallel to the time axis (Figure 2).

The generators of these cones coincide with the bicharacteristics of equations (4). To obtain the equation of these bicharacteristics and the conditions on them, we split the two-dimensional system (4) into one-dimensional ones. This can be done if in system (4) one of the spatial variables is sequentially fixed [11]. This technique corresponds to the idea of KA. Bagrinovskiy and S.K. Godunov of the splitting of multidimensional t-hyperbolic systems into one-dimensional systems [12].

Selection of scattering scheme and template. Let the body be divided into square cells whose sides are $\Delta x_1 = \Delta x_2 = h$. At the nodal points, the values of function v_i, σ_{ij} is sought at different times with step τ. The spot grid from basis of which the difference scheme is constructed, in addition to the node points mentioned, contains points formed by the intersection of bicharacteristics with hyperplanes t = const [13].

A template consisting of node and points $E_{ij}^{\pm}$, separated from point O by distances $\lambda_{ij}\tau$ is accepted (Figure 3).

Further, the upper sign "0"is assigned to the values of the functions at the point O, the subscript ij and the upper "$\pm$"sign to the points $E_{ij}^{\pm}$ (for example

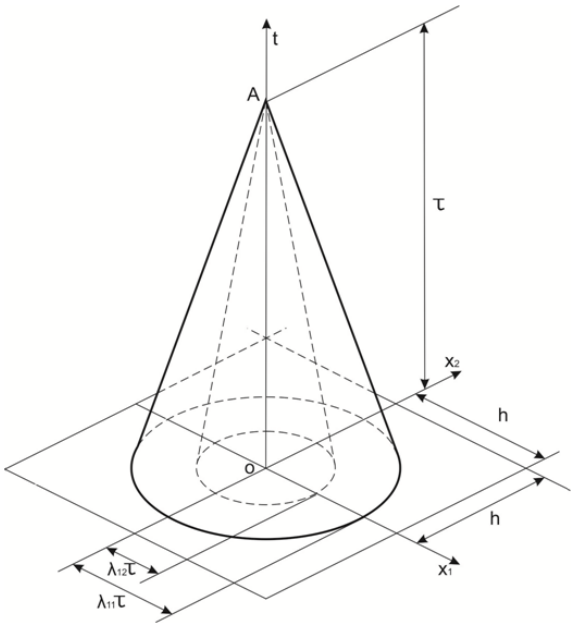


Figure 2. Characteristic cone

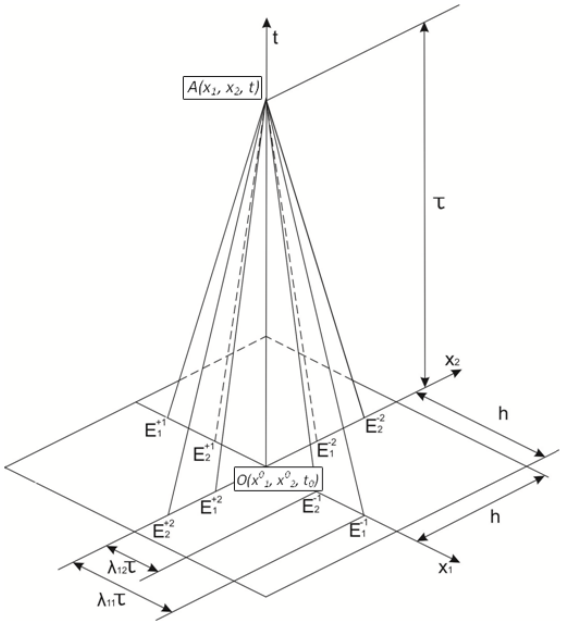


Figure 3. Scattering scheme of difference equations

$\sigma_{ij}^{\pm}$), and at the point A (the upper layer of time $t_0 + \tau$) the additional index is not is attributed.

On the basis of the described scattering scheme, the method for solving dynamic problems developed below allows us to determine the velocities v_i and the components of the stress tensor σ_{ij} at the point A on some time layer $t = t_0 + \tau$, if their values are known on the previous layer $t = t_0$ at the point O and the adjacent to its points $E_{ij}^{\pm}$. Difference schemes of this type are called explicit. These systems are solved successively from one-time layer to the next.

Accuracy and stability of the numerical solution

The system of difference equations (4) should lead to a solution that coincides with the solution of the original system. The general theory of partial differential equations for this requires certain restrictions to the grid ratio of steps with respect to time and coordinate in problems with initial and boundary conditions that can be represented as follows [15]:

$$\left|\frac{\tau c_{ij}}{h}\right| \ll 1, \tag{5}$$

where c_{ij} are the coefficients of the hyperbolic system. Physically, such a restriction means that the solution at the hypercone vertex is expressed in terms of the initial value inside the domain bounded by the hypercone surface.

A necessary condition for the stability of the grid-characteristic method, which follows from the Neumann condition (the spectral radius of the augmented matrix does not exceed one), is found as follows:

$$max\left\{\left|\frac{\tau\lambda_{ii}}{h}, \frac{\tau\lambda_{ij}}{h}\right|\right\} \leq 1, \tag{6}$$

which expresses the Courant-Friedrichs-Lewy condition.

During further calculations, the steps of the spatiotemporal grid are selected according to the stability conditions (5) and (6). Numerous calculations have experimentally verified that condition ensures the stability of counting for a large time point [16].

Analysis of results

The propagation of plane elastic waves was investigated for a semiband (steel) material with properties: c_1=5817 m/s, , c_2=3109 m/s, with the following values: $A = 0.5$, $\omega = 4.5$, $\tau = 0.0025$, $h = \Delta x_1 = \Delta x_2 = 0.05$, $l = 5h$, $L = 70h$, $N_1 = 10h$, $N_2 = 14h$.

Figures 4 – 11 show the results of calculations in the form of isolines, performed for the time $t = 60\tau$. Considered time corresponds to multiple reflections of plane waves from the boundaries AM ($0 \leq x_1 \leq \infty$, $x_2 = -l$), BN ($0 \leq x_1 \leq \infty$, $x_2 = l$) and ($x_1 = 0$, $|x_2| = l$). Investigations are carried out up to the time when the superposition of waves of various types occurs.

Figures 4 and 5 show the isolines of normal $\sigma_{22}^{(1)}$ and tangent $\sigma_{12}^{(1)}$ stresses, that correspond to time $t = 20\tau$.

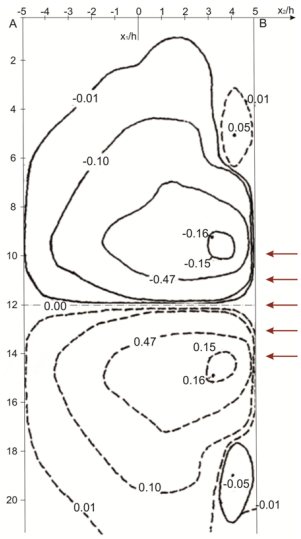


Figure 4. Isolines of tangent stress $\sigma_{12}^{(1)}$ (10^{-3}) at time $t = 20\tau$

During this time, the boundary perturbance propagated from the local site of action pass a distance of *10h* and reach the opposite boundary of AM. The axis$x_1 = 0.5(N_1 + N_2) = 12h$ is the axis of symmetry of the wave pattern. At the same time, normal stresses σ_{22} are even, and tangent stresses σ_{12} are odd function with respect to this axis. It is possible to note areas of stress concentration near special points $x_1 = N_1,\ x_2 = l$ X $x_1 = N_2,\ x_2 = l$, which are points of discontinuity of boundary conditions.

Figures 6 – 11 shows isoloines of normal $\sigma_{jj}^{(1)}$, $(j = 1,\ 2)$ and tangent $\sigma_{12}^{(1)}$ stresses, that correspond to time $t = 40\tau$and $t = 60\tau$.

At time $t = 40\tau$ (figures 6 – 8) characteristic for the time $t = 20\tau$ the symmetry of the stress fields relative to the axis$x_1 = 0.5(N_1 + N_2) = 12h$ is still visible near the axis of symmetry.

With the distance from this axis, the symmetry of isolines is violated. This result is explained by the influence on the character of the stress distribution of the free end AB in the area $x_1 \leq N_1$ and the absence of similar effects in the area $x_1 \geq N_2$. Due to the fact that the external load is already equal to zero, the values of local extreme points decrease comparing to the previous $(t = 20\tau)$. When the plane waves are reflected from the free surface AM, the normal stresses change sign (become stretching).

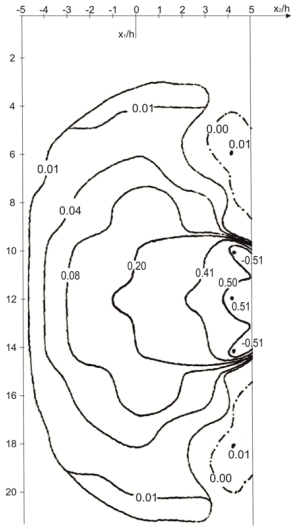


Figure 5. Isolines of normal stress $\sigma_{22}^{(1)}$ (10^{-2}) at time $t = 20\tau$

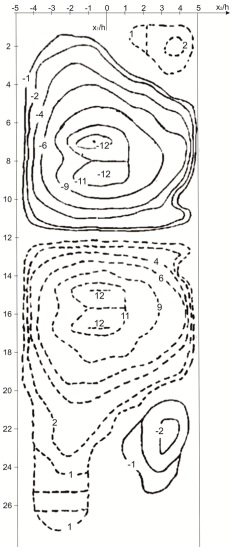


Figure 6. Isolines of tangent stresses $\sigma_{12}^{(1)}$ (10^{-2}) at time $t = 40\tau$

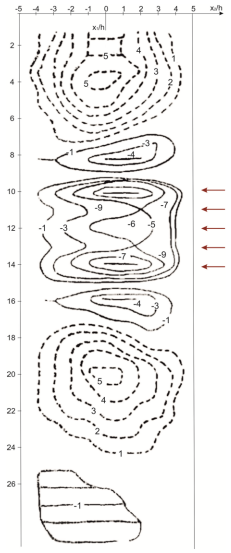


Figure 7. Isolines of normal stresses $\sigma_{11}^{(1)}$ (10^{-2}) at time $t = 40\tau$

Figure 8 shows the distribution of normal stresses $\sigma_{22}^{(1)}$. Unit pull $\sigma_{22}^{(1)}$, due to the reflection of the wave from the free surface AM, are practically symmetrical with respect to the loading axis $x_1 = 0.5(N_1 + N_2) = 12h$ and at the instant time reach a maximum value on the free surface.

A known phenomenon of a spalling can be caused precisely by these tensile stresses. At time $t = 60\tau$ (Figures 9, 10 and 11), the wave pattern is greatly complicated due to multiple reflections from free boundaries, interference and diffraction of plane waves from singular points (angular points and discontinuity points of boundary perturbance).

At this time, the external load is equal to zero. Normal stresses $\sigma_{jj}^{(1)}$, $(j = 1, 2)$ are compressive and the symmetry distribution remains near the CD boundary. It should be noted that the region of tensile normal stresses $\sigma_{22}^{(1)}$, responsible for phenomena such as "splitting off expands at time $t = 60\tau$.

Conclusion

Based on the optimized bicharacteristic method, a software complex was developed that allowed obtaining the results of calculations in the form of isolines made for different instants of time. The results obtained with the help of the software make it possible to analyze the wave processes and determine the axis of symmetry of the wave pattern, the stress concentration area, the boundary point discontinuity point, the loading axis, the phenomenon of "splitting etc.

The developed numerical method has shown high accuracy and stability, which, in turn, shows a wide range of applied value of this method and the

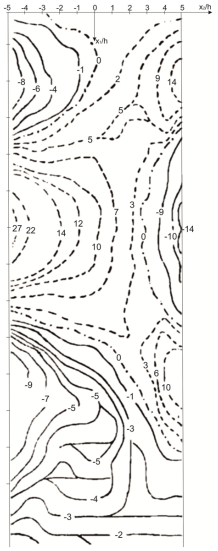


Figure 8. Isolines of normal stresses $\sigma_{22}^{(1)}$ (10^{-2}) at time $t = 40\tau$

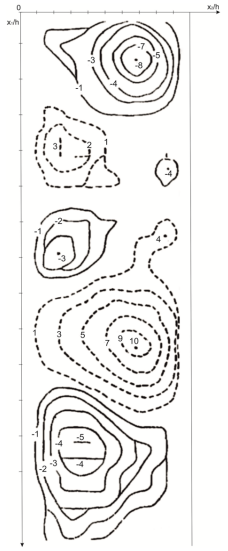


Figure 9. Isolines of tangent stresses $\sigma_{12}^{(1)}$ (10^{-2}) at time $t = 60\tau$

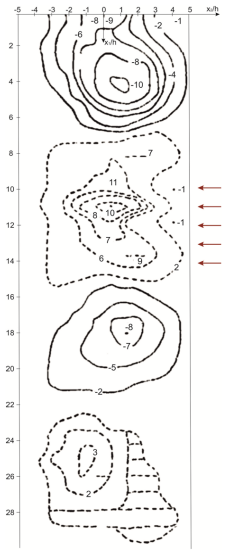


Figure 10. Isolines of normal stresses $\sigma_{11}^{(1)}$ (10^{-2}) at time $t = 60\tau$

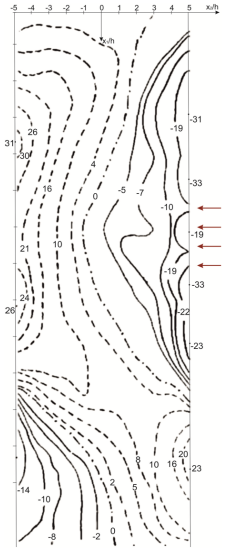


Figure 11. Isolines of normal stresses $\sigma_{22}^{(1)}$ (10^{-2}) at time $t = 60\tau$

possibility of its use for solving various wave problems. The advantage of this method is that it allows us to approach the area of maximum dependence of the final and differential equations to the area of dependence of the initial differential equation.

The obtained results and software can be used in studies of wave processes of construction, for building structures in engineering practice, in mechanical engineering, etc.

References

1. Clifton R., Difference Method in Plane Dynamic Elasticity Problems, Mechanics. Collection of translations 1968. - ?1. - P. 103-122.
2. Tarabrin G. T. The Jump Bend. Conversion of convexity thru click: monography / Tarabrin G. T. - Saarbrucken (Germany): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. - 67 p.
3. Tarabrin G. T. Difference schemes of wave problems in the theory of elasticity: monograph / Tarabrin G. T; Volg SU. - Volgograd: RPK "Polytechnic 2000. - 148 p.
4. Kukudzhanov V.N. Numerical Continuum Mechanics. De Gruyter, 2012. xviii, 425 pages.
5. Kukudzhanov V.N. A New Numerico-analytical Method for the Solution of Elastoplastic Equations Based on the Splitting of Constitutive Equations // In book Computational Plasticity VII. Ed. D.R.T. Owen, E.Onate, B.Suarez. Barselona CIMNE 2005., pp. 711-714.
6. Recker V.V. Applied mechanics// Series A.-1970. -?1.-A. 121-129.
7. Aitaliev S.M., Masanov Z.K., Baimakhanov I.B., Mahmtova N.M.,// Numerical methods for solving problems of mechanics of deformation in a solid body, Karaganda, 1987. p.3-15.
8. Bazhenov V.G., Kibec A.I., Shoshin D.V., Stability and limiting states of elastoplastic spherical shells under static and dynamic loading. Applied Mechanics and Technical Physics, 2014. V. 55, ?1, P.13-22.
9. Aitaliyev S.M., Alekseyeva L.A., Dildabayev S.A., Zhanbyrbayev N.B. The method of boundary integral equations in problems of the dynamics of elastic multiple connected bodies.- Almaty: Science, 1992. - p. 228.
10. Djuzbayev S.S., Karimbaev T.D., A complex stress state at the base of the pile under cyclic loading.// Abstracts of the scientific and technical conference "Strength of materials and structural elements at sound and ultrasonic loading frequencies Kiev, 1992, p. 18.
11. Baitaliyev B.T., Djuzbayev S.S., Method of bicharacteristics in spatial problems of the linear theory of heredity. / / Abstracts of the reports of the All-Union Symposium on Soil Rheology, Volgograd, 1985, p. 37-38
12. Bagrinovskiy A.K., Godunov S.K. Difference schemes for multidimensional problems. Reports of the USSR Academy of Sciences, 1957, vol. 115 (3), pp. 431-433.
13. Akhmetova Z., Boranbayev S., Zhuzbaev S. The visual representation of numerical solution for a non-stationary deformation in a solid body. Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer International Publishing Switzerland.-2016-Vol.448.-pp. 473-482, ISSN 2194-5357.

14. Akhmetova Z., Zhuzbaev S., Boranbayev S. The method and software for the solution of dynamic waves propagation problem in elastic medium. Acta Physica Polonica A, Polish Academy of Sciences.-2016, Vol.130. - pp. 352-354, ISSN 0587-4246.
15. Yanenko N.N. Methods of fractional steps for solving multidimensional problems in mathematical physics / Yanenko N.N. - Novosibirsk: Nauka, Sib. Division, 1967. - 196 p.
16. Zhuzbaev S.S., Kupeshov B.K. Propagation of two-dimensional stress waves in a transversally isotropic plate, 1987, Manuscript of VNIINTI 01.07.87, No.1503, 4(186), p. 192.

Analysis and synthesis of typical behavioral structures for cyber physical systems' agents

D. Zyryanov and N. Denissova

D.Serikbayev East Kazakhstan State Technical University,
Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
{dzyryanov,NDenisova}@ektu.kz
http://www.ektu.kz

Abstract Cyber physical system can be described in terms of multi agent system, where all physical and software objects act as agents to solve the system's general problem. There is a huge amount of different components of cyber physical system, which differ in architecture and software. But all of them can be classified according to different criteria. Every agent has a different set of actions depending on its category that it can initiate in the system. All of these actions can be performed through typical general templates, which are necessary for standardization and compatibility of various equipment at the protocol level. This article provides a classification of cyber physical systems' agents by the level of interaction with the systems and other objects. In addition, behavior patterns were identified based on agents' classification and behavior model of some agents was being constructed using above-mentioned patterns.

Keywords: Smart factory, multi-agent systems, cyber physical systems, information processing, machine-to-machine communications.

Introduction

In future cyber-physical systems (CPS) will play an important role in manufacturing processes. The main principle of "Industry 4.0" program is "the integration of cyber physical systems and Internet of Things and Services (IoTS) with an eye to enhance productivity, efficiency and flexibility of production processes and thus economic growth". [1]

Any CPS can be considered as multi-agent system (MAS), where every agent has its own goals of functioning and a set of available actions. However, the integration of devices (agents) into a single system is a quite complex and time-consuming task due to differences in software and hardware architectures and a huge amount of manufacturers around the world.

Development of common standards and protocols for data exchange between agents is the best way to solve this problem. For agent-based systems this task was accomplished by the Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA)

organization in Agent Management and Agent Communication Language (FIPA-ACL) standards. [2] In this article we try adopt these standards to CPS used in smart manufacturing.

The paper is organized as follows. Section 2 gives a brief description of related works in this area. Section 3 shows agents' classification according to interaction level. Section 4 shows typical process of interaction between agents in CPS, and Section 5 presents concluding remarks.

Related works

There are many research directions in smart manufacturing at this time, including security, devices interaction, horizontal and vertical integration etc. Consider works where interaction of components among themselves is presented.

Authors in [3] represented an anthropocentric cyber-physical reference architecture for smart factories, which consist of three constituents: physical component, computational or cyber component and human component.

Author in [4] build a multi-agent system for real-time adaptive resource management. In [5] authors represented a collaborative framework between a constraint-based scheduling system and multi-agent manufacturing execution system, which allows a consistent and robust integration of botch systems.

In [6] authors give brief description of smart factory's physical architecture and principles of functioning, including differences with traditional production line. Detailed description of Industry 4.0 design principles was show in [7].

The development and importance of modeling and simulation technology in a wide range of applications, including manufacturing process, briefly considered in [8].

Authors in [9] represented own classification of the smart objects into 4 types of agents and define a coordinator in the cloud. Moreover, they proposed four complementary strategies to prevent deadlocks in multi-agent system.

Agents classification

"Industry 4.0" program based on recent advances in the field of information technologies, like machine-to-machine communication, internet-of-things, microcontrollers, mini-computers, wireless sensor networks, distributed and cloud computing etc. Cyber-physical system plays uniting role of above mentioned technologies, where tightly integrated computing devices, actuation and control, networking infrastructure, and sensing of the physical world. [10]

Manufacturing CPS consists of three layers: physical resources or shop floor (including sensors, actuators, machine-tools and materials), network (wired or wireless) and software (cloud computing, big data, monitoring).

Any shop floor's device, may be considered as agent in multi-agent system, with its own functions and goal of functioning. Moreover, produced product also can be considered as agent with main goal - to finish its own production process according to technological map. However, due to the lack of own computing

capabilities, interaction with other agents is organized through product's "digital twin virtual representation of the physical thing.

There are four types of agents can be determined according to level of interaction with physical world:

- Sensors, register changes in physical world without interaction;
- Manipulators, move physical thing between different positions;
- Actuators, change the appearance of things depending on capabilities;
- Containers, temporarily store physical things for identification and transportation reasons;
- Products, produced thing according to technological map.

According to this classification, all physical agents of shop floor was classified, and results are shown in table 1.

Table 1. Physical agents of manufacturing CPS multi-agent system

Agent type	**Functions**
Manipulator (conveyor)	Catching an agent
	Moving an agent
	Moving itself to destination
	Moving itself to agent
Actuator (machine-tool)	Raw material processing
	Checking the result of process
	Processing correcting
	Wear identification
Container	Identification of nested thing
	Replacing of nested thing
Sensor	Observation of physical characteristic
	Contingency identification
	Contingency alert
Product	Identification of the next stage of processing
	Optimization of processing
Common to all agents	Agents information exchanging
	Own state evaluation
	Own components state evaluation
	Self-service requesting
	Data processing from the knowledge base
	Self-identification

According to FIPA standards two additional software agents needs for correct information exchange in multi-agent system. Additionally, knowledge base agent presented to simplify information extraction and exchanging because of different software and hardware agents' architectures. Software agents are shown in table 2.

Table 2. Software agents of manufacturing CPS multi-agent system

Agent type	Functions
Agents manager	Registering new agent
	Providing a list of agents according to functionality
	Unregistering agent
	Providing information about specific agent
	Assessment of agents (through periodic request)
Interface agent	Creating production task
	Modifying technological map according to customer requirements
	Providing information about current production process
	Interaction with the staff
Knowledge base agent	Conversion of agent request to knowledge base request
	Providing data from the knowledge base to the agent
	Recording new information from the agent to the knowledge base

Agents' behavior pattern

A significant feature of the multi-agent architecture is the equivalence of all its elements, in contrast from the client-server architecture, where all clients are subordinate to the server. In respect that distinction, the result of establishing communication between two agents can have three states:

- success, connection established and accepted;
- fail, connection not established due to technical reasons;
- abort, connection established but unaccepted due to high load.

All possible interactions between agents represented in table 3. They can be unidirectional or bidirectional. More complex interactions can be constructed using above mentioned simple types of connections, as shown in figure 1.

In general, the process of interaction between agents consists of several steps, as shown in figure 2. Initial agent or initiator requests the list of agents with the necessary functionality from agents' manager. After receiving the list of appropriate devices and their identifiers initial agent consequentially request every agent in the list for processing details. Thereafter, initiator chooses the best processing variant according to own rule base and informs target agent about decision. All other agents receive "abort"status.

This above mentioned interaction process applicable for any type of task (or function) between two agents in the system. However, the existence of answer time is necessary due to interference, possible packet loss and equipment failure.

Table 3. Interactions between agents

Agent 1	Agent 2	Task
(any)	Agents manager	Registration
		Registration cancelling
		Providing a list of agents according to functionality
Interface agent	Agents manager	Creation of product agent
Product	Container	Connecting product and container
(any)	Knowledge base agent	Requesting and receiving data from knowledge base
		Updating information in knowledge base
Product	*(any)*	Requesting for processing
(any)	Product	Notice of beginning a process*
		Notice of ending a process*
		*(*in case of processing)*
Sensor	*(any)*	Notice of contingency

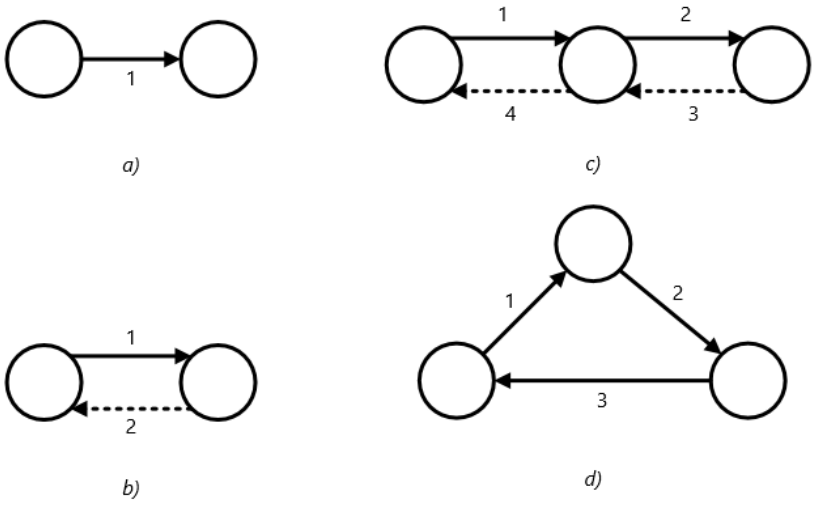


Figure 1. Connection types. More complex connection c) and d) may be constructing from two types of simple connections a) and b).

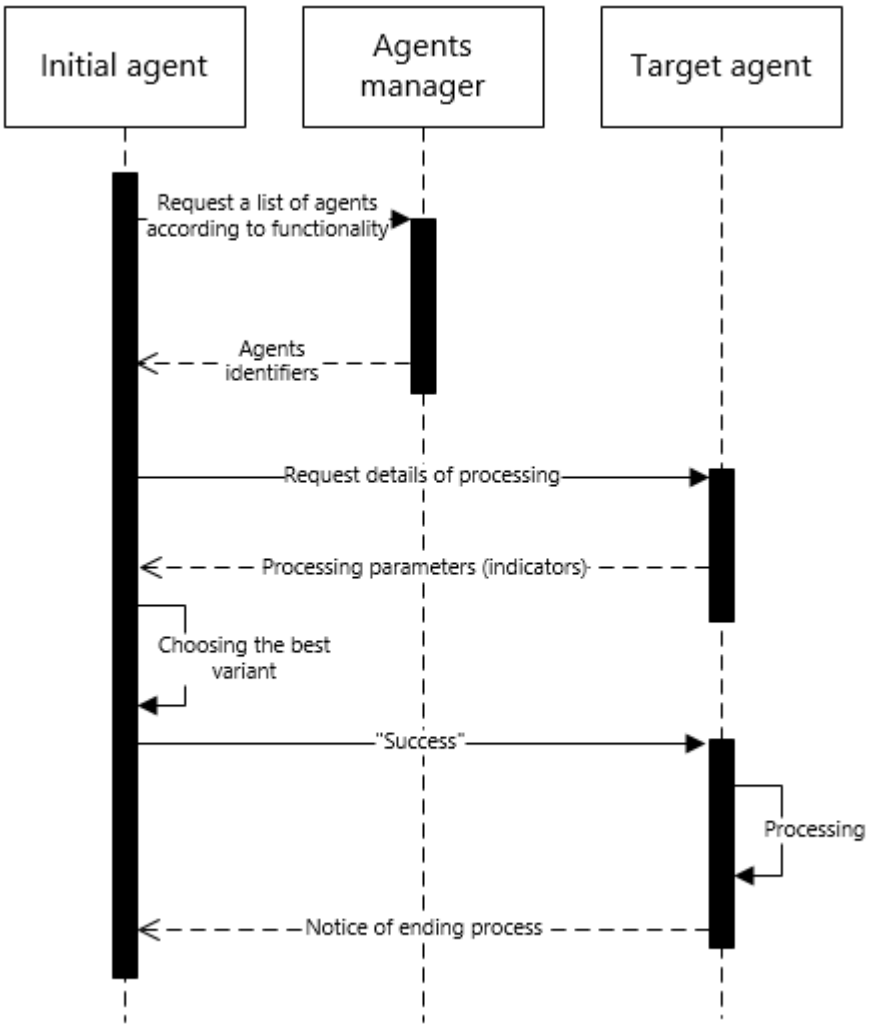


Figure 2. Generalized interaction process between two agents (initial and target)

Conclusion

The agents of multi agent systems classification according to type of interactions with other agent at the shop floor of smart manufacturing is presented. The main functions realized by physical, software and hybrid agents are identified. The tasks leading to interaction between agents of the system are concretized and generalized interaction process between agents is constructed. Future work is consisting of creation ontology for storing and retrieving information in smart manufacturing, and testing above mentioned model of interaction using imitation model.

References

1. Demetrius Klitou, Johannes Conrads & Morten Rasmussen: Germany: Industrie 4.0. In: Digital Transformation Monitor. PwC, European Union (2017)
2. The Foundation for Itelligent Physical Agents, `http://www.fipa.org`
3. Constantin B. Zamfirescu, Bogdan C-tin Pirvu, Jochen Schlick, Detlef Zuehlke: Preliminary Insides for an Anthropocentric Cyber-physical Reference Architecture of the Smart Factory. In: Studies in Informatics and Control, vol. 22 (3), pp. 269–278. DOI: 10.24846/v22i3y201303 (2013)
4. Petr Skobelev: Multi-Agent Systems for Real-Time Adaptive Resource Management. In: Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry, Elsevier, pp. 207–229. DOI: 10.1016/B978-0-12-800341-1.09991-5 (2015)
5. Juan M. Novas, Rudi Bahtiar, Jan Van Belle, Paul Valckeaers: An Approach for the Integration of a Scheduling System and a Multi-Agent Manufacturing Execution System. Towards a Collaborative Framework. In: Proceeding of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Bucharest, Romania, pp. 728–733. DOI: 10.3182/20120523-3-RO-2023.00156 (2012)
6. Shiyong Wang, Jiafu Wan, Di Li and Chunhua Zhang: Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. In: International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 2016. DOI: 10.1155/2016/3159805 (2016)
7. M. Hermann, T. Pentek and B. Otto: Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. In: 49th Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 3928–3937. IEEE Press, Hawaii. DOI: 10.1109/HICSS.2016.488 (2016)
8. James H. Taylor: Modeling & Simulation of Dynamic Systems – a Tutorial (2001)
9. Shiyong Wang, Jiafu Wan, Daqiang Zhang, Di Li, Chunhua Zhang: Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. In: Computer Networks, Elsevier, vol. 101, pp. 158–168. DOI: 10.1016/j.comnet.2015.12.017 (2016)
10. Cyber-Physical Systems NSF 18-538 Program, National Science Foundation, USA, `http://www.nsf.gov` (2018)

Моделирование систем вентиляции методом теории гидравлических цепей

Д. В. Бойков

Сибирский Федеральный Университет,
Красноярск, Россия
dimkadim@yandex.ru

Аннотация В статье представлена математическая модель потокораспределения многокомпонентного неизотермического газа в системах трубопроводов. Модель базируется на теории гидравлических цепей. В данной модели предложен метод решения задачи потокораспределения модифицированным методом поузловых увязок давления, в котором решается система уравнений на поправку статического давления. Метод позволяет получить единую систему уравнений на поправку давления для газоходов, расход в которых зависит от перепада полного давления и для присосов через негерметичность зависящих от перепада статического давления. Предложен альтернативный вариант граничных условий, позволяющий упростить модель и задание исходных данных. Описан метод управления системой через одиночные управляющие устройства.

Ключевые слова: Теория Гидравлических Цепей, Потокораспределение в инженерных сетях

Введение

Системы вентиляции и газоудаления обычно состоят из протяженных и сильно разветвленных систем трубопроводов. Моделирование таких систем методами пространственного моделирования посредством использования уравнений Навье-Стокса обычно оказывается нецелесообразно в виду слишком больших вычислительных затрат. На рис. 1 приведена топология системы газоудаления и газоочистки предприятия цветной металлургии [1]. Одной из особенностей данной системы была конструкция газоходов в виде кирпичных туннелей большого сечения. Суммарное отношение длинны к гидравлическому диаметру для данной системы 450 калибров. Построенная трехмерная сетка (рис. 2) содержала 3 млн. расчетных ячеек и могла быть посчитана на одиночном производителен компьютере в течении нескольких часов(рис. 3).

Если рассмотреть более распространённые варианты таких систем, то их полная длина может составить тысячи и десятки тысяч калибров. Размер 3х-мерной расчетной сетки будет зависеть от длины задачи линейно.

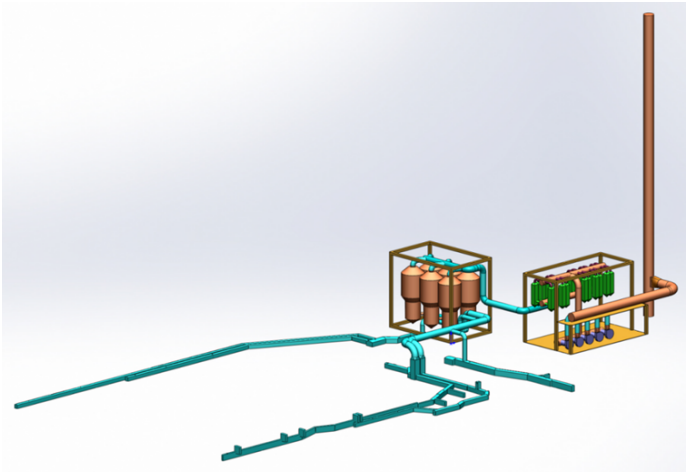


Рисунок 1. Геометрическая модель системы газоудаления

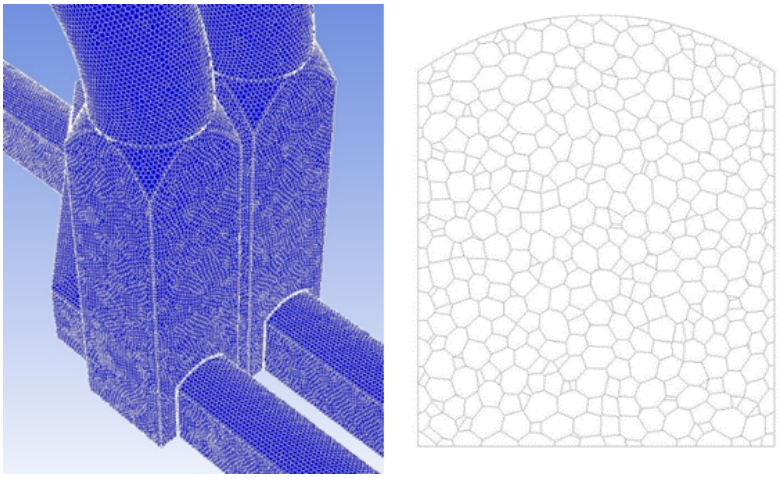


Рисунок 2. Фрагмент расчетной сетки системы газоудаления

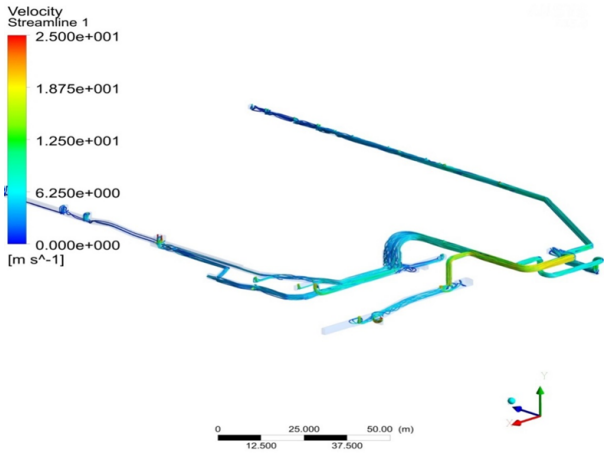


Рисунок 3. Скорости в системе газоудаления

Хорошим подходом для решения таких задач являются методы развивающиеся в рамках теории гидравлических цепей [2]. Такие методы позволяют моделировать с приемлемой точностью поведение потока в системе при существенно меньшем объеме затрат.

Представление гидравлической сети на основе ориентированного графа

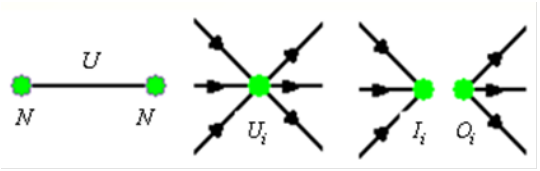
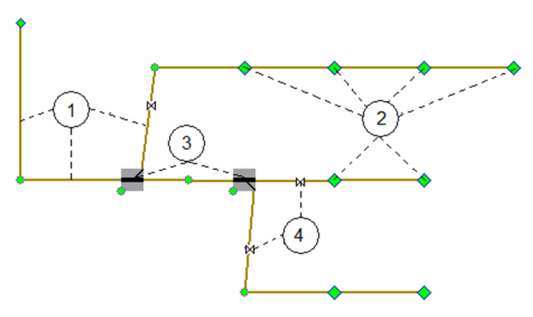


Рисунок 4. Элементы графа гидравлической сети

Элементы графа гидравлической сети.

Для решения задач потокораспределения, возникающих при расчете трубопроводных сетей, вентиляции зданий (рис. 5) и шахт, систем охлаждения двигателей и др., применяется модель гидравлической цепи [2]. Гидравлическая цепь состоит из узлов и связывающих их ветвей (рис. 4). Узлы - это точки соединения трактов, в которых соблюдаются законы сохранения массы и энергии, выраженные в форме интегральных уравнений баланса



1. 1-Газоходы
2. 2-Вентиляционные окна
3. 3-Тройники
4. 4-Регулирующие заслонки

Рисунок 5. Вентиляционная сеть в виде графа

расходов и тепловой энергии. Ветви моделируют различные конструкции газоходного тракта. Каждая ветвь цепи характеризуется своим интегральным законом, связывающей перепад давления на данной ветви с расходом газа/жидкости в ней. Законы, описывающие потокораспределение в гидравлической цепи, являются законами Кирхгофа. Для представления сети используется ориентированный граф, состоящий из двух множеств: множества узлов N и множества ветвей U. При этом каждой ветви ставится в отношении пара узлов, один из которых является начальным, а второй конечный для данной ветви. O_i является подмножеством ветвей, начинающихся в i-том узле, а I_i подмножеством ветвей, заканчивающихся в i-том узле. Множество U_i для любого , обозначает множество ветвей инцидентных этому узлу. Для произвольного, заданного потока $u_l, l \in U$, на графе вводится естественная ориентация ветвей, соответствующая потоку: $O_i(u)$, $I_i(u)$. Таким образом задается матрица связей узлов и ветвей:

$$\nabla_{il} = \begin{cases} 1 & \text{if} l \in O_i \\ -1 & \text{if} if l \in I_i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad i \in N \tag{1}$$

Модель гидравлической сети

Задачу моделирования течения газа или жидкости в гидравлической сети можно свети к комбинации задач распределения несущего потока в виде массового расхода и сноса свойств среды (энтальпия, концентрации компонент, и т.д.) этим потоком [3]. Некоторые характеристики среды будут влиять на несущий поток через плотность и вязкость. Потокораспределение несущего потока в теории гидравлических цепей можно описать соотношениями:

$$\sum_{l \in U_j} \nabla_{jl} u_l = q_j,\ j \in N_{inner}, l \in U \tag{2}$$

$$\sum_{i \in N} \nabla_{il} p_i = h_l\left(u_l\right), i \in N, l \in U \tag{3}$$

$$p_i = const, i \in N_{bdr} \neq 0 \tag{4}$$

u_l – расход в ветви (кг/с); $h_l(u_l)$ – потеря давления (Па); p – давление (Па), q_j - источник массы в узле (кг/с), N_{inner} – множество внутренних/расчетных узлов, N_{bdr} – множество граничных узлов. Уравнение (2) закон сохранения для несущего потока в узле. Выражение (3) - в общем случае нелинейное, уравнение на потерю давления на ветви как функцию расхода. Уравнение (4) задает узлы с фиксированным давлением, для которых не рассчитывается баланс массы.

Задача сноса свойств среды несущим потоком описываются следующими соотношениями:

$$\sum_{l \in U} \nabla_{il} x_l^{ch} = \begin{cases} q_i^{ch}, \text{if}\left(q_i = 0\right) \\ H_i^{ch} \cdot q_i \,\text{if}\left(q_i > 0\right) \\ \eta_i^{ch} \cdot q_i \,\text{if}\left(q_i < 0\right) \end{cases} + \sum_{l \in I_i(u)} q_l^{ch},\ i \in N_{inner} \tag{5}$$

$$x_l^{ch} = u_l \cdot \eta_i^{ch}, l \in O_i\left(u\right), i \in N \tag{6}$$

$$\eta_i^{ch} = const, i \in N_{bdr} \tag{7}$$

Здесь η_i^{ch}, H_i^{ch} – характеристика в узле и в источнике узла, q_i^{ch}, q_l^{ch} – источник соответствующей характеристики в узле и на ветви. Уравнение (5) это закон сохранения уже для конкретной характеристики. Уравнение (6) снос этой характеристики из начального по потоку узла. Первый источниковый член уравнения (5) меняет свой смысл в зависимости от знака источника несущего потока q_i. Когда источник отрицателен из узла сети уходит поток с свойсвами потока в данном узле. В другом случае эти свойства берутся из источника в узле. Таким образом для каждого узла в котором наблюдается неотрицательный источник несущего потока в этой постановке имеется два набора свойств потока. Первый в самом узле, а второй в источнике для узла. Кроме того, источник имеет два альтернативных варианта описания характеристик, целесообразность их выбора зависит от конкретных условий. Второй источник уравнения связан с изменением характеристики за время пребывания потока в ветви (теплообмен с окружающей средой через стенку трубы для энтальпии и т.д.). Особенности конкретных свойств учитываются при расчете соответствующих источников q_i^{ch}, q_l^{ch} и в замыкающих соотношениях на свойства несущего потока (связь плотности с температурой и т.д.).

Автором была предложена другая постановка. Для этого вместе со множеством граничных узлов ввелось также множество граничных ветвей. В

граничных узлах будет фиксироваться давление для несущего потока и характеристики для всех остальных в граничных ветвях потоки соответствующей величины. В этом случае распределение несущего потока сведется к виду:

$$\sum_{l \in U_j} \nabla_{jl} u_l = 0, j \in N_{inner}, l \in U \tag{8}$$

$$\sum_{i \in N} \nabla_{il} p_i = h_l\left(u_l\right), i \in N, l \in U_{inner} \tag{9}$$

$$p_i = const, i \in N_{bdr} \neq 0 \tag{10}$$

$$u_l = const, l \in U_{bdr} \tag{11}$$

Здесь U_{inner}, U_{bdr} – множества расчетных и граничных ветвей. Здесь нужно учесть, что граничная по потоку ветвь (11) убирает связь по давлению между соответствующими узлами и, если нет других путей между этими узлами, развязывает сеть на два гидравлически независимых сегмента каждый из которых потребует по крайне мере одного граничного узла.

Свойства рассчитываются по следующим соотношениям:

$$\sum_{l \in U} \nabla_{il} x_l^{ch} = q_i^{ch} + \sum_{l \in I_i(u)} q_l^{ch}, i \in N_{inner}^{ch} \tag{12}$$

$$x_l^{ch} = u_l \cdot \eta_i^{ch}, l \in O_i(u), l \notin U_{bdr}^{ch}, i \in N \tag{13}$$

$$\eta_i^{ch} = const, i \in N_{bdr} \neq 0 \tag{14}$$

$$x_l^{ch} = const, l \in U_{bdr}^{ch} \tag{15}$$

Множества граничных узлов и ветвей для каждых из подзадач $N_{bdr}^{ch}, U_{bdr}^{ch}$ в данной постановке определяются самостоятельно и необязательно совпадают между собой и с границами несущего потока N_{bdr}, U_{bdr}. Такой подход обеспечивает гибкость в представлении элементов сети: узел граничный для несущего потока и для потока всех характеристик атмосфера/бесконечный резервуар, узел граничный по температуре и внутренний по несущему потоку – термостат, ветвь на которой задается расход компоненты – участок в реальной системе в котором производится замер расхода этого этой компоненты и выше по потоку этой ветви эта величина попросту неизвестна. Для решения нелинейной задачи потокораспределения несущего потока автором был реализован SIMPLE-подобный метод давлений из теории гидравлических цепей. В этом методе давление ищется через итерационный процесс:

$$p_i^{K+1} = p_i^K + \delta p_i, i \in N_{inner} \tag{16}$$

Если на каждой итерации для всех расчетных ветвей соблюдается уравнение:

$$\sum_{i\in N} \nabla_{il} p_i^K = h_l(u_l^K), i \in N, l \in U_{inner} \tag{17}$$

То учитывая это и подставляя $x_l^{K+1} = x_l^K + \delta x_l$, уравнение (16) в систему уравнений (8,9,10,11) легко получить систему линейных уравнений (СЛАУ) на поправку давления δp_i:

$$\begin{gathered}
\sum_{i\in N} \Delta_{ij}(a)\delta p_i = -\sum_{l\in U_j} \nabla_{jl} u_l,\ j \in N_{inner}, i \in N \\
\delta p_j = 0,\ j \in N_{bdr} \\
\Delta_{ii}(a) = \sum_{l\in U_l} a_l,\ i \in N_{inner} \\
\Delta_{ij}(a) = -\sum_{l\in U_l} a_l,\ i \in N_{inner}, j \in N, i \neq j \\
a_l = \begin{cases} \left(\frac{\partial h_l}{\partial u_l}\right)^{-1} & l \in U_{inner} \\ 0, & l \in U_{bdr} \end{cases}
\end{gathered} \tag{18}$$

Таким образом, решение задачи потокораспределения несущего потока сводится к нелинейному итерационному циклу (внутренний итерационный цикл), на каждой итерации которого необходимо решить систему линейных уравнений на поправку давления δp (18), а для ее построения на каждой итерации решить уравнение (17) для всех внутренних ветвей. Размеры данной СЛАУ в практических задачах таковы, что допускают использование как неявных (метода сопряженных градиентов), так и явных методов решения СЛАУ. Сходимость итерационного цикла контролируется среднеквадратичной невязкой расходов в узлах:

$$err = \sqrt{\frac{\sum\limits_{i\in N_{Inner}} \left(\sum\limits_{l\in U_i} \nabla_{il} u_l\right)^2}{\sum\limits_{l\in U} (u_l)^2}} \tag{19}$$

Аналогично из (12,13,14,15) получаем систему линейных алгебраических уравнений на свойство потока.

$$\begin{gathered}
\sum_{j\in N} \Delta_{ij}^*(u)\eta_i^{ch} = q_i^{ch} + \sum_{l\in I_i(u)} q_l^{ch},\ i \in N_{inner}^{ch} \\
\Delta_{ii}^*(u) = \sum_{l\in O_i(u)} |u_l|,\ , i \in N_{inner}^{ch} \\
\Delta_{ij}^*(u) = -\sum_{l\in U_i \cap O_j(u)} |u_l|,\ i \in N_{inner}, j \in N,\ i \neq j
\end{gathered} \tag{20}$$

Данная СЛАУ будет решатся либо в дополнительном внешнем цикле для цикла по потокораспределению несущего потока (внешний итерационный цикл), если характеристики потока зависят от этого свойства или по завершению расчета потокораспределения несущего потока если свойство

на поток не влияет. В первом случае, после расчета свойств среды пересчитываются харакеристики потока в сети, происходит расчет всех расходов на ветвях (17) и определяется невязка внешнего цикла (19), сходимость контролируется по этой невязке. Во втором случае может потребоваться дополнительный итерационный цикл в рамках решения задач потокораспределения свойств, если свойства зависят друг от друга (температура через теплоемкость зависит от концентраций компонент) или их источники зависят от них самих (тепловой поток через стенку трубы зависит от температуры среды в трубе).

Потокораспределния несущего потока для статического давления

Зависимости потерь давления от расхода приводятся в справочниках [4], [5] для полного давления:

$$\sum_{i \in N} \nabla_{il} \left(p_i + \left| \frac{\rho v^2}{2} \right|_i \right) = \left(\xi_l + \frac{\lambda_l \cdot L_l}{d_l} \right) \frac{{u_l}^2}{2 \cdot \rho_l \cdot s_l^2} - h_l \tag{21}$$

где p_i -статическое давление, $\left| \frac{\rho v^2}{2} \right|_i$ -динамическое давление, λ_l, ξ_l – коэффициент линейного и местного сопротивления [4], [5], D_l – диаметр газохода (м), L_l – длина газохода(м), s_l – площадь поперечного сечения газохода, h_l – фиксированный напор (Па). В том случае если все ветви исследуемой системы будут описывается только такими соотношениями ничего не мешает решать эту систему относительно полного давления. Однако в практике встречаются системы с газоходами, состоянии которых приводит к присосу воздуха через разные неплотности. В особо тяжелом случае, величина присосов составила треть от общего расхода системы. Такие присосы можно определить по формуле:

$$p_l - p_l^{wall} = C_f \cdot s_l^{wall} \frac{\left(u_l^{wall}\right)^2}{2 \cdot \rho} \tag{22}$$

Где p_l, p_l^{wall} – давление газа в трубе и воздуха в атмосфере (Па), s_l^{wall} - площадь стенок трубы, $u_l^w all$– поток через стенку трубы, C_f – некий эмпирический коэффициент проницаемости стенок труб вентиляционной системы, который определяется по данным экспериментальных замеров исследуемой сети.

Предложенный автором подход для решения таких задач состоял в следующем: уравнение (21) приводится к виду:

$$\sum_{i \in N} \nabla_{il} p_i = \left(\xi_l + \frac{\lambda_l \cdot L_l}{d_l} \right) \frac{{u_l}^2}{2 \cdot \rho_l \cdot s_l^2} - h_l - \sum_{i \in N} \nabla_{il} \left| \frac{\rho v^2}{2} \right|_i \tag{23}$$

Задается множество дополнительных граничных узлов и множество ветвей, идущих от внутренних для несущего потока узлов, описывающих присосы:

$$\sum_{i \in N} \nabla_{il} p_i = C_f \frac{\sum\limits_{l \in U_i} s_l^{wall}}{2} \frac{{u_l}^2}{2 \cdot \rho} \tag{24}$$

СЛАУ (18) содержит оба типа ветвей и пишется уже относительно статических давлений. Динамическое давление для внутреннего по потоку узла определяется как среднемассовое динамическое давление для всех ветвей, примыкающих к данному узлу. Для граничного по потоку узла динамическое давление равно 0. Для обеспечения сходимости при данной постановке динамическое давление пересчитывается во внешнем цикле вместе с решением СЛАУ на свойства. Причем невязка расходов до которой предварительно сбивается поправка давления во внутреннем цикле δp не может быть больше чем 0.2 от невязки расходов во внешенем цикле после перерасчета импульса или 4-5 внутренних итераций по давлению. Если это условие не выполнить, то будет наблюдаться «дрейф решения», который, в лучшем случае, не позволит внешнему циклу сойтись с большей точностью, а в худшем, малыми поправками давления уведет решение в заведомо нефизичную область. Если задача сходится, то полное число внутренних итераций слабо зависит от выбранного отношения требуемой ошибки внутреннего итерационного цикла ко внешней.

Описания свойств потока

Наиболее очевидной характеристикой среды будет температура/энтальпия. Для построения модели распределения характеристики необходимо задать источник на ветвях связанный с теплообменом:

$$q_l^{heat} = kf_l \cdot \left(t_l - t_l^{wall}\right) \tag{25}$$

здесь q_l – искомый тепловой поток, t_l, t_l^{wall} – температура потока в ветви и окружающей среды, kf_l – коэффициент теплопередачи в окружающую среду на ветви. Среднеинтегральная температура потока на ветви определяется по формуле:

$$t_l = t_l^{wall} + \frac{|u_l \cdot Cp_{O_l}(u)|}{kf_l} \cdot \left(t_{O_l(u)} - t_l^{wall}\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{kf_l}{\left|u_l \cdot Cp_{O_l(u)}\right|}\right)\right) \tag{26}$$

где $Cp_{O_l}(u)$ -теплоёмкость при постоянном давлении. Для записи системы уравнений относительно температуры несущий поток умножается на теплоемкость: $x_l^{heat} = u_l \cdot Cp_i \cdot t_i, l \in O_i(u), i \in N$. Для газа будет учитываться влияние температуры на плотность через уравнение состояния идеального газа.

Концентрации компонент могут влиять на плотность и теплоемкость потока внутри сети. По формуле $\tau_l = \frac{\rho_l \cdot V_l}{u_l}$, где V_l – объем ветви, легко определить время пребывания потока в ветви и по известным концентрациям компонент определить источники на ветви связанные с химической реакцией. При расчете пыли и наличии осаждения пыли в очистных установках или по длине газовой сети решаются СЛАУ на все фракционные составы и СЛАУ на все фракционные составы и на все значимые компонентные составы. Источник на ветви (точнее говоря сток) для СЛАУ на компоненту и фракцию будет равен произведению стока соответствующей фракции

на концентрацию компоненты в этой фракции. Если это не учитывать, то можно будет легко получить ситуацию где драгоценный метал образуется исключительно в виде мелкой фракции пыли, которую не улавливают очистные сооружения, однако модель покажет почти полное улавливание этого металла поскольку перед очисной установкой смешивается с намного большим количеством пыли более крупного фракционного состава и информация о наличии драгметалла в только в мелкой фракции будет утеряна.

Объекты

В реальных гидравлических сетях будут встречаться объекты, которые потребуют более сложного описания по сравнению с приведенным выше. Такие объекты могут оказывать влияние как на задачу потокраспределения несущего потока, так и на задачу распределения характеристик. Влияние объектов на потокораспределение несущего потока может осуществляться, как в пределах внутреннего цикла при формировании СЛАУ (), так и во внешнем итерационном цикле при пересчете характеристик и динамического давления. Для задачи потокораспределения характеристики объекты будут влиять через источники на ветвях или через характеристики в узлах.

В качесве примера объекта раассмартиваеся вентилятор. Для описания вентилятора используется функция зависимости развиваемого напора от расхода (расходная характеристика). В зависимости от конструкции вентилятора можно выделить два существенно различных варианта расходной характеристики. В первом случае (Рис. 6) развиваемый напор падает с ростом расхода во всем рабочем диапазоне. Такой вентилятор описывается функцией, которая решается во внутреннем цикле. Более того, такой вентилятор иногда можно описать уравнением (21) через эффективную величину фиксированного напора h_l и величину коэффициента местного сопротивления ξ_l (кривая аппроксимация на рис 6). Во втором случае (рис 7) напор в рабочей зоне вентилятора с ростом расхода растет. Такой вентилятор уже пересчитывается на внешнем итерационном цикле где по текущему расходу определяется фиксированный напор (также h_l из 21).

Заслонка - это поворотный диск размещенный внутри трубы который в зависимости от угла поворота может открывать или закрывать трубу а так же регулировать расход при неполном закрытии. Заслонка создает местное сопротивление, определяемое по формуле [4]:

$$\xi_{valve} \approx \left(\frac{1.56}{1 - (D_d)^2} \cdot \sin(\alpha) - 1 \right)^2 \tag{27}$$

где D_d – отношение диаметра заслонки к диаметру трубы, α – угол поворота заслонки. Для заслонки было реализовано три режима работы: неуправляемая, управляемая по давлению в узле, управляемая по расходу на ветви. В первом случае в ветви с заслонкой перед расчетом определяется местное сопротивление (27). Во втором случае заслонке ставится в соответствие контрольный узел, причем узел может быть выбран только такой, что закрытие

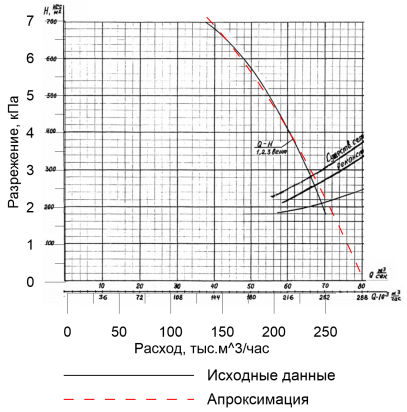


Рисунок 6. Расходная характеристика вентилятора ВЦТ-20

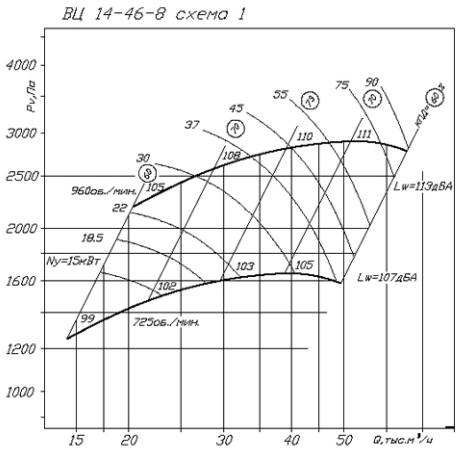


Рисунок 7. Характеристика вентилятора ВЦ-280

заслонки расход через ветви, примыкающие к этому узлу уменьшит до 0. На внешней итерации новое местное сопротивление считается равным старому умноженному на отношение расчетного давления в контрольном узле к требуемому $\xi_{valve}^{New} = \xi_{valve}^{Old} \cdot \frac{P_{solve}}{P_{fix}}$ и сверяется с допустимым диапазоном (так же по формуле27). Местное сопротивление заслонки и угол регулировки будет уходить за допустимый диапазон, то будет выбран предельно допустимый угол. С расходом все полностью аналогично, включая требования по контрольной ветви, только в качестве множителя для местного сопротивления будет квадрат отношения расходов $\xi_{valve}^{New} = \xi_{valve}^{Old} \cdot \left(\frac{u_{solve}}{u_{fix}}\right)^2$. Такой подход к регулировке прост в реализации, однако требует грамотного выбора контрольных узлов/ветвей.

Другие объекты (электрофильтры и т.д.), на потокораспределение несущего потока будут влиять через местное сопротивление, а на распределение характеристик через источник на ветви.

Примеры использования сетевого моделирования

Описанные алгоритмы автором были реализованы в программе сетевой гидрогазодинамики sigmaNet. Эта программа применялась для ряда прикладных иследований газоходов промышленных предприятий. Первый пример уже приведенная вначале статьи система газоудаления и газоочистки производств цветной металлургии. Модель этой системы учитывала вредных газов и виде малых примесей с упрощенной моделью химического реагирования (взаимной нейтрализацией) перенос пыли с осаждением в очистных установках. Расходная харктеристика установленных вентиляторов приведена на рис. 6. Использовался первый способ описания вентилятора в сети (т.е через местное сопротивление и напор). Настроенная модель по реакциям на управление совпадала с данными телеметрии установленной в существующей сети. Модель в дальнейшем использовалась для выработки стратегии по управлению газоочисткой при реконструкции предприятия.

Второй пример система газоудаления лабораторного здания (рис. 10). В системе установлены вентиляторы ВЦ-280 (рис. 7)и управляющие заслонки. Модель показала совпадение с данными мониторинга по давлению при управлении системой вентиляторами и заслонками. Автоматически выбираемый угол регулирующих заслонок в реальной системе и в модели также совпадали.

Список литературы

1. Бойков Д.В., Филимонов С.А., Дектерев А.А. Комплексный анализ систем газоходов с использованием методов трехмерного моделирования и методов ТГЦ // Математическое моделирование трубопроводных систем энергетики / Тр. XIV Всеросс. научн. семин. с междунар. участ. «Математические модели и методы

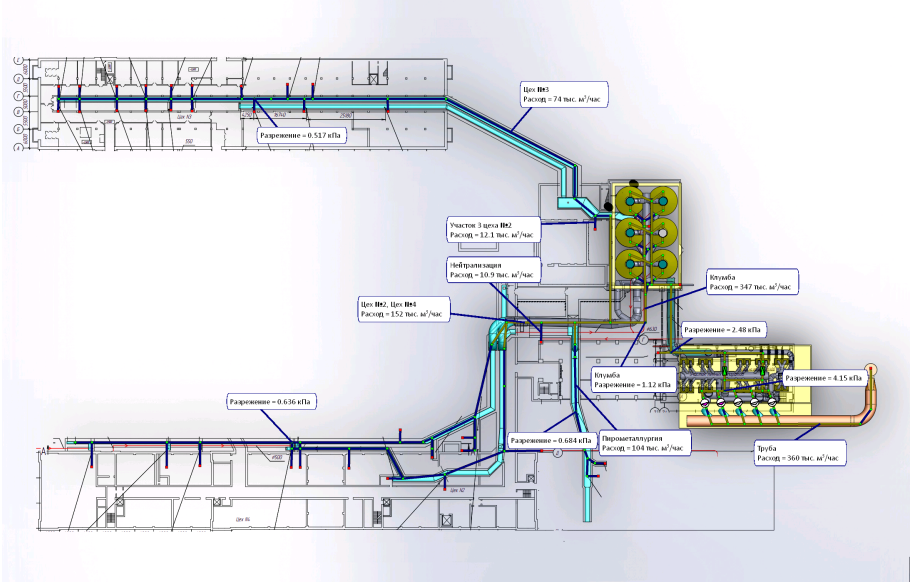


Рисунок 8. Расходы и разрежения системы газоочистки

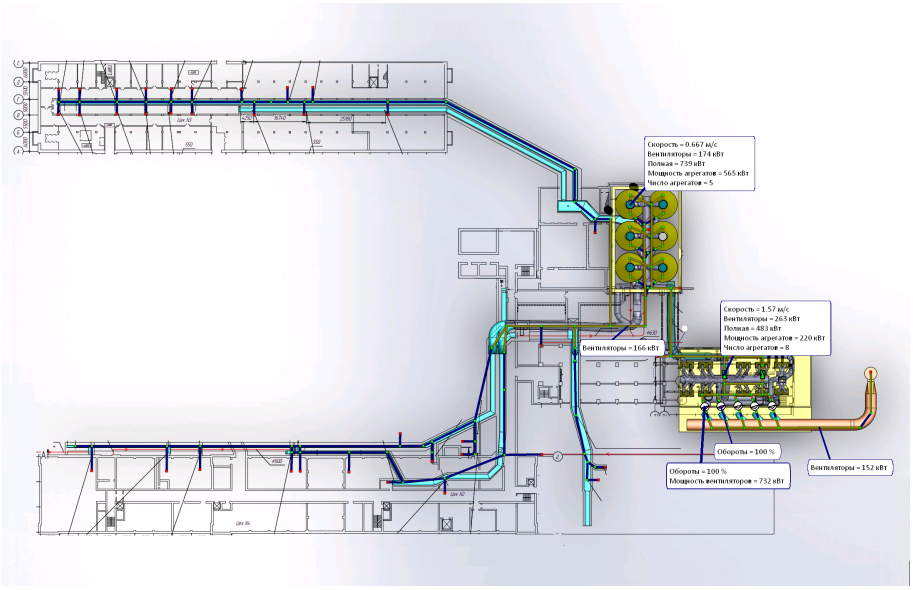


Рисунок 9. Распределение энергетических затрат по зонам системы газоочистки

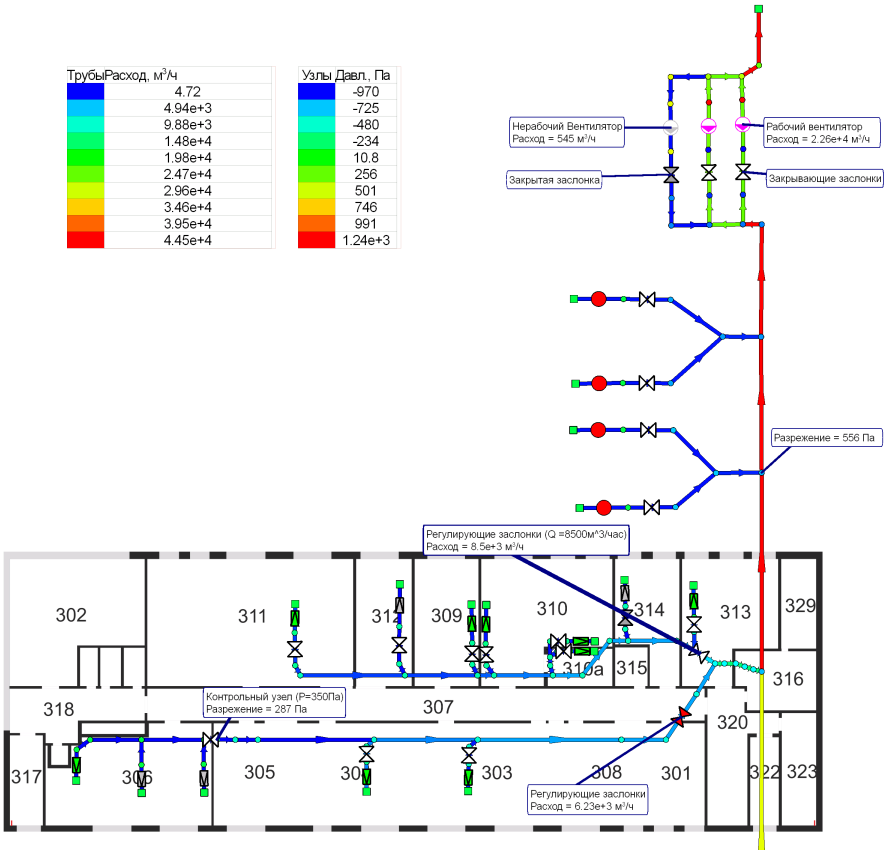


Рисунок 10. Фрагмент сети технологической вентиляции Лабораторного корпуса

анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем», 8–13 сентября 2014 г. – Иркутск, ИСЭМ СО РАН. – 2014. – С.28–43
2. Хасилев В. Я. Меренков, А. П. Теория гидравлических цепей М -"НАУКА 1985.
3. Бойков Д.В., Дектерев А.А. Моделирование потокораспределения неизотермических многокомпонентных газовых смесей в сетях. // Комунальне господарство міст (укр. і рос. мовами). Науково-технічний збірник, Випуск 101, Серія: Технічні науки та архітектура. Харківська національна академія міського господарства, Харків. 2011. с 356-363
4. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М. Машиностроение, 1992.
5. Miller D. Internal flow systems BHR group, 1996. — 402 стр.

Статистикалық әдістер негізінде пәндік аймақ онтологиясын құру

Б.Б. Досанов, М.Е. Мансурова, А.Б. Нугуманова

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Казахстан
С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан мемлекеттік университеті,
Өскемен, Қазақстан
dossanbekzhan@gmail.com

Аңдатпа Бұл мақалада белгілі бір пәндік аймақ үшін, формальді түсінік негізінде, Бутстраппинг технологиясы арқылы берілген сөйлем ішінен түсініктерді алу комбинациясының жаңа тәсілі жайында. Формальді түсінік теориясы автоматты түрде пәндік аймақ үшін түсініктерді алуға арналған мықты аппарат, бірақ кіріс дерек негізінде пәндік аймақ деректер қоры толық, нақты әрі қуыс болмауы керек. Берілген сөйлем ішінен пәндік аймақ негізінде мұндай толық деректер қорын алу өте қиын, себебі сөйлем ішінен кейбір түсініктер үшін сиректілік байқалады, яғни бастапқы деректер қорында бос қуыстық байқалады. Осыған сәйкес, Вебтегі фрагменттелген ақпараттарды интеллектуалды іздестіруді қамтамасыз ете отырып, Бутстраппинг технологиясын қолдану арқылы бастапқы деректер қорының сапасын жақсартуға болады.

Кілттік сөздер: онтология, формальді түсініктер анализы, кластерлеу, түсініктер алу, мәліметтер қоры, бутстраппинг

Кіріспе

Онтология белгілі бір білім саласын сипаттайтын спецификацияның формальді ерекшеліктері мен қарым-қатынастарды ресми нақтылау үшін пайдаланылады. Белгілі бір білім саласын ұсыну үшін онтологияның артықшылығы – формальді құрылым [4]. Формальді құрылым – информатика саласында ақпаратты өңдеуді оңайлатады.

Онтология белгілі бір пәндік аймақта білімді жинақтау, қайта пайдалану мүмкіндігі, модель жасау үшін пайдаланылуы мүмкін. Бұл бір пәндік аймақ бойынша мамандарға білімін жақсартуға, жаңа үлгілерді табуға, тәжірибе алмасуға мүмкіндік береді.

Соңғы уақытта онтология құру мәселесіне көптеген зерттеулер жүргізілді. Алайда, онтологияны автоматтандырылған түрде құру мәселесі қазіргі уақытта қанағаттанарлық шешімге ие емес. Белгілі бір пәндік аймақ онтологиясын автоматты түрде құру шешімдерінің бірі – бастапқы кіріс деректер қорына пәндік аймақ мәтіндер корпусын қолданып, Bootstrapping технологиясын концептуалды моделдеу үлгісі ретінде пайдаланып, пәндік аймақ онтологиясының иерархиясын құру.

Пәндік аймақ онтологиясының құрылуы

Қазіргі уақытта онтологиялық инжинеринг саласында онтологияны концептуализациялық ерекшелік ретінде көрсететін екі түрлі полярлық көзқарас бар. Алғашқы көзқарас – онтологияны симуляцияланған субъектілердің қасиеттері мен қарым-қатынастарының дәл математикалық тұжырымдамаларын беруге тырысатын ресми теория ретінде көрсету. Мұндай формальді теориялар, әдетте, математикалық аксиоматтарға негізделген және әртүрлі логикалық формализмдерді пайдаланады, мысалы, предикаттарды есептеу. Екінші көзқарас – онтологияны семантикалық желі ретінде көрсету. Мұндай көзқарастың құрылымын сипаттау өте оңай: оның торабы – пәндік аймақ түсінігі, ал доғалар – таксономикалық қатынастар болып табылатын түсініктер арасындағы байланыстар болып табылады.

Осылайша, екінші типтегі жеңіл онтология – бірінші типтегі ауыр салмақты формальді онтологияға қарағанда елеулі артықшылығы бар: оларды оңай жобалауға болады. Бүгінгі таңда медицина, лингвистикада саласында, электронды коммерцияда және т.б. қазіргі заманғы кең ауқымды пәндік аймақ үшін қолданылатын «өте үлкен ресурстар» жеңіл онтология негізінде құралады [1].

Статистикалық әдістер негізінде пәндік аймақ онтологиясы

Пәндік аймақ онтологиясын моделдеу құрылу жолы, дамыту, ақпаратты өңдеу процесстерінен құрылады. Жалпы пәндік аймақ онтологиясын құру келесідей алгоритмнен тұрады: бастапқы кіріс деректер қорын жинау, үлгі бойынща сөз тіркестерін алу, объект-қатынас кестесын құру, соңғы этапта объектерден түсініктерді алу немесе иерархиясын құру.

Онтологияны құрудың әдістерінің бірі белгілі бір пәндік аймақ үшін объектілерді тікелей жинау болып табылады. Мұндай әдіспен пәндік аймақ онтологиясын құру жолы бастапқыда кіріс деректер қорынан объектілер шығарылып, түсініктер алынады. Түсініктер алынған соң, қайтадан сирек тілікті жою үшін толықтырулар жүргізіледі. Сәйкесінше, ұсынылған мақсат бойынша келесі орындалатын жұмыстар мынадай қадамдармен орындалады. Алғашқы бөлімде «формальді анализ түсінінің» негізгі ережелері келтіріледі. Келесі бөлімдерде белгілі бір пәндік аймақ үшін жеңіл салмақты онтология құру алгоритмі сипатталады:

- Формальді түсініктер анализы;
- Пәндік аймаққа қатысты корпус жинау;
- Кіріс деректер қоры негізінде сөйлем ішінен терминдерді алу
- Объект-қасиет кестесінде қуыстарды қалпына келтіру
- Объект-қасиет кестесінен түсініктерді алу

Формальді түсінік анализының негізгі элементтері

Формальді түсініктер анализы алгебралық тілдік теорияның қолданбалы саласы болып табалады, ал оның шеңберінде алгебра тілінде ұғымдардың түсінігі мен иерархиясын сипаттайтын математикалық формализм ұсынылады [2].

Онтология құру кезінде формальді түсініктер анализын қолданған кезде тек онтология қаңқасын құрастыра аламыз, яғни пәндік аймақ үшін көптеген түсініктердің арасындағы байланыстар анықталады. Мұндай әдіспен объект-қасиет байланысы құрылады. Объект-қасиет байланысы арқылы формальді түсініктер торын құрастыра аламыз. Формальді түсініктер анализының математикалық негізгі идеясы – кез-келген бинарлы қатынас торын құру және объект-қасиет түсініктерін алу.

Формальді түсініктер анализы үшін пәндік аймақ онтологиясына бастапқы кіріс деректері негізінде объект-қасиет шаблоны қолданылады, мұндағы объект деп пәндік аймақ классын жатқызсақ, қасиет – объектінің қасиеті болып табылады.

Кіріс деректер қоры үшін формальді түсініктер анализі – пәндік аймақ негізінде қасиеттерді бөлуге арналған. Формальді түсініктер анализы деп келесі үштік контекстін айтамыз:

$$K =< G, M, I > \tag{1}$$

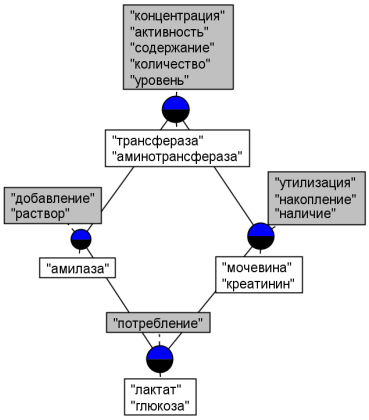
G – объектілер жиынтығы, M – қасиеттер жиынтығы, $I - G$ мен M нің арасындағы қатынас: gIm дегеніміз, $g \in G$ объектісі $m \in M$ қасиетіне ие бола алады. Ендігі мәселе кіріс деректер қоры үшін пәндік аймақ негізінде объектілер мен қасиеттердің алыну жолы. Берілген контекст ішінен формальді түсініктердің алынуы формула незінде көрсетейік.

1-суретте Хассе диаграммасы суреттелген. Ол түсініктердің екі торынан тұрады. Олар өз кезегінде қарастырылып отырған формальді контекст негізінде құрастырылған. Қабылдап алған иерархиялар мен объектілер кластарын анализ жасай отырып осы саланың эксперті олардың қателіктерін байқайтын еді. Мысалы: креатанин мен мочевина еритін заттар бола тұра, «еритін заттар» түсініктерінен бұрыс шығарылған. Бұл формалды түсініктерді анализдеудің негізгі проблемасы болып табылады егер контекст сиретілген және шектелген (құрамында қуыстар бар) болса, онда алынатын түсініктер және әсіресес олардың иерарихиясы бұрыс қалыптасатын болады.

Табиғи тілде сөйлем ішінен құрылымдалмаған сөйлемдерге формальді түсініктер анализы пәндік аймақ онтологиясын құруға қолданамыз. Формальді түсініктер анализын мұндай тәсілмен қолдану модельдеу үшін біртұтас бағыт қолданады. Мұндай бағыт басқа тәсілдерге қарағанда басымдылықты білдіреді.

Пәндік аймаққа қатысты корпус жинақтау

Пәндік аймақ үшін кіріс деректер қоры негізінде «Большой медицинской энциклопедии» сайтынан 13000 медициналық мақаласы алынды [3]. Бастапқы



Сурет 1. Хассе диаграммасы

кіріс деректер корпусы үшін жиналған мақалалар енгізіледі. Медициналық ақпараттар корпусы қарапайым түрде құрылымды емес түрде сақталынған. Кіріс деректер қорын жинақтау Java тілін қолдану арқылы, «бмэ.орг» сайтынан әрбір мақалаға парсинг жасаланылады.

```
public static Map<String, String> parseArticle(String link) throws IOException {
    Map<String, String> articles = new HashMap<String, String>();
    String title;
    String context;

    Document article = Jsoup.connect(link).userAgent("Mozilla/5.0").get();
    title = article.select( cssQuery: "h2.title").text();

    Document document = Jsoup.connect(link).userAgent("Mozilla/5.0").get();
    Elements elements = document.getElementsByAttributeValue("id", "mw-content-text").select("p");
    context = elements.text();

    articles.put(title, context);

    return articles;
}
```

Сурет 2. Берілген сілтеменің контексін парсинг жасауға арналған код

Мақала толық жиналғаннан кейін мәтіндер алдын ала өңдеуді жүзеге асырылады. Атап айтқанда, медициналық мақалалардан сөйлем ішінен жеке сөздерге бөлініп, әр сөз өзінің леммасына ауыстыралады. Артық сөздер алып тасталынады. Келесі қадам жиналған ақпараттарды кіріс деректер қоры негізінде пайдаланып, сөйлем ішінен объект-қасиет негізінде түсініктерді алуға жіберіледі.

Кіріс деректер қоры негізінде сөйлем ішінен терминдерді алу

Автоматты түрде бастапқы кіріс деректер қоры негізінде пәндік аймақ түсініктерін алу үшін мәтіндер корпусында жалпылама лингвистикалық анализын (shallow linguistic analysis) қолданамыз. Жалпылама лингвистикалық анализ – мәтіндер анализінде қосымша құрастыру үшін мұндай өңдеу өте танымал тәсіл болып табылады.

Біздің қарастырылып отырған есепке сәйкес маңызды ақпарат «медициналық» объектілермен олардың белгілері болып табылады. «медициналық» объекті деп, медицина саласында қолданылатын медициналық атаулар мен құбылыстарды (ауру түрлері, диагноздар, емдеудің атаулары, дәрі-дәрмек атаулары, адамның ағзалары) тұспалданады.

Мұндай тәсілдің артықшылығы – көрсетілген объектілер мен олардың белгілерін (қасиетерін) корпуста берілген сөйлем ішінен жалпылама лингвистикалық үлгі «Существительное + Существительное в родительном падеже» бойынша іздейміз. Басқаша айтқанда, бастапқы әртектес объектілер мен белгілерін (қасиеттерін) үлгі бойынша қанағаттардыратын сөз тіркестерін аламыз. Тәжірибе жүзінде объектілер мен қасиеттерді сөйлем ішінен алу үшін келесідей Pullenti ашық кодын қолданамыз.

Сөйлем ішінен объектерлермен және оның қасиеттерін алу SDK Pullenti жүйесінде қалай жүзеге асатындығы көрсетілген. SDK үшін мәтін ретінде келесі сөйлем берілді: «Обычно гайморит – это следствие осложнений после инфекционного заболевания, например, скарлатины, гриппа, простуды. Основные симптомы гайморита – затрудненное дыхание, постоянный насморк, заложенность носа и головная боль». Бұл сөйлемнен келесідей объект-қасиет жұптары алынды: «симптом гайморита», «заложенность носа», «следствие осложнения», «следствие заболевания».

SDK Pullenti де сөйлем ішінен объектерлермен және оның қасиеттерін алу мысалы келтірілген. Мұндағы объектілер мен оның қасиеттері берілген сөйлем фрагментінен алынады. «Синдром Лемьера – редкое, но серьезное осложнение гнойной ангины, иногда ее называют постангинальным сепсисом». Келтіріген фрагмент ішінен келесідей сөз тіркесі алынды: «синдром Лемьера» және «осложнение ангины». Көріп отырғанмыздай берілген фрагментте «ангина» объектісінің алдында «гнойная» сөзі жолығып тұр, ал «осложнение» сөзінің алдында «серьезное» сөзі келіп тұр, бірақ SDK Pullenti үшін дұрыс объект-қасиетін анықтауға кедергі келтірмейді.

Әрбір мақаладан сөз тіркестері бір үлкен файлға жинақталады. Жиналған сөз тіркесі бастапқы кіріс деректер қоры негізінде объект-қасиет кестесін құруға жіберіледі. Жалпы бастапқы кіріс деректер қоры үшін алынған сөз тіркестер саны шамамен 300 мың.

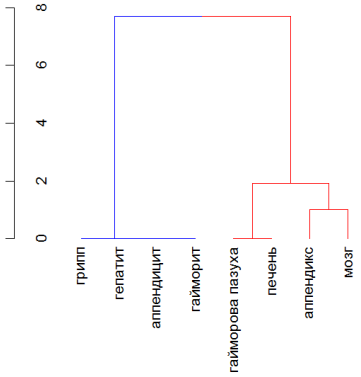
Келесі қадам бастапқы дерек қоры негізінде сөйлем ішінен «объект-қасиет» кестесін құру болып табылады. Жиналған сөз тіркесінен бүкіл объект атаулары қатар бойынша қайталаусыз, ал қасиет атаулары дәл солай баған бойынша қайталаусыз жазылады. Әрбір алынған «объект-қасиет» жұптары үшін, кестенің баған және қатар бойынша қиылысқан жеріне 1



Сурет 3. Сөйлем ішінен алынған сөз тіркестер фрагменті

жазылады. Кестедегі қалған «объект-қасиет» жоқ элементтер өзгерусіз қалады, яғни 0.

Бұл практикалық жұмыста пәндік аймаққа қатысты кластерлеу Уорди тәсілін қолдану арқылы, k-means алгоритмі пайдаланылды. 4-суретте кластерленген объект-қасиет кестесінің иерархия нәтижесі көрсетілген. Бірінші кластерге медициналық ауру атаулары кірсе, екінші кластерге ағзалардың атаулары кірген. Екінші кластер ішінде келесідей объектілер «гайморова пазуха», «печень» жеке бір субкластер ретінде бөліктенген, себебі формальді контексте «лечение» деген қасиетпен бірге жолыққан. «Лечение» – бұл гибридті қасиетке ие, себебі бұл сөз ауру түрлеріменде, әрі ағзалармен бірге сөз тіркесі ретінде жолығады. (лечение гепатита және лечение печени).



Сурет 4. Кластерленген объектілер

Объект-қасиет кестесінде қуыстарды қалпына келтіру

Пәндік аймақ негізіндегі кріс деректер қорына кластерлеу жасалынған соң, кластерлер ішінен біртектес элементтерден құралған кластер алынады. Алынған кластер терминдеріндегі қуыстарды толықтыру мақсатында әлсіз «machine learning» тәсіл қолданданып, қалпына келтіру жұмысы орындалады. Яғни берілген кестедегі әрбір объект үшін үлгі бойынша жаңа қасиеттер табу. Ол үшін таңдалып алынған кластер ішінен әрбір объект үшін қасиеттерді байланыстырып шығамыз.

5-суретте келтірілген код бойынша алынған кластерден объект үшін барлық мүмкін болатын қасиеттерді қарастырып шығамыз. Алынған терминдерді Веб ресурстарын пайдаланып тексереміз. Егер Веб ресурстарында жеткілікті түрде сөз тіркесіне ақпарат табылса, онда кестеде тексерілген объект пен қасиет қиылысы 1 ге ауыстырылады.

```
public static int isPhrase(String object, String attribute) throws IOException {
    String url = "https://www.google.ru/search?q=";
    String tempURL = url + object + " " + attribute;

    Document document = Jsoup.connect(tempURL).userAgent("Mozilla/5.0").get();
    Element divResultStats = document.select( cssQuery: "div#resultStats").first();

    Integer results = toInteger(divResultStats.text());
    if (results >= FULLRESULT) {
        return 1;
    }
    return 0;
}
```

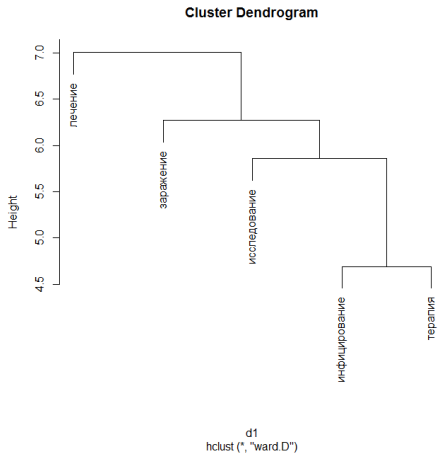
Сурет 5. «Объект-қасиет» кестесінде қуыстарды толықтыруға арналған код

Мұндай машиналық оқыту итеративті түрде орындалады, яғни әрбір объект үшін кластердегі қасиеттермен қосылып, Веб ресурсынына сұраныс беріп, алынған нәтижелеріне қарай, мұндай термин бар жоғын анықтайды.

Объект-қасиет кестесінен түсініктерді алу

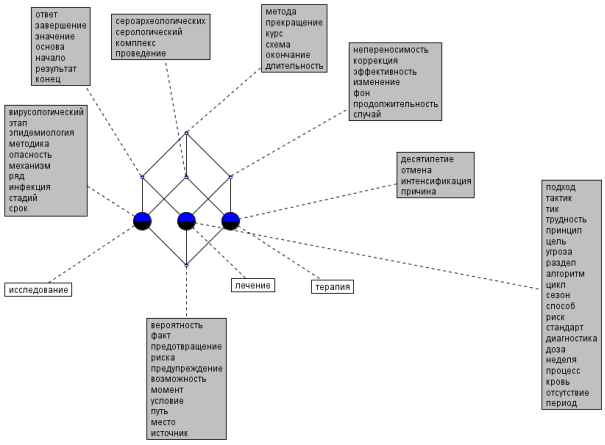
Қалыпқа келтірілген кесте ішінен пәндік аймақ негізінде түсініктерді алу және алынған түсініктерден иерархия құру. Алдағы орындалатын қадам медициналық мәтіндерден түсініктердің иерархиялық торларын формальді торлар құру болып табылады. Медициналық мәтіндерден автоматты түрде медициналық құрылымын құру қиын есеп болып табылады. Жасалынған жұмыста кластерлеу, формальді анализ түсініктер негізінде «Statistical Text Mining» қолданып мұндай есептерді шығару жолын көрсетеміз. 6-суретте кіші кластердің дендограмасы көрсетілген.

Формальді контекст торын құру модулі «объект-қасиет» кестесінің құрылыс модулімен жасалған формальді контексті пайдаланады. Модуль формальді тұжырымдамалар торын құрастырады. Өйткені, формальді тұжырымдама екі жиын болып табылады: объектілер жиынтығы және қасиеттер жиынтығы, бұл формальді тұжырымдамасы бар онтология класс атауы



Сурет 6. Кластер дендограмасының фрагменті

тек сарапшы ғана бере алады. Автоматты түрде онтология алудың екінші кезеңінде Concept Explorer бағдарламасы арқылы таңдалынған кластерден түсініктерді алу болып табылады. 7-суретте медицина саласында кіші кластер үшін концепциясы көрсетілген. Осылайша, осы кезеңде бағдарлама онтологиялық таксономиялық ядро класстарына сәйкес келетін тұжырымдамалар формальді контекст торын құрастырады.



Сурет 7. Кластерден түсініктерді алу фрагменті

Көрсетілген нәтижеге қарап, «лечение», «терапия», «исследование» объектілері концепте көрсетілген қасиеттерге жақын екендігін көрсетеді. Бұл жұмыстың келесі қадамдары объектілердің әртүрлі қасиет түрлерін алу әдістерін зерттеуге және жүйенің функционалдығын осындай қарым-қатынастарды алу мүмкіндігіне кеңейтуге байланысты болмақ.

Әдебиеттер тізімі

1. Лукашевич Н.В. Тезаурусы в задачах информационного поиска //М.: Издательство МГУ, 2011. – 512 с.
2. B. Ganter and R. Wille, Formal Concept Analysis: Mathematical Foundations, Springer, 1999.
3. www.бмэ.орг/index.php/
4. Crysmann B. et al. An integrated architecture for shallow and deep processing // Proceedings of the 40th annual meeting on association for computational linguistics. – Association for Computational Linguistics, 2002. – Pp. 441-448.

Современные математические модели, численные методы и пакеты прикладных программ для решения задач фильтрации

Б. Жумагулов

Национальная инженерная академия Республики Казахстан
Алматы, Казахстан
nia_rk@mail.ru

Нефтяной комплекс Казахстана является отраслью, которая обеспечивает жизнедеятельность производства и населения и во многом определяет экономическую независимость Республики Казахстан. Сегодня Казахстан – страна, которая не только способна обеспечить внутренние потребности в сырой нефти, но и осуществить её экспорт. При этом по запасам углеводородного сырья республика входит в десятку наиболее крупных мировых держав и имеет реальную возможность в недалёком будущем по объёмам добычи и экспорта нефти войти в число ведущих стран мира. Нефтяной комплекс Казахстана является крупнейшим рынком труда с постоянным приростом новых рабочих мест.

Сегодня можно выделить четыре основных стратегических направления повышения эффективности нефтегазовой отрасли, на которых должны быть сконцентрированы основные материальные и интеллектуальные ресурсы. Это информационные технологии на базе высокопроизводительных вычислительных систем и последних достижений математики, механики и геофизики; технологии на основе протяжённых горизонтальных скважин; метод гидровзрыва для создания больших трещин в пласте; механические и химические методы обработки прискважинной зоны и пласта.

Разработанные на основе математических моделей новые информационные технологии в нефтегазодобывающей промышленности позволяет на качественно более высоком уровне осуществлять томографию пластов и выявлять малоразмерные зоны скопления углеводородов, зоны повышенной проницаемости. Благодаря этому удаётся оптимизировать сетку скважин, резко сократить число малодебитных скважин, тем самым сократить объёмы неэффективного бурения, определяющего основные затраты в нефтегазодобывающей промышленности. Новые технологии позволяют контролировать, оптимизировать и увеличивать отдачу пластов, привлекать иностранный капитал, сохраняя контроль над национальными ресурсами.

Эффективное решение вопросов проектирования, анализа и контроля, управления и регулирования при разработке нефтяных и газовых месторождений немыслимо без использования автоматизированных систем, и мощных вычислительных ресурсов. Роль высокопроизводительных вычислений в данной сфере растет с каждым годом, так как средние показатели выработки месторождений снижаются, а требования к эффективности их использования становятся все более строгими. В частности, на старых, истощен-

ных месторождениях методы высокоточного гидродинамического моделирования позволяют существенно повысить коэффициент нефтеизвлечения.

Основой информационных технологий, предназначенных для решения проблем нефтегазовой отрасли, являются математические модели одно- и многофазных потоков жидкости в пористых средах. В наиболее законченном виде теория фильтрации разработана в работах С. Н. Антонцева, В. Н. Монахова, А. Н. Коновалова, Г. И. Баренблатта, К. С. Басниева, В. М. Ентова, В. М. Рыжика, Ю. П. Желтова, И. А. Чарного, А. В. Кажихова, Ш. С. Смагулова, Б. Т. Жумагулова, К. У. Утегенова, Н. В. Зубова, М. А. Мейрманова, М. Б. Габбасова, У. К. Жапбасбаева, Н. М. Темирбекова и других. Теория неизотермического движения многофазной жидкости была развита в работах И. А. Чарного, А. Ф. Зазовского, К. М. Федорова, В. М. Ентова, Э. Б. Чекалюка, А. А. Боксермана, С. И. Якубы, Н. К. Байбакова, A. E. Sheidegger, N. D. Shutler, Y. C. Yortsos и других. Теория неравновесной фильтрации двухфазной жидкости развивалась в работах Г. И. Баренблатта, А. П. Виниченко, А. А. Гильмана, М. Б. Габбасова, К. К. Шакенова, Т. К. Ермагамбетова и других.

Существует довольно большое количество программных пакетов, направленных на решение практических проблем в нефтегазовой отрасли. Ведущими проектами в этой области являются комплексы программ для гидродинамического моделирования Eclipse и Intersect компании Schlumberger, tNavigator компании Rock Flow Dynamics, Tempest компании Roxar, TimeZYX группы компаний Trust и другие.

На протяжении последних тридцати лет учеными СНГ проводятся исследования по разработке информационных технологий в нефтегазодобывающей промышленности. Одной из первых разработок в данной области является система автоматизированного анализа разработки нефтегазовых месторождений, созданная коллективом ученых Казахстана и России. Первоначально система имела название ИСАР (информационная система анализа, контроля и прогноза нефтегазовых месторождений), аббревиатура которой была введена член-корреспондентом РАН, профессором В. Н. Монаховым. Основной целью ИСАР является оценка эффективности реализуемой на данном объекте технологии, которая проводится путем изучения технологических и технико–экономических показателей разработки на основе многовариантных математических расчетов. ИСАР представляет собой открытую систему, построенная по модульному принципу имеет возможность проводить расчетные процедуры с выдачей графической, табличной и текстовой документации, а также позволяет производить автономный расчет любого элемента или группы элементов.

В основу системы положены математические модели фильтрационных процессов в нефтяных пластах, которые подробно описаны в работе [1]. С учётом подмоделей и комбинированных моделей банк содержит свыше 30 различных математических моделей нефтяного пласта. Основными гидродинамическими расчётными моделями являются модель Баклея–Леверетта, характерной особенностью которой является равенство фазовых давле-

ний; модель Маскета–Леверетта, в которой учитывается капиллярный скачок фазовых давлений; тепловая модель Маскета–Леверетта, учитывающая температурные взаимодействия жидкостей и пористой среды; модель Навье-Стокса и модель Дарси-Жуковского, специальным образом включающая силы сопротивления пористой среды. В ИСАР банк математических моделей подразделяется на три модуля:

– однофазные модели Дарси и контактные модели;

– двухфазные модели (например, Маскета–Леверетта);

– комбинированные модели (например, двух неоднородных жидкостей).

Наряду с общепринятыми моделями Дарси и Маскета–Леверетта, тепловой моделью Маскета–Леверетта (в форме Бочарова О.Б., Монахова В.Н. [2,3] в ИСАР активно используются модели Навье–Стокса и Жуковского для оптимизации процессов регулирования и прогнозов нефтедобычи нефтяных месторождений. Следует также отметить оригинальные модели, описывающие процесс "пенообразования" в нефтяных пластах и сопряжение фильтрационного течения с потоком жидкости в скважине.

В работе Антонцева С.Н. и Монахова В.Н. [4] была предложена общая модель фильтрации нефтяного пласта, содержащая некоторое количество функциональных параметров, при специальном выборе которых могут быть получены многие из моделей, содержащиеся в банке моделей.

ИСАР объединяет автоматизированные рабочие места геолога, технолога, разработчика, диспетчера и состоит из из основных трех блоков: блока геолого–промысловых данных, блока инженерных моделей и блока математических моделей. Развитие указанных блоков производилось в двух направлениях. Первое направление связано с исследованием строгих математических моделей, наиболее полно описывающих законы фильтрации многофазных жидкостей в пористых средах. Данное направление приводит к постановкам сложных пространственных задач многофазной (многокомпонентной) фильтрации в нефтяных пластах, которые затем реализуется численными методами. Второе направление связано с исследованием инженерных моделей по упрощенным схемам фильтрации.

Группой сотрудников института механики и математики Казахского национального университета имени аль-Фараби анализируется ряд известных математических моделей фильтрации однородных и неоднородных жидкостей в пористых средах и предлагаются новые модели. Основные направления исследований института в области нефтепромысловой тематики связаны с математическим моделированием и численным прогнозом процессов вытеснения нефти и газа водой с учетом тепловых и физико–химических эффектов в прискважинной зоне пласта (под руководством профессора Н. Т. Данаева, а ныне его учениками), компьютерным моделированием геофизических исследований (под руководством профессора М. К. Орунханова), задачами формирования соленых куполов и оптимальный прогноз нефтедобычи (под руководством член-корреспондента НАН РК, профессора К.А. Касымова) и другими.

При создании ИСАР огромный вклад внесен сотрудниками Института гидродинамики СО РАН им. М. А. Лаврентьева (под руководством член-корреспондента РАН, профессора В.Н. Монахова), «РосНИПИтермнефть» (под руководством Н. В. Зубова), Инженерной академии РК (под руководством профессора Б. Т. Жумагулова) и Казахского национального университета имени аль-Фараби (под руководством академика ИА РК, профессора Ш. С. Смагулова). При создании ИСАР получены новые научные результаты и разработаны математические модели с применением метода фиктивных областей (Ш. С. Смагулов); фазовых переходов неизотермической фильтрации жидкости в пористой среде (С. Т. Мухамбетжанов); идентификация параметров нефтяного пласта (С. Т. Мухамбетжанов, Ш. Ж. Мусиралиева); с применением одномерных графов (С. Т. Мухамбетжанов, К. М. Баймиров); полуобратные задачи теории фильтрации (С. Т. Мухамбетжанов, М. А. Бектемесов); вытеснения нефти с учетом ПАВ (С. Т. Мухамбетжанов, Н. Шыганаков); с расщеплением по физическим процессам в системе «нефть-вода» и «нефть-газ» (С. Т. Мухамбетжанов, Т. У. Жумашева). Научными руководителями отдельных научных проектов сформулированы ряд основных требований к феноменологическим моделям фильтрации:

1. Экспериментальная замкнутость модели, т.е. возможность экспериментального определения всех входящих в нее параметров без привлечения дополнительных теорий. Устойчивая воспроизводимость экспериментов.

2. Четкое выделение гипотез, положенных в основание модели и определение границ изменимости этой модели как качественных (какие физические эффекты могут быть описаны), так и количественных.

3. Вложимость в модели более высокого уровня, учитывающие новые физические факторы.

4. Математическая доступность и корректность модели.

5. Адаптируемость математических моделей для конкретных месторождений.

Ряд полученных результатов по созданию ИСАР внедрены на нефтяных месторождениях Каражанбас (с учетом ПТВ и ПТОС) и Кумколь-Лукойл.

Наряду с ИСАР разработаны другие автоматизированные системы: «Прискважинная зона пласта» (под руководством профессора Н. Т. Данаева) и по проблемам транспортировки нефти и газа (под руководством профессора Б. Т. Жумагулова).

Исследование вопросов по разработке информационных технологий в нефтегазодобывающей промышленности проводятся в Казахстане и по сей день. Казахстанским НИИ математики и механики на базе математических и компьютерных моделей движения жидкости в пористой среде с учетом процессов тепло- и массопереноса разработана распределенная информационно-вычислительная система анализа разработки нефтяных месторождений ИСАР-II, особенностью которой является то, что все расчеты численных моделей производятся на распределенных высокопроизводительных вычислительных ресурсах, организуется распределенная обработка и хранение данных, а пользователь в промысловых условиях через Интернет,

включая мобильные платформы, получает доступ к автоматизированному рабочему месту технолога-аналитика [5]. Модуль визуализации представлен в виде Web-модуля, исполняющегося на сервере (кластере) и использующего аппаратные средства графической подсистемы (GPU) со стороны клиента. При разработке программы использована гибридная технология организации параллельных вычислений OpenMP и MPI. Вопросам создания распределенных информационно-вычислительных систем для расчета задач нефтегазовой отрасли, а также распараллеливания алгоритмов с использованием технологий MPI, OpenMP, CUDA посвящены работы Д. Ж. Ахмед-Заки [6,7], Б. Т. Жумагулова, Н. Т. Данаева, Т. С. Иманкулова, Т. Т. Бекибаева [8,9,10]. В работах У. К. Жапбасбаева, И. К. Бейсембетова, Б. К. Кенжалиева, Б. К. Асилбекова приводятся результаты исследований применимости технологии CUDA для распараллеливания гидродинамических расчетов трехмерных задач фильтрации.

Приведем обзор ряда оригинальных методов решения задач многофазной фильтрации. Одна из основных проблем моделирования движения многофазного потока через пористую среду многокомпонентных частично смешивающихся жидкостей связана с появлением однофазных зон, занятых насыщенной (или недонасыщенной) жидкостью, т. е. значительно удаленной от равновесной двухфазной области. В перенасыщенной зоне уравнения двухфазного течения вырождаются и больше не могут быть использованы, что вызывает серьезные проблемы в численных расчетах. В работе [11] предлагается описать двухфазную и перенасыщенную однофазную зону единой системой классических двухфазных уравнений, расширяя понятие фазового насыщения так, чтобы оно было отрицательным и превышало единицу. Физически это означает, что рассматриваются перенасыщенные однофазные состояния как псевдо-двухфазные состояния, которые характеризуются отрицательным насыщением мнимой фазы. Такое расширение понятия фазового насыщения требует разработки некоторых условий консистенции, обеспечивающих эквивалентность между псевдо-двухфазными уравнениями и истинной моделью однофазного потока в перенасыщенных зонах. Этот метод позволяет использовать существующие численные симуляторы двухфазного потока для моделирования однофазных зон путем добавления простого плагина без изменения структуры симуляторов. Этот метод иллюстрируется несколькими примерами потока воды в виде водорода в радиоактивном хранилище отходов и закачки CO_2 в нефтяной пласт.

Подход отрицательных насыщенностей был обобщен для неизотермического случая в работе [12]. Данный решения эффективно решает любую проблему неизотермического композиционного потока, которая включает в себя исчезновение фазы, появление фазы и фазовый переход. Преимущество подхода решения заключается в том, что он обходит с помощью разных уравнений для однофазных и двухфазных областей и последующей неустойчивой процедуры. Данный подход может быть эффективно реализован в числовых симуляторах для решения проблем моделирования смешанной закачки CO_2-воды в геотермальных пластах, процессов термической регенерации и

для многоконтактного смешивающегося и несмешивающегося газа в нефтяных пластах.

Следующий ряд работ посвящен решению задач многофазной фильтрации с учетом капиллярных сил. В работе С. Н. Антонцева и В. Н. Монахова [13], а затем в работе G. Chavent, J. Jaffre [14] предложен подход решения задачи двухфазной изотермической фильтрации. Идея их методов состоит во введении новой переменной - "глобального" ("приведенного") давления по формуле

$$p = p_o - \int_{s_w}^{1} \frac{\lambda_w}{\lambda_w + \lambda_o} \frac{\partial p_c}{\partial s_w} d\xi, \quad \lambda_\alpha = \frac{k_\alpha}{\mu_\alpha}. \tag{1}$$

В работе [14] данный подход обобщен для двухфазного сжимаемого потока, трехфазного изотермического случая и для модели Black Oil. Несмотря на то, что глобальное давление не имеет явного физического смысла, введение этой замены позволило получить новые математические результаты. Обзор работ по данной тематике приведен в работе [15]. Используя концепцию глобального давления, в работе [14] доказано существование решения задачи фильтрации несжимаемой жидкости для вырожденного и невырожденного случаев и доказана единственность задачи в одном частном случае. Например, в работе [16] доказывается существование слабого решения уравнений сжимаемых несмешивающихся жидкостей. В работе [17] установлено существование решения задачи двухфазной фильтрации в "глобальной" постановке. В работе [18] доказывается существование слабых решений задачи двухфазной фильтрации несжимаемых жидкостей в рамках упрощенной модели двойной пористости. В работе [19] установлено существование слабых решений задачи двухфазной фильтрации несмешивающихся сжимаемых жидкостей для случая среды с разными породами. В работе [20] доказано существование, единственность и регулярность слабого решения задачи двухфазной фильтрации несжимаемых жидкостей. В работе Т. К. Ермагамбетова [21] доказана разрешимость задачи двухфазной неравновесной фильтрации. В работе [22] доказана разрешимость задачи трехфазной фильтрации в изотермическом случае на основе введения глобального давления. В работе [23] на примере модельных задач трехфазной изотермической фильтрации показано, что с вычислительной точки зрения решение данной задачи с использованием глобального давления является более эффективным, чем решение задачи в "фазовой" постановке. В работе [24] исследована задача о движении двухфазного многокомпонентного потока на основе введения глобального давления. В работе [25] данный подход обобщается на случай пористой среды с разрывом. В работе [26,15] указанный подход обобщен для задачи трехфазной неизотермической фильтрации.

Одним из многообещающих направлений в теории фильтрации являются задачи определения оптимальных параметров закачки вытесняющего агента для повышения нефтеотдачи или получения желаемых свойств пласта. Данные задачи изучались в работах казахстанских математиков. Например, в работе [27] была изучена задача определения скорости закачки воды в пласт для достижения желаемого гидродинамического состояния пла-

ста. Работа [28] посвящена численному решению задачи определения оптимального давления пара на нагнетательной скважине для достижения предопределенной температуры вдоль пласта. В работе [29,31] изучается задача оптимального управления для уравнений трехфазной неизотермической фильтрации, которая заключается в минимизации отклонения температуры пласта от заданного распределения температуры к определенному времени разработки, посредством управления массового расхода теплоносителя на нагнетательных скважинах.

Изучение дифференциальных свойств систем уравнений моделей фильтрации, определение порядка аппроксимаций, устойчивости и сходимости разностных схем нужны только математикам. Исследовав дифференциальные уравнения и соответствующие разностные схемы математики строят алгоритмы для численного решения этих задач на компьютере. Широкому кругу пользователей нужен конечный результат: пакеты прикладных программ, коммерческие гидродинамические симуляторы и информационные системы.

В связи с этим на сегодняшний день является актуальным совершенствования гидродинамических симуляторов на высокопроизводительных компьютерах. Как уже было отмечено имеются современные симуляторы типа tNavigator от Rockflow Dinamics, Schlumberger Eclipse 300 и другие. Если раньше пакеты прикладных программ оценивались меньшим количеством счетного времени, то в настоящее время гидродинамические симуляторы отличаются количеством визуализируемых кадров в секунду. Например визуализатор tNavigator от Rockflow Dinamics отображает на экран компьютера 37,2129 кадров в секунду при количестве 44 млн. полигонов.

Таким образом, актуальным является создания гидродинамических симуляторов способных моделировать процесс фильтрации с отображением на экран в режиме реального времени. Большие задачи фильтрации рассчитываются на мощных кластерах, большое значение приобретает интерактивный интерфейс для работы с результатами расчетов. Основная сложность заключается в визуализации больших данных на средних и слабых клиентских устройствах с той же скоростью с которой происходит расчет на суперкомпьютере. По этой причине много внимания уделяется модулю высокопроизводительной визуализации результатов расчета в режиме реального времени для оперативного отслеживания состояния симуляции и возникающих ошибок, поскольку время работы может быть довольно дорогим. Основным фактором качественной визуализации является удобное представление данных , поэтому это направление должно развиваться в сторону упрощения визуального восприятия информации. Следующим шагом в данном направлении можно назвать представления результатов расчетов в в виртуальной реальности с эффектом присутствия.

Сегодня перед нефтегазовой отраслью стоит важнейшая проблема, которую необходимо незамедлительно решать. Она заключается в новом , не формальном , работающем подходе к подготовке и аттестации специалистов опасных производственных объектов. Это, прежде всего, передача профес-

сиональных знаний, опыта, развитие технической интуиции, а также логики. И самое главное – это умение использовать все эти человеческие качества не только в недопущении аварий и чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах, но и предотвращении их последствий. Но для этого нужны постоянные тренинги, на которых отрабатываются всевозможные изменения режимов и технические инциденты, которые могут произойти на предприятиях нефтегазовой отрасли. Немаловажным фактором является наглядность и «цифровая» продвинутость обучающих систем – молодые люди погружены в цифровые технологии, «экранозависимы» и мало подвержены традиционному наставничеству.

Создание и внедрение тренажеров – это процесс, позволяющий уже в процессе разработки формализовать и аккумулировать часто разрозненные знания, обладатели которых разбросаны по разным объектам, выявить и преодолеть некомпетентность отдельных средних руководителей, работающих под девизом «ничего менять не надо» когда все вокруг меняется.

Поэтому необходимо создавать крупные моделирующие комплексы нефтегазовых объектов с использованием современных достижении визуального программирования. Интерактивные панели подключенные к компьютерной сети тренажера включающий в себе виртуальные полигоны, совмещающие модели процессов, SCADA и 3D – объекты для отработки тренингов и аттестации специалистов нефтегазовой отрасли. Разрабатывать учебно- тренировочные комплексы в основе которой лежит подробная математическая модель реального фрагмента нефте-газотранспортной сети. Программное обеспечение должна содержать САПР, позволяющие достаточно оперативно менять и расширять модель сети, оборудования и автоматики. Управление учебной нефтегазотранспортной сетью осуществляется с АРМ подробно имитирующих реальные АРМ специалистов. Параметры работы реального оборудования заводятся обратно в математическую модель по принципу обратной связи. Такое решение дает более широкие возможности для практического обучения специалистов.

Таким образом, в данной работе проведен обзор последних работ, выполненных при изучении моделей многофазного потока жидкости в пористой среде, а также обзор последних достижений в области разработки автоматизированных информационных систем моделирования на основе этих моделей.

Список литературы

1. Жумагулов, Б. Т., Зубов, Н. В., Монахов, В. Н., Смагулов, Ш. С.: Новые компьютерные технологии в нефтедобыче. Алматы, Гылым (1996)
2. Бочаров, О.Б., Монахов, В.Н.: Краевые задачи неизотермической двухфазной фильтрации в пористых средах. Динамика сплошной среды 88. Новосибирск (1988)
3. Бочаров, О.Б., Монахов, В.Н.: Неизотермическая фильтрация несмешивающихся жидкостей с переменными остаточными насыщенностями (1988)

4. Антонцев С.Н., Монахов В.Н. О некоторых задачах фильтрации двухфазной несжимаемой жидкости. Динамика сплошной среды, 156–167 (1969)
5. Жумагулов, Б. Т., Данаев, Н.Т.: Распределенная информационная система анализа разработки нефтегазовых месторождений - ИСАР II. Полимерное заводнение. Обработка пространственных данных и дистанционный мониторинг природной среды и масштабных антропогенных процессов (DPRS 2013). – Барнаул, С.126-134 (2013)
6. Ахмед-Заки, Д. Ж., Айдаров, К. А.: Распределенная вычислительная система на основе технологии MPI с интерфейсом WEB 2.0. Материалы конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании 2013», Усть-Каменогорск. - С.56-60 (2013)
7. Ахмед-Заки, Д. Ж., Борисенко, М. Б.: Разработка высокопроизводительных приложений с использованием гибридных технологий параллельных вычислений – MPI/OpenMP/Cuda. Вестник КазНУ. Серия математика, механика, информатика, №3 (78). – С.33-39 (2013)
8. Данаев, Н. Т.: Программная реализация задач численного моделирования осесимметричной двухфазной фильтрации. Вестник Инженерной академии Республики Казахстан, №2 (10). – С.45-49 (2003)
9. Жумагулов, Б. Т., Данаев, Н. Т., Ахмед-Заки, Д. Ж., Турар, О. Н.: Разработка модуля визуализации для Web гидродинамического симулятора ИСАР-II с применением CUDA технологии. Вестник КазНУ. Серия математика, механика, информатика, №3(78). – С.48-55 (2013)
10. Бекибаев, Т. Т., Асилбеков, Б. К., Жапбасбаев, У. К., Бейсембетов, И.К., Кенжалиев, Б. К.: Применение CUDA для распараллеливания трехмерной задачи фильтрации нефти. Вестник КазНУ, серия Математика, механика, информатика, №1 (72). – С.65-78 (2012)
11. Abadpour, A., Panfilov, M.: Method of Negative Saturations for Modeling Two-phase Compositional Flow with Oversaturated Zones. Transport in Porous Media 79, 197–214 (2009).
12. Salimi, H., Wolf, K., Bruining, J. Negative Saturation Approach for Non-Isothermal Compositional Two-Phase Flow Simulations. Transport in Porous Media 91, 391–422 (2012).
13. Антонцев, С.Н., Монахов, В.Н.: Краевые задачи для некоторых вырождающихся уравнений механики сплошной среды. Новосибирский государственный университет (1977)
14. Chavent, G., Jaffre, J.: Mathematical models and finite elements for reservoir simulation. North Holland (1986)
15. Байгереев, Д. Р. Экономичные разностные схемы для задачи трехфазной неизотермической фильтрации в переменных "глобальное давление, насыщенность, температура". Дис. ... PhD (2017)
16. Amirat, Y., Shelukhin, V.: Global weak solutions to equations of compressible miscible flows in porous media , SIAM Journal of Mathematical Analysis 38 (6), 1825–1846 (2007)
17. Amaziane, B., Jurak, M., Vrbaski, A.: Existence for a global pressure formulation of water-gas flow in porous media, Electronic Journal of Differential Equations 102, 1–22 (2012)
18. Arbogast, T: The existence of weak solutions to single porosity and simple dual-porosity models of two-phase incompressible flow. Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications. Vol. 19, Issue 11, 1009-1031 (1992)

19. Amaziane, B., Pankratov, L., Piatnitski, A.: The existence of weak solutions to immiscible compressible two-phase flow in porous media: the case of fields with different rock-types. Discrete and continuous dynamical systems Series B (2013)
20. Chen, Z: Degenerate two-phase incompressible flow I: Existence, uniqueness and regularity of a weak solution. Journal of Differential Equations 171, 203–232 (2001)
21. Ермагамбетов, Т.К.: Разрешимость и численное исследование модели неравновесной фильтрации двухфазной несжимаемой жидкости с обобщенным законом неравновесности. Дис.... канд. физ.-мат. наук. Алматы (2010)
22. Fabrie, P., Saad, M.: Existence de solutions faibles pour un modèle d'écoulement triphasique en milieu poreux. Annales de la faculté des sciences de Toulouse 6 e série 2(3), 337–373 (1993)
23. Chen, Z., Ewing, R.: Comparison of various formulation of three-phase flow in porous media. Journal of Computational Physics (1997)
24. Amaziane, B., Jurak, M., Keko, A.: Modeling compositional compressible two-phase flow in porous media by the concept of the global pressure. Computational Geoscience. Vol. 18, Issue 3-4, 297–309 (2014)
25. Bastian, P.: Numerical Computation of Multiphase Flows in Porous Media. Christian-Albrechts-Universität Kiel (1999)
26. Temirbekov N.M., Baigereyev D.R.: Modeling of three-phase non-isothermal flow in porous media using the approach of reduced pressure. Mathematical modeling of technological processes. Series of Communications in Computer and Information Science 549 ,Springer. P.166-176 (2015)
27. Мукимбеков М. Ж.: Оптимизация технологических параметров воздействия на пласт. Вестник Карагандинского университета. №3 (59). – С. 42-46 (2010)
28. Абдраманова М. Б. Численное моделирование процесса вытеснения нефти паром. Вестник КазГУ. Серия математика, механика, информатика №10. С. 3-10 (1998)
29. Жумагулов Б.Т., Темирбеков Н.М., Байгереев Д.Р. Моделирование трехфазного неизотермического течения в пористой среде с использованием концепции глобального давления и управление технологическими параметрами нагнетания пара. Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова №3 (39), Ч. 1, С. 71-76 (2016)
30. Temirbekov N.M., Baigereyev D.R.: Numerical solution of an optimal control problem governed by three-phase non-isothermal flow equation. AIP Conference Proceedings 1759. – P. 020140-1 – 020140-5 (2016)
31. Байгереев Д. Р. О задаче оптимального управления для уравнений трехфазной неизотермической фильтрации. Вестник КазНИТУ №4. С. 577-581 (2016)

Компьютерное моделирование распространения трещины из вершины острого v-образного выреза при антисимметричном изгибе

В. Кургузов

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
Новосибирск, Россия
kurguzov.hydro.nsc.ru

Аннотация Проведено экспериментальное исследование зарождения трещины в вершине острого V-образного выреза. Рассмотрен антисимметричный изгиб плоского образца прямоугольного поперечного сечения, ослабленного V-образным вырезом, т.е. при нагружении по чистой II моде. Проведены эксперименты по разрушению образцов с V-образным вырезом из оргстекла и эбонита. Получены зависимости критической нагрузки от локации, глубины и схемы нагружения V-образного выреза. Методом конечных элементов с использование данных экспериментов получены критические коэффициенты интенсивности напряжений по I и II модам разрушения. Проведено компьютерное моделирование зарождения и развития трещины из вершины V-образного выреза. Выполнено численное моделирование распространения трещин в плоских образцах при квазистатическом нагружении. В окрестности вершины выреза возникают большие деформации, поэтому задача решалась в текущей лагранжевой постановке с учетом физической и геометрической нелинейности на основе общих уравнений механики деформируемого твердого тела с использованием в качестве меры напряжений тензора напряжений Коши, а в качестве меры деформаций – тензора логарифмических деформаций Генки. Получено качественное соответствие данных эксперимента и результатов численных расчетов.

Ключевые слова: угловой вырез, критерий разрушения, компьютерное моделирование, метод конечных элементов

Введение

В классической механике разрушения силовые и деформационные критерии разрушения ориентированы на их применение к областям, содержащим трещины. Оценке хрупкой прочности областей с трещинами при нагружениях, соответствующих трем классическим типам трещин, посвящено большое количество работ. В то же время влияние угловых вырезов на величину разрушающей нагрузки изучено недостаточно. Это объясняется прежде всего

тем обстоятельством, что все известные критерии разрушения не приспособлены к угловым точкам. Следует отметить, однако, что в инженерной практике такого рода проблематика встречается достаточно часто [1].

В элементах конструкции нередки случаи, когда трещина располагается в поле напряжений от внешней нагрузки так, что она работает не только на отрыв (тип I), но и на поперечный сдвиг (тип II). В связи с этим для определения несущей способности элемента конструкции, а также трещиностойкости материала в конкретных условиях необходимы методы оценки соответствующих характеристик трещиностойкости. Произвести раздельное и независимое определение критических значений коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) K_{Ic} и K_{IIc} методически достаточно сложно. Известно несколько типов образцов, позволяющих производить испытания с определением K_{Ic} и K_{IIc}. Это плоские образцы с наклонной трещиной при растяжении и образец типа компактного.

Экспериментальное определение критического КИН

Ниже представлены результаты экспериментального определения критического КИН для трещин поперечного сдвига и угловых вырезов по схеме четырехточечного антисимметричного изгиба. На рис. 1, 2 показаны схемы классического трехточечного изгиба для определения КИН K_{Ic} по I моде и четырехточечного антисимметричного изгиба для определения КИН K_{IIc} по II моде. Нагрузки P_a и P_b не могут быть произвольными: из условия баланса сил и моментов получаем $P_a \cdot a = P_b \cdot b$. Момент в середине балки обращается в нуль, т.е. реализуется состояние чистого сдвига и происходит разрушение по II моде, перерезывающая сила $Q = P\dfrac{a-b}{a+b}$, где $P = P_a + P_b$.

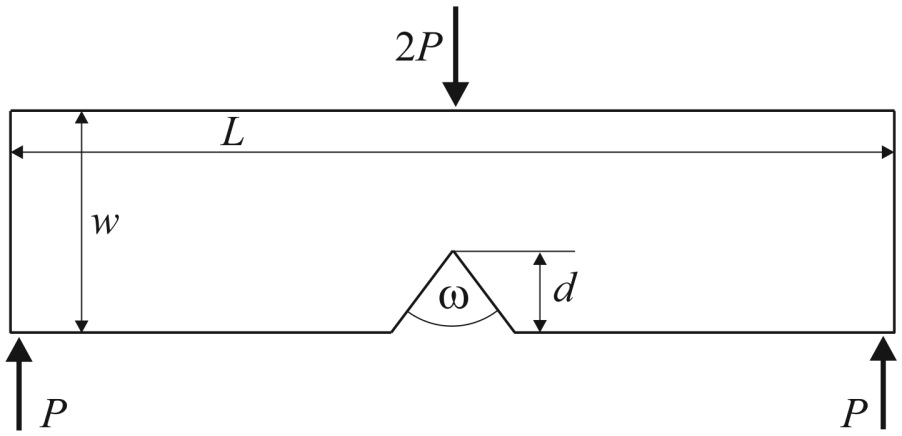


Рисунок 1. Трехточечный изгиб.

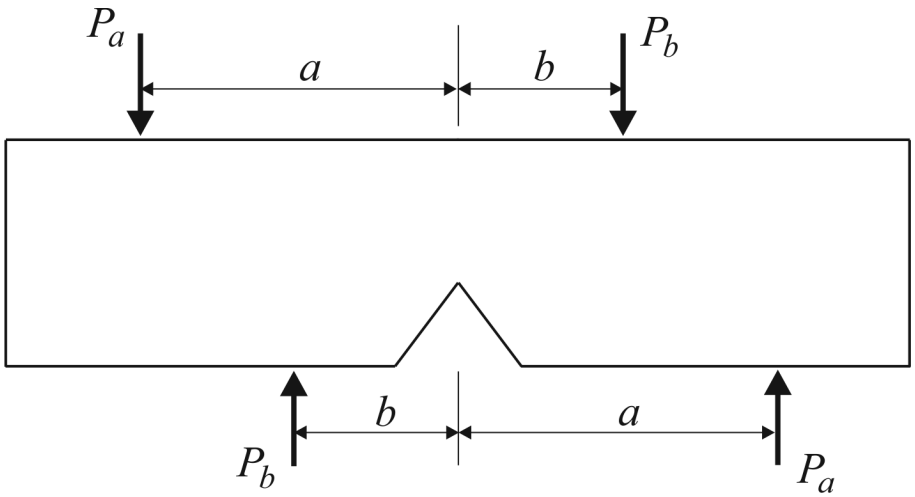


Рисунок 2. Четырехточечный антисимметричный изгиб.

Были проведены эксперименты по разрушению балок из оргстекла и эбонита. Испытывались балки длиной $L = 80$ мм, шириной $w = 20$ мм, толщиной $t = 10$ мм. Глубина разреза $d = 9$ мм. Размеры балок соответствовали ГОСТу на трехточечный изгиб. При определении разрушающей нагрузки испытывались по 3 образца, при этом варьировались расстояния от середины образца до места приложения нагрузок a и b. Сначала рассмотрим образцы с трещинами, это частный случай углового выреза с углом 0 градусов. Результаты испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1. Критическая нагрузка.

a, мм	b, мм	P_c, кН
30	10	4.0, 3.9, 4.4
25	15	9.6, 10.1, 9.8
20	20	16.9, 18.1, 17.5

Как видно из приведенных результатов, критическая нагрузка растет с увеличением расстояния b, это ближайшая к середине балки точка приложения сил. Разброс значений разрушающей нагрузки P_c не превышал 5-10 % от среднего значения по трем испытаниям для каждой партии образцов. Разброс значений P_c в основном связан с неточностью установки образцов на опоры и мест приложения нагрузок.

На рис. 3 представлена фотография разрушенных образцов. Разрушение образцов как из оргстекла, так и из эбонита, происходит по кривой траектории, начиная от вершины разреза и кончая ближайшей точкой приложения

нагрузки. Начиная с некоторого значения параметра b, характер разрушения образцов меняется.

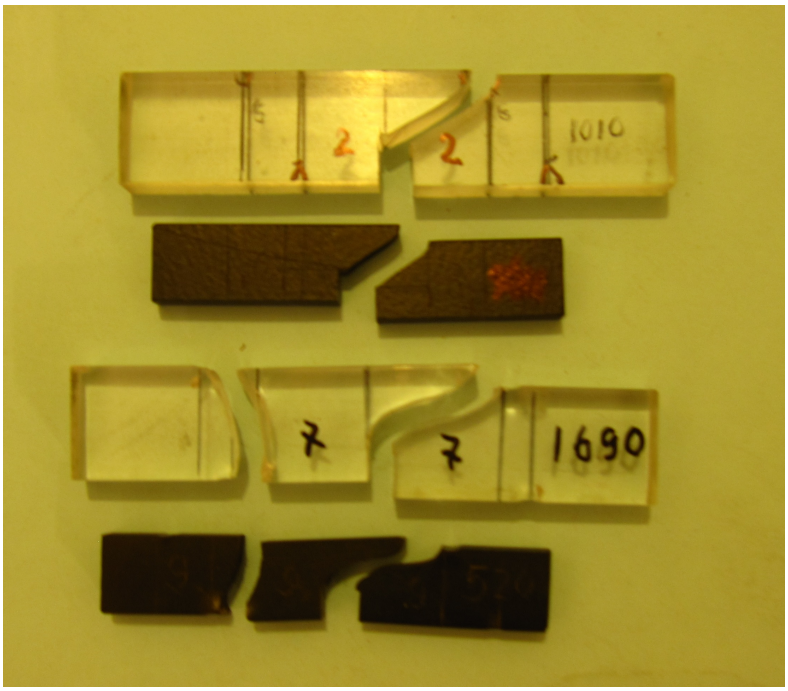


Рисунок 3. Фотография разрушенных образцов.

Воспользуемся методом конечных элементов для нахождения критических КИН K_{Ic} и K_{IIc} на основании полученных в экспериментах значений критической нагрузки. Расчетная область и схема нагружения показаны на рис. 4. Расчетная область покрывалась равномерной сеткой, содержащей 160000 четырехузловых четырехугольных элементов с линейной аппроксимацией смещений, размер элемента 0,1 мм. Материал балки – изотропный линейно упругий, с модулем Юнга $E = 3200$ МПа, коэффициентом Пуассона $\nu = 0.33$. Нагрузка принималась равной средней критической нагрузке, найденной в эксперименте.

Расчет напряженно-деформированного состояния балки выполнялся в пакете конечноэлементного анализа MSC.Marc 2017 [3]. Коэффициенты интенсивности напряжений K_{I} и K_{I} вычислялись с помощью инвариантного J-интеграла, который в случае плоской деформации связан с K_{I}, K_{II} соотношением $JE' = K_{\mathrm{I}}^2 + K_{\mathrm{II}}^2$, где $E' = E/(1-\nu^2)$. Разделение J-интеграла на I и II моды в пакете MSC.Marc базируется на методе Делорензи (другое название – метод интегрирования по областям), согласно которому контурный интеграл преобразуется в интеграл по площади, интегрирование ве-

дется по кольцу элементов, окружающих вершину трещины, напряжения вычисляются внутри элементов в точках гауссовых квадратур. В расчете использовались 4 контура интегрирования, результаты для 3 и 4 контуров отличались незначительно. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

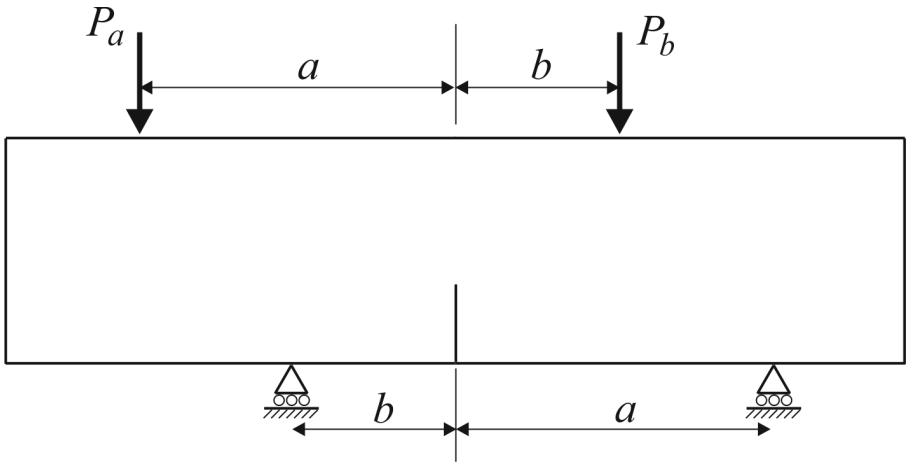


Рисунок 4. Расчетная область и схема нагружения.

Таблица 2. Критические КИН.

a, мм	b, мм	K_{Ic}, МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$	K_{IIc}, МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$
40	40	1.088	10^{-7}
30	10	0.230	1.866
25	15	0.310	2.330
25	20	0.213	1.810

Во второй строке приведены значения критических КИН для трехточечного изгиба, в справочнике [2] приведено значение 1,05 МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$, т.е. получено хорошее совпадение. В следующих строках представлены результаты по антисимметричному изгибу. Как видно, чистый сдвиг оказался не совсем чистым, разделить моды разрушения, так чтобы первая оказалась близка к нулю, не удается, погрешность составляет примерно 11%.

Компьютерное моделирование распространения трещины

Переходим к компьютерному моделированию распространения трещины при антисимметричном изгибе. Рассмотрим решение контактной задачи, схема нагружения балки представлена на рис. 5. Балка – деформируемое тело, полуокружности – жесткие тела, которые моделируют опорные цилиндры и нагрузочные цилиндры, которые передают воздействие траверсы испытательной машины на балку. Тип контакта – касание, т.е. возможно проскальзывание без трения. Задача решалась в текущей лагранжевой постановке с учетом физической и геометрической нелинейности на основе общих уравнений механики деформируемого твердого тела [4] с использованием в качестве меры напряжений тензора напряжений Коши, а в качестве меры деформаций – тензора логарифмических деформаций Генки.

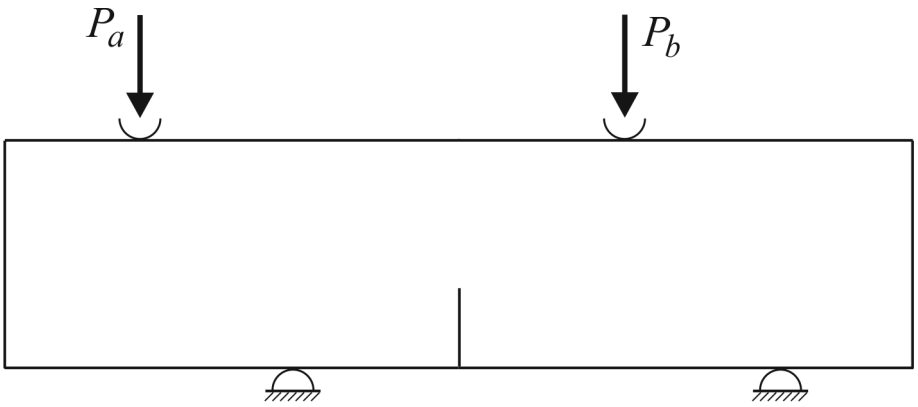


Рисунок 5. Расчетная область и схема нагружения в контактной задаче.

Процесс распространения трещины в линейно упругом изотропном теле можно характеризовать интенсивностью освобождения упругой энергии G, которая в методе конечных элементов вычисляется с помощью методики виртуального закрытия трещины VCCT (Virtual Crack Closure Technique). Концепция квазихрупкого разрушения Гриффитса основана на энергетическом балансе энергии деформации тела и работой, затрачиваемой на образование новой поверхности. Энергетический критерий Гриффитса можно записать в виде

$$G = -\frac{dW}{dl} \leq G_c,$$

где W – энергия деформации, l – длина трещины. Параметр G_c называется вязкостью разрушения и является характеристикой материала, определяемой из экспериментов. Для изотропного линейно упругого материала

$G_c = J_c = 0.3$ Н/мм, т.е. равен критическому значению J-интеграла, найденному из экспериментов.

Результаты расчета представлены на рис. 6, 7. Цветом маджента показана начальная конфигурация. На рис. 6 расстояние до нагрузочного цилиндра 10 мм, на рис. 7 – 15 мм. Наблюдается качественное совпадение с результатами эксперимента.

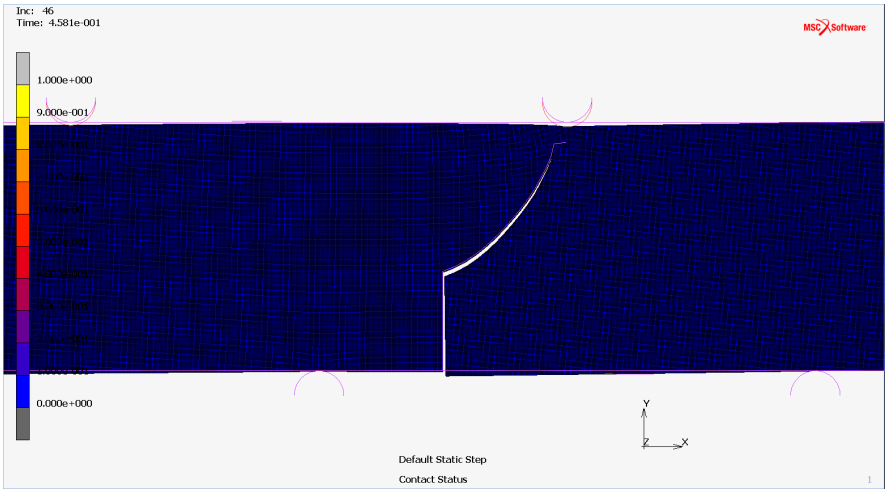


Рисунок 6. Распространение трещины из вершины разреза, $b = 10$ мм

Рассмотрим теперь результаты испытания на антисимметричный изгиб балок с двумя краевыми разрезами длиной 3 мм. Две схемы нагружения с односторонними и двусторонними опорами показаны на рис. 8, 9. Эти схемы на первый взгляд выглядят эквивалентными, поскольку силу можно заменить реакцией опоры и наоборот, реакцию опоры можно заменить силой. Однако в компьютерной модели возникает различие.

Размеры образцов те же самые, расстояния до нагрузочных цилиндров 20 и 10 мм, 25 и 15 мм. Фотография образца с угловым вырезом после разрушения показана на рис. 10. Видно, что возникают две антисимметричные трещины, которые распространяются от вершины выреза к месту приложения нагрузки. С увеличением расстояния от выреза до точки приложения ближайшей нагрузки (10 мм и 15 мм) критическая нагрузка значительно возрастает от 5.2 кН до 14.6 кН. Малейшая неточность при установке нижних опорных и верхних загрузочных цилиндров, а также различие в глубине вырезов с точностью до сотых долей миллиметра, приводит к несимметричному разрушению образца. Из 9-ти испытанных образцов симметричные трещины возникали только в 2-х случаях.

Результаты компьютерного моделирования показаны на рис. 11, 12.

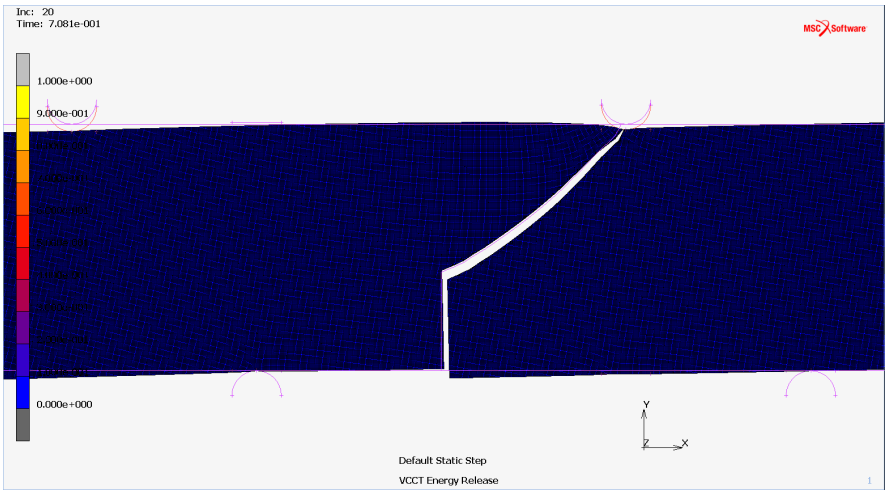


Рисунок 7. Распространение трещины из вершины разреза, $b = 15$ мм

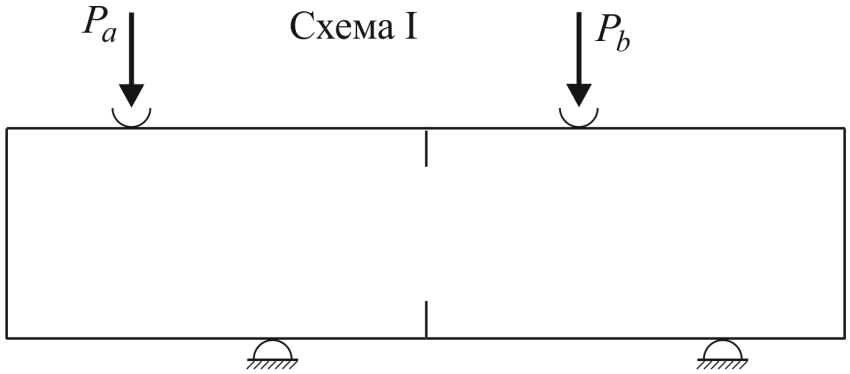


Рисунок 8. Схема нагружения с односторонними опорами.

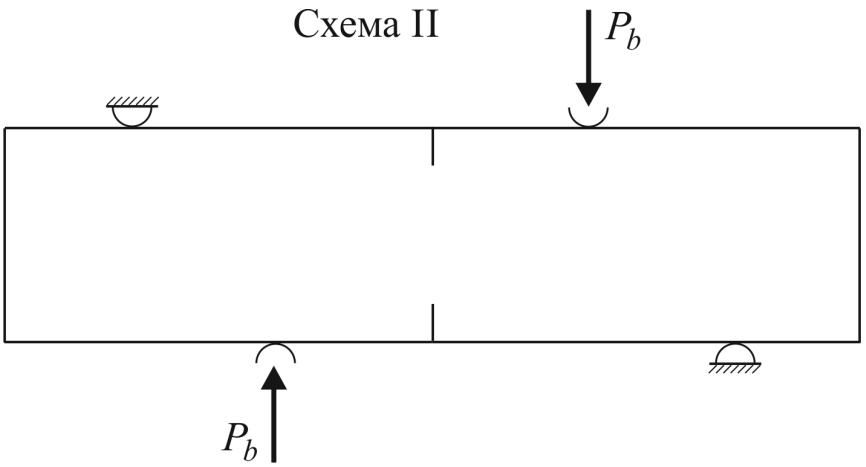


Рисунок 9. Схема нагружения с двухсторонними опорами.

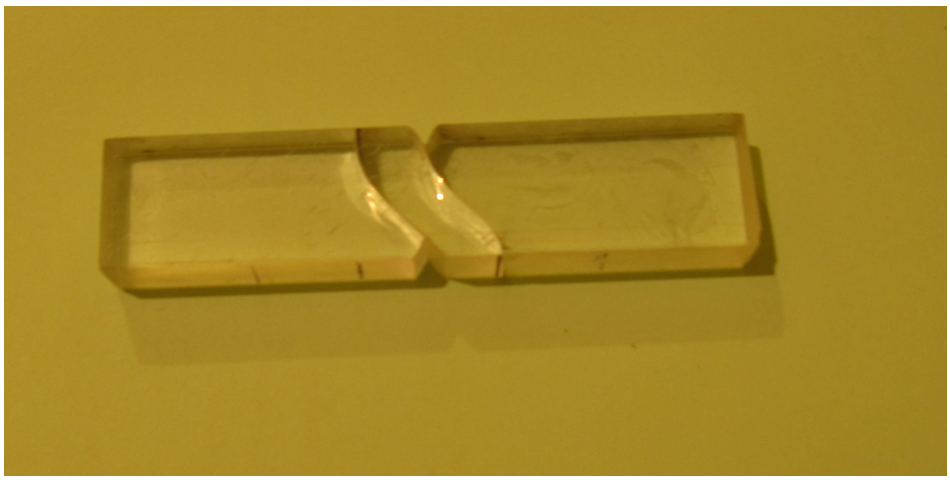


Рисунок 10. Фотография разрушенного образца: две антисимметричные трещины.

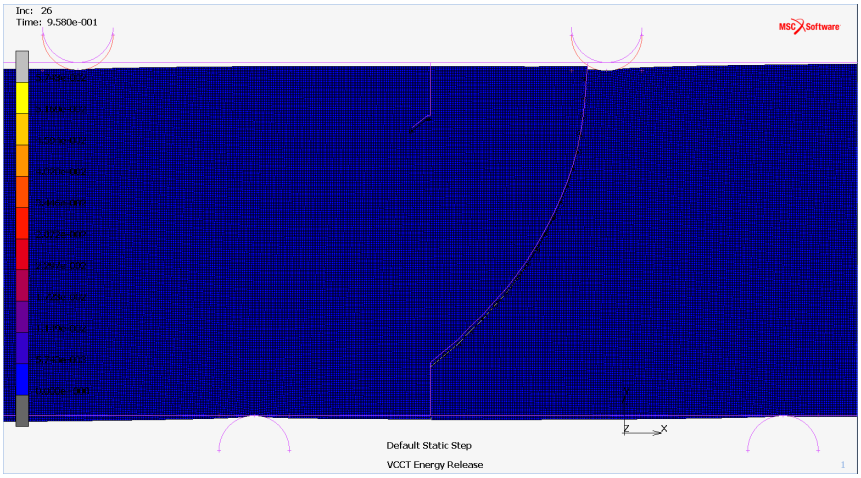


Рисунок 11. Нагружение по схеме 1, односторонние опоры, расстояния 20 и 10 мм, несимметричные трещины.

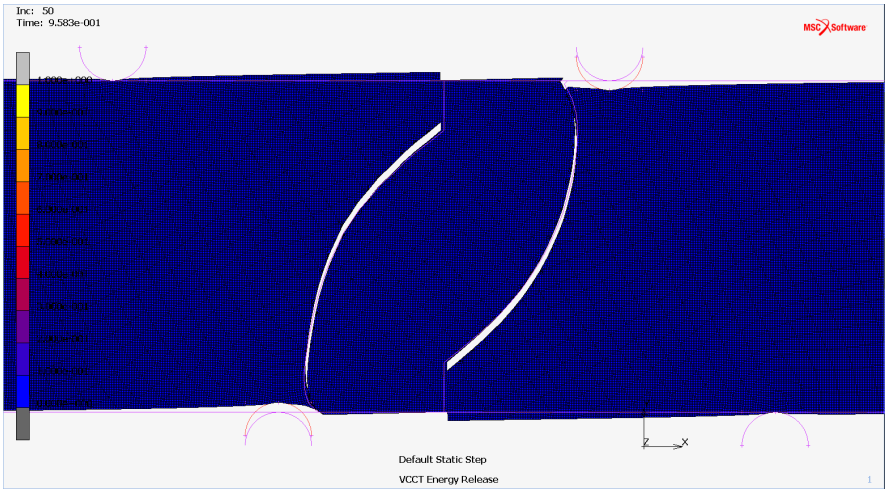


Рисунок 12. Нагружение по схеме 2, двусторонние опоры, расстояния 20 и 10 мм, трещины распространяются симметрично.

Испытания на антисимметричный изгиб балок с угловым вырезом

Рассмотрим теперь результаты испытания на антисимметричный изгиб балок с угловым вырезом с углом раствора 90° глубиной 8 мм. Результаты испытаний представлены на рис. 13. При определении разрушающей нагрузки испытывались по три образца одинаковых размеров, но с разным расположением нагрузочных цилиндров, $b = 10$ мм, 15 мм и 20 мм. Разрушение образца всегда начиналось в вершине выреза и продолжалось до места приложения ближайшей нагрузки. С увеличением расстояния b разрушающая нагрузка увеличивается. Разброс значений критической нагрузки не превышает 10% от среднего значения и зависит от точности установки опорных цилиндров.

Результаты компьютерного моделирования, показанные на рис. 14, 15, обнаруживают качественное совпадение с экспериментальными данными.

Получение критического КИН для балок из оргстекла с угловым вырезом

Рассмотрим острый угловой вырез в бесконечном теле. Введем декартову и полярную системы координат с началом в вершине выреза, как показано на рис. 16.

Асимптотика поля напряжений и смещений в окрестности вершины выреза имеет вид

$$\sigma_{\alpha\beta} = \frac{K_{\mathrm{I}}^n}{(2\pi r)^{1-\lambda_1}} f_{\alpha\beta}^1(\theta) + \frac{K_{\mathrm{II}}^n}{(2\pi r)^{1-\lambda_2}} f_{\alpha\beta}^2(\theta),$$
$$u_\alpha = \frac{K_{\mathrm{I}}^n r^{\lambda_1}}{(2\pi)^{1-\lambda_1}} g_\alpha^1(\theta) + \frac{K_{\mathrm{II}}^n r^{\lambda_2}}{(2\pi)^{1-\lambda_2}} g_\alpha^2(\theta).$$

Коэффициенты при главных членах асимптотических разложений поля напряжений называются обобщенными коэффициентами интенсивности напряжений и обозначаются K_{I}^n (разрушение по I моде), K_{II}^n (разрушение по II моде). Показатели степени λ_1 и λ_2 описывают сингулярности поля напряжений в окрестности вершины выреза и являются корнями характеристических уравнений

$$\lambda_1 \sin 2\alpha + \sin 2\lambda_1\alpha = 0,$$
$$\lambda_2 \sin 2\alpha + \sin 2\lambda_2\alpha = 0.$$

Зависимость показателей сингулярности λ_1 и λ_2 от угла ω (в радианах) представлена на рис. 17. Заметим, что λ_2 не является сингулярным для углов выреза ω больших 102.6°, в то время как λ_1 сингулярно для всех $\omega < 180°$.

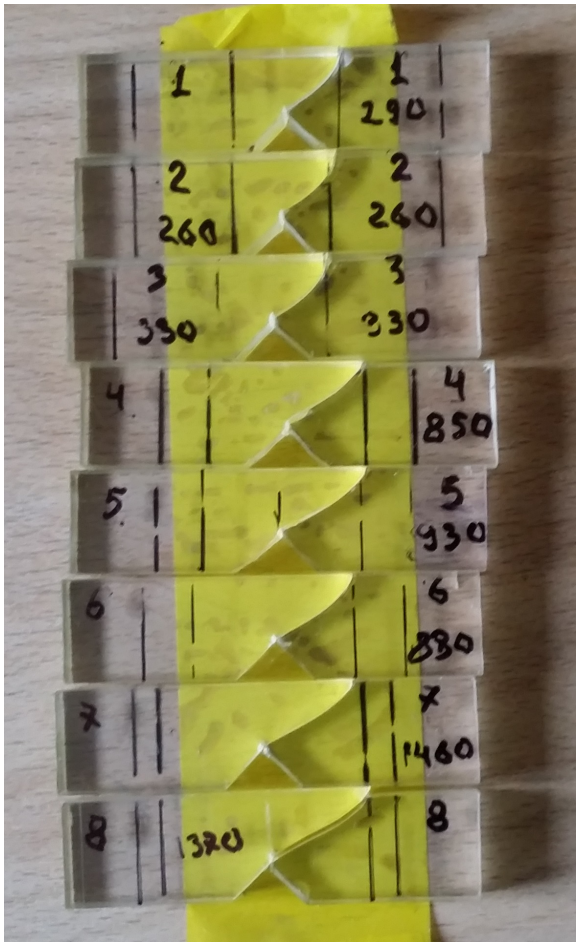


Рисунок 13. Результат испытания на антисимметричный изгиб балок с угловым вырезом: образцы 1-3 $b = 10$ мм, образцы 4-6 $b = 15$ мм, образцы 7-8 $b = 20$ мм, справа указана критическая нагрузка в кГ.

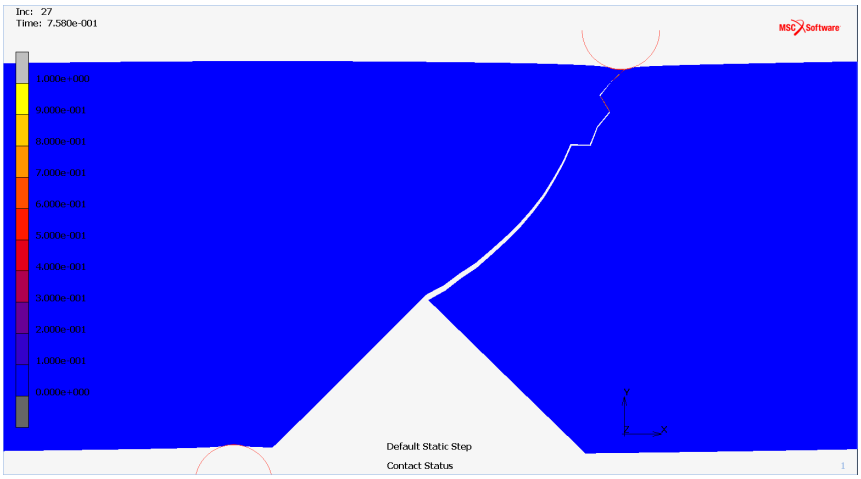


Рисунок 14. Односторонние опоры, трещина продвигается с изломом траектории.



Рисунок 15. Двусторонние опоры, отличия от предыдущего рисунка незначительны.

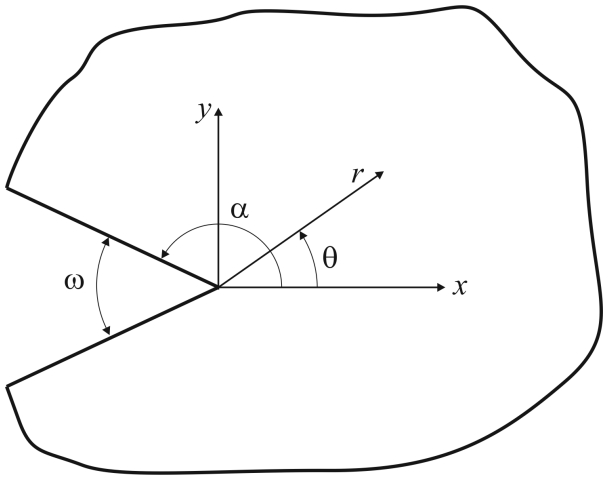


Рисунок 16. Система координат в окрестности V-образного выреза.

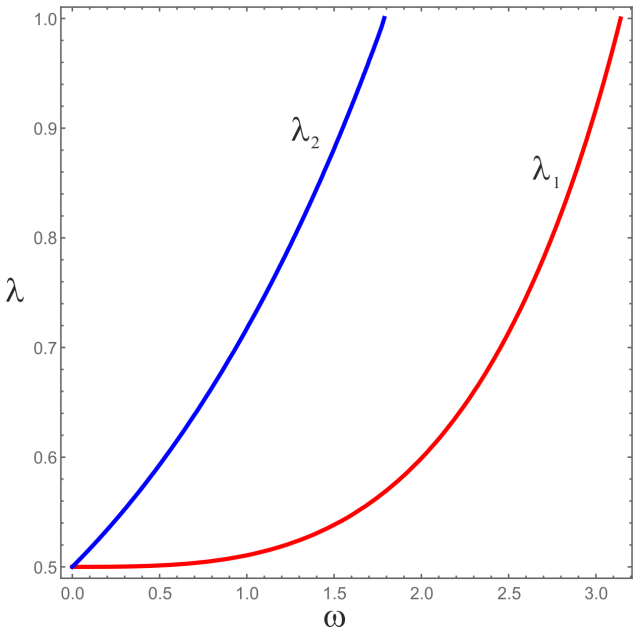


Рисунок 17. Зависимость параметра λ от угла ω (в радианах).

Для $\omega = 180°$ показатели сингулярности $\lambda_1 = 0.5445$, $\lambda_2 = 0.9085$, поэтому сингулярность поля напряжений $1 - \lambda_2 = 0.0915$ намного слабее чем для трещины.

Критический обобщенный КИН для углового выреза K^n_{IIc} найдем совместным использованием асимптотики поля напряжений и смещений в окрестности вершины выреза, метода конечных элементов и экспериментальных значений разрушающей нагрузки. Полученные результаты сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Критические КИН.

a, мм	b, мм	P_c, кН	K^n_{IIc}, МПа $\cdot$ м$^{0.0915}$
30	10	2.93	13.039
25	15	8.87	19.740
25	20	14.2	14.044

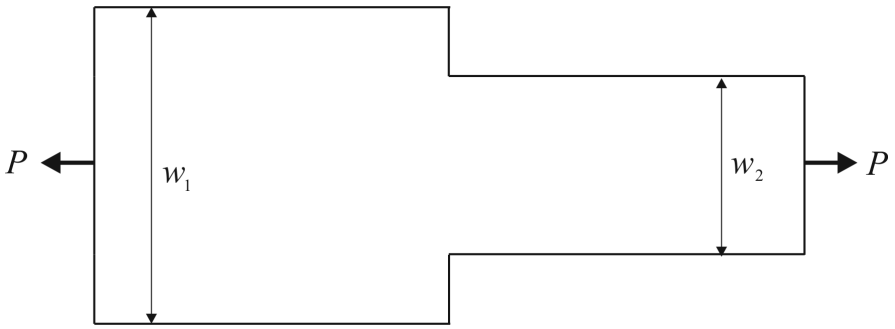


Рисунок 18. Растяжение пластины с двумя симметричными угловыми вырезами.

Заключение

1. Получены значения критического КИН поперечного сдвига для оргстекла как для трещины $\omega = 0°$, так и для углового выреза $\omega = 90°$.
2. Проведено компьютерное моделирование зарождения и развития трещины из вершины V-образного выреза. Получено качественное соответствие данных эксперимента и результатов численных расчетов.
3. Сфера применения: формулировка критерия разрушения по смешанной моде для предсказания критической нагрузки при растяжении T-образных конструкций в микроэлектромеханических системах (МЭМС). Такие конструкции часто обладают острыми углами, вследствие изготовления путем анизотропного химического травления (рис. 18).

Список литературы

1. Морозов Н.Ф. Математические вопросы теории трещин. М.: Наука, 1984.
2. Ковчик С.Е., Морозов Е.М. Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения, Т. 3 // Механика разрушения и прочность материалов. Киев: Наук. думка, 1988.
3. MARC Users Guide. Vol. A. – Santa Ana (CA): MSC.Software Corporation, 2017.
4. Коробейников С.Н. Нелинейное деформирование твердых тел. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.

Использование метода конечных объемов для решения уравнения переноса излучения в прикладных задачах

К. Литвинцев

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Красноярск, Россия
sttupick@yandex.ru

Аннотация В процессе разработки в Красноярском филиале ИТ СО РАН комплекса программ «SigmaFlow», предназначенного для решения задач вычислительной гидродинамики и теплообмена, были реализованы математические модели переноса излучения, основанных на использовании P1 приближения и метода конечных объемов (МКО). Реализованный МКО поддерживает многопоточные вычисления на основе пространственной декомпозиции расчетной области на неструктурированных сетках и угловую многоблочность (неоднородная по пространству угловая дискретизация). Для решении системы линейных алгебраических уравнений, полученных с использованием МКО, были рассмотрены как стандартные методы, используемые при решении уравнений гидродинамики (BiCGSTAB, DILU, CS и т.д.), так и схема “бегущего счета”.
На базе комплекса программ "SigmaFlow был решен ряд прикладных задач, в которых одним из основных механизмов переноса тепла являлось излучение: моделирование газовой топочной камеры, горелочного устройства и вакуумной электропечи.

Ключевые слова: Перенос излучения, метод конечных объемов, численное моделирование

Введение

При использовании численного моделирования для решения широкого класса прикладных задач большое значение имеет возможность настройки и адаптации математических моделей для описываемых процессов, которые позволяли бы уменьшать вычислительные затраты, показывая при этом приемлемую точность. Особенно это важно при решении задачи переноса излучения, которая может предъявлять значительные требования к вычислительным ресурсам вследствие необходимости учета анизотропии распространения излучения по разным направлениям и зависимости оптических свойств среды от частоты излучения. В Красноярском филиале ИТ СО РАН при разработке комплекса программ «SigmaFlow» [1], предназначенного для решения задач вычислительной гидродинамики и теплообмена, были

реализованы математические модели переноса излучения, основанные на использовании P_1 приближения и метода конечных объемов (МКО), которые развивались при решении прикладных задач. Также для проведения сравнительных расчетов был реализован дискретно-ординатный метод (ДОМ) на основе S_n квадратур [2].

Если P_1 приближение используется уже достаточно давно, то метод конечных объемов (МКО) для решения уравнения переноса излучения (УПИ) появился и стал активно развиваться только в 90-ых годах прошлого века, но к настоящему времени получил достаточно широкое распространение [3]. Особенно можно отметить его использование в свободно распространяемых программах OpenFOAM и FDS, предназначенных для численного моделировании процессов, связанных с гидро-газодинамикой и сложным тепломассопереносом. МКО обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами решения уравнения переноса теплового излучения. Так МКО не имеет ограничений по оптическим свойствам среды (неоднородность, анизотропность, рассеяние) в отличие от P_n приближений (особенно P_1), метода дискретных направлений или специальных требований к расчетной области в отличие от потоковых методов. По точности МКО уступает лучевым методам (например, Монте-Карло), однако, требования к вычислительным ресурсам для него значительно ниже. При сравнении с ДОМ МКО является немного более ресурсоемким, но корректнее описывает рассеяние излучения. К достоинству МКО также можно отнести его относительно простой и наглядный вывод для УПИ [4].

Математическая модель переноса излучения

Уравнение переноса излучения описывает баланс энергии при данной частоте излучения, поступающего вдоль направления $\boldsymbol{s}$ в малый элемент объема поглощающей, испускающей и рассеивающей среды:

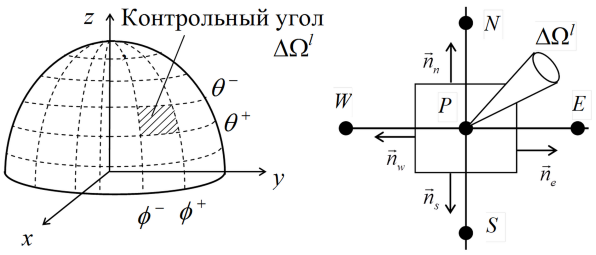
$$\frac{dI_\nu(\boldsymbol{r},\boldsymbol{s})}{ds} = -\beta_\nu(\boldsymbol{r})\, I_\nu(\boldsymbol{r},\boldsymbol{s}) + \kappa_\nu(\boldsymbol{r})\, I_{b\nu}(\boldsymbol{r}) + \frac{\sigma_\nu(\boldsymbol{r})}{4\pi} \int\limits_{4\pi} I_\nu(\boldsymbol{r},\boldsymbol{s}')\, \Phi_\nu(\boldsymbol{s}',\boldsymbol{s})\, d\Omega' \tag{1}$$

где I_ν – интенсивность излучения; где $I_{b\nu}$ - интенсивность излучения абсолютно черного тела; β_ν – коэффициент затухания ($\beta_\nu = \sigma_\nu + \kappa_\nu$); κ_ν – коэффициент поглощения; σ_ν - коэффициент рассеяния; Ω – телесный угол; $\boldsymbol{r}$ – радиус-вектор; $\boldsymbol{s}$ – направление распространения излучения; Φ_ν – функция рассеяния.

Для описания коэффициента поглощения среды использовались модели «серого газа», WSGG (Weighted Sum of Gray Gases) модели и полосные модели, созданные на основе открытой базы данных спектральных свойств газов HITRAN (HIgh-resolution TRANsmission molecular absorption database) [5].

Метод конечного объема для уравнения переноса излучения

МКО основан на дискретизации пространственного и углового распределения интенсивности излучения - разбиении на контрольные объемы и контрольные (телесные) углы (Рис. 1). Дискретный аналог УПИ для МКО получается интегрированием уравнения (1) по контрольному объему и контрольному углу [4].



а) б)

Рисунок 1. Пространственная и угловая дискретизация УПИ: а) контрольный угол; б) контрольный объем и ориентация контрольного угла.

В итоге дискретный вид уравнения (1) для произвольных пространственных сеток при l-ом направлении распространения излучения может быть записан следующим образом:

$$\sum_{nb} I^l_{nb} A_{nb} D^l_{nb} = \left(-\beta I^l_p + S^l\right) \Delta V \Delta\Omega^l, \tag{2}$$

где

$$S^l = \kappa I_b + \tfrac{\sigma}{4\pi} \sum_{l'=1}^{L} I^{l'} \bar{\Phi}^{l'l} \Delta\Omega^{l'};$$
$$D^l_{nb} = \int\limits_{\Delta\Omega^l} \left(\boldsymbol{s}^l \cdot \boldsymbol{n}_{nb}\right) d\Omega;$$

$\Delta\Omega^l$ - контрольный телесный угол; подстрочный индекс nb – грань контрольного объема с узловой точкой P; $\bar{\Phi}^{l'l}$ - усредненная функция рассеивания из контрольного угла l' в контрольный угол l.

При использовании противопоточной схемы аппроксимации, значение интенсивности в контрольном объеме сносится на грани, расположенные по ходу распространения излучения в текущем направлении. Дискретная форма МКО для противопоточной схемы аппроксимации для произвольных сеток записывается следующим образом:

$$a^l_P I^l_P = \sum_{nb} a^l_{nb} I^l_{nb} + b^l, \tag{3}$$

где

$$a_{nb}^{l} = \max\left(-A_{nb}D_{nb}^{l}, 0\right),$$
$$a_{P}^{l} = \sum_{nb} \max\left(A_{nb}D_{nb}^{l}, 0\right) + \beta_P \Delta V_P \Delta\Omega^{l},$$
$$b^{l} = S_P^{l} \Delta V_P \Delta\Omega^{l}.$$

Для уменьшения ошибки, вносимой пересечением граней контрольных объемов с контрольными телесными углами, телесный угол Ω^l можно разбить плоскостью грани на два телесных угла Ω^+ и Ω^-, соответствующих входящему и выходящему излучению (Рис. 2). В этом случае уравнение (3) модифицируется следующим образом [6]:

$$a_{nb}^{l} = -A_{nb}D_{nb}^{l+}$$

$$D_{nb}^{l\pm} = \int\limits_{\Delta\Omega^{l\pm}} \left(\boldsymbol{s}^{l} \cdot \boldsymbol{n}_{nb}\right) d\Omega$$

$$a_{P}^{l} = \sum_{nb} A_{nb}D_{nb}^{l-} + \beta_P \Delta V_P \Delta\Omega^{l} \tag{4}$$

Надстрочные индексы «+» и «-» соответствуют входящему и исходящему потокам излучения в контрольный объем P.

Данную модификацию целесообразно использовать при грубой угловой дискретизации, в противном случае влияние данной ошибки минимально.

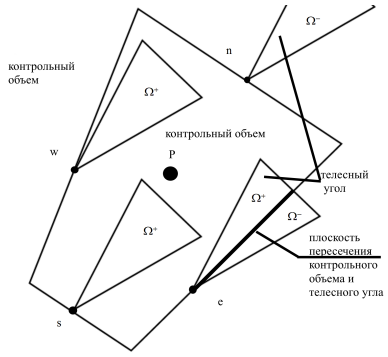


Рисунок 2. Пример пересечения контрольного угла с гранью контрольного объема.

Для структурированных сеток в МКО была реализована поддержка угловой многоблочности, которая позволяет задавать разную угловую дискретизацию в пространстве. Данный подход позволяет при необходимости локально разрешать угловое распределение излучения. Данный подход показал свою эффективность для тестовых задач [6], однако, при решении прикладных задач с использованием «SigmaFlow» не использовался.

В качестве граничных условий были реализованы периодические граничные условия и диффузионное излучение непрозрачной поверхности. При периодических граничных условиях связываются две границы, на которых задается условие равенства распределения входящей, для одной границы, и исходящей, для другой границы, интенсивности излучения. Сложность реализации периодических граничных условий для МКО возникает из-за невозможности однозначной связи между двумя дискретными телесными углами на разных периодических границах. Поэтому для периодических граничных условий каждый дискретный телесный угол может быть связан с несколькими телесными углами на другой границе с заданным весом. Граничное условие в виде диффузионного излучения наиболее часто встречается при решении прикладных задач, как в следствие преобладания поверхностей со степенью черноты близкой к единице, так и в следствии отсутствия данных по индикатрисе отражения и испускания.

Для решения СЛАУ (3,4) можно применять как стандартные методы, используемые при решений уравнений гидродинамики (BiCGSTAB, DILU, CS и т.д), так и схему «бегущего счета» [7]. Преимущество первых методов заключается в том, что они уже были реализованы для решения задач гидродинамики и теплообмена.

Суть схемы «бегущего счета» заключается в последовательном расчете интенсивности излучения в контрольных объемах в выбранном направлении (Рис. 3) [5]. Для любой сетки с выпуклыми ячейками можно построить такую последовательность обхода контрольных объемов в произвольном направлении распространения излучения, что излучение, поступающее в текущий контрольный объем, будет всегда известно.

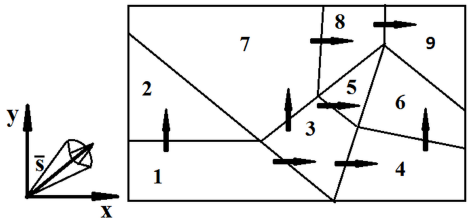


Рисунок 3. Демонстрация обхода контрольных объемов для схемы «бегущего счета».

Примеры задач совместного использования МКО и P_1 приближения

Для многих прикладных задач, в которых присутствует теплообмен излучением, до сих пор используется P_1 приближение для решения УПИ. Это оправдано, когда можно использовать приближение «серого» газа и среда

является оптически толстой или, если не интересует корректность распределения потока излучения на границе расчетной области. В этом случае можно существенно сократить вычислительные и временные затраты на расчет поля излучения. Когда же необходимо учитывать зависимость оптических свойств среды от частоты излучения, использование P_1 приближения приводит к существенным ошибкам, и в этом случае необходимо использовать более точные, но и более затратные методы решения УПИ, в данном случае МКО. Однако, возможность использовать достоинства P_1 приближения остаются и в этом случае. Для этого можно использовать то, что при численном моделировании переноса излучения с использованием WSGG или полосных моделей, фактически, УПИ решается для набора сред со своим «серым» газом. Это позволяет применять комбинированный подход, когда для расчета оптически толстых «серых» сред используется P_1 приближение, а для остальных – МКО. Таким образом, суммарное значение плотности энергии излучения можно описать следующим выражением:

$$E = \sum_{i}^{N} E_i^{\text{МКО}} + \sum_{i}^{N} E_i^{P_1} \tag{5}$$

где N_i и N_j – «серые» газы, рассчитанных МКО и P_1 приближением соответственно; E - плотность энергии излучения (Вт/м^2).

Описанный подход особенно хорошо себя показывает при использовании WSGG моделей, в которых можно легко выделить оптически толстую среду для одного из «серых» газов. Например, для WSGG модели, предложенной в работе [8], значения удельных коэффициентов поглощения «серых» газов составляют: для первого – 131.9 м$^{-1}$Атм$^{-1}$, для второго – 6.516 м$^{-1}$Атм$^{-1}$, для третьего – 0.4201 м$^{-1}$Атм$^{-1}$, для четвертого – 0.0 м$^{-1}$Атм$^{-1}$. Первый «серый» газ в подавляющем большинстве случаев можно рассчитывать P_1 приближением, для второго газа необходимо более аккуратно оценивать распределение концентраций реперных газов (CO_2 и H_2O) и характерный масштаб задачи.

Представленные далее в данной главе задачи решались на структурированных неортогональных сетках.

Замкнутый цилиндр, заполненный смесью газов

Рассмотрим применение комбинированного подхода на примере тестовой задачи, представленной в работе Yu M.J., в которой для расчета поля излучения использовался ДОМ с 96 направлениями совместно с WSGG моделью коэффициента поглощения [9]. Задача представляет собой закрытый цилиндр, заполненный газовой смесью (H2O – 20%, CO2 - 10%, N2 - 70%.) с однородной температурой (Рис. 4а).

Решение УПИ проводилось на базе МКО с 96 дискретными направлениями, для расчета коэффициента поглощения использовалась та же WSGG модель [8], как в работе Yu M.J. Сравнение результатов проводилось по

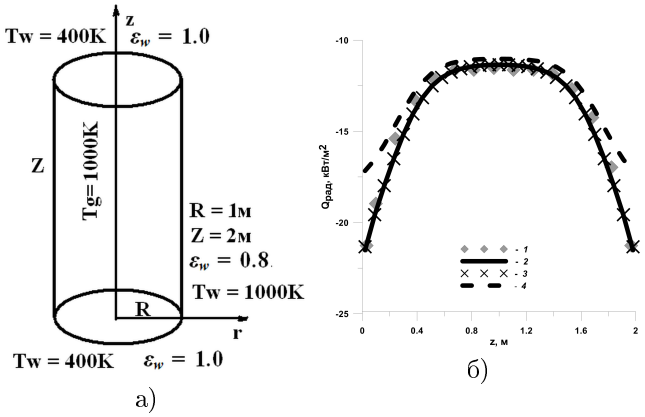


Рисунок 4. Замкнутый цилиндр, заполненный смесью излучающих газов: а) описание задачи; б) Распределение потока излучения на боковую грань цилиндра: 1 — Yu M.J. et al [9]; 2 — КОМ; 3 — КОМ и P_1 для одного «серого» газа, 4 — КОМ и P_1 для двух первых «серых» газов.

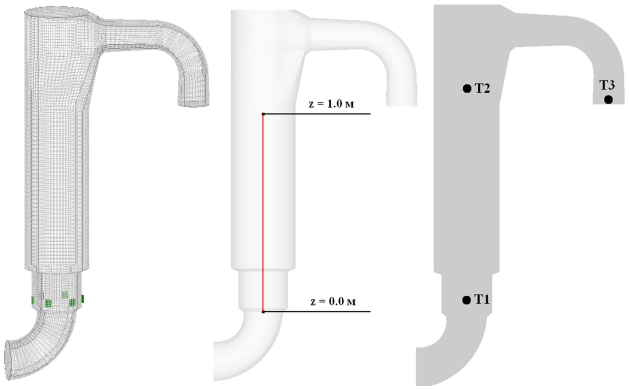
потоку излучения на боковую стенку цилиндра. Решение, полученное с использованием P1 приближения для первого «серого» газа WSGG модели и МКО для остальных, практически совпадает с решением, использующим только МКО, и результатами, представленными в работе Yu M.J. (Рис. 4б). Когда на основе P1 приближения рассчитывается поле излучения для двух первых «серых» газов, наблюдаются отклонения вблизи торцов цилиндра (Рис. 4б), то есть для второго «серого» газа среда не является достаточно оптически толстой.

Таким образом, для данной задачи удалось сократить время, затрачиваемое на расчет поля излучения, примерно на 25% без потери точности решения.

Горелочное устройство для сжигания анодных газов

Комбинированный подход применялся при моделировании работы реального технологического оборудования, и в первом таком примере рассматривается горелочное устройство (Рис. 5), предназначенное для сжигания анодного газа электролизного производства. Анодные газы, выделяющиеся в процессе электролизного производства алюминия, состоят в основном из CO и CO_2. В горелочное устройство анодные горючие газы поступают снизу, а воздух – через боковые щели из окружающей среды [10]. Расчетная сетка для горелочного устройства состояла из 50000 контрольных объемов.

Необходимость использования спектральных моделей коэффициента поглощения связана с существенным занижением температуры при использовании приближения «серого» газа (Рис. 6б, Рис. 7а). Использование WSGG модели для коэффициента поглощения привело к увеличению времени расчета, практически пропорционально числу «серых» газов в модели. При



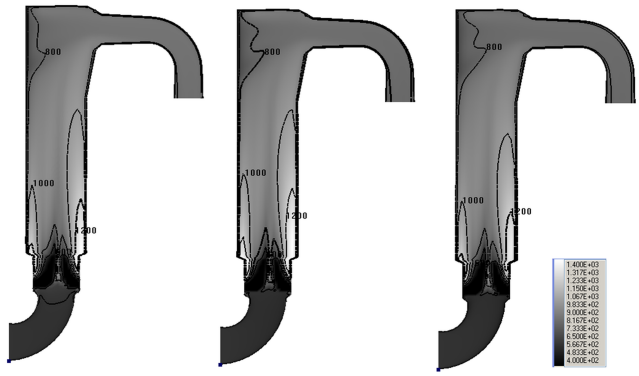
а) б) в)

Рисунок 5. Горелочное устройство: а) сетка; б) геометрия; в) точки экспериментальных замеров температуры.

совместном использовании МКО и P_1 приближения для одного «серого» газа, в данной задаче наблюдаются отличия от варианта с использованием только МКО в зоне смешения холодного воздуха с анодным газом (Рис. 6а,б, Рис. 7б). В этой области средняя температура по сравнению с расчетом, использующим только МКО, снижается на 80 ^{0}C. Это связано с тем, что в этой зоне высокотемпературная излучающая область имеет малый характерный размер, и, таким образом, несмотря на высокое значение коэффициента поглощения для первого «серого» газа в WSGG модели, среда для P_1 приближения не является достаточно оптически толстой. Но поскольку данная область горения достаточно мала, то выше зоны смешения различия по температуре не столь велики, не более 20 ^{0}C (Рис. 6, Рис. 6а).

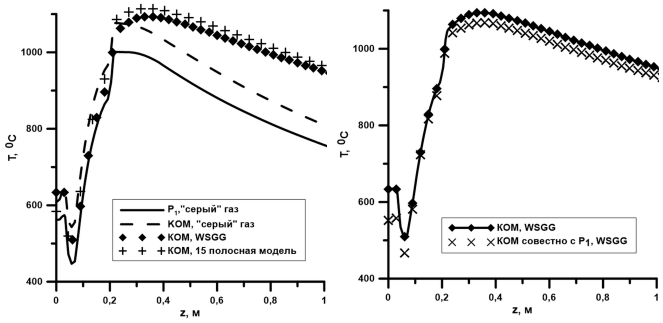
Таким образом, совместное использование МКО и P1 приближения (даже для одного «серого» газа) в данной задаче может влиять на результаты численного моделирования горения в области смешения.

Кроме этого для горелочного устройства было проведено сравнение 15-ти полосной модели, созданной на основе данных базы HITRAN, и WSGG модели коэффициента поглощения. Рассчитанные поля температур с использованием 15-ти полосной и WSGG моделей оказались близки, разница в среднем составляет величину порядка 10^0C (Рис. 6, Рис. 7а). Основные отличия наблюдаются вблизи входа в горелку, в этой области тепловые потери излучением с 15-тью полосной моделью выше. Это связано с тем, что в WSGG модели коэффициент поглощения рассчитывается по концентрациям CO_2 и H_2O, таким образом, не учитывается наличие большого количества CO в анодном газе, что приводит к занижению коэффициента поглощения и, в конечном счете, немного большей средней температуре в горелке по сравнению с полосной моделью.



а) б) в)

Рисунок 6. Поле температуры в вертикальном сечении, ^{0}C: а) МКО, WSGG; б) МКО, 15-ти полосная модель; в) МКО совместно с P1, WSGG.



а) б)

Рисунок 7. Распределение усредненной по сечению горелки температуры вдоль оси z: а) для различных методов решения УПИ и моделей коэффициента поглощения; б) для КОМ и КОМ совместно с P1 приближением для первого «серого» газа в WSGG модели.

В Таблице 1 приведены результаты сравнения данных натурных измерений (Рис. 7в) с данными расчетов с использованием различных моделей коэффициента поглощения.

В целом видно, что использование не «серых» моделей коэффициента поглощения при расчете горелочного устройства позволяет получать уровень температур, соответствующий данным измерений. Расхождения в температурных диапазонах в эксперименте и расчетах связаны с тем, что расчет не охватывает всех режимов работы горелки, так, например, при увеличении общего расхода на 15% температура в среднем вырастает на 20-30^{0}C. Наибольшее расхождение с данными измерений наблюдается в точке замеров 1 (Рис. 5в), что связано с особенностью проведения замеров в данной точке, которая обусловлена сильной неравномерностью поля температур и скоро-

стей по сечению горелки. Так как высокая температура наблюдается по центру горелочного устройства, которая в первую очередь отслеживается при проведении серии точечных замеров, то полученная средняя температура при измерении получается выше истинной средней температуры. В случае же использования приближения «серого» газа температура в горелочном устройстве существенно ниже по сравнению с данными измерений.

Таблица 1. Сравнение рассчитанных и осредненных по горизонтальному сечению температур (^{0}C) с данными натурных измерений в точках замеров.

Точки замеров	WSGG модель	15-ти полосная модель	Приближение «серого» газа	Данные натурных измерений
1	900-950	840-880	900-950	870-945
2	800-900	790-890	640-700	780-990
3	670-750	660-740	500-550	620-845

Газовый котел

В данной задаче рассматривается газовый котел мощностью 250 МВт [12]. Расчетная сетка состоит из 160 000 контрольных объемов (Рис. 8).

При использовании приближения «серого» газа УПИ рассчитывалось двумя методами: МКО и P_1 приближением. В случае P_1 приближения температура в ядре горения и в области выше мест подачи воздуха немного больше, чем при использовании МКО, но ближе к выходу из топочной камеры разница в температуре уменьшается (Рис. 9б). Единственное существенное отличие наблюдается в нижней части топки, в которую поступает воздух, вследствие чего среда там оптически прозрачная и P_1 приближение работает не корректно.

При использовании WSGG модели [8], отличия не столь сильные, по сравнению с предыдущим примером (Рис. 7), но и в данном случае учет селективности среды приводит к росту температуры в топочной камере и изменению распределения поля температур по сравнению с приближением «серого» газа, наиболее заметно падение температуры в нижней части топки и рост температуры в ядре горения при использовании WSGG модели по сравнению с приближением «серого» газа (Рис. 9). При анализе распределения усреднённой по горизонтальному сечению температуры по высоте топки видно, что использование модели «серого» газа приводит к занижению усредненной температуры максимально на 100 ^{0}C для МКО и на 140 ^{0}C для P_1 приближения (Рис. 9б) по сравнению с WSGG моделью. Результаты анализа расчетов показывают необходимость учета селективности излучения для моделирования газовой топки.

Совместное использование МКО и P_1 приближения с WSGG моделью коэффициента поглощения (для первого «серого» газа) позволяет полу-

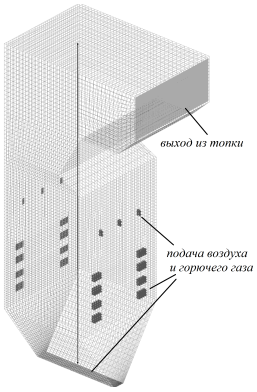
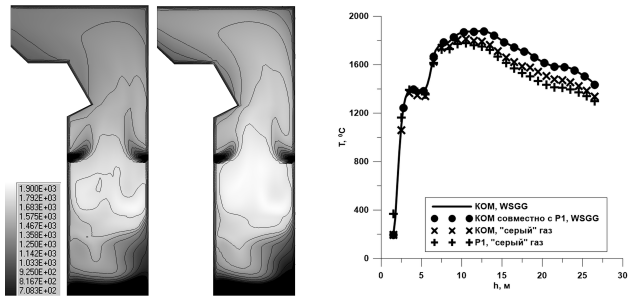


Рисунок 8. Газовый котел. Геометрия и сетка.



а) б)

Рисунок 9. Газовый котел. Результаты численного моделирования: а) поле температур: слева – модель «серого» газа, P_1 приближение; справа – WSGG модель, КОМ; б) Распределение усредненной по сечению температуры вдоль оси z для различных методов решения УПИ и моделей коэффициента поглощения.

чить практически идентичное решение, как при использовании только МКО (Рис. 9б). Такой результат связан как с наличием существенных концентраций излучающих газов (смесь H^2O и CO^2 – до 30%), так и с большими геометрическими размерами топочной камеры (в отличие от предыдущей задачи с горелочным устройством).

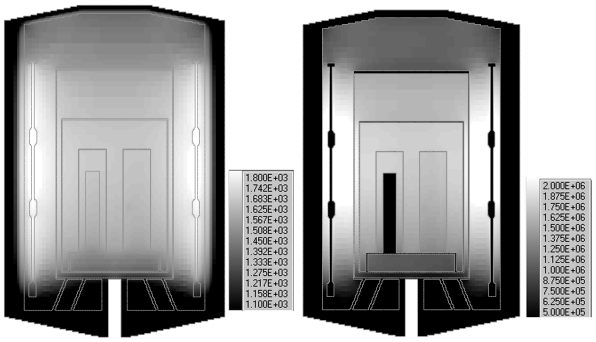
Использования схемы «бегущего счета» для МКО на неструтурированных сетках

Для математического моделирования геометрически сложных технологических устройств в «SigmaFlow» используются неструктурированные сетки как созданные на основе собственного генератора сеток, так и импортированные из сторонних программ. Для решения УПИ в подобных задач со

сложной геометрией был реализован МКО для неструктурированных сеток. Кроме этого была реализована поддержка многопоточных вычислений на основе пространственной декомпозиции расчетной области. Особенности реализации МКО представлены на примере решения задачи моделирования сопряженного теплообмена в вакуумной электропечи сопротивления.

Оптимизация математической модели расчета переноса излучения для вакуумной электропечи.

Вакуумная электропечь сопротивления представляет собой объект с объемом рабочего пространства 14,7 м^3, имеющий омические нагревательные элементы в (виде набора колон), футеровку и внутреннюю оснастку, выполненные из углеродных материалов. Внутри печи помещены две реторты – внешняя и внутренняя (Рис. 10).



а) б)

Рисунок 10. Теплообмен в вакуумной электропечи сопротивления (сетка $5 \cdot 10^6$ ячеек): а) поле температур, К; б) поле плотности потока излучения, Вт/м^2.

Внутри меньшей реторты происходит основной технологический процесс. Характерное время цикла работы печи составляет несколько суток, максимальная температура нагрева внутри рабочей области составляет около 1800 ^{0}C. Давление в печи поддерживается на уровне нескольких сотен Па. Механизм переноса тепла излучением в электропечи является доминирующим. Основные проблемы при моделировании теплообмена в данной печи связаны с длительностью технологического процесса и разномасштабностью элементов (от нескольких миллиметров до метров), которые приводят к длительным временам счета в виду необходимости решения задача на персональных компьютерах, а не на мощных вычислительных кластерах.

При численном моделировании задачи работы электропечи основное время тратится на расчет поля излучения, поэтому для уменьшения временных затрат в первую очередь была проведена оптимизация математической модели переноса излучения, основанной на использовании МКО.

Во-первых, для сокращения времени расчета была реализована FTn модификация МКО для углового разбиения телесного пространства, которая позволяет обеспечить более равномерное разбиение телесного пространства, по сравнению со стандартным подходом (Рис. 1а), основанным на равномерной дискретизации по сферическим углам (Рис. 11) [13]. FTn модификация МКО позволяет использовать меньшее количество дискретных телесных углов по сравнению со стандартным угловым разбиением. В данной задаче это позволило перейти от разбиения углового пространства на 32 дискретных телесных угла к 24 без значимого изменения расчетного поля излучения.

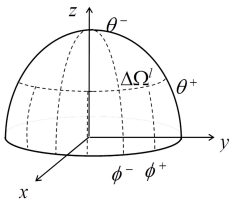


Рисунок 11. Дискретизация телесного пространства для FTn модификации МКО

Далее в рамках решения задачи было проведено сравнение методов решения СЛАУ, реализованных в «SigmaFlow» для решения задач гидродинамики и теплообмена, таких как метод неполной LU-факторизации (DILU), стабилизированным метод бисопряженных градиентов (BiCGSTAB), метод сопряженных градиентов (CG) и схемы «бегущего счета», реализованной для нестуктурированных сеток [6], [15] [16]. Данное сравнение включало в себя и многопоточные вычисления на основе пространственной декомпозиции расчетной области.

Процесс построения неструктурированной сетки с использованием собственного генератора сеток «SigmaFlow» основан на предварительном восьмеричном разбиении пространства геометрии с различной детализацией расчетной области (согласно геометрии) – построение октодерева. Итоговая сетка строится на основе построенного октодерева путем проецирования вершин предварительной сетки на границы объекта и формирования ячеек, связывающих области с различной дискретизацией (переходные области). В результате формируется неструктурированная гибридная сетка, включающая в себе шестигранные (в основном) и четырех- и пятигранные контрольные объемы (в переходных областях и на границах объекта). При корректном построение сетки на основе данного подхода все контрольные объемы (ячейки) получаются выпуклыми, что позволяет найти эффективную схему обхода для «бегущего счета». Эффективная схема обхода предполагает, что при условии равенства степени черноты для всех границ единице и отсутствии рассеивания, поле излучения рассчитывается за один проход. Тестовые расчеты показали, что при условии реализации эффективной схе-

мы обхода максимальное превосходство во времени счета над стандартными методами решения СЛАУ, реализованными в «SigmaFlow», достигает 11 раз в условиях оптически тонкой среды. Кроме этого оказалось, что метод BiCGSTAB и другие методы крыловского типа (CRES, CG) могут не находить решения СЛАУ с нулевой правой частью, т.е. когда среда является оптически прозрачной, поэтому для расчетов переноса излучения в электропечи схема «бегущего счета» сравнивалась с DILU [7].Отрицательной особенностью схемы «бегущего счета» является то, что для геометрически сложных объектов, при использовании процедуры уменьшения ошибки, связанной с угловым перекрытием, и для многопоточных вычислений, основанных на пространственной декомпозиции, она становится итерационной и ее эффективность падает. Численное моделирование сопряженного теплообмена в электропечи является задачей, в которой данные условия выполняются.

Проведенные расчеты поля излучения для электропечи показали, что схема «бегущего счета» обеспечивает ускорение расчета поля излучения примерно в 5,5 раз по сравнению с DILU для однопоточного расчета. При использовании многопоточных расчетов данное соотношение изменяется и может как уменьшаться, так и увеличиваться. Это связано с тем, что в расчете присутствуют твердые тела, в которых при использовании схемы «бегущего счета» расчет не ведется, и поэтому эффективность многопоточных вычислений сильно зависит от декомпозиции расчетной области, т.е. насколько равномерно распределена по потокам газовая область. Это хорошо видно, если сравнить расчеты, в которых поле излучение рассчитывается во всей расчетной области, с расчетами, в которых оно рассчитывается только в части расчетной области. Если расчетная область является полностью проницаемой для излучения, то коэффициент эффективности многопоточных вычислений близок к единице, но в данной задаче с твердыми телами его значение существенно ниже единицы и заметно варьируется в зависимости от «качества» разбиения. Так при декомпозиции на 2-6 частей значение коэффициент эффективности изменяется от 0,57 до 0,62.

Заключение

Реализованные методы решения УПИ в комплексе программ «SigmaFlow» продемонстрировали возможность ихиспользования для прикладных задач. Анализ полученных результатов показывает, что представленные подходы можно в дальнейшем развивать для повышения их эффективности. Это касается: возможности расширения совместного применения P_1 приближения и МКО, когда выделяются не только различные «серые» среды, но и используется возможность пространственного разделения; создания более сложного разбиения углового пространства; разработки более эффективных алгоритмов пространственной декомпозиции для задач с сопряженным теплообменом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки на-

учной и научно-технической деятельности» в рамках научного проекта № 17-41-240475

Список литературы

1. Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Минаков А.В.: Современные возможности CFD кода SigmaFlow для решения теплофизических задач. Сборник статей. Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. № 2(4). стр. 117-122.(2010)
2. Litvintsev K. Yu., Dekterev A. A.: Comparison of the Finite-Volume and Discrete-Ordinate Methods and Diffusion Approximation for the Radiative Heat Transfer Equation. Heat Transfer Research. Volume 39. pp. 653-655. (2008)
3. Raithby G.D., Chui E.H.: A Finite-Volume Method for Predicting a Radiant Heat Trans-fer Enclosures with Participating Media. Journal of Heat Transfer. Vol. 11. pp. 415–423. (1990)
4. Chai J.C., and Patankar S.V.: Finite-Volume Method for Radiation Heat Transfer. Advances in Numerical Heat Transfer. Vol. 2. Chapter 4, Taylor & Francis, pp. 109 – 138.(2000)
5. Gordon I.E., Rothman L.S., Hill C. et al.: The HITRAN2016 Molecular Spectroscopic Database. J Quant Spectrosc Radiat Transfer. Vol. 203. pp. 3 – 69. (2017)
6. Литвинцев К.Ю.: Использование метода конечных объемов для решения уравнения переноса теплового излучения в трехмерных задачах. Вычислительные технологии. Т. 19. № 5. стр. 37-50. (2014)
7. Литвинцев К.Ю., Филимонов С.А.: Использование схемы “бегущего счета” для решения СЛАУ, полученных на основе метода конечных объемов для уравнения теплового переноса излучения. Вычислительные технологии. Т. 22. № 4. стр. 69-79. (2017)
8. Smith T.F., Shenand Z.F,., and Friedman, J.N.: Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model. Journal of Heat Transfer. 104. pp. 602-608. (1984)
9. Yu M.J., Baek S.W. and Park J.H.: An extension of the weighted sum of fray gases non-gray gas radiation model to a two phase mixture of non-gray gas with particles. Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 43. pp. 1699–1713. (2000)
10. Литвинцев К.Ю., Дектерев А. А., Необъявляющий П.А.: Моделирование радиационного теплопереноса в горелочном устройстве по дожиганию анодных газов. Тепловые процессы в технике. Т. 5. № 8. С.354-360. (2013)
11. Необъявляющий П.А., Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Сторожев Ю.И.: Расчетно-экспериментальное исследование горелочного устройства по дожиганию анодного газа. Теплофизика и аэромеханика. Т. 14. № 1. стр. 151-160. (2007)
12. Гроо А.А., Бойков Д.В., Дектерев А.А.: Расчетное исследование вариантов реконструкции котла ТП-92 Яйвинской ГРЭС. Сборник докладов VI Всероссийской конференции «Горение твердого топлива». Т. 1. стр. 147-155. Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск. (2001)
13. Kim SH, Huh KY.: A new angular discretization scheme of the finite volume method for 3-D radiative heat transfer in absorbing, emitting and anisotropically scattering media. Int J Heat Mass Transfer. Volume 43, Issue 7. Pages 1233-1242. (2000)

14. Barrett R., Berry M. W., Chan T. F. et al.: Templates for the Solution of Linear Systems: Building Blocks for Iterative Methods (SIAM, Philadelphia, 1994)
15. VanderVorst H.A.: Bi-CGSTAB: a fast and smoothly converging variant of Bi-CG for solution of non-symmetric linear systems. SIAM J. Sci. Stat. Comp. 2. pp. 631-644. (1992)

Комплекс некоммерческих программ «SigmaFlow» для решения задач гидродинамики, тепломасообмена и горения

К. Литвинцев, А. Гаврилов, А. Дектерев, С. Филимонов, Е. Харламов и А. Сентябов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Красноярск, Россия
Сибирский Федеральный Университет,
Красноярск, Россия
sttupick@yandex.ru

Аннотация «SigmaFlow» – это некоммерческий комплекс программ для решения широкого класса задач гидродинамики, тепломасообмена и горения, развиваемый специалистами Красноярского филиала Института теплофизики СО РАН и кафедры Теплофизики Сибирского федерального университета. Комплекс программ «SigmaFlow» позволяет моделировать: стационарные и нестационарные, ламинарные и турбулентные течения; неньютоновские жидкости; процессы смешения и диффузии неоднородных газовых смесей; химические реакции в потоке, горение газообразного, жидкого и твердого топлива; конвективный и сопряженный теплообмен, теплопроводность; перенос излучения; движение дисперсной фазы в потоке газа; процессы с фазовыми переходами; течения со свободной поверхностью; течения газа и жидкости с подвижными твердыми телами. Кроме этого «SigmaFlow» имеет собственные инструменты для построения и импорта сетки и для анализа результатов численного моделирования.

Ключевые слова: Программный комплекс, численное моделирование, параллельные вычисления

Введение

Комплекс программ «SigmaFlow» – это универсальный некоммерческий программный продукт для решения широкого класса задач гидродинамики, тепломасообмена и горения, развиваемый специалистами Красноярского филиала Института теплофизики СО РАН и кафедры Теплофизики Сибирского федерального университета. «SigmaFlow» является развитием программы «AeroChem», разработка которой началась в 1993 году. Специализированные версии программы используются рядом научно-исследовательских и проектных организаций и в учебном процессе. Развитие программы происходит в рамках выполнения проектов по грантам и договорам на выполнение НИР.

В комплексе программ «SigmaFlow» были реализованы математические модели, которые позволяют моделировать: стационарные и нестационарные, ламинарные и турбулентные течения; неньютоновские жидкости; процессы смешения и диффузии неоднородных газовых смесей; химические реакции в потоке, горение газообразного, жидкого и твердого топлива; конвективный и сопряженный теплообмен, теплопроводность; перенос излучения; движение дисперсной фазы в потоке газа; процессы с фазовыми переходами; течения со свободной поверхностью; течения газа и жидкости с подвижными твердыми телами [1],[2],[3],[4].Реализация численных моделей основана на современных методах вычислительной гидродинамики несжимаемой жидкости. Для дискретизации уравнений гидродинамики применяется широко известный метод контрольного объема [5], в котором расчетная область разбита на непересекающиеся объемные многогранники – контрольные объемы или ячейки. Численный метод основан на использовании неструктурированных сеток, согласованных с границами расчетной области. Для связывания полей скорости и давления применяется SIMPLE-подобный алгоритм. Получаемые в результате дискретизации системы линейных уравнений решаются с помощью таких методов, как методы неполной факторизации, вариационные методы и многосеточные методы [6], [7]. «SigmaFlow» содержит программный модуль, позволяющий формировать геометрию расчетной области или импортировать ее из сторонних CAD систем, создавать расчетные сетки (многоблочные структурированные на основе гекса ячеек и неструктурированные на основе окто разбиения) или импортировать готовые. Кроме этого существует развитый программный модуль анализ результатов численного моделирования с использованием средств инженерной графики. Программа позволяет выполнять высокопроизводительные параллельные вычисления, в том числе для ряда задач в гетерогенных кластерных системах (CPU+GPU), под управлением Windows или Linux операционных систем. В настоящее время в «SigmaFlow» появились новые возможности, обусловленные: развитием инструментов построения расчетной сетки; развитием математических моделей дисперсных сред; развитием версии программы для расчета на GPU кластерных системах; возможностью передачи геометрии расчетной области из сторонних CAD программ и построению на ее основе расчетной сетки; развитием возможностей моделирования двухфазных ламинарных и турбулентных течений, сопряженного и радиационного теплообмена; разработкой методов гибридного моделирования CFD-гидравлические сети. На основе программного ядра «SigmaFlow» были созданы свободно распространяемая версия программы «SigmaFW» и специализированные программы для расчета: угольных топочных камер, химического реактора, развития пожаров в здании, течения буровых растворов [8], [9].

Построение сетки на основе окто разбиения

При создании сеток для относительно геометрически простых объектов в «SigmaFlow» используется собственный построитель геометрии расчетной области, на основе результатов работы которого строится блочно-структурированная сетка. Однако, строить сетки для геометрически сложных объектов с криволинейными поверхностями с использованием блочно-структурированного подхода достаточно сложно. Поэтому в рамках «SigmaFlow» развивается подход, предпологающий использование неструктурированных сеток. В этом случае дискретизация расчетной области проводится на базе сторонней (импортируемой) геометрии (Рис. 1).

Первый шаг в создании расчетной сетки – это подготовка геометрии расчетной области на основе обработки импортируемой геометрии. Области для построения сетки определяются замкнутыми поверхностями, которые импортируются из файлов в *stl* формате, предварительно подготовленных во внешних CAD программах. При создании сетки для задач, в которых необходимо выделение нескольких областей с различными свойствами, предусмотрена возможность импорта нескольких *stl* файлов, каждый из которых будет характеризовать свою геометрическую область. Поскольку формат файлов *stl* не позволяет группировать и маркировать геометрические элементы объекта (границы или замкнутые области) в интерфейсе пользователя предоставлена возможность задавать уникальные номера набору граней, а также ассоциировать набор границ с выделенной областью. Данная маркировка позволяет в последствии задавать необходимую детализацию сетки в выбранных областях, а также модифицировать готовую сетку, например, добавляя пристеночные слои на нужной границе. Следующим этапом после подготовки геометрии является предварительное разбиение сетки. Процесс генерации сетки основан на восьмеричном разбиении пространства геометрии (окто разбиение). Сначала на основе размеров геометрического объекта строится один пространственный элемент (куб), в которой заключен объект. Этот элемент в свою очередь, разбивается на восемь элементов (кубов) и далее процесс повторяется для каждого элемента. Момент, на котором получен первый элемент будет соответствовать первому уровню разбиения, Восемь элементов, получившихся в процессе разбиения первого элемента соответствуют второму уровню и т.д. Выбирая части для последующего разбиения и момент прекращения разбиения для элемента, можно добиться нужной детализации будущей сетки в необходимых областях геометрического объекта. В процессе выполнения разбиения соблюдается правило, при котором число соседей с каждой стороны элемента не должно быть больше четырех.

В процессе разбиения элементы делятся на три группы: выходящие за границу объекта, располагающиеся внутри объекта и пересекаемые внешними и внутренними границами объекта. Элементы, выходящие за границу, в генерации итоговой сетки не участвуют. На основе получившегося пространственного распределения элементов далее строится конечная сетка.

Итоговая сетка строится на основе распределения элементов, полученных на предыдущем шаге. При этом вершины итоговой сетки совпадают

с вершинами элементов предварительного разбиения. Для вершин сетки, которые принадлежат элементам, проходящим через границы объекта, выполняется процедура проецирования на границы объекта.

В результате формируется неструктурированная гибридная сетка, включающая в себе шестигранные кубические ячейки в основном внутри области объекта и многогранные элементы (пирамиды призмы тетраэдры), находящиеся в переходных областях (где соседние элементы предварительного разбиения имеют разную глубину разбиения) и на границах объекта (Рис. 1). В сетки, создаваемые для расчета задач сопряженного теплообмена, которые содержат несколько областей для твердых тел и газа (жидкости), также добавляются призматические слои на границу радела между ними.

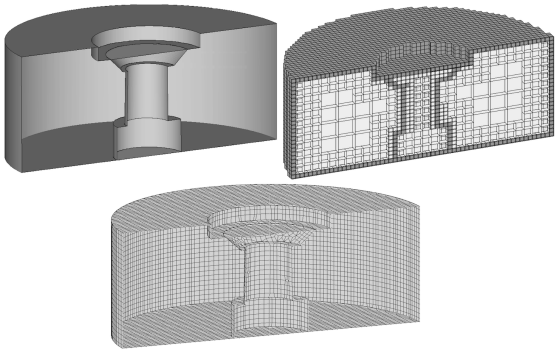


Рисунок 1. Создание из CAD геометрии предварительного разбиения расчетной области и переход к построению итоговой сетки.

Основные проблемы при построении сетки на основе окто разбиения связаны с проецированием вершин предварительных ячеек на границы, когда могут появляться «плохие» ячейки, например, вырожденные ячейки. На данный момент основная работа ведется в направлении минимизации появления подобных ячеек, алгоритмов их обнаружения и исправления. Кроме этого, необходимо заметить, что на итоговое качество сетки влияет качество, импортируемой геометрии, в частности размер полигонов.

Гетерогенные (CPU/GPU) параллельные вычисления.

Моделирование физических явлений и технологических процессов требует постоянного роста производительности вычислительных машин. В последнее время производительность графических процессоров возросла настолько, что они стали привлекательны для научного и инженерного моделирования. Как результат, появились технологии неграфических расчетов на графических процессорах – GPGPU (General-Purpose computation on

GPUs). На базе «SigmaFlow» ведется разработка версии программы, позволяющей использовать для расчетов гибридные CPU/GPU системы [10]. В GPU-версии кода все основные операции по обработке расчётных данных выполнялись на графическом процессоре: расчёт градиентов полей скорости и давления, дискретизация уравнения движения и уравнения на поправку давления, решение систем линейных уравнений и корректирующие операции процедуры SIMPLE. Для их реализации использовалась архитектура CUDA (Compute Unified Device Architecture) поколения 2.0. В подавляющем большинстве реализованных CUDA-ядер требуется выполнить некую операцию над каждым узлом или гранью сетки, оперируя значениями с соседних с ним/ней узлов. Таким образом, структуру подобных ядер можно описать следующим образом. Имеется массив размера, равного количеству контрольных объемов или граней сетки. Для каждого элемента необходимо прочитать значения из этого же массива по известным индексам и подать их на вход некой функции, которая выполняется в отдельной нити CUDA на GPU ядре. Так же, как и в CPU-версии, использовалась декомпозиция расчётной области – в этом случае роль ядра CPU, на котором выполняется отдельный поток, играет весь графический процессор. Таким образом, осуществляется разбиение задачи между несколькими GPU. GPU-ветка программного комплекса позволяет проводить расчеты стационарного и нестационарного ламинарного и турбулентного течения несжимаемой жидкости. При расчете турбулентности используются RANS модели турбулентности ($k-\omega$, $k-\omega$ SST), вариант метода моделирования крупных вихрей LES WALE, а также гибридные методы DES и DDES на основе модели $k-\omega$ SST. При моделировании течения вблизи стенки могут использоваться как пристеночные функции, так и разрешение пограничного слоя до стенки. Тестовые расчеты показывают соответствие результатов на GPU экспериментальным данным и результатам других расчетов для различных задач: стационарное ламинарное течение, нестационарное ламинарное течение, турбулентное течение в каверне и турбулентное течение в части проточного тракта гидротурбины [10]. Для обеспечения высокой производительности все необходимые поля хранились в памяти графического ускорителя и все операции алгоритма SIMPLEC выполнялись так же на GPU. Результаты расчетов показали высокую производительность графических ускорителей. Современные GPU позволяют увеличить производительность расчётов задач вычислительной гидродинамики в $2-3$ раза по сравнению с современными 6-ядерными CPU. Кроме этого, необходимо отметить, что мощные пользовательские графические ускорители показывают близкие результаты по сравнению с профессиональными для вычислений с одинарной точностью (Рис. 2), что позволяет строить существенно более дешевые гибридные вычислительные кластеры . Ограничения на объём памяти на одном графическом процессоре можно обойти использованием параллельных вычислений с разделением задачи между несколькими GPU.

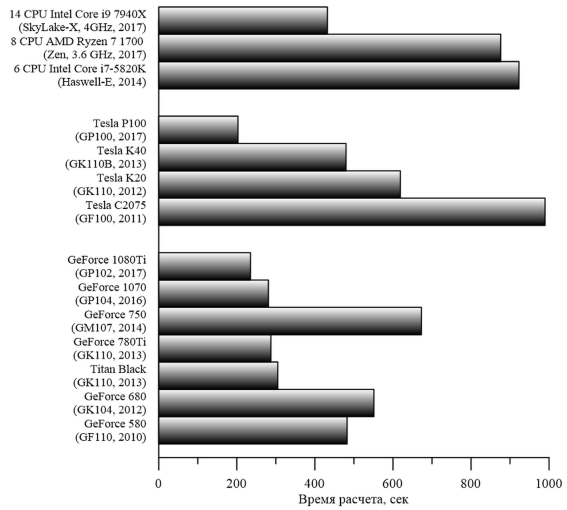


Рисунок 2. Результаты расчета для задачи обтекания цилиндра [11]. Сетка: 1,5 млн. ячеек, одинарная точность.

Двухфазные течения

Разрабатываются модели для расчета течений с дисперсной фазой: кавитирующих течений, течений с мелкодисперсной примесью частиц и капель и течений высококонцентрированных суспензий. Данные течения моделируются с использованием вариантов диффузионно-инерционной модели движения частиц [12], [13], которая является упрощением двухжидкостной модели дисперсных потоков. В этом случае уравнения переноса дисперсной фазы в предположении малости отклонений скоростей частиц от скорости несущей фазы редуцируется к одному уравнению диффузионного типа для концентрации примеси. Диффузионно-инерционная модель позволяет провести расчет распространения примеси в турбулентных потоках с учетом турбулентной диффузии частиц и миграции в результате турбофореза, действия массовых сил и инерционных эффектов, обусловленных отклонением траекторий частиц от линий тока газа при их искривлении и из-за нестационарности потока.

В работе [14] было произведено исследование предсказательной силы траекторного подхода и инерционно-диффузионной модели на ряде задач о дисперсных двухфазных турбулентых течений. Показано преимущество эйлерова подхода для численного моделирования турбулентных течений с мелкодисперсными частицами.

Проводились численные исследования кавитационных турбулентных течений. Сравнение численных результатов с данными эксперимента о кавитационном обтекании гидропрофиля NACA0015 показывают, что уже в случае небольшой паровой каверны аккуратное описание присоединения потока за

ней требует привлечения метода замыкания второго порядка – дифференциальной модели переноса рейнольдсовых напряжений [15]. Моделирование с помощью вихреразрешающих методов предсказывает низкочастотную периодическую динамику паровой каверны (Рис. 3, 4).

Для исследований ламинарных течений высококонцентрированных суспензий предложена модель на основе модели смеси с учётом межфазного скольжения и межчастичными взаимодействиями [16]. Сопоставление численных результатов с экспериментальными данными демонстрирует хорошую предсказательную способность модели, как в отношении распределенных полевых величин, так и в отношении интегральных параметров.

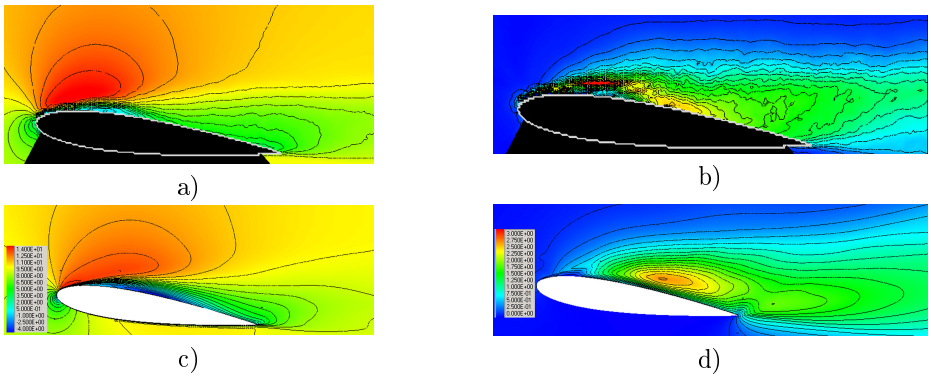


Рисунок 3. Кавитационное обтекание гидропрофиля NACA0015. Среднее значение продольной компоненты скорости и ее пульсаций: а) поле средней скорость, эксперимент (PIV); б) поле пульсаций скорости, эксперимент (PIV); в)поле средней скорость, расчет (DES); г)поле пульсаций скорости, расчет (DES).

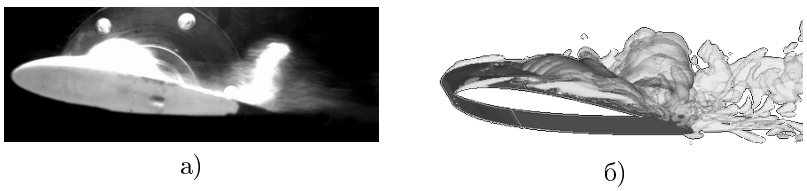


Рисунок 4. Кавитационное обтекание гидропрофиля NACA0015. Область образования пара: а) эксперимент; б) расчет.

Гибридный метод решения пространственно-сетевых задач.

Гибридный метод, основанный на совместном использовании методов вычислительной гидродинамики и теории гидравлических сетей, используется

при решении задач, содержащих существенно протяженные (сетевые) и пространственные элементы. В представленном гибридном методе связь между различными частями модели (сетевой и пространственной) осуществляется за счёт построения единого уравнения для расчёта поля давления. Такой подход обеспечивает высокую сходимость по сравнению с традиционными методами решения гибридных задач, предполагающими раздельное решение пространственной и сетевой частей [17].

В данном гибридном методе исходная задача разбивается на пространственную и сетевую части, взаимодействие между которыми осуществляется на основе решения общего уравнения на поправку давления. Взаимосвязь поля скорости и давления в пространственной и сетевой части осуществлялся при помощи SIMPLE-подобной процедуры. Механизм объединения двух частей задачи осуществляется при помощи стыковочных ветвей (Рис. 5).

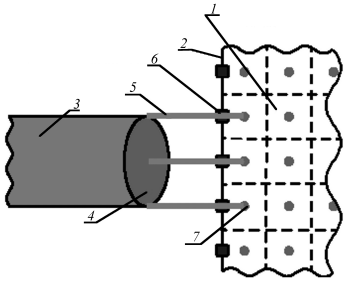


Рисунок 5. Механизм объединения двух частей задачи: 1 – пространственная часть задачи, 2 – граница пространственной области, 3 и 4 – ветвь и узел сетевой части задачи, 5 – стыковочная ветвь, 6 – стыковочная грань, 7 – стыковочный контрольный объем.

После расчёта уравнений сохранения импульса для разных частей задачи, проводим процедуру связи расходов через граничную ветвь 3 и входную границу пространственной области 2. Для этого от стыковочного узла 4 в каждый граничный контрольный объем пространственной области 7 строится стыковочная ветвь 5 (Рис. 5). Особенность данных ветвей в том, что значение расхода на них не рассчитывается, а задается путем интерполяции известных расходов на границе, однако в уравнениях на поправку давления и в уравнении сохранения энергии стыковочная ветвь участвует как обычна ветвь сети.

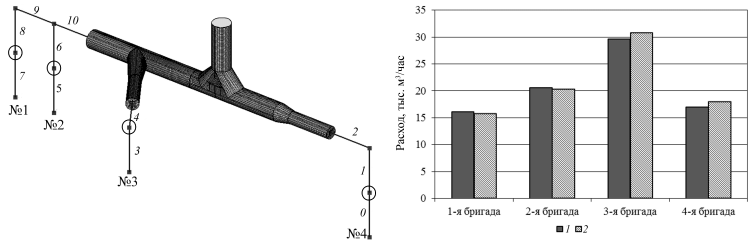
Такой подход позволяет сохранить профиль скорости на границе пространственной области, что исключает из результатов решения потерю давления на восстановление формы потока после ударного профиля. Полученный в стыковочной ветви расход переходит в правую часть уравнения на поправку давления как для стыковочного узла, так и для каждого гранич-

ного контрольного объёма. После решения уравнений на поправку давления на стыковочных гранях задаётся среднее значение поправки давления.

В качестве примера работы гибридного метода представлена численное моделирование узла сбора анодных газов от одного из корпусов Красноярского алюминиевого завода. Основной целью работы было определение возможности регулирования расходов от каждой бригады корпуса, исходя из заданного диапазона расхода от одной электролизной ванны. Электролизные ванны в корпусе разделены на четыре бригады. На каждую бригаду приходится разное количество ванн (от 20 до 24). Выравнивание расходов осуществлялось с помощью регулирующих заслонок.

Главной особенностью данного выносного газохода является наличие центрального сборного коллектора (пространственная часть представлена на Рис. 3а), потери давления в котором составляют примерно половину от общей потери давления в исследуемой части системы. Размер расчётной сетки для построения полностью пространственной модели всего корпуса будет слишком велик, так как длины некоторых участков больше 100 м. В то же время, при построении полностью сетевой модели необходимо определить гидравлическое сопротивление коллектора для разных режимов его работы, что является достаточно трудоемкой задачей. При использовании гибридного метода протяженные элементы были представлены в виде сети, сборный коллектор в виде пространственного элемента (Рис. 6а), что позволило минимизировать требуемые вычислительные ресурсы с корректным учетом сопротивления, вносимым пространственным элементом – сборным коллектором.

Для определения текущего состояния системы, а также корректного задания параметров и верификации гибридной модели, был проведен ряд замеров на выходе выносных газоходов бригад из-под корпуса. Точки замеров указаны на рисунке 6а.



а) б)

Рисунок 6. Пример построения гибридной модели для системы выносных газоходов электролизного корпуса: а) расчетная область, №1 - 4 номера бригад, 0 –10 номера ветвей сети, кругом выделены точки замеров б) сравнение расчётных расходов по бригадам с данными замеров: 1 – данные измерений, 2 - результаты расчёта.

На рисунке 6б показано сравнение рассчитанных и измерениных расходов. Максимальное отклонение наблюдается для четвертой бригады и составляет примерно 6%, что меньше погрешности средств измерения объемного расхода газов, которая составляет ±10%.

Специализированные программные комплексы

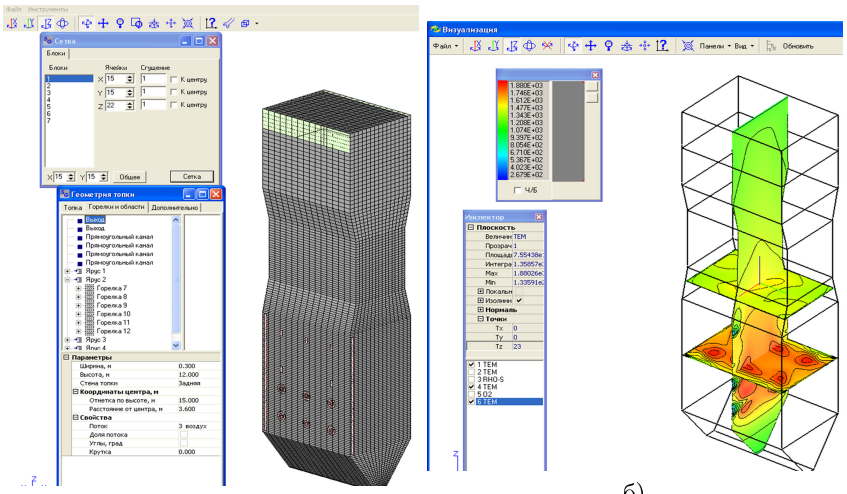
Комплекс программ «SigmaFlow» используется не только для решения исследовательских и прикладных задач, но и для создания специализированных программных комплексов как для отдельных предприятий, так и для отраслей промышленности. При создании специализированных расчетных программ, как правило, требуется разработка новых или совершенствование существующих математических моделей, разработка новых инструментов описания задачи и анализа результатов расчета. Полученные таким образом наработки могут входить в состав «SigmaFlow». За время существования программы «SigmaFlow».на ее базе был создан ряд специализированных программных комплексов, часть из которых представлена далее.

Программный комплекс «SigmaFlame».

Специализированная программа «SigmaFlame» была разработана для моделирования процессов в топочных камерах пылеугольных котельных агрегатов и использования ее инженерами, технологами и проектировщиками в угольной энергетике. Разработанная комплексная математическая модель физико-химических процессов в топочных камерах котельных агрегатов включает подмодели: пространственной турбулентной аэродинамики; конвективного теплообмена и теплообмена излучением; движения и выгорания пылеугольного топлива; горения летучих в газовой фазе; образования окислов азота; формирования шлаковых отложений на поверхностях нагрева [18]. Разработанная методика расчета процесса горения угольного топлива в топочной камере дает устойчивое и точное решение в широком диапазоне рабочих параметров. Кроме этого программный комплекс “SigmaFlame” включает в себя адаптированные редактор для построения расчетной области, трехмерную визуализацию расчетов и вывод в отдельный файл основных интегральных параметров работы камеры котельного агрегата (Рис. 7). “SigmaFlame” позволяет, задав основные характеристики котельного агрегата и режим его работы, без настройки математической модели провести численное моделирование, а использование специально адаптированных моделей и методов для данного класса задач обеспечивают высокую скорость расчета по сравнению с коммерческими универсальными программными комплексами .

«SigmaFlame» успешно используется в исследовательской и прикладной деятельности ряда научных и проектных организаций (ВТИ, СибЭНТЦ, УралВТИ, ООО «ТОРИНС», ЗиО КОТЭС, ОАО ТКЗ «Красный котельщик») и для подготовки специалистов в учебном процессе ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», СФУ, СПбПУ, САФУ и УрФУ. С использованием

«SigmaFlame» были проведены расчетные исследования топочных процессов в таких котлах как П-67 Березовской ГРЭС, БКЗ-420 Минусинской ТЭЦ и др.



а) б)

Рисунок 7. Программный комплекс «SigmaFlame»: а) построение расчетной области; б) визуализация расчетов.

Программный комплекс «Сигма ПБ».

Программный комплекс «Сигма ПБ» был разработан КФ ИТ СО РАН совместно с ИВМ СО РАН для решения задачи определения вероятности эвакуации людей при пожаре из здания [19]. Для решения данной задачи моделируются процессы распространения опасных факторов пожара (ОФП) и эвакуации людей из здания. Для выполнения численного моделирования в «Сигма ПБ» используются расчетные модули собственной разработки «SigmaFire» (КФ ИТ СО РАН) и «SigmaEva» (ИВМ СО РАН), в которых реализованы математическая модель развития пожара и модель движения людей индивидуально-поточного типа соответственно. Расчетный модуль «SigmaFire» основывается на моделировании пространственных нестационарных турбулентных течений с химическими реакциями в потоке и сопряженным теплообменом. Для описания развития очага пожара используется эмпирическая модель. Математическая модель эвакуации людей описывает движение каждого отдельного человека с учетом наличия других участников движения и граничных условий, является непрерывной по пространству, но предполагает конечное число возможных направлений перемещения человека.

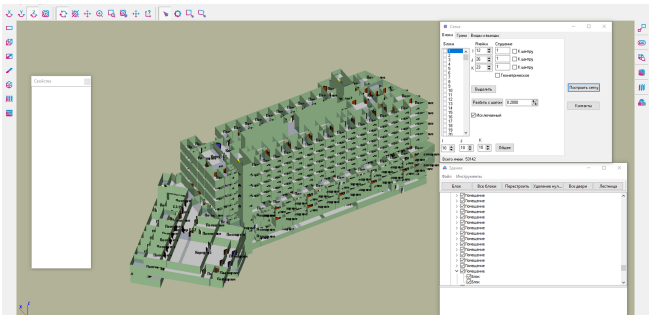


Рисунок 8. Программный комплекс «Сигма ПБ». Построение расчетной области для расчетов.

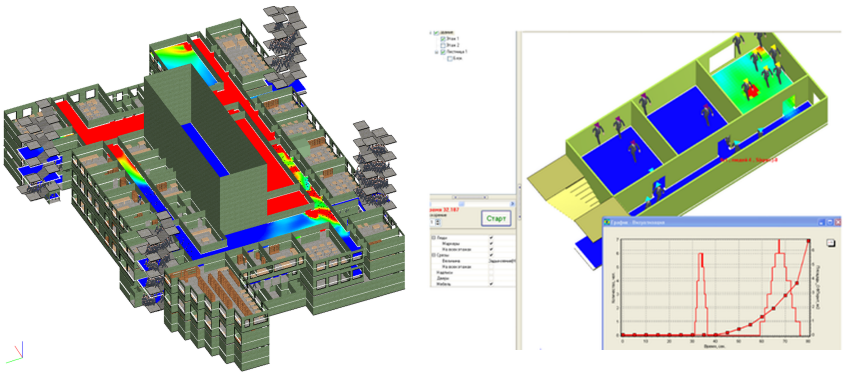


Рисунок 9. Программный комплекс «Сигма ПБ». Модуль анализа результатов.

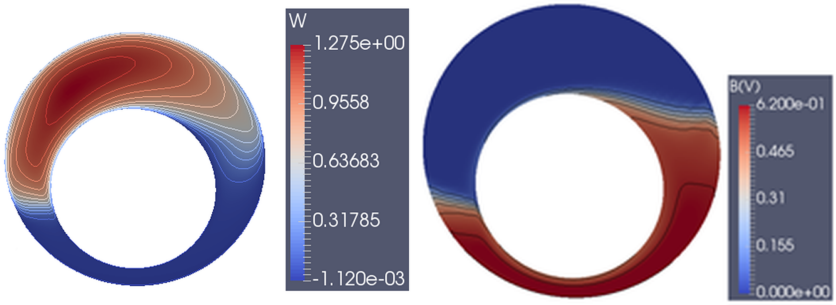
«Сигма ПБ» предназначена для использования специалистами в области пожарной безопасности, как при оценке пожарной опасности существующих зданий, так и при проектировании новых. В рамках «Сигма ПБ» была проведена большая работа по адаптации инструментов построения расчетных областей для моделирования распространения ОФП и эвакуации людей (Рис. 9) и задания сценариев пожара, математических моделей указанных процессов и модуля анализа результатов, включающего в себя автоматическую генерацию отчета вероятности эвакуации из здания (Рис. 10).

Программный комплекс «TubeFlow».

Одним из примеров создания специализированного программного комплекса для отдельной компании является «TubeFlow», который был разработан для нефтегазовой сервисной компании Baker Hughes.

«TubeFlow» предназначен для моделирования течений неньютоновских сред в каналах произвольного поперечного сечения в широком диапазоне изменения параметров течения на основе методов вычислительной гидродина-

мики [20]. В программный комплекс заложены созданные авторами оригинальные численные алгоритмы и математические модели для турбулентных течений нелинейно-вязкопластичных сред. Программный комплекс позволяет проводить исследования течений неньютоновской среды пользователями, не обладающими специальными знаниями из области вычислительной гидродинамики. «TubeFlow» используется для исследования характера течения в кольцевом зазоре и построения базы данных, представляющей зависимость силовых факторов от геометрии задачи и режимных параметров (Рис. 11а). Кроме этого программный комплекс позволяет моделировать нестационарные течения жидкостей с твердыми частицами в каналах (Рис. 11б). Математическая модель течения суспензий построена основе эйлерова представления двухфазного дисперсного потока с учётом межфазного скольжения и межчастичных взаимодействий.



а) б)

Рисунок 10. Программный комплекс «TubeFlow». Распределение: а) аксиальной скорости суспензии; б) концентрации тяжелых частиц в горизонтальном кольцевом канале с вращающимся внутренним цилиндром.

Программный комплекс «SigmaFW».

Сотрудниками КФ ИТ СО РАН в ближайшее время планируется выпуск свободно-распространяемого программного комплекса «SigmaFW» для моделирования задач гидрогазодинамики и тепломассообмена [8]. «SigmaFW» – полноценный программный комплекс, предназначенный для научных и образовательных организаций и промышленных предприятий, основной целью которого является продвижения численного моделирования в РФ. «SigmaFW» состоит из трех основных модулей: подготовка расчета, расчетное ядро, анализ результатов (Рис. 12). В «SigmaFW» расчетная сетка создается на основе сторонней (импортируемой) геометрии, предварительно подготовленной во внешней CAD системе. В расчетном модуле реализованы математические модели, описывающие стационарные и нестационарные

ламинарные и турбулентные одно и многокомпонентные течения, сопряжённый и лучистый теплообмен, химические реакции в газовом потоке. Кроме этого «SigmaFW» поддерживает возможность многопоточных вычислений.

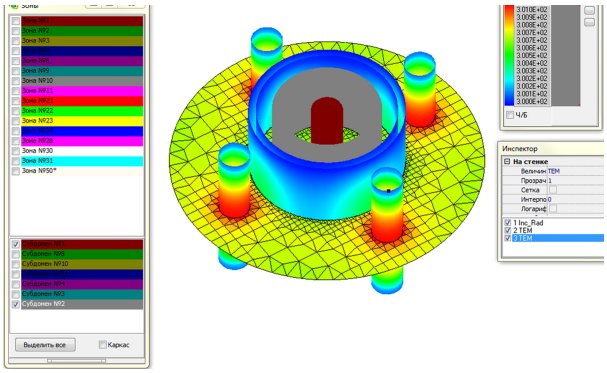


Рисунок 11. Программный комплекс «SigmaFW». Блок анализа результатов и геометрических элементов, импортированных из CAD систем. Сечение поля излучения и распределение температуры на поверхности.

Заключение

В работе рассмотрен ряд новых моделей и подходов, реализованных в комплексе программ SigmaFlow. Представлены результаты расчетов на гетерогенных вычислительных системах. А также представлены специализированные программные комплексы, разработанные на основе «SigmaFlow».

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности» в рамках научного проекта № 17-41-240947.

Список литературы

1. Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Минаков А.В.: Современные возможности CFD кода SigmaFlow для решения теплофизических задач. Сборник статей. Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. № 2(4). стр. 117-122.(2010)
2. Gavrilov A. A., Dekterev A. A., Sentyabov A. V.: Modeling of swirling flows with coherent structures using the unsteady Reynolds stress transport model. FLUID DYNAMICS. Volume 50. pp. 471-482. (2015)
3. Dekterev A.A., Dekterev A.A., Minakov A.V.: Comparative study of different combustion models for turbulent gas flames. Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 754. p. 6. (2016)

4. Litvintsev K. Yu., Dekterev A. A.: Comparison of the Finite-Volume and Discrete-Ordinate Methods and Diffusion Approximation for the Radiative Heat Transfer Equation. Heat Transfer Research. Vol. 39. pp. 653 – 655.(2008)
5. Ferziger J.H., Peric M.: Computational methods for fluid dynamics. 3rd ed. Springer. P. 423. (2002)
6. Barrett R., Berry M. W., Chan T. F. et al. Templates for the Solution of Linear Systems: Building Blocks for Iterative Methods (SIAM, Philadelphia, 1994). URL: http://www.netlib.org/templates/templates.pdf11.
7. VanderVorst H.A.: Bi-CGSTAB: a fast and smoothly converging variant of Bi-CG for solution of non-symmetric linear systems. SIAM J. Sci. Stat. Comp. 2. pp. 631-644. (1992)
8. Дектерев А.А., Литвинцев К.Ю., Гаврилов А.А., Харламов Е.Б., Филимонов С.А.: Свободно распространяемый программный комплекс SIGMA_FW для моделирования гидродинамики и теплообмена. Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. Т. 10. №4. Стр. 534-542 (2017)
9. Дектерев А.А., Литвинцев К.Ю., Гаврилов А.А., Бойков Д.В.: Специализированное программное обеспечение для решения прикладных теплофизических задач. Сборник материалов Первой Всероссийской конференции с международным участием «Цифровые средства производства инженерного анализа». Стр. 58-65. ТГПУ им. Л. Н. Толстого, Тула. (2017)
10. Sentyabov A.V., Gavrilov A.A., Krivov M.A., Dekterev A.A., Pritula M.N.: Development of a High Performance Code for Hydrodynamic Calculations Using Graphics Processor Units. Communications in Computer and Information Science. Vol. 753. pp. 288-300 (2017)
11. Zdravkovich M.M. Flow around circular cylinders: Vol. 1. Fundamentals, Oxford University Press (1997)
12. Волков Э.П., Зайчик Л.И., Першуков В.А.: Моделирование горения твердого топлива. Москва. Наука. 320 с. (1994)
13. Zaichik L.I., Drobyshevsky N.I., Filippov A.S., Mukin R.V., Strizhov V.F.: A diffusion-inertia model for predicting dispersion and deposition of low-inertia particles in turbulent flows. International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 53. Pp. 154–162. (2010)
14. А.В. Минаков, А.А. Гаврилов, А.А. Дектерев.: Анализ методов моделирования двухфазных мелкодисперсных течений. XVII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях» Жуковский. С. 198-200. (2009)
15. Сентябов А.В., Тимошевский М.В., Первунин К.С., Гаврилов А.А., Маркович Д.М., Дектерёв А.А.: Расчетно-экспериментальное исследование кавитационного обтекания гидрокрыла NACA0015. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. Т. 327. № 8. с. 28-43 (2016)
16. Гаврилов А.А., Шебелев А.В.: Одножидкостная модель смеси для ламинарных течений высококонцентрированных суспензий. Известия РАН. Механика жидкости и газа. № 2. с. 84–98. (2018)
17. Филимонов С.А., Необъявляющий П.А., Михиенкова Е.И.: Применение гибридного алгоритма моделирования для исследования системы удаления вредных газов алюминиевого производства. Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. № 6 (44). С. 64-79. (2016)
18. Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А.: Математическая модель процессов теплообмена и горения пылеугольного топлива при факельном сжигании. Физика горения и взрыва. №3. С. 37-46. (2011)

19. Литвинцев К.Ю., Кирик Е. С., Дектерев А. А., Харламов Е. Б., Малышев А. В., Попел Е. В.: Расчетно-аналитический программный комплекс «Сигма ПБ» по моделированию развития пожара и эвакуации. Пожарная безопасность. № 4. С. 51-59. (2016)
20. Гаврилов А.А., Минаков А.В., Дектерев А.А., Рудяк В.Я.: Численный алгоритм для моделирования установившихся ламинарных течений неньютоновских жидкостей в кольцевом зазоре с эксцентриситетом. Вычислительные технологии. Т. 17. № 1. С. 44-56. (2012)

Исследование поступательно-вращательного движения спутника с переменным тензорам инерции в поле притяжении сферического тела

М. Дж. Минглибаев и О. Б. Байсбаева

Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Алматы, Казахстан
minglibayev@gmail.com,baisbayeva@gmail.com

Аннотация Получены аналитическое выражение силовой функций ньютоновского притяжения спутника с переменным тензором инерции в поле притяжении сферического тела. На основе полученного выражения силовой функции составлены уравнения поступательно-вращательного движения – основная математическая модель исследуемой проблемы. Собственная система координат спутника направлена по главным осям инерции спутника, и предполагается, что в ходе эволюции их относительная ориентация остаются неизменными. Найдены новые промежуточные движения для исследования вращательного движения спутника вокруг собственного центра инерции. В неограниченной постановке выведены дифференциальные уравнения возмущенного движения спутника с переменным тензором инерции в поле притяжения сферического тела в различных системах оскулирующих элементов. В разложении возмущающей функции в ряд используется современные вычислительные технологии компьютерной алгебры. Выведены канонические уравнения возмущенного движения в аналогах элементов Делоне-Андуайе и Делоне-Пуассона, которые дают возможность вычисления вековых возмущений. Полученные новые результаты работы могут быть использованы для анализа динамической эволюции поступательно-вращательного спутника в нестационарных гравитирующих системах.

Ключевые слова: переменность масс, тензор инерции, поступательно-вращательное движение

Введение

Реальные космические тела – нестационарные. Со временем изменяются их массы, размеры, формы и структура распределения масс внутри тел [1]-[5]. Эти процессы особенно интенсивно происходят в двойных и кратных системах [4]. В связи с этим, исследуется поступательно-вращательное движения спутника с переменным тензорам инерции в поле притяжении сферического тела.

Постановка задачи

Рассмотрим частный случай поступательно-вращательного движения трехосного нестационарного тела в поле притяжения нестационарного шара в относительной системе координат [5]. Примем следующие допущения:

1. первое тело – шар со сферическим распределением масс с переменной массой $m_1 = m_1(t)$ и с переменным радиусом $l_1 = l_1(t)$;
2. второе тело – спутник с переменной массой $m_2 = m_2(t)$обладает произвольным динамическим строением и характерным линейным размером $l_2 = l_2(t)$. Его моменты инерции второго порядка переменные

$$A = A(t), B = B(t), C = C(t). \tag{1}$$

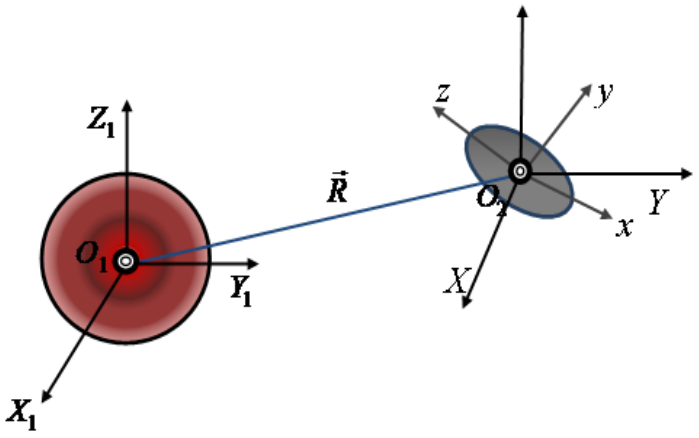


Рисунок 1. Шар и спутник.

3. Моменты инерции второго тела меняются в одинаковом темпе

$$\frac{A(t)}{A(t_0)} = \frac{B(t)}{B(t_0)} = \frac{C(t)}{C(t_0)} = \tilde{I}(t) = m\chi^2 \tag{2}$$

здесь m, χ - заданные известные функции времени.Это означает, что размеры спутника меняются гомотетически, его первоначальная форма остается неизменным, но размеры простого слоя и массы будут меняться.
4. Оси собственной системы координат для спутника совпадают с главными осями инерции и они в процессе эволюции остаются неизменными;
5. Массы тел и размеры меняются разными удельными темпами

$$\frac{\dot{m}_1(t)}{m_1(t)} \neq \frac{\dot{m}_2(t)}{m_2(t)}, \frac{\dot{l}_1(t)}{l_1(t)} \neq \frac{\dot{l}_2(t)}{l_2(t)}. \tag{3}$$

6. Относительная скорость отделяемых (присоединяемых) частиц равна нулю
$$u_\xi - \dot{\xi} = 0, \quad u_\eta - \dot{\eta} = 0, \quad u_\zeta - \dot{\zeta} = 0, \tag{4}$$
и не возникают допольнительные вращательные моменты.
7. Ограничимся приближенным выражением силовой функции

$$U \approx \frac{fm_1m_2}{R} + U_2. \tag{5}$$

$$U_2 = fm_1\frac{A_2 + B_2 + C - 3I}{2R^3} \tag{6}$$

При выполнении вышеуказанных допущений уравнения поступательно-вращательное движения спутника в относительной системе координат можно записать в следующем виде

$$\mu(t)\ddot{x} = \frac{\partial U}{\partial x}, \mu(t)\ddot{y} = \frac{\partial U}{\partial y}, \mu(t)\ddot{z} = \frac{\partial U}{\partial z} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} l\frac{d}{dt}(A(t)p) - (B(t) - C(t))qr &= \frac{\sin\varphi}{\sin\theta}\left[\frac{\partial U}{\partial\psi} - \cos\theta\frac{\partial U}{\partial\varphi}\right] + \cos\varphi\frac{\partial U}{\partial\theta} \\ \frac{d}{dt}(B(t)q) - (C(t) - A(t))rp &= \frac{\cos\varphi}{\sin\theta}\left[\frac{\partial U}{\partial\psi_i} - \cos\theta\frac{\partial U}{\partial\varphi}\right] - \sin\varphi\frac{\partial U}{\partial\theta} \\ \frac{d}{dt}(C(t)r) - (A(t) - B(t))pq &= \frac{\partial U}{\partial\varphi} \end{aligned} \tag{8}$$

где $\mu(t) = m_1(t)m_2(t)/m_1(t) + m_2(t)$ - приведенная масса,

$$U = U_1 + U_2, \quad U_1 = \frac{fm_1m_2}{R} \tag{9}$$

$$R^2 = x^2 + y^2 + z^2, \tag{10}$$

f - гравитационная постоянная, I- момент инерции спутника относительно прямой, соединяющая центр масс шара и спутника, p, q, r- проекции угловой скорости вращательного движения спутника на оси собственных координат, которые описываются кинематическими уравнениями Эйлера

$$\begin{aligned} p &= \dot{\psi}\sin\theta\sin\varphi + \dot{\theta}\cos\varphi \\ q &= \dot{\psi}\sin\theta\cos\varphi - \dot{\theta}\sin\varphi \\ r &= \dot{\psi}\cos\theta + \dot{\varphi} \end{aligned} \tag{11}$$

ϕ, ψ, θ- углы Эйлера. Полученные уравнения (7) - (11) полностью характеризует поступательно-вращательное движение нестационарного спутника с переменным тензором инерции в поле притяжении нестационарного шара, в рассматриваемой постановке.

Уравнения возмущенного поступательно-вращательного движения в аналогах элементов Делоне-Андуайе

Уравнения возмущенного движения центра масс спутника в аналогах элементов Делоне [5] имеют вид

$$\dot{L} = \frac{\partial W^*}{\partial l}, \dot{G} = \frac{\partial W^*}{\partial g}, \dot{H} = \frac{\partial W^*}{\partial h}, \dot{l} = -\frac{\partial W^*}{\partial L}, \dot{g} = -\frac{\partial W^*}{\partial G}, \dot{h} = -\frac{\partial W^*}{\partial H} \quad (12)$$

соответсвенно

$$W^* = \frac{1}{\nu^2(t)} \cdot \frac{\tilde{\beta}^4}{2\mu_0 L^2} + \tilde{W}(t, L, G, H, l, g, h, L', G', H', l', g', h'), \quad (13)$$

$$\tilde{W} = \frac{1}{\psi} W, \quad W = U_2 - \frac{1}{2} b^* R^2 = W(t, L, G, H, l, g, h, L', G', H', l', g', h'). \quad (14)$$

При условии

$$\frac{A(t)}{A(t_0)} = \frac{B(t)}{B(t_0)} = \frac{C(t)}{C(t_0)} = \tilde{I}(t) = m\chi^2 \quad (15)$$

$$A = A(t_0) m\chi^2, B = B(t_0) m\chi^2, C = C(t_0) m\chi^2$$

поэтому

$$\frac{A}{B} = const, \frac{A}{C} = const, \frac{B}{C} = const,$$

здесь m, χ - заданные известные функции зависящие от времени,

$$m = m(t) = \frac{m_2(t)}{m_2(t_0)}, \chi = \chi(t) = \frac{l_2(t)}{l_2(t_0)} \quad (16)$$

вращательное движение спутника опишем аналогами переменных Андуайе. Уравнения возмущенного вращательного движения в аналогах переменных Андуайе [5] сохраняют свой вид

$$\dot{l}' = \frac{\partial F^*}{\partial L'}, \dot{g}' = \frac{\partial F^*}{\partial G'}, \dot{h}' = \frac{\partial F^*}{\partial H'}, \dot{L}' = -\frac{\partial F^*}{\partial l'}, \dot{G}' = -\frac{\partial F^*}{\partial g'}, \dot{H}' = -\frac{\partial F^*}{\partial h'}, \quad (17)$$

соответсвенно возмущающая функция F^*

$$F^* = F_{\text{нв}} + F_{\text{в}}, \quad F_{\text{нв}} = F_{\text{вр}}, \quad (18)$$

$$F_{\text{вр}} = \frac{1}{2}\left(G'^2 - L'^2\right)\left(\frac{\sin^2 l'}{A} + \frac{\cos^2 l'}{B}\right) + \frac{L'^2}{2C}, \quad (19)$$

$$F_{\text{в}} = U_2(t, L, G, H, l, g, h, L', G', H', l', g', h'), \quad (20)$$

$F_{\text{вр}}$- гамильтониан задачи Эйлера о свободном вращательном движении вокруг центра масс нестационарного спутника в аналогах переменных Андуайе при условии (15)-(16), $F_{\text{в}}$-возмущающая функция.

Разложение возмущающей функции через элементы Делоне-Андуайе

Для того чтобы получить в явном виде уравнения возмущенного движения необходимо разложить возмущающую функцию

$$W^* = \frac{1}{\nu^2}\frac{\tilde{\beta}^4}{2\mu_0 L^2} + \frac{1}{\psi}\left[-\frac{1}{2}bR^2 + U_2\right], \tag{21}$$

$$U_2 = fm_1\frac{A_2 + B_2 + C - 3I}{2R^3}, \tag{22}$$

$$I = A\alpha^2 + B\beta^2 + C\gamma^2,$$

через элементы Делоне-Андуайе. В формуле (22) α, β, γ - направляющие косинусы вектора $\boldsymbol{R}$, соединяющий центр масс тел относительно подвижной собственной системы координат спутника

$$\begin{aligned}
\alpha &= a_{11}\frac{x}{R} + a_{21}\frac{y}{R} + a_{31}\frac{z}{R} = \cos(\boldsymbol{R}\widehat{\longrightarrow}O_2X),\\
\beta &= a_{12}\frac{x}{R} + a_{22}\frac{y}{R} + a_{32}\frac{z}{R} = \cos(\boldsymbol{R}\widehat{\longrightarrow}O_2Y),\\
\gamma &= a_{13}\frac{x}{R} + a_{23}\frac{y}{R} + a_{33}\frac{z}{R} = \cos(\boldsymbol{R}\widehat{\longrightarrow}O_2Z),
\end{aligned} \tag{23}$$

$\frac{x}{R}$, $\frac{y}{R}$, $\frac{z}{R}$ - направляющие косинусы вектора $\boldsymbol{R}$ относительно неподвижных осей системы координат O_2xyz,a_{ij} - косинусы углов между осями подвижной системы координат и неподвижной системы координат. Для контроля аналитических и численных вычислений можно использовать известное соотношение

$$\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1.$$

В аналогах переменных Андуайе направляющие косинусы a_{ij} выражаются следующим образом

$$\begin{aligned}
a_{11} &= \cos h'\cos g'\cos l' - \cos h'\cos J'\sin g'\sin l' - \sin h'\cos I'\cos l'\sin g' -\\
&- \sin h'\cos I'\cos g'\cos J'\sin l' + \sin h'\sin I'\sin l'\sin J',\\
a_{21} &= \sin h'\cos g'\cos l' - \sin h'\cos J'\sin g'\sin l' + \cos h'\cos I'\cos l'\sin g' +\\
&+ \cos h'\cos I'\cos g'\cos J'\sin l' - \cos h'\sin I'\sin l'\sin J',\\
a_{31} &= \sin I'\sin g'\cos l' + \sin I'\cos J'\cos g'\sin l' - \cos I'\sin l'\sin J',
\end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned}
a_{12} &= -\cos h'\cos J'\cos l'\sin g' - \cos h'\cos g'\sin l' - \sin h'\cos I'\cos g'\cos l'\cos J' +\\
&+ \sin h'\cos I'\sin g'\sin l' + \sin h'\sin I'\cos l'\sin J',\\
a_{22} &= -\sin h'\cos J'\cos l'\sin g' - \sin h'\cos g'\sin l' + \cos h'\cos I'\cos g'\cos l'\cos J' -\\
&- \cos h'\cos I'\sin g'\sin l' - \cos h'\sin I'\cos l'\sin J',\\
a_{32} &= \sin I'\cos J'\cos l'\cos g' - \sin I'\sin g'\sin l' + \cos I'\cos l'\sin J',
\end{aligned} \tag{25}$$

$$\begin{aligned} a_{13} &= \cos h' \sin J' \sin g' - \sin h' \sin I' \cos J' + \sin h' \cos I' \cos g' \sin J', \\ a_{23} &= \sin h' \sin J' \sin g' - \cos h' \sin I' \cos J' - \cos h' \cos I' \cos g' \sin J', \\ a_{33} &= \cos I' \cos J' - \sin I' \cos g' \sin J', \end{aligned} \tag{26}$$

где

$$\cos I' = \frac{H'}{G'}, \sin I' = \sqrt{1 - \frac{H'^2}{G'^2}}, \cos J' = \frac{L'}{G'}, \sin J' = \sqrt{1 - \frac{L'^2}{G'^2}}. \tag{27}$$

Перепишем формулу (22) в виде

$$U_2 = fm_1 \frac{A + B + C - 3(A\alpha^2 + B\beta^2 + C\gamma^2)}{2R^3} =$$
$$= \frac{fm_1(A + B + C)}{2} \left[\frac{1}{R^3}\right] - \frac{3fm_1 A}{2} \left[\frac{\alpha^2}{R^3}\right] - \frac{3fm_1 B}{2} \left[\frac{\beta^2}{R^3}\right] - \frac{3fm_1 C}{2} \left[\frac{\gamma^2}{R^3}\right]. \tag{28}$$

В последней формуле величины в квадратных скобках нужно выразить через аналоги переменных Делоне-Андуайе, используя формулы невозмущенного движения. В выражении (28) направляющие углы косинусов между радиус-вектором $\boldsymbol{R}$ и осями вращающейся системы координат определяются формулами (23). Первая величина в квадратной скобке имеет вид

$$\frac{1}{R^3} = \frac{1}{\nu^3 \rho^3} = \frac{(1 + e\cos\upsilon)^3}{\nu^3 p^3}. \tag{29}$$

С учетом последнего соотношения и используя формулу

$$\alpha = a_{11}\frac{x}{R} + a_{21}\frac{y}{R} + a_{31}\frac{z}{R} \tag{30}$$

находим выражение $\frac{\alpha^2}{R^3}$

$$\frac{\alpha^2}{R^3} = \frac{(1 + e\cos\upsilon)^3}{\nu^3 a^3 (1 - e^2)^3} \cdot \left(a_{11}\frac{x}{R} + a_{21}\frac{y}{R} + a_{31}\frac{z}{R}\right)^2, \tag{31}$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= \kappa_{11}\sin l' + \kappa_{12}\sin g' \sin l' + \kappa_{13}\sin g' \cos l' + \kappa_{14}\cos g' \sin l' + \kappa_{15}\cos g' \cos l', \\ a_{21} &= \kappa_{21}\sin l'_i + \kappa_{22}\sin g' \sin l' + \kappa_{23}\sin g' \cos l' + \kappa_{24}\cos g' \sin l' + \kappa_{25}\cos g' \cos l' \\ a_{31} &= \kappa_{31}\sin l' + \kappa_{32}\sin g' \cos l' + \kappa_{33}\cos g' \sin l', \end{aligned}$$

$$\kappa_{11} = \frac{\sqrt{(G'^2 - H'^2)(G'^2 - L'^2)}}{G'^2}\sin h', \kappa_{12} = -\frac{L'}{G'}\cos h',$$
$$\kappa_{13} = -\frac{H'}{G'}\sin h', \kappa_{14} = -\frac{L'H'}{G'^2}, \kappa_{15} = \cos h',$$
$$\kappa_{21} = \frac{\sqrt{(G'^2 - H'^2)(G'^2 - L'^2)}}{G'^2}\cos h', \kappa_{22} = -\frac{L'}{G'}\sin h',$$
$$\kappa_{23} = \frac{H'}{G'}\cos h', \kappa_{24} = \frac{L'H'}{G'^2}\cos h', \kappa_{25} = \sin h',$$

$$\kappa_{31} = -\frac{H'}{G'}\sqrt{1-\frac{L'^2}{G'^2}},\ \kappa_{32} = \sqrt{1-\frac{H'^2}{G^2}},\ \kappa_{33} = \frac{L'}{G'}\sqrt{1-\frac{H'^2}{G'^2}}. \tag{32}$$

Аналогично учитывая (29) и используя формулу

$$\beta = a_{12}\frac{x}{R} + a_{22}\frac{y}{R} + a_{32}\frac{z}{R}, \tag{33}$$

можно написать

$$\frac{\beta^2}{R^3} = \frac{(1+e\cos\upsilon)^3}{\nu^3 a^3(1-e^2)^3}\cdot\left(a_{12}\frac{x}{R} + a_{22}\frac{y}{R} + a_{32}\frac{z}{R}\right)^2, \tag{34}$$

$a_{12} = \sigma_{11}\cos l' + \sigma_{12}\sin g'\sin l' + \sigma_{13}\sin g'\cos l' + \sigma_{14}\cos g'\sin l' + \sigma_{15}\cos g'\cos l',$
$a_{22} = \sigma_{21}\cos l' + \sigma_{22}\sin g'\sin l' + \sigma_{23}\sin g'\cos l' + \sigma_{24}\cos g'\sin l' + \sigma_{25}\cos g'\cos l',$
$a_{32} = \sigma_{31}\cos l' + \sigma_{32}\sin g'\sin l' + \sigma_{33}\cos g'\cos l',$

$$\sigma_{11} = \frac{\sqrt{(G'^2-H'^2)(G'^2-L'^2)}}{G'^2}\sin h', \sigma_{12} = \frac{H'}{G'}\sin h',$$
$$\sigma_{13} = \frac{L'}{G'}\cos h', \sigma_{14} = -\cos h',\ \sigma_{15} = -\frac{L'H'}{G'^2}\sin h',$$
$$\sigma_{21} = \frac{\sqrt{(G'^2-H'^2)(G'2-L'^2)}}{G'^2\cos h',}\ \ \sigma_{22} = -\frac{H'}{G'}\cos h',\ \sigma_{23} = -\frac{L'}{G'}\sin h',$$
$$\sigma_{24} = -\sin h',\ \sigma_{25} = \frac{L'H'}{G'^2}\cos h',$$
$$\sigma_{31} = -\frac{H'}{G'}\sqrt{1-\frac{L'^2}{G'^2}},\ \sigma_{32} = -\sqrt{1-\frac{H'^2}{G'^2}}\ \ \sigma_{33} = \frac{L'}{G'}\sqrt{1-\frac{H'^2}{G'^2}} \tag{35}$$

Также, учитывая (29) и используя формулу

$$\gamma = a_{13}\frac{x}{R} + a_{23}\frac{y}{R} + a_{33}\frac{z}{R}, \tag{36}$$

получим

$$\frac{\gamma^2}{R^3} = \frac{(1+e\cos\upsilon)^3}{\nu^3 a^3(1-e^2)^3}\cdot\left(a_{13}\frac{x}{R} + a_{23}\frac{y}{R} + a_{33}\frac{z}{R}\right)^2, \tag{37}$$

$$\begin{aligned} a_{13} &= \varepsilon_{11} + \varepsilon_{12}\sin g' + \varepsilon_{13}\cos g', \\ a_{23} &= \varepsilon_{21} + \varepsilon_{22}\sin g' + \varepsilon_{23}\cos g', \\ a_{33} &= \varepsilon_{31} + \varepsilon_{33}\cos g', \end{aligned} \tag{38}$$

$$\varepsilon_{11} = \frac{L'\sqrt{G'^2-H'^2}}{G'^2}\sin h',\ \varepsilon_{12} = \frac{\sqrt{G'^2-L'^2}}{G'}\cos h',\ \varepsilon_{13} = \frac{H'\sqrt{G'^2-L'_i{}^2G'^2}}{\sin}h'$$
$$\varepsilon_{21} = \frac{L'\sqrt{G'^2-H'^2}}{G'^2}\cos h',\ \varepsilon_{22} = -\frac{\sqrt{G'_i{}^2-L'_i{}^2}}{G'i}\sin h',\ \varepsilon_{23} = \frac{H'_i\sqrt{G'^2-L'^2}}{G'_i{}^2}\cos h',$$
$$\varepsilon_{31} = \frac{L'H'}{G'^2}, \qquad \varepsilon_{33} = -\frac{\sqrt{(G'^2-H'^2)(G'^2-L'^2)}}{G'^2}. \tag{39}$$

В формулах (31),(34),(37) направляющие косинусы вектора $\boldsymbol{R}$ определяются выражениями

$$\begin{array}{l} \frac{x}{R} = \tau_{11}\sin\upsilon + \tau_{12}\cos\upsilon, \\ \frac{y}{R} = \tau_{21}\sin\upsilon + \tau_{22}\cos\upsilon, \\ \frac{z}{R} = \tau_{31}\sin\upsilon + \tau_{32}\cos\upsilon, \end{array} \tag{40}$$

$$\begin{array}{l} \tau_{11} = -\cosh\sin g - \frac{H}{G}\sinh\cos g,\ \ \tau_{12} = \cosh\cos g - \frac{H}{G}\sinh\sin g, \\ \tau_{21} = -\sinh\sin g + \frac{H}{G}\cosh\cos g,\ \ \tau_{22} = \sinh\cos g + \frac{H}{G}\cosh\sin g, \\ \tau_{31} = \cos g\sqrt{1-\frac{H^2}{G^2}},\ \ \tau_{32} = \sin g\sqrt{1-\frac{H^2}{G^2}}, \end{array} \tag{41}$$

В аналитических и численных вычислениях для контроля результатов можно использовать известное соотношение

$$\left(\frac{x}{R}\right)^2 + \left(\frac{y}{R}\right)^2 + \left(\frac{z}{R}\right)^2 = 1.$$

Уравнения поступательно-вращательного движения в аналогах элементов Делоне-Пуассона

Выражение решения невозмущенного вращательного движения в явном виде. Аналоги промежуточных элементови аналоги элементов Пуассона

Чтобы перейти к аналогам элементов Пуассона сначала введем аналоги промежуточных элементов, потом можно перейти к аналогам элементов Пуассона, как это было выполнено в соответствующей стационарной задаче. Элементы Пуассона обладают свойством переменных «действие-угол», поэтому их также называют переменными «действие-угол» [6,7].

Аналоги промежуточных элементов даются следующей системой элементов

$$\bar{L}', \bar{G}', \bar{H}', \bar{l}', \bar{g}', \bar{h}'. \tag{42}$$

Они вводятся следующим образом

$$\bar{L}' \equiv N = \sqrt{\left\{2\alpha_1 - \frac{1}{2}\left(\frac{1}{A_0} + \frac{1}{B_0}\right)\alpha_2^2\right\} D}, \tag{43}$$

$$\bar{G}' \equiv \alpha_2 = G', \bar{H}' = \alpha_3 = H'. \tag{44}$$

Обобщенные координаты канонически сопряженно связанные с переменными $\bar{L}', \bar{G}', \bar{H}'$ определяются следующими выражениями

$$\bar{l}' = \frac{\partial S}{\partial \bar{L}'} = \frac{\partial S}{\partial N} = \frac{\bar{L}'}{D}\left(\Phi_1(t) + \beta_1\right), \tag{45}$$

$$\bar{g}' = \frac{\partial S}{\partial \bar{G}'} = \beta_2 - \frac{\partial S}{\partial N}\frac{\partial N}{\partial \alpha_2} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{A_0} + \frac{1}{B_0}\right)\bar{G}'\left(\Phi_1(t) + \beta_1\right) + \beta_2 - \bar{G}'\tilde{\Phi}_2(t), \tag{46}$$

$$\bar{h}' = \beta_3 = h'. \tag{47}$$

Обозначим

$$\Phi_2(t) = \Phi_1(t) - \frac{2A_0B_0}{A_0 + B_0}\tilde{\Phi}_2(t) \tag{48}$$

Тогда (46) имеет вид

$$\bar{g}' = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{A_0} + \frac{1}{B_0}\right)\bar{G}'\left[\Phi_2(t) + \beta_1\right] + \beta_2 \tag{49}$$

На основе введенных промежуточных элементов вводятся аналоги элементов Пуассона

$$L'', G'', H'', l'', g'', h''. \tag{50}$$

Введенная система элементов Пуассона (50) обладает свойством «действие-угол» и лучшим образом описывает невозмущенноевращательное движение нестационарного трехосного тела вокруг собственного центра масс.

Переменные «действие». Переменные «действие» определяются следующими формулами [6]

$$L'' = \frac{1}{2\pi}\oint\sqrt{\frac{\bar{L}'^2 - \varepsilon\bar{G}'^2\cos 2l'}{1 - \varepsilon\cos 2l'}}dl', \tag{51}$$

$$G'' = \bar{G}' = G' = \alpha_2, H'' = \bar{H}' = H' = \alpha_3. \tag{52}$$

Введем новую переменную $\bar{\delta}$ чтобы вычислить интеграл (51)

$$cos2\bar{\delta} = \frac{\cos 2l' - \varepsilon}{1 - \varepsilon\cos 2l'} \quad \text{или} \quad \cos 2l' = \frac{\varepsilon + \cos 2\bar{\delta}}{1 + \varepsilon\cos 2\bar{\delta}}. \tag{53}$$

Отсюда находим новое важное соотношение между переменными $l', \bar{\delta}$

$$tgl' = \sqrt{\frac{1-\varepsilon}{1+\varepsilon}}tg\bar{\delta}. \tag{54}$$

Это соотношение похоже на зависимость между эксцентрической и истинной аномалиями в кеплерском движении.

Из уравнений (53) получим

$$dl' = \frac{\sqrt{1-\varepsilon^2}}{1 + \varepsilon\cos 2\bar{\delta}}d\bar{\delta}. \tag{55}$$

С помощью переменной $\bar{\delta}$ интеграл (51) имеет следующий вид

$$L'' = \frac{\bar{L}'}{2\pi}\sqrt{(1-\varepsilon)(1+\varepsilon b)}\oint\sqrt{\frac{1 - k^2\cos^2\bar{\delta}}{1 + \varepsilon\cos 2\bar{\delta}}}d\bar{\delta} = \bar{G}'\Lambda \tag{56}$$

здесь

$$k^2 = \frac{2\varepsilon}{1-\varepsilon}\frac{b-1}{1+\varepsilon b}, b = \frac{\bar{G}'^2}{\bar{L}'^2} = (\cos^2\bar{J}')^{-1}, \tag{57}$$

и

$$\Lambda = \frac{2}{\pi}\left[EF(\tilde{\chi},k') + KE(\tilde{\chi},k') - KF(\tilde{\chi},k')\right], \tag{58}$$

$$\tilde{\chi} = \arcsin\sqrt{\frac{1+\varepsilon b}{b(1+\varepsilon)}}, \qquad k' = \sqrt{1-k^2}, \tag{59}$$

k –модуль эллиптического интеграла, k'– дополнительный модульи

$$0 \le k < 1, \quad 0 \le k' < 1,$$

$F(\tilde{\chi},k)$–неполный эллиптический интеграл первого рода, $E(\tilde{\chi},k)$- неполный эллиптический интеграл второго рода, $K(k)$–полный эллиптический интеграл первого рода, $E(k)$–полный эллиптический интеграл второго рода.

Интеграл (57) можно решить относительно $\alpha_1 = F^0_{2@}$ через две переменные действия L'', G''. Но невозможно получить явный вид. Нам нужны только производные α_1 по переменным L'', G''. Средние угловые движения переменных l'', g'', которые связаны с переменными L'', G'' канонически сопряжено даются в следующем виде

$$n_{l''} = \frac{\partial\alpha_1}{\partial L''} = \frac{\partial\alpha_1}{\partial\bar{L}'}\frac{\partial\bar{L}'}{\partial L''}, n_{g''} = \frac{\partial\alpha_1}{\partial G''} = \frac{\partial\alpha_1}{\partial L''}\frac{\partial\bar{L}'}{\partial G''} + \frac{\partial\alpha_1}{\partial\bar{G}'}. \tag{60}$$

Из-за того, что умноженные матрицы Якоби

$$\frac{\partial\left(L'',G''\right)}{\partial\left(\bar{L}',\bar{G}'\right)} \times \frac{\partial\left(\bar{L}'_1,\bar{G}'\right)}{\partial\left(L'',G''\right)}$$

равны идентичной матрице [6], имеем

$$\frac{\partial\bar{L}'}{\partial L''}\cdot\frac{\partial L''}{\partial\bar{L}'} = 1, \quad \frac{\partial\bar{L}'}{\partial G''} + \frac{\partial\bar{L}'}{\partial L''}\cdot\frac{\partial L''}{\partial\bar{G}'} = 0. \tag{61}$$

Если учитывать соотношение (61), тогда формула (60) имеет окончательно следующий вид

$$n_{l''} = \frac{\bar{L}'}{D}\left(\frac{\partial L''}{\partial\bar{L}'}\right)^{-1} = \frac{\pi\bar{L}'}{2KD}\sqrt{(1-\varepsilon)(1+\varepsilon b)}, \tag{62}$$

$$n_{g''} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{A_0}+\frac{1}{B_0}\right)\bar{G}' - n_{l''}\frac{\partial L''}{\partial\bar{G}'} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{A_0}+\frac{1}{B_0}\right)\bar{G}' - n_{l''}\Lambda + \frac{\bar{L}'^2}{D\bar{G}'}. \tag{63}$$

*Переменные «угол».*Найдем связь между переменными l'', g'' и $\bar{l}', \bar{g}'$

$$l'' = \frac{\partial S}{\partial L''} = \frac{\partial S_1}{\partial\bar{L}'}\frac{\partial\bar{L}'}{\partial L''} = \frac{n_{l''}}{\bar{L}'}D\bar{l}' = n_{l''}(\Phi(t)+\beta_1), \tag{64}$$

$$g'' = \frac{\partial S}{\partial G''} = \bar{g}' + \bar{l}'\frac{\partial\bar{L}'}{\partial G''} = n_{g''}(\Phi(t)+\beta_1) + \beta_2. \tag{65}$$

$$h'' = \bar{h}' = h' = \beta_3.$$

Во вращательном невозмущенном движении величины l'', g'' являются линейными функциями от $\Phi(t)$, а другие элементы сохраняют постоянные значения. Используя уравнение (53) получим следующее

$$\frac{\bar{L}'\sqrt{(1-\varepsilon)(1+\varepsilon b)}}{D}(\Phi(t)+\beta_1) - K = \int_0^{\bar{\delta}-\pi/2} \frac{d\bar{\delta}}{\sqrt{1-k^2\sin^2\bar{\delta}}}, \tag{66}$$

или

$$\bar{\delta} = \mathrm{am}\frac{2K}{\pi}\left(l'' - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{\pi}{2}, \tag{67}$$

Здесь am– амплитуда функция. Если результат выражении (67) подставить в уравнении (53) тогда компоненты вектора кинетического момента имеют вид

$$\begin{aligned} G'_x &= \sqrt{\frac{\bar{G}'^2 - \bar{L}'^2}{1+\varepsilon}}\,\mathrm{cn}\frac{2K}{\pi}(l'' - \frac{\pi}{2}), \\ G'_y &= -\sqrt{\frac{\bar{G}'^2 - \bar{L}'^2}{1-\varepsilon}}\,\mathrm{sn}\frac{2K}{\pi}(l'' - \frac{\pi}{2}), \\ G'_z &= L' = \sqrt{\frac{\bar{L}'^2 + \varepsilon\bar{G}'^2}{1+\varepsilon}}\,\mathrm{dn}\frac{2K}{\pi}(l'' - \frac{\pi}{2}), \end{aligned} \tag{68}$$

здесь cn, sn, dn– эллиптические функции Якоби. Переменная l' связанасуравнениями (54),(64),(67) через функцию $\Phi(t)$. Функция g' находится из соотношений

$$\begin{aligned} \frac{dg'}{dt} &= \frac{\partial F_{2@}}{\partial G'} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{A} + \frac{1}{B}\right)\bar{G}' + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{B} - \frac{1}{A}\right)\bar{G}'\cos 2l' = \\ &= \frac{1}{m\chi^2}\left\{\frac{1}{2}\left(\frac{1}{A_0} + \frac{1}{B_0}\right)\bar{G}' + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{B_0} - \frac{1}{A_0}\right)\bar{G}'\cos 2l'\right\}. \end{aligned} \tag{69}$$

Если использовать промежуточные переменные (42), то вид гамильтониана невозмущенного движения в случае (59)-(60) будет простым

$$F_{\text{вр}} = \frac{1}{m\chi^2}F^0_{\text{вр}} = \frac{1}{m\chi^2}\left(\frac{1}{2D}\bar{L}'^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{1}{A_0} + \frac{1}{B_0}\right)\bar{G}'^2\right). \tag{70}$$

Таким образом, формулы (53),(67),(64) выражают в явном виде l' как функцию от времени. А соотношение (70) где уже считается $l' = l'(t)$ определяет g' как функцию от времени.

Уравнения возмущенного движения в аналогах элементов Делоне-Пуассона

Уравнения поступательно-вращательного движения центра масс тела в аналогах элементов Делоне-Пуассона имеет вид

$$\dot{L} = -\frac{\partial W^*}{\partial l}, \dot{G} = -\frac{\partial W^*}{\partial g}, \dot{H} = -\frac{\partial W^*}{\partial h}, \dot{l} = \frac{\partial W^*}{\partial L}, \dot{g} = \frac{\partial W^*}{\partial G}, \dot{h} = \frac{\partial W^*}{\partial H}, \quad (71)$$

$$\dot{L}'' = -\frac{\partial F^*}{\partial l''}, \dot{G}'' = -\frac{\partial F^*}{\partial g''}, \dot{H}'' = -\frac{\partial F^*}{\partial h''}, \dot{l}'' = \frac{\partial F^*}{\partial L''}, \dot{g}'' = \frac{\partial F^*}{\partial G''}, \dot{h}'' = \frac{\partial F^*}{\partial H''}, \quad (72)$$

здесь (71) описывает поступательное, а (72) описывает вращательное движение.

Если $A(t) = B(t)$, тогда аналоги элементов Пуассона переходит к аналогом элементов Андуайе. В частном особенном случае, когда $b = 1$, то есть $\bar{L}' = L'' = \bar{G}' = G''$ или $\tilde{b} = 1$. Тогда средние угловые движения имеют следующий простой вид

$$\begin{aligned} ln_{l''} &= \frac{L''}{D}\sqrt{1-\varepsilon^2}, \\ n_{g''} &= \left(\frac{1}{C_0} - \frac{1}{D}\sqrt{1-\varepsilon^2}\right) L''. \end{aligned} \quad (73)$$

Выражение возмущающей функции в аналогах элементов Делоне-Пуассона. Возмущающая функция имеет вид

$$W^* = \frac{1}{\psi}W, \quad W = U_2 - \frac{1}{2}b^*R^2, \quad (74)$$

В общем случае, полное выражения силовой функции имеет вид

$$U = -\frac{fm_1m_2}{R}\left\{1 + \sum_{n=2}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{r_0}{R}\right)^n P_n^m(\sin\beta)\left[C_n^m\cos m\lambda + S_n^m\sin m\lambda\right]\right\}. \quad (75)$$

Мы используем приближенное значение силовой функции

$$U \approx U_2 = \frac{fm_1m\chi^2}{\nu^3\rho^3}\tilde{U}_2. \quad (76)$$

Функцию $\tilde{U}_2$ можно представить в виде

$$\tilde{U}_2 = \left\{\frac{2C_0 - A_0 - B_0}{2}P_2(\sin\beta) + \frac{A_0 - B_0}{4}P_2^2(\sin\beta)\cos 2\lambda\right\}. \quad (77)$$

Поэтому можно написать

$$\begin{aligned} W = \frac{fm_1m\chi^2}{\nu^3\rho^3}\Bigg\{&\frac{2C_0 - A_0 - B_0}{2}P_2(\sin\beta) + \\ &+ \frac{A_0 - B_0}{4}P_2^2(\sin\beta)\cos 2\lambda\Bigg\} - \frac{1}{2}b^*R^2. \end{aligned} \quad (78)$$

Обозначим

$$m_1 = m_{10} m_1^*(t) = m_{10}(t) m_1^*(t), \tag{79}$$

и напишем возмущающую функцию в виде

$$W = W_1 + W_2, W_{_1} = \frac{m_1^*(t) m \chi^2(t)}{\nu^3} \cdot W_{_1}^0, \tag{80}$$

здесь

$$W_1^0 = \frac{f m_{10}}{\rho^3} \left\{ \frac{2C_0 - A_0 - B_0}{2} P_2(\sin\beta) + \frac{A_0 - B_0}{4} P_2^2(\sin\beta)\cos 2\lambda \right\}, \tag{81}$$

$$W_2^* = -\frac{1}{2} b^* R^2 = -\frac{1}{2} b^*(t) \nu^2(t) \rho^2. \tag{82}$$

Вековая часть последнего выражения известно

$$W_{2\text{век}} = -\frac{1}{2} b^*(t) \nu^2(t) a^2 \left(\frac{\rho}{a}\right)^2 = -\frac{1}{2} b^*(t) \nu^2(t) a^2 \left[1 + \frac{3}{2} e^2\right], W_{1\text{век}}^0 = a^2 \left[1 + \frac{3}{2} e^2\right], \tag{83}$$

$$W_{2\text{век}} = -\frac{1}{2} b^*(t) \nu^2(t) W_{125:}^0(L, G). \tag{84}$$

Преобразуем функцию $\tilde{U}_2$

$$\tilde{U}_2 = \frac{2C_0 - A_0 - B_0}{2} \left(\frac{a}{\rho}\right)^3 P_2(\sin\beta) + \frac{A_0 - B_0}{4} \left(\frac{a}{\rho}\right)^3 P_2^2(\sin\beta)\cos 2\lambda, \tag{85}$$

здесь

$$\left(\frac{a}{\rho}\right)^3 = 1 + \frac{3}{2}e^2 + \frac{15}{8}e^4 + \frac{35}{16}e^6 + ... + \left(3e + \frac{27}{8}e^3 + \frac{261}{64}e^5 + \frac{14309}{3072}e^7 + ...\right)\cos l + \\ + \left(\frac{9}{2}e^2 + \frac{7}{2}e^4 + \frac{141}{32}e^6 + ...\right)\cos 2l + \left(\frac{53}{8}e^3 + \frac{393}{128}e^5 + \frac{24753}{5120}e^7 + ...\right)\cos 3l + \\ + \left(\frac{77}{8}e^4 + \frac{129}{80}e^6 + ...\right)\cos 4l + \left(\frac{3167}{160}e^6 + ...\right)\cos 6l + \left(\frac{432091}{15360}e^7 + ...\right)\cos 7l + ..., \tag{86}$$

Теперь необходимо возмущающую функцию W выразить через переменные Делоне и Пуассона согласно [6]

$$\begin{pmatrix} \cos\beta\cos\lambda \\ \cos\beta\sin\lambda \\ \sin\beta \end{pmatrix} = R_3(l') R_1(J') R_3(g') R_1(I') R_3(h' - h) R_1(-i) R_3(-f - g) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \tag{87}$$

$$\begin{aligned} \cos\beta\cos\lambda &= p_1\cos(f+g) + p_2\sin(f+g), \\ \cos\beta\sin\lambda &= q_1\cos(f+g) + q_2\sin(f+g), \\ \sin\beta &= r_1\cos(f+g) + r_2\sin(f+g), \end{aligned} \tag{88}$$

$$\begin{aligned} p_1 = {} & \cos g' \left[\cos(h' - h)\cos l' - \cos I' \cos J' \sin(h' - h)\sin l'\right] - \\ & - \sin g' \left[\cos I' \sin(h' - h)\cos l' + \cos J' \cos(h' - h)\sin l'\right] + \\ & + \sin I' \sin J' \sin(h' - h)\sin l' \end{aligned} \tag{89}$$

$$
\begin{aligned}
p_2 = {} & \cos g' \left[\cos i \left\{\sin(h'-h)\cos l' + \cos I' \cos J' \cos(h'-h)\sin l'\right\} + \right. \\
& \left. + \sin i \sin I' \cos J' \sin l'\right] + \\
& + \sin g' \left[\cos i \left\{\cos I' \cos(h'-h)\cos l' - \cos J' \sin(h'-h)\sin l'\right\} + \right. \\
& \left. + \sin i \sin I' \cos l'\right] + \\
& + \left[-\cos i \sin I' \cos(h'-h) + \sin i \cos I'\right] \sin J' \sin l',
\end{aligned}
\tag{90}
$$

$$
\begin{aligned}
q_1 = {} & -\cos g' \left[\cos(h'-h)\sin l' + \cos I' \cos J' \sin(h'-h)\cos l'\right] + \\
& + \sin g' \left[-\cos J' \cos(h'-h)\cos l' + \cos I' \sin(h'-h)\sin l'\right] + \\
& + \sin I' \sin J' \sin(h'-h)\cos l',
\end{aligned}
\tag{91}
$$

$$
\begin{aligned}
q_2 = {} & \cos g' \left[\cos i \left\{\cos I' \cos J' \cos(h'-h)\cos l' - \sin(h'-h)\sin l'\right\} + \right. \\
& \left. + \sin i \sin I' \cos J' \cos l'\right] - \\
& - \sin g' \left[\cos i \left\{\cos J' \sin(h'-h)\cos l' + \cos I' \cos(h'-h)\sin l'\right\} + \right. \\
& \left. + \sin i \sin I' \sin l'\right] + \\
& + \left[-\cos i \sin I' \cos(h'-h) + \sin i \cos I'\right] \sin J' \cos l',
\end{aligned}
\tag{92}
$$

$$
r_1 = \cos I' \sin J' \sin(h'-h)\cos g' + \sin J' \cos(h'-h)\sin g' + \sin I' \cos J' \sin(h'-h),
\tag{93}
$$

$$
\begin{aligned}
r_2 = {} & -\left[\cos i \cos I' \sin J' \cos(h'-h) + \sin i \sin I' \sin J'\right] \cos g' + \\
& + \cos i \sin J' \sin(h'-h)\sin g' + \left[-\cos i \sin I' \cos(h'-h) + \sin i \cos I'\right] \cos J',
\end{aligned}
\tag{94}
$$

$$
\begin{aligned}
\cos\beta \cos\lambda = {} & \textstyle\sum_{\gamma} \frac{1}{2}\gamma \sin i \cos I' \sin J' \cos\left[l' - \gamma(f+g)\right] - \\
& - \textstyle\sum_{\varepsilon,\gamma} \frac{1}{4}\varepsilon(1+\gamma\cos i)\sin I' \sin J' \cos\left[l' + \varepsilon(h'-h) - \varepsilon\gamma(f+g)\right] + \\
& + \textstyle\sum_{\rho,\gamma} \frac{1}{4}\gamma \sin i \sin I'(1+\rho\cos J')\cos\left[l' + \rho g' - \rho\gamma(f+g)\right] + \\
& + \textstyle\sum_{\rho,\varepsilon,\gamma} \frac{1}{8}(1+\gamma\cos i)(1+\varepsilon\cos I')(1+\rho\cos J')\cdot \\
& \cdot \cos\left[l' + \rho g' + \rho\varepsilon(h'-h) - \rho\varepsilon\gamma(f+g)\right],
\end{aligned}
\tag{95}
$$

$$
\begin{aligned}
\cos\beta \sin\lambda = {} & -\textstyle\sum_{\gamma} \frac{1}{2}\gamma \sin i \cos I' \sin J' \sin\left[l' - \gamma(f+g)\right] + \\
& + \textstyle\sum_{\varepsilon,\gamma} \frac{1}{4}\varepsilon(1+\gamma\cos i)\sin I' \sin J' \sin\left[l' + \varepsilon(h'-h) - \varepsilon\gamma(f+g)\right] - \\
& - \textstyle\sum_{\rho,\gamma} \frac{1}{4}\gamma \sin i \sin I'(1+\rho\cos J')\sin\left[l' + \rho g' - \rho\gamma(f+g)\right] - \\
& - \textstyle\sum_{\rho,\varepsilon,\gamma} \frac{1}{8}(1+\gamma\cos i)(1+\varepsilon\cos I')(1+\rho\cos J')\cdot \\
& \cdot \sin\left[l' + \rho g' + \rho\varepsilon(h'-h) - \rho\varepsilon\gamma(f+g)\right],
\end{aligned}
\tag{96}
$$

$$
\begin{aligned}
\sin\beta = {} & \sin i \cos I' \cos J' \sin(f+g) + \\
& + \textstyle\sum_{\gamma} \frac{1}{2}(1+\gamma\cos i)\sin I' \cos J' \sin\left[h' - h - \gamma(f+g)\right] \\
& + \textstyle\sum_{\gamma} \frac{1}{2}\gamma \sin i \sin I' \sin J' \sin\left[g' - \gamma(f+g)\right] + \\
& + \textstyle\sum_{\varepsilon,\gamma} \frac{1}{4}(1+\gamma\cos i)(1+\varepsilon\cos I')\sin J' \sin\left[g' + \varepsilon(h'-h) - \varepsilon\gamma(f+g)\right].
\end{aligned}
\tag{97}
$$

Здесь индексы$\rho, \varepsilon, \gamma$ (обозначения только здесь) принимает значения $+1$ и -1. Например,

$$
\begin{aligned}
& \textstyle\sum_{\rho,\gamma} \gamma(1+\rho\cos J')\sin[l' + \rho g' - \rho\gamma(f+g)] = (1+\cos J')\sin[l' + g' - (f+g)] + \\
& + (1-\cos J')\sin[l' - g' + (f+g)] - (1+\cos J')\sin[l' + g' + (f+g)] - \\
& - (1-\cos J')\sin[l' - g' - (f+g)].
\end{aligned}
\tag{98}
$$

Используя уравнения находим

$$P_2(\sin\beta) = 2\sum_{\gamma,\varepsilon}\sum_{i=0}^{2} P^i \sum_{j=0}^{2}\sum_{k=0}^{1} W_{i,k,j}\cdot \\ \cdot\cos\left[ig' + \varepsilon j(h'-h) - \varepsilon\gamma 2k(f+g)\right], \\ P_2^2(\sin\beta)\cos 2\lambda = -\sum_{\rho,\gamma,\varepsilon}\sum_{j=0}^{2} R^i \sum_{j=0}^{2}\sum_{k=0}^{1} W_{i,k,j}\cdot \\ \cdot\cos\left[2l' + \rho i g' + \rho\varepsilon j(h'-h) - \rho\varepsilon\gamma 2k(f+g)\right], \tag{99}$$

здесь

$$\begin{aligned} &P^0 = \tfrac{1}{2}(3\cos^2 J' - 1),\ R^0 = 3\sin^2 J', \\ &P^1 = \tfrac{3}{2}\sin 2J',\ R^1 = -6\rho\sin J'(1+\rho\cos J'), \\ &P^2 = 3\sin^2 J',\ R^2 = 6(1+\rho\cos J')^2, \end{aligned} \tag{100}$$

$$\begin{aligned} W_{000} &= -\tfrac{1}{64}(3\cos^2 i - 1)(3\cos^2 I' - 1), \\ W_{001} &= -\tfrac{3}{64}\sin 2i\sin 2I', \\ W_{002} &= -\tfrac{3}{64}\sin^2 i\sin^2 I', \\ W_{010} &= -\tfrac{3}{64}\sin^2 i(3\cos^2 I' - 1), \\ W_{011} &= \gamma\tfrac{3}{32}\sin i(1+\gamma\cos i)\sin 2I', \\ W_{012} &= -\tfrac{3}{64}(1+\gamma\cos i)^2\sin^2 I', \\ W_{100} &= \tfrac{1}{64}(3\cos^2 i - 1)\sin 2I', \\ W_{101} &= \tfrac{1}{32}\sin 2i(1+\varepsilon\cos I')(1-\varepsilon 2\cos I'), \\ W_{102} &= -\varepsilon\tfrac{1}{32}\sin^2 i\sin I'(1+\varepsilon\cos I'), \\ W_{110} &= \tfrac{3}{64}\sin^2 i\sin 2I', \\ W_{111} &= -\gamma\tfrac{1}{16}\sin i(1+\gamma\cos i)(1+\varepsilon\cos I')(1-\varepsilon 2\cos I'), \\ W_{112} &= -\varepsilon\tfrac{1}{32}(1+\gamma\cos i)^2\sin I'(1+\varepsilon\cos I'), \\ W_{200} &= -\tfrac{1}{128}(3\cos^2 i - 1)\sin^2 I', \\ W_{201} &= \varepsilon\tfrac{1}{64}\sin 2i\sin I'(1+\varepsilon\cos I'), \\ W_{202} &= -\tfrac{1}{128}\sin^2 i(1+\varepsilon\cos I')^2, \\ W_{210} &= -\tfrac{3}{128}\sin^2 i\sin^2 I', \\ W_{211} &= -\varepsilon\gamma\tfrac{1}{32}\sin i(1+\gamma\cos i)\sin I'(1+\varepsilon\cos I'), \\ W_{212} &= -\tfrac{1}{128}(1+\gamma\cos i)^2(1+\varepsilon\cos I')^2. \end{aligned}$$

При аналитических вычислениях были использованы современные методы компьютерной алгебры [8]. Полученные формулы дают возможность написать уравнения движения в явном виде.

Заключение

Полученные уравнения поступательно-вращательного движения трехосного спутника в оскулирующих элементах могут быть использованы для анализа динамической эволюции поступательно-вращательного спутника в нестационарных гравитирующих системах. Они также могут быть использованы для управления поступательно - вращательным движением спутника с переменной геометрией масс и с переменным составам в поле притяжении сферического тела. Дальнейшее развитие работы предполагает исследование динамической эволюции векового поступательно-вращательного движения трехосного спутника с переменным тензором инерции в вышеприведенных системах оскулирующих элементов.

Список литературы

1. Омаров Т. Б. :Динамика гравитирующих систем Метагалактики. Наука, Алматы (1975)
2. Omarov T. B. (Editor):Non-Stationary Dynamical Problems in Astronomy. Nova Science Publ. Inc., New-York (2002)
3. Bekov A. A., Omarov T. B.: The theory of Orbits in Non-Stationary Stellar Systems. Astron. and Astrophys. Transactions, vol. 22, pp.145-153 (2003)
4. Лукьянов Л. Г.: Динамическая эволюция орбит звезд в тесных двойных системах с консервативным обменом масс. Астрон. ж., т. 85, №8, с.755-768 (2008)
5. Минглибаев М.Дж.: Динамика гравитирующих тел с переменными массами и размерами. Поступательное и поступательно-вращательное движение. Lambert Academic Publishing, Germany (2012)
6. Kinoshita H.: First-Order Perturbations of the Two Finite Body Problem. Publ. Astron. Soc. Japan, vol.24, pp.423-457 (1972)
7. Борисов А.В., Мамаев И.С.: Динамика твердого тела. Гамильтоновы методы, интегрируемость, хаос. Институт компьютерных исследований, Москва-Ижевск (2005)
8. Прокопеня А.Н.: Решение физических задач с использованием системы Mathematica. Издательство БГТУ, Брест (2005)

Применение методов многокритериальной оценки услуг в транспортной компании

Н. Набиева, Г. Жомарткызы, М. Базарова и А. Уркумбаева

Восточно-Казахстанский государственный
технический университет им. Д. Серикбаева,
Усть-Каменогорск, Казахстан
gomartova@mail.ru

Аннотация В статье рассматривается проблема повышения качества предоставляемых услуг транспортной компании. Проведен анализ существующих систем и действующей системы распределения заказов, что подтверждает практическую значимость и необходимость улучшения системы распределения заказов. Описаны бизнес-процессы транспортной компании и данные об исполнителях используемые в системе распределения заказов. В работе применяется метод анализа иерархии применительно к решению задачи оценки услуг в транспортной компании. Выделены основные этапы распределения заказов, определены критерии.

Ключевые слова: транспортная компания, коэффициент важности, многокритериальный анализ, метод анализа иерархий

Введение

Текущее состояние сферы пассажирских перевозок. Обзор существующих систем распределения заказов в транспортных компаниях В период с 1990 по 2014 годы пассажиропоток в Республике Казахстан вырос в 2,8 раза. Если в 1990 году пассажирооборот составлял 91241 млн. пассажирокилометров, то 2014 году пассажирооборот составил 255956,2 млн. пассажирокилометров. Основная доля пассажирооборота в Республике Казахстан приходится на автомобильный и городской электрический транспорт. В 2014 году доля автомобильного и городского электрического пассажирооборота составила 84,9% [1]. Метод анализа иерархий (метод анализа иерархий) и его развитие – метод анализа сетей применяются сейчас очень широко и для самых разных практических задач. Аналитический иерархический процесс и аналитический сетевой процесс обладает рядом достоинств по сравнению с другими методами количественного анализа решений. Именно в этом методе полностью реализована схема системного анализа проблем, а именно: представление проблемы как системы. В рамках диссертационной работы для оценки услуг в транспортной компании выбран метод анализа иерархий. Его преимущество – в методе реализована схема системного анализа проблем, а именно: представление проблемы как системы.

Этапы распределения заказов

Распределение заказов в действующей системе производится таким образом, чтобы определенные исполнители увидели и имели взять заказ раньше других исполнителей. Это достигается разной скоростью поступления заказов в их ленту заказов. Для улучшения системы распределения заказов предлагается следующая схема, состоящая из четырех этапов Рис. 1 На первом

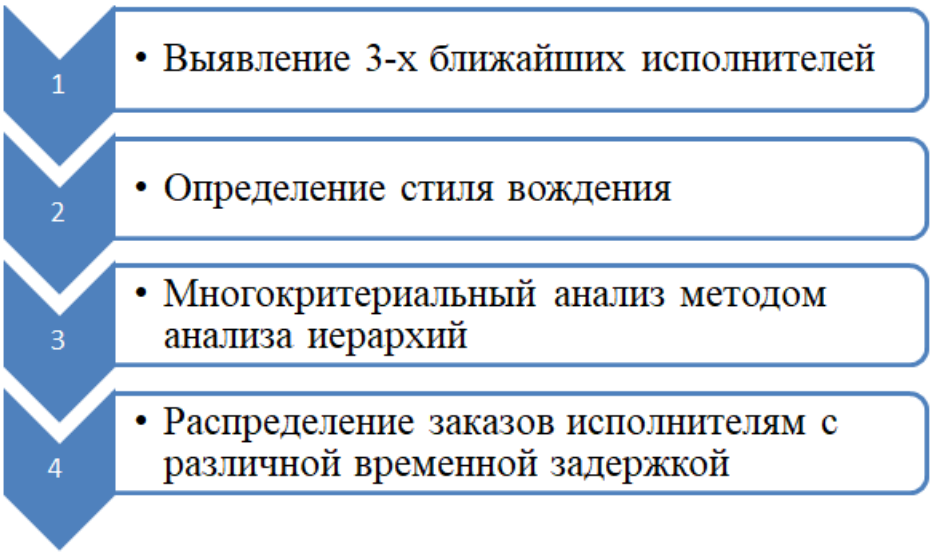


Рисунок 1. Этапы процесса распределения заказов

этапе распределения заказов выявляется 3 ближайших исполнителя. Отдаленность от пассажира определяется по прямой линии на основании координат исполнителей, полученных с GPS-датчиков их мобильных устройств. На втором этапе определяется стиль вождения исполнителя. На третьем этапе выявляется наиболее и наименее предпочтительные исполнители на основании анализа их критериев методом анализа иерархий. На четвертом этапе, на основании ранжирования исполнителей, происходит распределение заказов с различной скоростью. Наиболее предпочтительный исполнитель получает заказ раньше других. Детальное описание каждого этапа представлено в следующих разделах. На основании показаний акселерометра мобильного телефона исполнителя были получены данные об его ускорении, а также на основании датчика GPS получены данные о скорости автомобиля. Основополагающим фактором качественного вождения является спокойная и уравновешенная езда. Спокойная вовсе не значит медленная. Речь идет об оптимальном управлении энергией транспортного средства, а также о со-

кращении излишнего торможения и ускорения. Агрессивное вождение, в частности, резкие ускорения и торможения, негативно влияет на самочувствие пассажира. Безопасное вождение (в частности, избежание аварийных ситуаций) – это также один из основных критериев качества вождения. В основу расчетов стиля вождения положим показатели превышения скорости, резкого ускорения и торможения. Оценка водительского стиля вождения представляет собой сумму штрафных баллов. Чем меньше баллов, тем более безупречным было вождение. Баллы ставятся за каждую поездку, а потом суммируются или усредняются в зависимости от времени или расстояния. Чем чаще водитель тормозит, тем хуже это для безопасности пассажира, а сильное ускорение сказывается на общем самочувствии пассажира. Значение ускорения при аварийном торможении и резком ускорении автомобиля равно 0,4g—0,6g. За каждое резкое торможение и ускорение проставляется 1 балл. По результатам исследований, при превышении средней скорости на 1 км/ч вероятность аварии возрастает на 10-15А при превышении средней скорости потока на 10 и более км/ч – количество аварий начинает резко расти на городских дорогах (Рис. 2). Для загородных дорог рост количества аварий не настолько критичен, но также имеет место [2]. Таким образом,

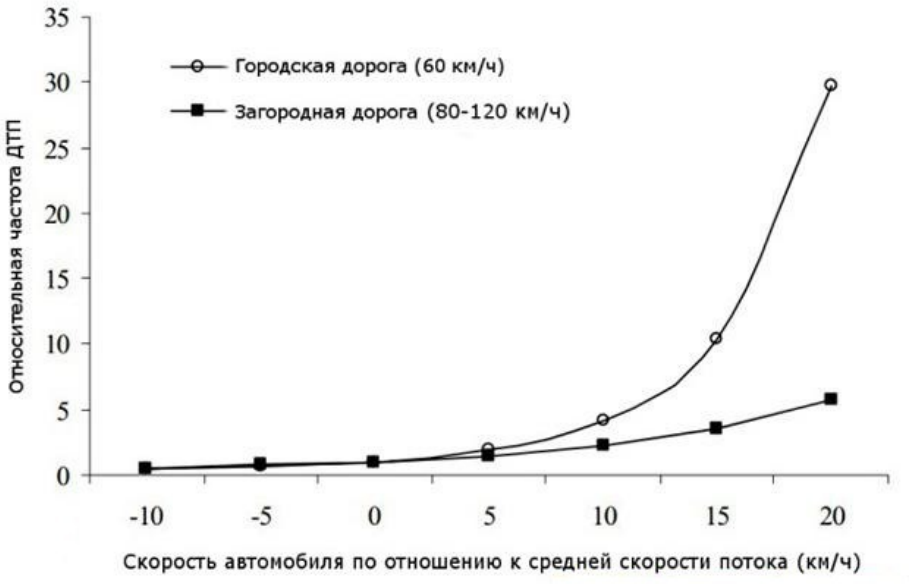


Рисунок 2. Зависимость частоты ДТП от скорости автомобиля

следующий показатель - количество превышений скорости на 10, 20, 30, 40 км/ч. За каждое превышение на 10 км/ч – 1 балл, 20 – 2, 30 – 3 и 40 – 4 балла. Общий алгоритм определения стиля вождения представим в виде

блок-схемы на Рис. 3. Выберем случайным образом данные исполнителя за

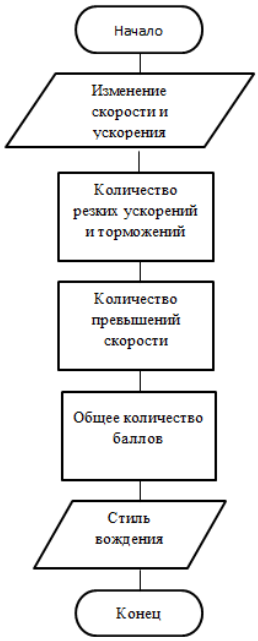


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма определения стиля вождения

1 час. И, на основании мнения экспертов примем: если количество баллов превышает 90 то стиль вождения у данного водителя плохой, если от 20 до 90 баллов то - средний, если менее 20 баллов то - отличный. Количество баллов можно выразить формулой (1), где сумма X – это баллы за количество резких ускорений и торможений, а сумма У - это баллы за количество превышений скорости.

$$K = \sum X + \sum Y \tag{1}$$

Для решения задачи разобьем ее на этапы, показанные на Рис. 4: Этап 1

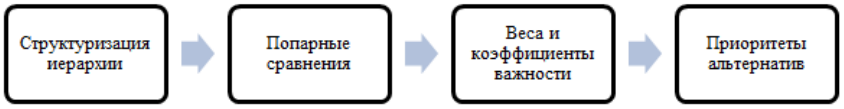


Рисунок 4. Этапы решения задачи многокритериальной оценки услуг

– структуризация иерархии, Этап 2 – попарные сравнения, Этап 3 – нахождение весов и коэффициентов важности, Этап 4 – определение приоритетов альтернатив. Первый этап подразумевает структуризацию задачи в виде иерархии. Суть процедуры – построение иерархической структуры по уровням «цели – критерии – альтернативы». Выберем следующие пять критериев для оценки вариантов выбора наилучшего водителя. 1. Статус 2. Наличие талона и уведомления 3. Наличие нового автомобиля 4. Рейтинг 5. Стиль вождения Критерий «Статус». Подтверждение - это процедура документального подтверждения данных водителя в офисе компании. Для подтверждения водителю необходимо предъявить удостоверение личности и техпаспорт. Критерий “Наличие талона и уведомления”: талон и уведомление - документы, подтверждающие, что водитель уведомил органы власти о том, что он является перевозчиком такси. Талон и уведомление оформляются водителем через ЦОН. Критерий “Новый автомобиль”. Новым авто-

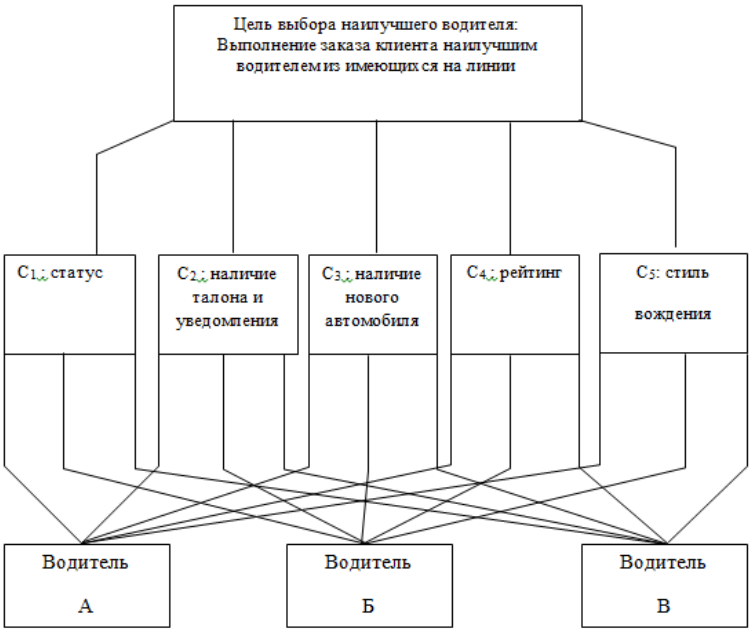


Рисунок 5. Иерархическая структура для выбора наилучшего исполнителя

мобилем считается любой автомобиль не старше 2-х лет или автомобиль не старше 5 лет стоимостью не менее 2,6 млн. тенге, не имеющие видимых дефектов и повреждений экстерьера и интерьера (вмятины, царапины, сколы, порывы, пятна любого размера следы незавершенного либо неаккуратного ремонта и другие видимые дефекты). Критерий “Стиль вождения” может

принимать значение «отличный», «хороший» и «плохой». Критерий “Рейтинг» зависит от оценок пассажиров и может принимать значения от 0 до 5 баллов. Пусть отобрано три альтернативных варианта (из значительно большего числа различных возможных вариантов) исполнителей. Обозначим их через А, Б, В. Требуется определить наилучший из этих вариантов с учетом указанных пяти критериев. Тогда соответствующая структуризация решаемой задачи может быть представлена в виде иерархии, которую иллюстрирует Рис. 5. Как видно из Рис. 5 в данном случае первый (наивысший) уровень иерархии имеет одну цель (выбора наилучшего исполнителя): выполнение заказа клиента наилучшим исполнителем из имеющихся на линии.Элементы второго уровня иерархии это - пять критериев: Статус, Наличие талона и уведомления, Наличие нового автомобиля, Рейтинг, Стиль вождения. Третий уровень иерархии имеет четыре элемента: это - альтернативы водителей: А, Б и В. На Рис. 6 показана страница демонстрационного пользовательского интерфейса, отображающая промежуточные и итоговые результаты многокритериального анализа методом анализа иерархий. В ре-

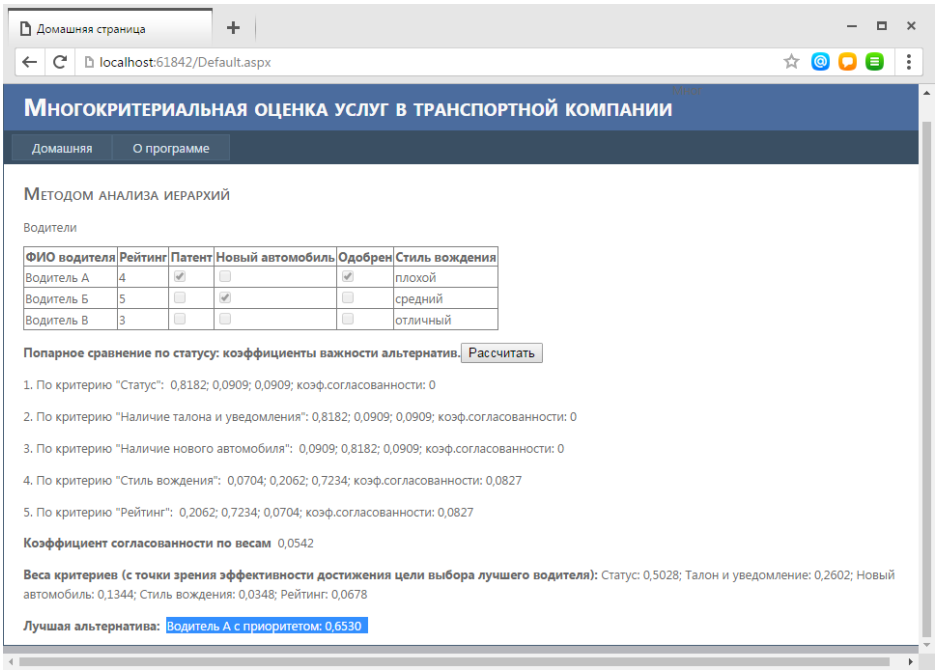


Рисунок 6. Результат работы разработанного web-приложения

зультате работы приложения получаем следующие значения:

Веса критериев: • Статус 0,5028, • Наличие талона и уведомления 0,2602, • Новый автомобиль 0,1344, • Стиль вождения 0,0348, • Рейтинг 0,0678

Заключение

В разделе было описано применение метода анализа иерархии применительно к решению задачи оценки услуг в транспортной компании. Выделены основные этапы распределения заказов. Определены критерии, используемые при ранжировании исполнителей: Статус, Наличие талона и уведомления, Наличие нового автомобиля, Рейтинг, Стиль вождения. Предложен алгоритм нахождения значения критерия «Стиль вождения». С приведением соответствующих формул описаны этапы нахождения наилучшего исполнителя методом анализа иерархий: этап 1 – структуризация иерархии, этап 2 – попарные сравнения, этап 3 – нахождение весов и коэффициентов важности, этап 4 – определение приоритетов альтернатив.

Список литературы

1. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г.: Справочник по элементарной физике. 10-е, испр. и доп. М.: Наука. 61 (1988)
2. Eco Driving: обзор инструмента для оценки водительского поведения, `http://www.pvsm.ru/gps/89061`

Глубина освоения вариантов подэтажной геотехнологии с обрушением на примере Шерегешевского месторождения

С. А. Неверов, Ю. Н. Шапошник, А. А. Неверов и А. И. Конурин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН
akonurin@yandex.ru

Аннотация В работе обобщены исследования нового способа разработки рудных залежей с обрушением в условиях больших глубин. Изложены сравнительные результаты численного моделирования напряженного состояния массива горных пород при отработке Шерегешевского месторождения системами подэтажного обрушения с торцовым и площадно-торцовым выпуском руды. Установлена безопасная глубина освоения геотехнологий.

Введение

Постоянное понижение горных работ на все более глубокие горизонты сопровождается ухудшением горнотехнических и геомеханических условий разработки, возникают проблемы в выборе рациональных параметров добычи и обеспечении сохранности выработок горизонтов выпуска [1-2]. В подобных условиях массив руд и пород нередко переходит в предельное состояние и разрушается в статической и динамической формах. Все эти явления влекут за собой трудности в обеспечении безопасной выемки месторождений и требуют прогнозирования напряженно-деформированного состояния (НДС) разрабатываемого массива пород.

При отработке железорудных месторождений, а также залежей, сложенных рудами средней ценности и качества, наибольшее распространение получили системы подэтажного обрушения. В зарубежной практике, на рудниках Швеции, Канады, США, Чили, Замбии и др., имеются успешные примеры освоения этих геотехнологий на больших глубинах [2]. Однако область их эффективного применения все еще до конца не изучена.

Преимущества систем разработки с закладкой и сплошной выемкой на больших глубинах, как альтернативных способов, очевидны по сравнению с технологиями подэтажного обрушения. Реализация принципа сплошной выемки с закладкой твердеющими смесями позволяет управлять сдвижением подработанного массива и горным давлением, достигать высоких показателей извлечения запасов из недр, утилизировать значительную часть отходов производства. Однако из-за высокой стоимости вяжущих материалов, электроэнергии процесс закладки выработанного пространства достаточно

дорог и даже при средней валовой ценности полезного ископаемого экономически не всегда оправдывается. На рудниках Норильского региона в общей себестоимости добычи руды доля закладки достигает 30%, на Николаевском руднике – до 40%. Поэтому подземные рудники, разрабатывающие месторождения руд средней и малой ценности, вынуждены отказываться от этих прогрессивных технологий и вести поиск более дешевых способов добычи.

Горные технологии с обрушением руды и вмещающих пород имея высокие показатели производительности и интенсивности выемки, и обладая хорошими возможностями к автоматизации производственных процессов, вместе с тем, характеризуются низким уровнем качества и полноты извлечения запасов из недр.

В Институте горного дела СО РАН проведены исследования по технологическому и геомеханическому обоснованию ряда новых способов добычи [1]. Применительно к условиям выемки мощных крутопадающих рудных залежей, к которым относится Шерегешевское месторождение, разработан принципиально новый вариант подэтажного обрушения с площадно-торцовым выпуском руды под обрушенными породами [1, 3, 4].

В основу разработки этой инновационной технологии были положены следующие принципы: адаптация геотехнологии к массивам, склонным к горным ударам; повышение качества и полноты извлечения запасов; простота конструкции, возможность совмещения очистных и проходческих работ, способность к автоматизации; рост производительности труда и оборудования, гибкость и трансформация от одного варианта к другому.

Состояние и перспективы развития горных работ на Шерегешском руднике

Основной системой разработки, применяемой на Шерегешском руднике, являлась технология этажного принудительного обрушения руды и вмещающих пород [5], которая в настоящее время вытесняется подэтажной технологией. Длина блока определяется мощностью рудного тела, ширина панели 27 ÷ 54 м, высота этажа – 70 ÷ 80 м. Обрушение руды на зажатую среду или компенсационные камеры осуществляется пучками параллельно-сближенных глубоких скважин. Донный выпуск руды производится с помощью виброустановок типа ВДПУ-4ТМ.

Особенностью месторождения является расположение его в сейсмоактивном Алтае-Саянском горном регионе с преобладанием высоких тектонических полей напряжений. Горизонтальные напряжения превышают вертикальные в 1,5÷3,0 раза и более [5].

Анализ деятельности предприятия за последние двадцать лет и обобщение горнотехнических условий разработки, позволяют отметить следующее.

1. Для технологии этажного обрушения характерно использование морально устаревшего переносного горного оборудования, которое является причиной достаточно сложного конструктивного оформления днищ блоков и буровых горизонтов (рис. 1).

2. Низкие темпы подготовки блоков и воспроизводства погашенных запасов в 3,0 – 4,0 раза отстают от возможной интенсивности очистной выемки, по сравнению с подэтажным обрушением, ограничивают её и, в конечном счёте, оказывают решающее влияние на производственную мощность рудника.

3. Большие масштабы взрывов при обрушении запасов панелей обусловливают высокую концентрацию опорного давления в призабойной зоне, провоцируют динамические явления большой энергетической мощности (до 10^9 Дж).

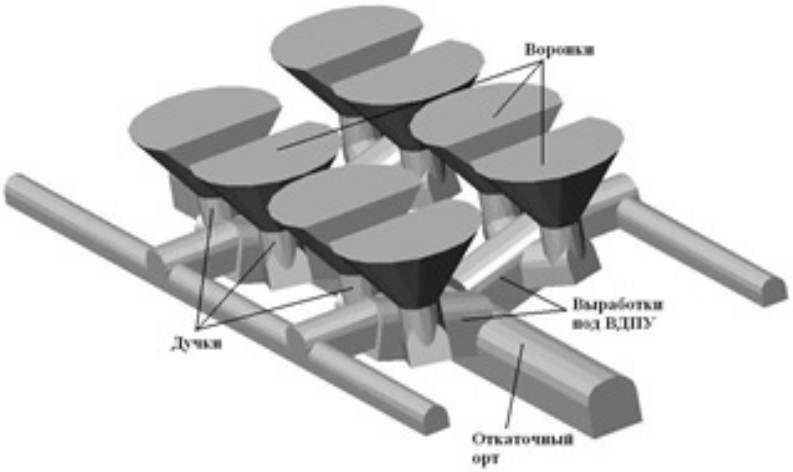


Рисунок 1. Конструкция днища блока системы разработки этажного принудительного обрушения при донном выпуске руды

Отмеченное выше состояние горных работ предопределило необходимость изучения перспективы освоения высокоинтенсивных технологий подэтажного обрушения, основанных на применении комплексов самоходного оборудования. Основные преимущества этих геотехнологий и технико-экономические показатели в сравнении с применяемой системой этажного обрушения раскрыты в работе [6].

Система разработки подэтажного обрушения с площадно-торцовым выпуском руды

За основу создания новой системы разработки принят эталон шведской технологии с торцовым выпуском руды (рис. 2). Сущность подэтажного обрушения с подготовкой горизонта выпуска по площадно-торцовой схеме (рис. 3) заключается в одновременном выпуске отбитой руды по площади слоя и

из его торца. Этим исключаются недостатки торцового выпуска – наблюдается рост показателей извлечения и обеспечивается вентиляция очистных забоев за счет общешахтной депрессии.

Из основных особенностей напомним, что количество погрузочных заездов, находящихся одновременно в очистной выемке, регламентировано и не превышает более двух выработок (одна предназначена для вентиляции, другая находится в процессе проходки) для исключения высокой изрезанности горизонта доставки. Технологические процессы включают в себя послойную отбойку и выпуск руды из торцов буро-доставочного орта и погрузочного заезда.

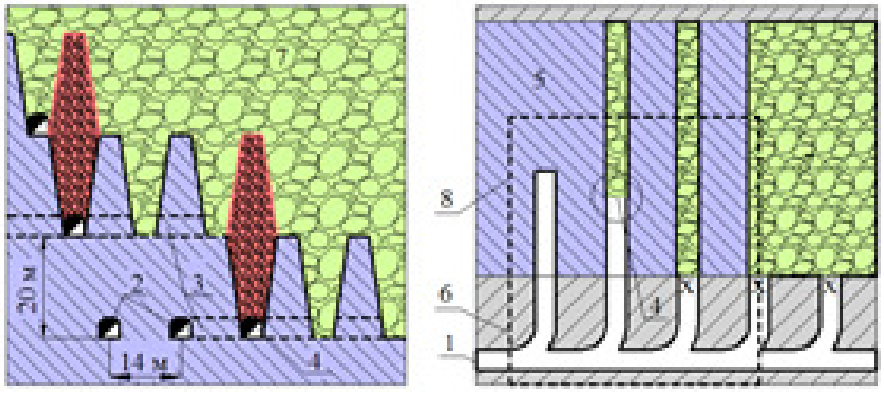


Рисунок 2. Технология подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды: 1 – подэтажные штреки; 2 – подэтажные буро-доставочные орты; 3 – погрузочные заезды; 4 – очистной забой; 5 – рудный массив; 6 – породный массив; 7 – обрушенные вмещающие породы; 8 – область исследования; × – погашенные выработки

Безопасное освоение геотехнологии определяется сохранностью горных выработок на весь срок их службы. Снижение устойчивости буродоставочных ортов, погрузочных заездов и штреков ограничивает область и глубину применения. В связи с этим, рассматривается задача по определению предельной глубины освоения перспективных и наиболее предпочтительных вариантов системы разработки подэтажного обрушения с торцовым и площадно-торцовым выпуском руды для условий отработки глубоких горизонтов Шерегешевского месторождения, путем установления наиболее слабых элементов горных конструкций.

Постановка задачи

Одним из методов эффективного решения подобного типа задач является метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет определить напря-

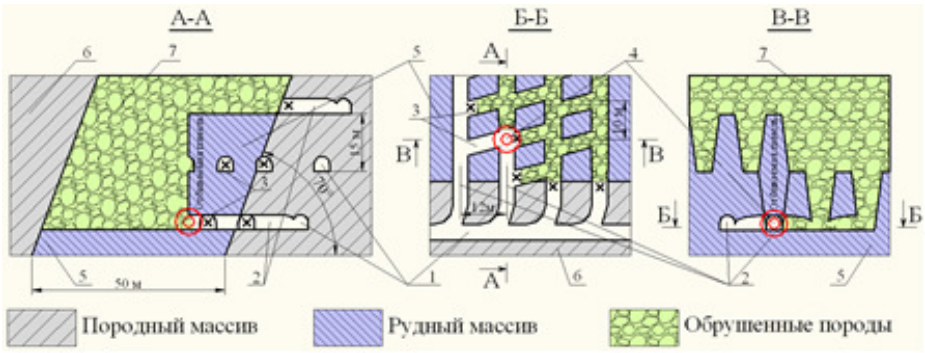


Рисунок 3. Технология подэтажного обрушения с площадно-торцовым выпуском руды: 1 – подэтажные штреки; 2 – подэтажные буро-доставочные орты; 3 – погрузочные заезды; 4 – очистной забой; 5 – рудный массив; 6 – породный массив; 7 – обрушенные вмещающие породы; × – погашенные выработки

женное состояние массива пород в любой его точке с учетом неоднородности и конструктивной (геометрической) сложности системы разработки [7].

Моделирование механического поведения массива горных пород проводилось в предположении объемного напряженного состояния. Рудная залежь и вмещающие породы имитируются упругими, изотропными, линейно-деформируемыми, однородными материалами (табл. 1), на границе контактов которых приняты условия жесткого сцепления.

Таблица 1. Механические свойства моделируемых пород

Показатель	Рудный массив	Породный массив	Обрушенный массив
Объемный вес (γ), т/м^3	3,7	2,8	2,0
Модуль Юнга (E), МПа	6,0 × 10^4	5,0 × 10^4	5,0 × 10^3
Коэффициент Пуассона (μ)	0,25	0,26	0,42

Основные значения тензора напряжений соответствуют натурным замерам, выполненным на Шерегешском руднике [5], на более глубоких горизонтах – прогнозным данным по аналогии с другими месторождениями, схожими по тектонотипу [8]. Величины исходного поля напряжений в массиве пород, принятые в расчетах приведены в табл. 2.

Величина концентрации горизонтальных напряжений (коэффициент бокового давления) с ростом глубины снижается, что отмечается большинством специалистов [9]. Анализ и обобщение опыта отработки месторождений показал, что поле действующих напряжений в условиях больших глубин

Таблица 2. Начальное напряженное состояние массива пород

Напряжения, МПа	Глубина горных работ (H), м		
	600	1000	1500
	$\sigma_{\text{у}} < \sigma_x \leq \sigma_z$	$\sigma_{\text{у}} < \sigma_x \leq \sigma_z$	$\sigma_{\text{у}} \approx \sigma_x \approx \sigma_z$
Вертикальные ($\sigma_{\text{у}} = \gamma H$)	γH	γH	γH
Горизонтальные вкрест простирания ($\sigma_x = q_x \times \gamma H$)	1,8γH	1,6γH	1,1γH
Горизонтальные по простиранию ($\sigma_z = q_x \times \gamma H$)	2,5γH	2,0γH	1,3γH

($H \geq 1500 \div 2000$ м) стремится к равнокомпонентному распределению $\sigma_{\text{у}} \approx \sigma_x \approx \sigma_z$ [9].

Границы геомеханической модели определены в соответствии с принципом Сен-Венана, согласно которого зона влияния горных разработок распространяется на расстояние не более трех максимальных размеров области ведения горных работ вглубь массива и не оказывает влияние на исходные краевые условия.

Упругая постановка задачи объясняется тем, что хрупкие высокомодульные породы не обладают в значительной степени реологическими свойствами, а менее крепкие – разрушаются в течение короткого промежутка времени.

Расчетная область R (см. рис. 4) представляет собой куб размером $1500 \times 2000 \times 2000$ м с параметрами ($0 \leq x \leq L_x$, $0 \leq y \leq L_y$, $0 \leq z \leq L_z$), в которой выполняются следующие уравнения:

равновесия:

$$\sigma_{ij,j} + pF_i = 0, \tag{1}$$

Коши:

$$\varepsilon_{ij} = 0,5(u_{i,j} + u_{j,i}) \tag{2}$$

обобщенный закон Гука:

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \lambda\theta\delta_{ij} \tag{3}$$

и граничные условия:

на плоскости ABCD –

$$\sigma_y(0,x,z) = \gamma g(H-h), \tau_{xy}(0,x,z) = \tau_{zy}(0,x,z) = 0; \tag{4}$$

EFGH –

$$u_y(L_y,x,z) = 0, \tau_{xy}(L_y,x,z) = \tau_{zy}(L_y,x,z) = 0; \tag{5}$$

BCGF –

$$\sigma_z(L_z,y,x) = q_z\sigma_y, \tau_{xz}(L_z,y,x) = \tau_{yz}(L_z,y,x) = 0; \tag{6}$$

ADHE –

$$u_z\,(0,y,x)=0, \tau_{xz}\,(0,y,x)=\tau_{yz}\,(0,y,x)=0, \tag{7}$$

ABFE –

$$\sigma_x\,(0,y,z)=q_x\sigma_y, \tau_{yx}\,(0,y,z)=\tau_{zx}\,(0,y,z)=0; \tag{8}$$

DCGH –

$$u_x\,(L_x,y,z)=0, \tau_{yx}\,(L_x,y,z)=\tau_{zx}\,(L_x,y,z)=0; \tag{9}$$

где σ_{ij}– компоненты тензора напряжений (σ_y, σ_x, σ_z, и τ_{xy}, τ_{xz}, τ_{yz}– соответственно вертикальная, горизонтальные нормальные и касательные компоненты тензора напряжений);$pF_i = \gamma g \delta_{ij}$ – объемные силы; γ – плотность пород; g – ускорение свободного падения; ε_{ij}– компоненты тензора деформаций (ε_y, ε_x, ε_z и ε_{xy}, ε_{yz}, ε_{zx}– соответственно вертикальная, горизонтальные главные линейные и угловые компоненты тензора деформаций); $u_{i,j}$– компоненты вектора перемещений (u_y, u_x, u_z – вертикальная и горизонтальные компоненты вектора перемещений); $\theta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$– относительная объемная деформация; G и λ – параметры Ламе $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$, $\lambda = \frac{E\mu}{(1-2\mu)(1+\mu)}$; δ_{ij}– символ Кронекера; q – коэффициент бокового давления; μ – коэффициент Пуассона; H – глубина разработки; h – расстояние от верхней границы модели до горизонта очистных работ.

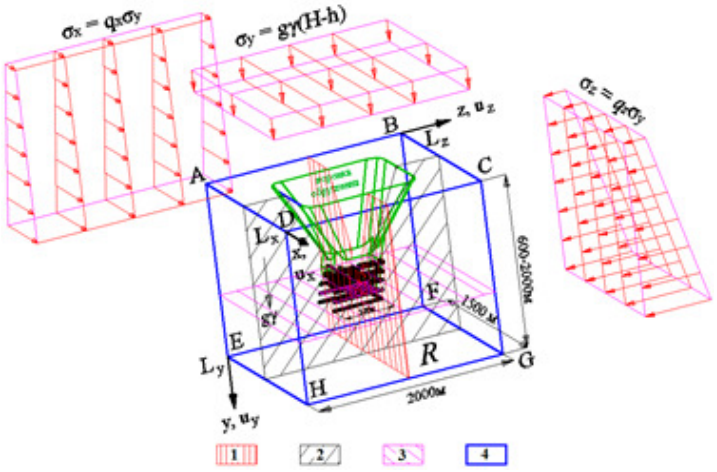


Рисунок 4. Расчетная схема к определению НДС массива: 1 – область разреза по центральной части отрабатываемой панели вкрест простирания залежи; 2 – тоже вдоль простирания залежи; 3 – тоже по горизонту выпуска и доставки руды; 4 – расчетная область $\boldsymbol{R}$

Результаты расчетов приводятся в виде картин-изолиний главных напряжений (МПа): за максимальное напряжение принято σ_1, за минимальное –

σ_3, растяжение – со знаком «минус». Напряженное состояние массива пород оценивалось в области влияния очистного забоя рабочей панели по горизонту выпуска и доставки руды.

Для рассматриваемых геотехнологий приняты следующие значения основных параметров моделируемой горнотехнической ситуации: мощность залежи – 50 м; количество подэтажей в одновременной работе – 2; угол падения – 70^0; высота подэтажа – 20 м; расстояние между буро-доставочными ортами – 14 м; расстояние между погрузочными заездами – 14 м. Конструктивное исполнение вариантов системы разработки с подобными параметрами принято по условию обеспечения максимальных показателей полноты и качества извлечения запасов из недр, более детальные исследования которых приведены в работах [1, 3, 6].

Часть отбиваемой панели, попадающей в разрез по простиранию залежи до выработанного пространства, составляет 5÷12 м. Выработки и обнажения, помеченные на рис. 2-3 знаком «×» погашены, при анализе НДС массива пород напряжения, возникающие вокруг них, во внимание не принимались.

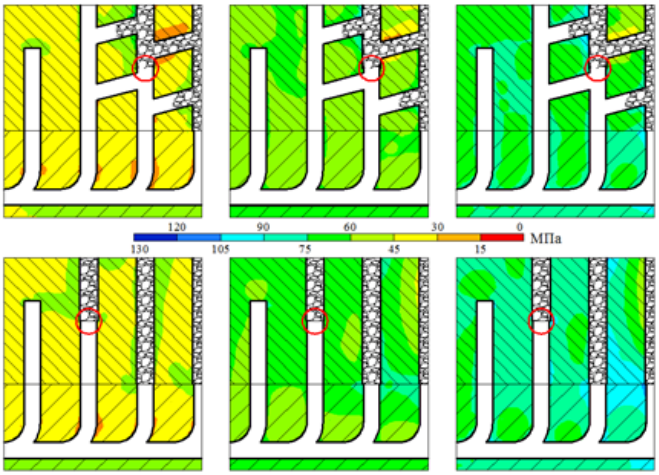
Обсуждение результатов исследований

Очистные панели, в представленных вариантах, находится в весьма неоднородной по напряженному состоянию области с зонами сжатия и растяжения (рис. 5, 6).

Для ситуации с подготовкой горизонта выпуска по площадно-торцовой схеме отмечается, что в наиболее неблагоприятных условиях находятся борта и кровля погрузочных заездов, непосредственно прилегающих к очистному забою, в которых формируются растягивающие напряжения (кругом на рис. 5-7 обозначены очистные забои). Величина их изменяется, в зависимости от глубины разработок, от 0 до -10 МПа (рис. 4).

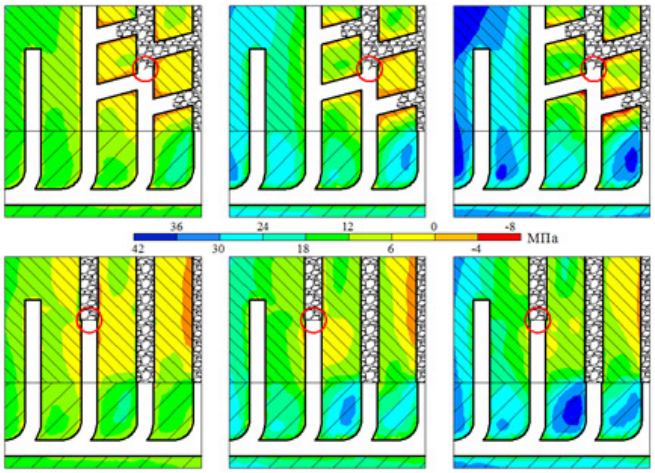
Оценивая НДС массива в районе отрабатываемого подэтажа в условиях площадно-торцового выпуска можно отметить, что напряжения в зоне заездов изменяются от сжатия в кровле к растяжению в бортах. Максимальная концентрация сжимающих напряжений σ_1 в них составляет при H = 600, 1000 и 1500 м соответственно 30-50, 60-80 и 65-90 МПа. В стенках погрузочных заездов по направлению к буро-доставочному орту напряжения σ_3 колеблются от 0 ÷ - 5 МПа. На глубине 1500 м в кровле заездов величина напряжений σ_1 превышает значение 120 МПа. Неблагоприятная ситуация наблюдается в местах сопряжения буро-доставочных ортов с погрузочными заездами и в торцовой зоне выпуска руды (σ_3 = - 5 ÷ - 10 МПа). Давление на кровлю подэтажного орта несколько ниже, чем в погрузочном заезде, σ_1 изменяются от 40 до 90 МПа.

Обобщая результаты расчетов НДС массива на уровне отрабатываемого горизонта при торцовом выпуске отметим следующее. В выработках практически отсутствуют зоны растяжения. Величина максимальной нагрузки в кровле не превышает 80 МПа. Высокая концентрация напряжений наблю-



а) б) в)

Рисунок 5. Характер распределения главных максимальных напряжений σ_1 в массиве пород: а) при глубине горных работ $H = 600$ м; б) $H = 1000$ м; в) $H = 1500$ м

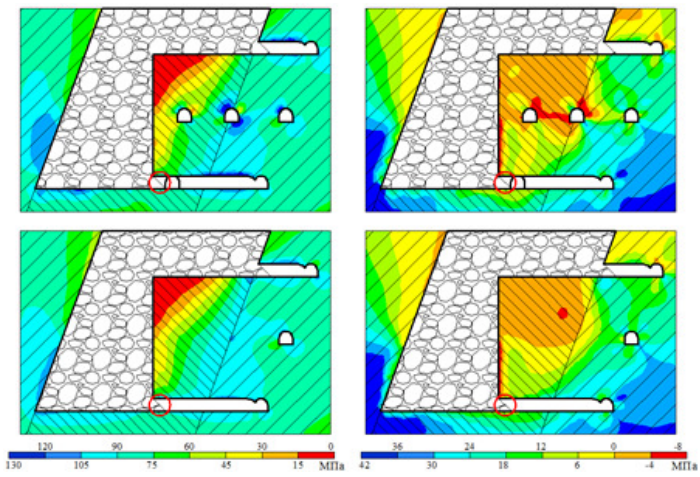


а) б) в)

Рисунок 6. Характер распределения главных минимальных напряжений σ_3 в массиве пород: а) при глубине горных работ $H = 600$ м; б) $H = 1000$ м; в) $H = 1500$ м

дается в области выпуска руды. Напряжения σ_1 в бортах ортов находятся на уровне 30-80 МПа. В целом при аналогичных условиях, напряжения в условиях торцового выпуска руды ниже, чем при площадно-торцовой схеме на 15 - 20 % (см. рис. 5, 6).

На рис. 7 представлен характер распределения максимальных сжимающих и растягивающих напряжений в плоскости вкрест простирания залежи. В центральной части отбиваемого слоя для торцового выпуска и в области влияния погрузочных заездов при площадно-торцовой подготовки залежи характерно наличие растягивающих напряжений соответственно до -2 и -10 МПа. Величина напряжений σ_1 в ромбовидных панелях, отрезанных от рудного массива, изменяется по вертикали в верхней части от 10 до 65 МПа и в нижней – до 90 МПа. Максимальные значения растягивающих усилий наблюдаются в центре панелей, которые постепенно к ее периферии переходят в сжимающие. Для обоих вариантов вне зоны влияния очистных работ характер распределения напряжений приближается к исходному полю, действующему в нетронутом массиве.



а) б)

Рисунок 7. Рис. 7. Характер распределения главных напряжений в крест простирания залежи на глубине 1500 м: а) σ_1; б) σ_3

Таким образом, выполненная геомеханическая оценка в границах исследуемой области очистных работ, показала, что с увеличением глубины разработки состояние горных пород приближается к предельному, при этом наблюдаются обширные зоны с растягивающими напряжениями. В наиболее сложных условиях находятся заезды при площадно-торцовом выпуске и

сопряжения буро-доставочных ортов, для обоих вариантов, с доставочным штреком. В этих местах, возможно, ожидать развития трещин, заколообразования и разрушения.

В качестве критерия оценки прочности горных пород в работе приняты теория максимальных нормальных растягивающих напряжений и показатель устойчивости (K_y), определяемый через уравнение прямолинейной огибающей предельных кругов Мора (критерий Кулона-Мора) с учетом структурного ослабления (K_c), характерного для Шерегешевского месторождения.

$$\sigma_3 \leq [\sigma_{?@54}]_A \tag{10}$$

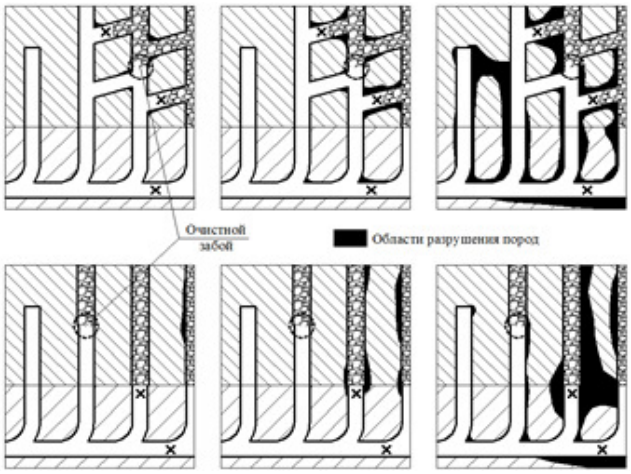
$$_C = \frac{\sin\varphi(\sigma_1 + \sigma_3 + 2 \times C \times ctg\varphi)}{\sigma_1 - \sigma_3} > 1 \tag{11}$$

где $\sigma_{пред}$ – предел прочности пород на растяжение, МПа;

C – сцепление, МПа;

φ – угол внутреннего трения горных пород, град.

На рис. 8 приведены участки массива горных пород, которые наиболее подвержены разрушению в соответствии с вышеприведенными критериями.



а) б) в)

Рисунок 8. Участки ожидаемых разрушений выработок выпуска с ростом глубины горных работ: а) $H = 600$ м; б) $H = 1000$ м; в) $H = 1500$ м

Для площадно-торцового выпуска руды на глубине 1500 м характерны обширные области с растягивающими напряжениями, которые распространены практически по всей длине буро-доставочных ортов и погрузочных

заездов. В связи с тем, что срок существования погрузочных заездов не превышает 10-15 смен, весьма вероятно ожидать их сохранность на глубинах до 1000-1250 м. При необходимости выработки подлежат креплению путем анкерования горных пород.

При торцовой технологии выемки руды устойчивость выработок, с учетом их крепления на глубинах свыше 1000 м, находится на достаточном уровне и не вызывает сомнений. Сохранность кровли ортов оценивается, как достаточная.

Заключение

Области концентрации максимальных сжимающих напряжений σ_1 во всех случаях формируются в окрестностях очистных выработок. Развитие значительных зон растяжения в местах сопряжения буро-доставочных ортов с погрузочными заездами при площадно-торцовой схеме подготовки свидетельствует о возможной потере устойчивости пород.

При глубине горных работ 600 м в подготовительно-нарезных выработках при торцовом и площадно-торцовом выпуске практически не наблюдается растягивающих усилий, и максимальные касательные напряжения не превышают предельных значений.

Глубина 1000 м характеризуется как приемлемая и предельно возможная, соответственно для торцовой и площадно-торцовой схем подготовки. Нагрузки, возникаемые в элементах горных конструкций, соизмеримы с длительным пределом прочности горных пород.

Появление зон повышенного сжатия и растяжения вокруг нарезных выработок и очистного забоя на глубинах 1500 м при площадно-торцовой технологии, свидетельствует о разрушении пород. Технологическое исполнение системы подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды в выделенных условиях больших глубин, позволяет безопасно использовать ее без видимых изменений.

В результате выполненных расчетов установлено, что варианты системы разработки подэтажного обрушения с торцовым и площадно-торцовым выпуском руды, в условиях тектонического поля напряжений Шерегешевского месторождения, могут быть успешно реализованы до глубин 1250 и 1500 м соответственно. Обязательным условием является крепление на горизонтах свыше 1000 м буро-доставочных ортов, их сопряжений с доставочными штреками и погрузочных заездов. Освоение подэтажного обрушения на больших глубинах потребует пересмотра основных конструктивных параметров технологии, в частности, высоты подэтажа, расстояний между буро-доставочными ортами и погрузочными заездами, толщины отбиваемого слоя. При высокой нарушенности горных пород площадно-торцовая схема подготовки способна гибко трансформироваться в торцовую технологию выпуска руды при некотором ухудшении показателей полноты и качества извлечения минерального сырья.

Список литературы

1. Фрейдин А.М., Неверов С.А., Неверов А.А., Филиппов П.А.: Современные способы разработки рудных залежей с обрушением на больших глубинах / Монография: Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, ИГД СО РАН. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 151 с.
2. Замесов Н.Ф., Айнбиндер И.И., Бурцев Л.И., Родионов Ю.И., Овчаренко О.В.: Развитие интенсивных методов добычи руд на больших глубинах. — М.: ИПКОН РАН СССР — 1990. – 234 с.
3. Фрейдин А.М., Неверов С.А.: Моделирование площадно-торцовой технологии выпуска руды под обрушенными породами / ФТПРПИ. – 2005. – № 5, с. 50 – 61.
4. Фрейдин А.М., Неверов С.А., Неверов А.А., Филиппов П.А.: Устойчивость горных выработок при системе разработки подэтажного обрушения / ФТПРПИ. – 2008. – № 1, с. 71 – 81.
5. Курленя М.В., Ерёменко А.А., Шрепп Б.В.: Геомеханические проблемы разработки железорудных месторождений Сибири. — Новосибирск: Наука, 2001. – 230 с.
6. Фрейдин А.М., Неверов А.А., Неверов С.А.: Современные способы выемки мощных залежей под обрушенными породами на больших глубинах / Горный журнал. – 2007, № 4 с. 46-49.
7. Зенкевич О.: Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 538 с.
8. Айтматов И.Т., Кожогулов К.Ч.: Напряженное состояние и прочность элементов систем разработок крутопадающих месторождений Средней Азии. / Фрунзе. Изд-во ИЛИМ — 1988. – 124 с.
9. Марков Г.А., Савченко С.Н.: Напряженное состояние пород и горное давление в структурах гористого рельефа. Л., Наука. — 1984. – 140 с.

Анализ сейсмических волн, генерируемых импульсным электромагнитным источником “Енисей”, с применением высокопроизводительных вычислений

В. М. Садовский и О. В. Садовская

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
sadov@icm.krasn.ru,o_sadov@icm.krasn.ru

Аннотация Разработана вычислительная технология для моделирования волновых полей, генерируемых импульсным электромагнитным источником сейсмических колебаний “Енисей”, в блочно-слоистых геосредах с различными механическими характеристиками слоев. К описанию волновых процессов применяются математические модели динамики упругих и упругопластических сред, пористых и сыпучих материалов. На основе метода двуциклического расщепления по пространственным переменным построены алгоритмы численной реализации моделей. Вычислительные эксперименты на многопроцессорных системах кластерной архитектуры показали, что предлагаемая технология позволяет с высокой степенью детализации воспроизвести систему волн вблизи областей возбуждения сейсмических колебаний. Результаты расчетов могут быть использованы при отработке оптимальных режимов функционирования источника “Енисей”, когда механические характеристики слоев меняются в широком диапазоне от твердых и мерзлых грунтов с включениями горной породы до сыпучих и глинистых водонасыщенных сред. Численный анализ позволяет также получить усредненные данные, необходимые для адекватного моделирования локализованного импульсного воздействия от источника при использовании упрощенных математических моделей для расчета синтетических сейсмограмм отраженных волн на большом протяжении и глубине залегания разнородных слоев в сложнопостроенных госредах.

Ключевые слова: Блочно-слоистая геосреда, электромагнитный источник сейсмических колебаний, упругие волны, параллельный вычислительный алгоритм, суперкомпьютерное моделирование

Введение

Северные территории Восточной Сибири характеризуются таежной вечномерзлотной структурой поверхностного слоя почвы, что снижает эффективность геологической разведки с использованием сейсмических источников

взрывного и вибрационного типов. Электромагнитный источник сейсмических колебаний “Енисей” представляет собой невзрывной поверхностный импульсный сейсмический источник с силовым электромагнитным приводом, который содержит один, два или четыре синхронно работающих короткоходовых электромагнита с автономной системой питания от емкостного накопителя электрической энергии и устройства для заряда и разряда [1,2,3]. Источник существует в колесном, санном, мобильном и водном вариантах (см. рис. 1). Он вполне конкурентоспособен в сравнении с источниками взрывного и вибрационного типа по эффективности и качеству производства разведочных работ и имеет неоспоримые преимущества в экономическом и экологическом аспектах. Использование этого источника обходится несравнимо дешевле, и он является едва ли не единственным возможным средством при проведении работ вблизи зданий и сооружений, в водоохранных зонах и на площадях, где имеется большое количество рек и озер. Применяется также по ледовым покрытиям водоемов, на мелководье и на шельфах. В процессе создания, доработки и совершенствования эксплуатационных и технических характеристик электромагнитный импульсный источник “Енисей” был подвергнут тщательному экспериментальному анализу и тестированию [4,5].

а *б*



Рисунок 1. “Сейсмоисточники серии «Енисей”: http://gseis.ru/our-business/field-seismic-works/impulse-technique/.

В настоящей работе представлена вычислительная технология, конечной целью которой является детальное математическое моделирование волновых полей, возбуждаемых источником “Енисей” в блочно-слоистых геосредах с различными механическими характеристиками блоков (глинистых и мерзлых грунтах, сыпучих, пористых и флюидонасыщенных средах). Результаты моделирования с использованием высокопроизводительных вычислений будут использоваться для оптимизации режимов функционирования источника при проведении сейсмических исследований.

Математическая модель

Для численного моделирования процессов распространения волн напряжений и деформаций в реологически сложных средах нами разработаны вычислительные алгоритмы и программные комплексы, ориентированные

на многопроцессорные вычислительные системы кластерной архитектуры. Применяются математические модели упругопластических, сыпучих и пористых сред с учетом разного сопротивления материалов растяжению и сжатию. Используются также уравнения динамики моментного континуума Коссера, описывающие волновые движения структурно-неоднородных сред, в которых наряду с поступательными степенями свободы реализуются независимые вращения материальных частиц.

Предполагается, что структура среды известна и представлена набором из разнородных блоков с криволинейными границами. Каждый блок характеризуется своим однородным материалом с соответствующими определяющими уравнениями. В простейшем случае упругого материала выполняется система уравнений линейной динамической теории упругости, записанная для вектора скорости v и тензора напряжений σ:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \nabla \cdot \sigma, \quad \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \rho\big(c_1^2 - 2\,c_2^2\big)(\nabla \cdot v)\,I + \rho\,c_2^2\,(\nabla v + \nabla v^*)\,. \tag{1}$$

Здесь ρ – плотность, c_1 и c_2 – скорости продольных и поперечных упругих волн, ∇ – градиент по пространственным координатам, I – единичный тензор. Точка над символом означает производную по времени, используются общепринятые обозначения тензорного анализа.

Начальные скорости и напряжения считаются равными нулю. На части границы задаются внешние напряжения от сосредоточенного импульсного воздействия. На плоскостях симметрии, если такие имеются, формулируются условия симметрии. Часть границы может быть неотражающей поверхностью, на ней моделируются условия прохождения волн без заметного отражения. На внутренних границах раздела ставятся условия непрерывности векторов скоростей и напряжений на площадках контакта блоков.

При численной реализации модели в блоках строятся независимые (несогласованные) расчетные сетки. Применяется алгебраический метод, состоящий в нахождении взаимно-однозначного отображения вычислительной области в виде единичного куба с равномерной сеткой на физическую область.

Исходная система уравнений (1) при построении конечно-разностной схемы записывается в матричной форме:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \sum_{i=1}^{3} A_i \frac{\partial U}{\partial x_i}\,, \tag{2}$$

где U – вектор–функция, составленная из компонент вектора скорости и тензора напряжений, A_i – матрицы–коэффициенты уравнений. Для решения системы (2) применяется схема интегрирования на основе метода двуциклического расщепления [6]. При этом расщепление производится не в физическом, а в параметрическом пространстве. Система преобразуется к следующему виду:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \sum_{i=1}^{3} \widetilde{A}_i \frac{\partial U}{\partial \xi_i}\,, \quad \widetilde{A}_i = \sum_{j=1}^{3} \frac{\partial \xi_i}{\partial x_j} A_j\,. \tag{3}$$

Метод расщепления приводит к серии из шести одномерных задач, три из которых решаются на временном интервале $[t_n, t_n + \tau/2]$, а остальные три – на интервале $[t_n + \tau/2, t_n + \tau]$ (τ – шаг сетки по времени):

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial U^{(1)}}{\partial t} = \widetilde{A}_1 \frac{\partial U^{(1)}}{\partial \xi_1}\ ,\ U^{(1)}(t_n) = U(t_n)\ ,\\
&\frac{\partial U^{(2)}}{\partial t} = \widetilde{A}_2 \frac{\partial U^{(2)}}{\partial \xi_2}\ ,\ U^{(2)}(t_n) = U^{(1)}(t_n + \tau/2)\ ,\\
&\frac{\partial U^{(3)}}{\partial t} = \widetilde{A}_3 \frac{\partial U^{(3)}}{\partial \xi_3}\ ,\ U^{(3)}(t_n) = U^{(2)}(t_n + \tau/2)\ ,\\
&\frac{\partial U^{(4)}}{\partial t} = \widetilde{A}_3 \frac{\partial U^{(4)}}{\partial \xi_3}\ ,\ U^{(4)}(t_n + \tau/2) = U^{(3)}(t_n + \tau/2)\ ,\\
&\frac{\partial U^{(5)}}{\partial t} = \widetilde{A}_2 \frac{\partial U^{(5)}}{\partial \xi_2}\ ,\ U^{(5)}(t_n + \tau/2) = U^{(4)}(t_n + \tau)\ ,\\
&\frac{\partial U^{(6)}}{\partial t} = \widetilde{A}_1 \frac{\partial U^{(6)}}{\partial \xi_1}\ ,\ U^{(6)}(t_n + \tau/2) = U^{(5)}(t_n + \tau)\ .
\end{aligned} \tag{4}$$

Вектор–функция $U^{(6)}(t_n + \tau)$ представляет собой искомое решение на временном слое $t_n + \tau$. Для сохранения свойства консервативности схемы на криволинейных сетках, когда матрицы–коэффициенты $\widetilde{A}_i$ зависят от координат, аппроксимация одномерных систем уравнений на шаге “корректор” производится с помощью интегро-интерполяционного метода. В результате интегрирования системы (4) по криволинейной ячейке в физической области с последующим применением формулы Грина получается следующее равенство:

$$\frac{\partial \overline{U}}{\partial t} = \frac{1}{\omega} \sum_{k=1}^{6} \gamma^k \left(n_1^k A_1 + n_2^k A_2 + n_3^k A_3 \right) U^k\ , \tag{5}$$

в котором n_i – направляющие косинусы внешней нормали, ω – объем ячейки, $\overline{U}$ – среднее интегральное значение вектора–решения, а индекс k относится к граням ячейки, в частности γ^k – площадь соответствующей грани. Далее сумма в правой части (5) разбивается на три пары слагаемых по противоположным граням, каждая из которых отвечает аппроксимации производных по пространственным переменным в одномерных системах (4).

Применяемая схема решения одномерных задач является гибридным вариантом сеточно-характеристической схемы второго порядка точности на монотонных решениях. Метод двуциклического расщепления сохраняет второй порядок точности. Кроме того, двойной пересчет одной и той же системы уравнений на третьем и четвертом этапах расщепления гарантирует устойчивость метода при выполнении одномерного условия Куранта–Фридрихса–Леви.

Описанный алгоритм обобщен на случай сыпучей среды [7], пористого материала [8], моментного континуума Коссера и многоблочной среды [7,9]. Разработанный метод решения реализован в виде программного комплекса

на алгоритмическом языке Fortran с использованием библиотеки обмена сообщениями MPI (Message Passing Interface). Технология распараллеливания основана на равномерном распределении расчетной области между узлами кластера. Верификация программного комплекса выполнена на точных решениях – формулах геометрической сейсмики для годографов отраженных и преломленных волн. Комплекс параллельных программ зарегистрирован в Роспатенте [10].

Результаты расчетов

Предварительная серия расчетов проводилась с целью валидации программного комплекса по основным параметрам сейсмических волн от источника – частотам и амплитудам колебаний. Сопоставление численных результатов с имеющимися экспериментальными данными показало удовлетворительное количественное соответствие.

Задача решалась для двухслойного массива упругой среды $60\times40\times40$ м^3, в двух вариантах, когда верхний 10–метровый слой является более податливым и, наоборот, более жестким по сравнению с нижним 50–метровым основным слоем. Для демонстрации возможностей программы граница раздела между слоями была искривлена, как это показано на рис. 2, где расчетная область равномерно распределена между 96 процессорами: 16 в верхнем слое и 80 – в нижнем.

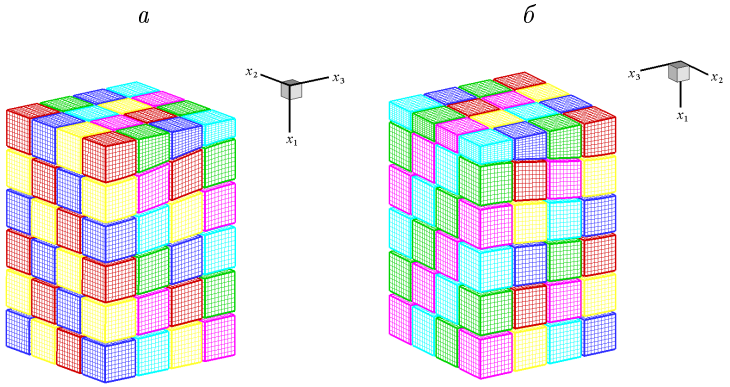


Рисунок 2. Двухслойная расчетная область с криволинейной границей (виды с разных сторон). Равномерное распределение вычислительной нагрузки между 96 узлами кластера.

Каждый процессор кластера производит вычисления в параллельном режиме. Разностная сетка в верхнем слое массива – $50 \times 200 \times 200$ ячеек, а в нижнем слое – $250 \times 200 \times 200$ ячеек, т.е. каждым узлом кластера выполняются расчеты на сетке из $50 \times 50 \times 50$ ячеек. Для наглядности разностная сетка на рис. 2 прорежена в 5 раз в каждом направлении.

На верхней границе расчетной области задавалось локализованное воздействие от колесного источника с четырьмя электромагнитами. С учетом симметрии расчеты проводились для четверти массива, ограниченной вертикальными координатными плоскостями. На левой и правой границах области решения (см. рис. 2*б*) ставились условия симметрии, тыльные границы и нижнее основание рассматривались как неотражающие поверхности. На этапе решения одномерных систем метода расщепления на этих поверхностях полагались нулевыми граничные значения инвариантов Римана, соответствующих уходящим характеристикам, что эквивалентно отсутствию отраженных волн в одномерных задачах.

На рис. 3 приведен график зависимости от времени давления от источника в зоне локализации, круге площадью 1 м^2, расположенном на удалении 2.5 м и 1.25 м от левой и правой границ симметрии. Давление в таком виде задавалось на основе экспериментальных измерений ускорения реактивной массы электромагнита. Плотности в слоях и скорости упругих волн приведены в таблице 1.

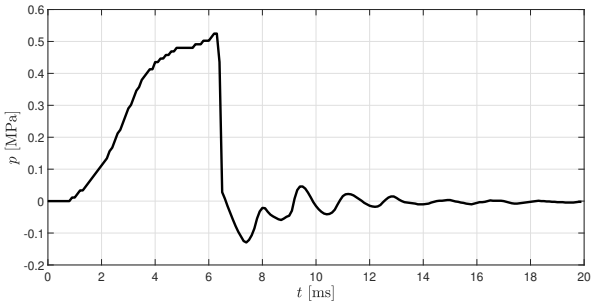


Рисунок 3. Зависимость от времени давления от источника в зоне локализации.

Выполнены расчеты для двухслойного и трехслойного массивов упругой среды. На рис. 4 *а* изображены характерные поверхности уровня касательного напряжения σ_{23} в случае податливого верхнего слоя (глина), а на рис. 4 *б* – в случае жесткого верхнего слоя (твердый грунт). Верхний слой – вода на рис. 4 *в*. Верхний слой – лед, средний слой – вода на рис. 4 *г*. В качестве ниж-

Таблица 1. Механические параметры материалов.

	ρ [кг/м^3]	c_p [м/с]	c_s [м/с]
лед	900	3000	1800
вода	1000	1450	0
глина	2100	1800	1100
грунт	2400	4500	2700
твердый грунт	2600	6000	3500

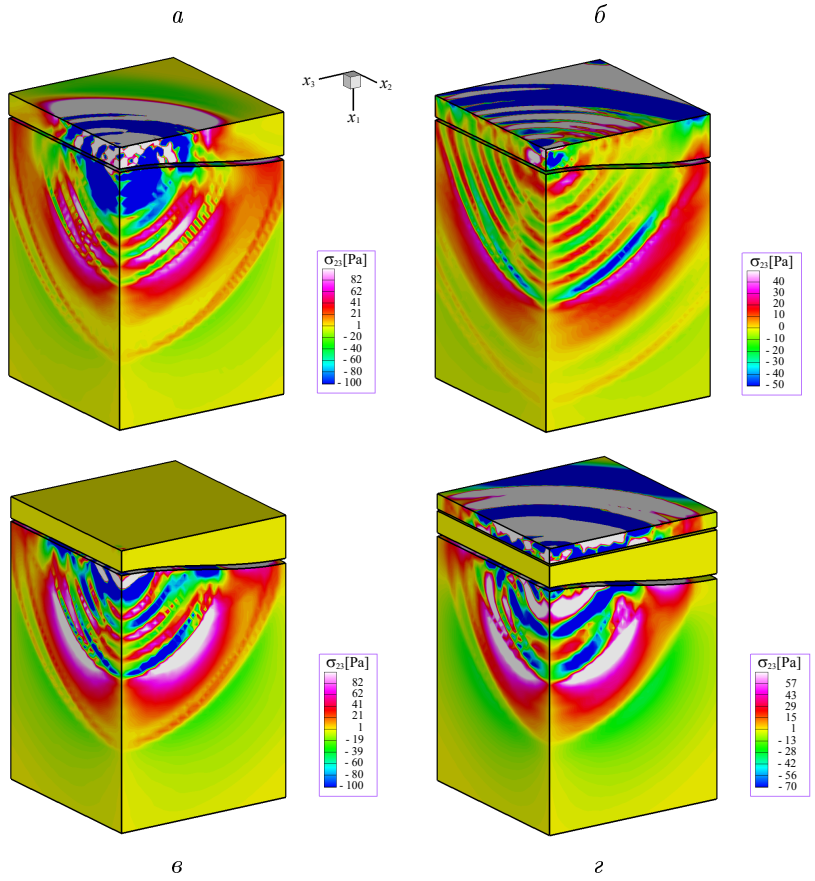


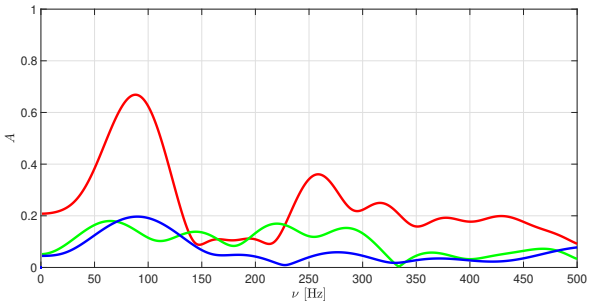
Рисунок 4. Поверхности уровня касательного напряжения σ_{23} ($t = 18$ мс). Нижний слой – грунт; верхний слой – глина ($а$), твердый грунт ($б$), вода ($в$), и верхний слой – лед, средний слой – вода ($г$).

него слоя всюду взят грунт с параметрами из таблицы 1. Толщина ледового покрова в расчетах – 3.5 м, что характерно для арктического шельфа.

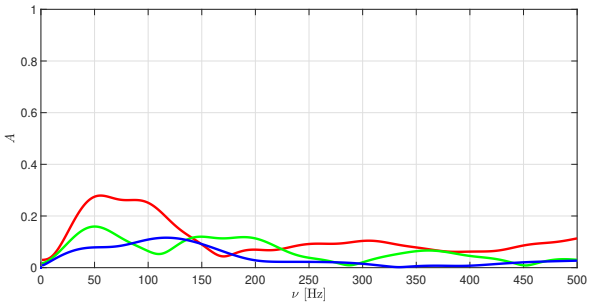
На рис. 5 приведены амплитудно-частотные зависимости для скорости v_1 частиц среды на глубине 30 м в системе точек под трассой, проходящей в направлении оси x_2 вблизи плоскости симметрии. Красная линия относится к точке, находящейся под источником, зеленая линия – к срединной точке влево, а синяя линия – к угловой левой точке.

Фурье–анализ сейсмограмм скоростей показал, что основная частота, которая слабо зависит от точки регистрации упругих колебаний, находится в пределах 50 – 100 Гц. Вместе с тем, в принимаемом сигнале содержатся высокочастотные колебания, степень затухания которых по мере прохождения

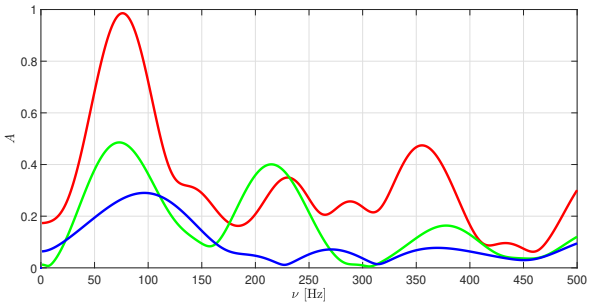
а



б



в



г

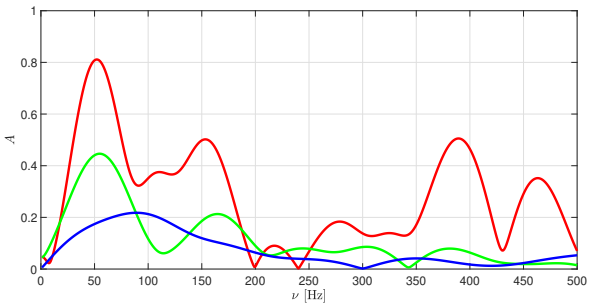


Рисунок 5. Амплитудно-частотные зависимости для скорости v_1 частиц среды на глубине 30 м. Нижний слой – грунт; верхний слой – глина (*а*), твердый грунт (*б*), вода (*в*), и верхний слой – лед, средний слой – вода (*г*).

волн за счет диссипации механической энергии может быть исследована с применением более общих уравнений вязкоупругих сред.

Список литературы

1. Смирнов В.П.: Электромагнитные источники сейсмических колебаний ряда “Енисей СЭМ, КЭМ”. Приборы и системы разведочной геофизики **3**(1), 21–25 (2003)
2. Детков В.А., Щадин П.Ю., Ивашин В.В.: Импульсные электромагнитные сейсмоисточники “Енисей”: особенности технического решения и применения. Приборы и системы разведочной геофизики **22**(4), 30–33 (2007)
3. Детков В.А.: Возбуждение сейсмических волн импульсными невзрывными источниками. Журнал СФУ: Сер. Математика и физика **2**(3), 298–304 (2009)
4. Смирнов В.П.: Технические средства и содержание проверки источников ряда “Енисей” в цикле накопления одиночных и групповых воздействий. Приборы и системы разведочной геофизики **12**(2), 45–48 (2005)
5. Щадин П.Ю.: Характеристики волнового сейсмического поля, возбуждаемого импульсными источниками “Енисей”. Технологии сейсморазведки **10**(4), 74–80 (2013)
6. Садовская О.В., Садовский В.М.: Параллельная реализация алгоритма для расчета упругопластических волн в сыпучей среде. Вычислительные методы и программирование **6**(2), 86–93 (2005)
7. Sadovskaya O., Sadovskii V.: Mathematical Modeling in Mechanics of Granular Materials. Vol. 21 of Advanced Structured Materials. Springer, Heidelberg – New York – Dordrecht – London (2012)
8. Садовский В.М., Садовская О.В.: Анализ деформации пористой среды с учетом схлопывания пор. Прикладная механика и техническая физика **57**(5), 53–65 (2016)
9. Sadovskii V.M., Sadovskaya O.V.: Modeling of elastic waves in a blocky medium based on equations of the Cosserat continuum. Wave Motion **52**, 138–150 (2015)
10. Садовский В.М., Садовская О.В.: Программный комплекс для решения трехмерных упругопластических задач динамики сыпучих сред (3Dyn_Granular). Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2012613990 от 28.04.2012 (Роспатент). RU ОБПБТ **3**(80), 209 (2012)

Расчёт сложных гидродинамических систем с применением разномасштабных методов моделирования

С. Филимонов, А. Дектерев и Д. Боиков

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Красноярск, Россия
Сибирский Федеральный Университет,
Красноярск, Россия
bdk@inbox.ru

Аннотация РРабота посвящена построению разномасштабных гидродинамических моделей. Разномасштабной или гибридной будем называть модель, в которой одновременно присутствую разные по масштабу элементы – в данном случае пространственные (3D) и сетевые (балансовое). В работе исследована актуальность построения таких моделей и рассмотрены три основных способа их реализации: пространственная и сетевая части рассчитываются по отдельности – результат расчёта одной части модели является входным параметром для другой; гидравлически единая модель: пространственная и сетевая части рассчитываются одновременно – сопряжение между моделями осуществляется во время расчёта; гидравлически не связанная модель – сетевые элементы «пронизывают» пространственную часть – связь происходит с помощью интегральных характеристик на стенках трубы/канала. У каждого способа есть свои достоинства и недостатки, которые показаны на практических примерах.

Ключевые слова: Вычислительная гидродинамика, сетевые модели, сопряженный теплообмен

Введение

При решении задач гидродинамики, в зависимости от типа объекта (системы, устройства и так далее), используются различные подходы моделирования: на основе методов вычислительной гидродинамики - пространственное (одно- двух- трехмерное) и сетевое (балансовое). Сетевое моделирование применяется в случае, когда объект можно представить в виде набора протяжённых элементов (труб или каналов), при этом расчёт искомых характеристик системы (давление, скорость, температура и так далее) осуществляется методами теории гидравлических сетей [1]. Гидравлическая сеть состоит из набора узлов и ветвей (граф) [2]. В узлах обеспечиваются законы сохранения массы и энергии (законы Кирхгофа). На ветвях обеспечивается закон количества движения, который описывает зависимость перепада давления

по длине ветви от расхода. При необходимости получить пространственное распределение характеристик течения и теплообмена применяют методы вычислительной гидродинамики (CFD) [3]. В основе данных методов лежит численное решение уравнений Навье-Стокса. В результате расчёта получаются поля характеристик исследуемого объекта, распределённые по объему, например: скорость, давление, температура, концентрации, турбулентные характеристики и др. Каждый из этих подходов моделирования обладает своими достоинствами и недостатками. Несомненным достоинством сетевого моделирования является относительная простота построения топологии модели и небольшие вычислительные затраты. К недостаткам можно отнести сильную зависимость модели от эмпирических данных (например, гидравлического сопротивления), характеризующих свойства элемента (узла, ветви), и возможность получения только осредненных по элементу сети характеристик системы. Сильной стороной пространственного CFD моделирования является возможность моделирования объекта сложной геометрии с описанием детальной структуры потока, меньшая зависимость модели от эмпирических данных, однако, такое моделирование требует значительных вычислительных затрат. Оба подхода моделирования нашли широкое применение при решении практических и научных задач. Однако, возникают случаи, когда моделирование объекта исследования в рамках одного подхода затруднительно. Например, предмет моделирования одновременно состоит из протяженных и более «компактных» элементов, представление «компактных» элементов невозможно в виде набора ветвей и узлов, а полностью пространственный расчет всех протяженных элементов ведет к неоправданно большим вычислительным затратам. Тогда необходимо построение разномасштабной модели. Примеры таких объектов моделирования можно обнаружить в различных областях жизни:

- кровеносная система, состоящая из сердечной мышцы, аорты, крупных артерий и вен, с одной стороны, и сети мелких кровеносных сосудов и капилляров с другой;
- система тепло- и водоснабжения, содержащая длинные участки трубопроводов и сложные регулирующие, раздающие и собирающие устройства;
- системы природных водоемов, включающие русла рек с протоками и дельтой, гидротехнические сооружения.

Основные методы построения разномасштабных моделей

Существует несколько способов реализации разномасштабных моделей, основные три из них:

1. полностью разделённая модель: пространственная и сетевая части рассчитываются по отдельности;

2. гидродинамически единая модель: пространственная и сетевая части рассчитываются одновременно;
3. гидродинамически не связанная модель: сетевые элементы «пронизывают» пространственную часть, и связь происходит с помощью интегральных характеристик на стенках трубы/канала.

Рассмотрим каждый способ более подробно.

Полностью разделенная модель

При применении такого способа, пространственная и сетевая части задачи рассчитываются по отдельности в разных программных продуктах, и результаты расчёта одной из частей модели определяют значения входных параметров для другой. Наиболее яркий пример применения данного способа – это определение гидравлического сопротивления нестандартного элемента сетевой модели пространственными методами [4] или определение входных параметров сложного устройства, рассчитав подводящую трубопроводную обвязку сетевыми методами. Несомненным достоинствам такого способа является возможность использовать готовые программные продукты для расчёта обеих частей задачи без каких-либо модификаций, так как передача информации между частями модели осуществляется вручную. Основной недостаток полностью разделенной модели – ограниченная применимость, например, при определении гидравлического сопротивления элемента посредством трёхмерных расчетов должна быть возможность построения зависимости между расходами в различных входах/выходах в элемент и перепадами давления между ними, что для большого числа входов/выходов потребует проведения множества 3D расчетов. Однако, если такую зависимость можно построить, то для дальнейших расчетов можно использовать только сетевую модель, а значит и сократить время расчёта. В качестве примера приведена система смазки узлов планетарного редуктора. Для обеспечения смазки подшипников сателлитов неподвижного водила и подшипников приводных вал-шестерен была спроектирована магистраль системы смазки (рис. 1) Кольцевой маслопровод осуществляет подачу смазки в подшипники сателлитов, а боковые отводки осуществляют подачу масла в подшипники приводных шестерен сателлитов.

Была поставлена задача выравнивания расходов из выходных отверстий. Сетевая модель системы смазки приведена на рис. 2. Особенностью данной задачи был ламинарный режим течения масла. При построении сетевой модели не было найдено данных о сопротивлении поворотного штуцера. Для определения этой информации была создана модель штуцера (рис. 3 и проведена серия CFD расчетов, в которых варьировалось значение расхода масла через штуцер. Диаметр входного патрубка равен 8 мм, диаметр выходного отверстия 6 мм. Плотность масла равна 907 кг/м3, вязкость 0,099 Па·с. Расход масла в патрубке штуцера варьировался для чисел Рейнольдса от 50 до 300. На входе задавался развитый ламинарный профиль, на выходе постоянное давление. В результате пространственных CFD расчетов

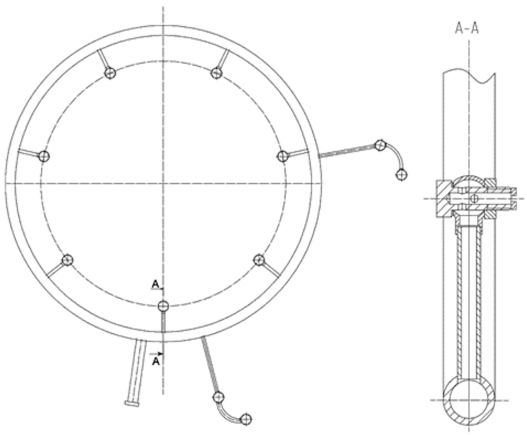


Рисунок 1. Эскиз системы смазки редуктора

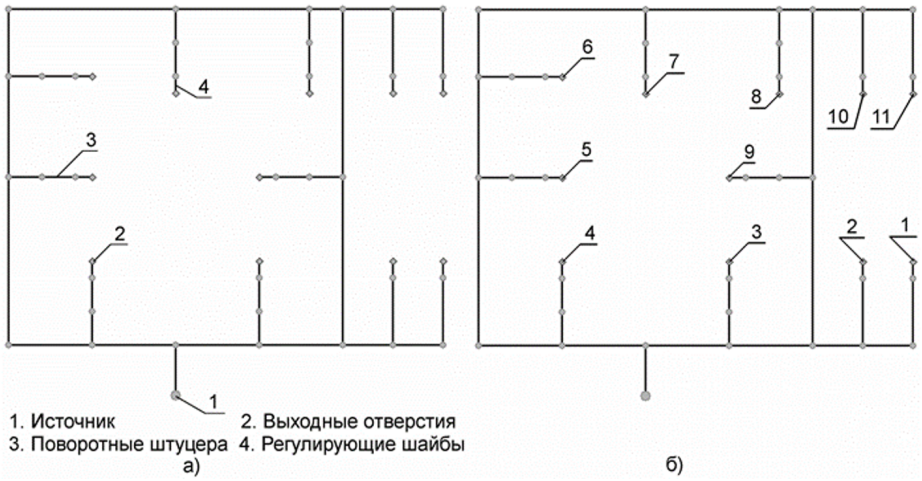


Рисунок 2. Сетевая модель магистрали смазки редуктора. а) Сетевая модель; б) Номера отверстий системы смазки (3-9 сателлиты, 1,2,10,11 приводные шестерни)

определили, что в сетевой модели штуцер можно описать в виде трубки диаметром 6 мм, длиной 18,5 мм, с коэффициентом местного сопротивления 3. Полученные в результате пространственных расчетов сопротивления и длины элементов использовались в качестве параметров сетевой модели системы смазки редуктора. Результаты расчета сетевой модели представлены на рис. 4. По результатам расчета видно, что масло в сателлиты (отверстия 3-9) раздается приблизительно равномерно. Однако расход масла в отверстиях, ведущих к приводным шестерням (отверстия 1,2,10,11) в полтора раза меньше. Для конструкции была выполнена серия расчетов с целью определения необходимых местных сопротивлений, которые бы обеспечили необходимый уровень расхода в узлах системы смазки (рис. 4). При выравнивании расходов масла в системе, значение расходов для отверстий приводных шестерен задавалось на 20% большим по сравнению с расходами в отверстиях сателлитов, что обусловлено более высоким тепловыделением соответствующих шестерен. Полученные сопротивления использовались для определения диаметра регулирующих шайб.

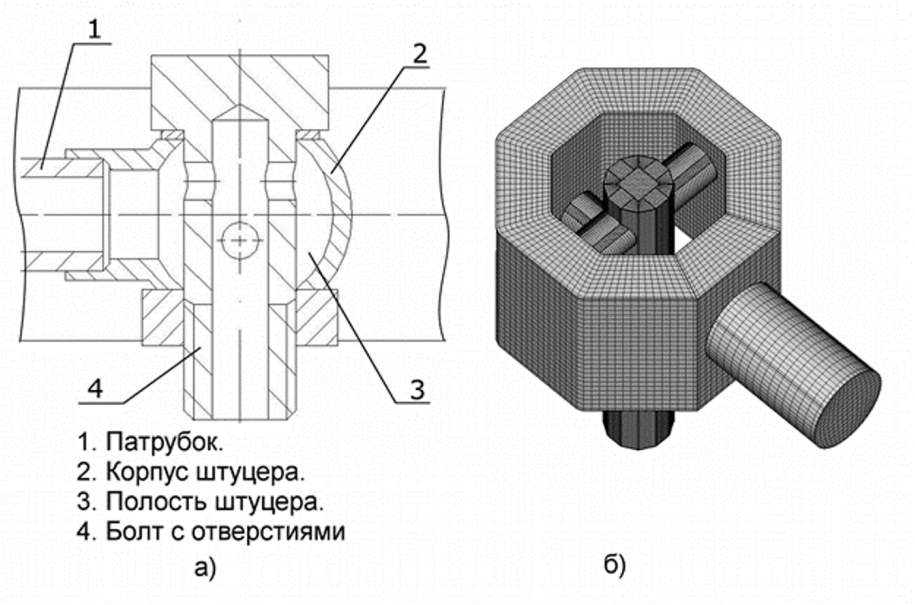


Рисунок 3. Модель поворотного штуцера. а) эскиз, б) расчетная сетка

При построении сетевой модели с использованием данных пространственного моделирования не обязательно соответствующий участок представлять в виде одной ветви с заданными параметрами. Например, система технологической вытяжки промышленного здания, которая состоит из системы воздуховодов, размещенных вдоль каждого этажа здания, и состав-

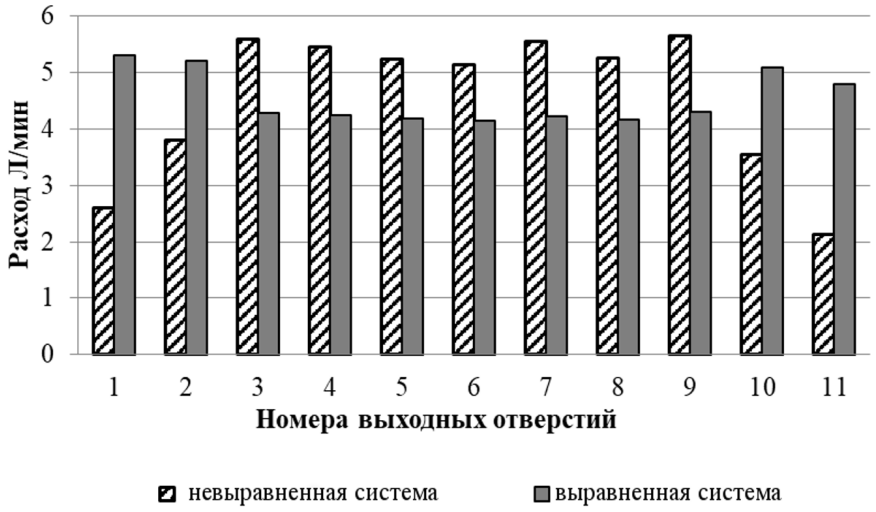


Рисунок 4. Распределение расходов в выходных отверстиях

ного скруббера, предназначенного для сбора и очистки воздуха, и имеет пять независимых входов, каждый из которых расположен на своем этаже (рис. 5). Очевидно, сетевая модель скруббера так же будет состоять из набора ветвей и узлов (рис. 6). Определение гидравлического сопротивления каждого элемента модели потребует очень большого количества расчетов, и, возможно, целесообразно перейти к модели с одновременным разрешением пространственных и сетевых объектов. Однако, большое время расчета пространственной задачи для скруббера и необходимость проведения большого количества расчетов сети, содержащей этот скруббер, так же требует значительных вычислительных затрат. Поэтому для решения этой задачи было предложено разделить модель скруббера на несколько зон:

1. все входы, геометрическое подобие которых позволило предположить существование одного коэффициента местного сопротивления на всех участках этой зоны;
2. подъёмная труба с 1 по 4 этаж, малые скорости в которой позволили предположить, что влияние местного сопротивления данных участков на потокораспределение в скруббере будет несущественным и соответственно гидравлическое сопротивление задавалось равным 0 для всех участков зоны;
3. подъёмная труба с 4 на 5 этаж;
4. выход на вентилятор.

Соответственно задача сводилась к поиску трех коэффициентов местного сопротивления для зон 1, 3 и 4 удовлетворяющих условию минимума отличия перепада давления в скруббере для сетевых и 3D расчетов. Для их

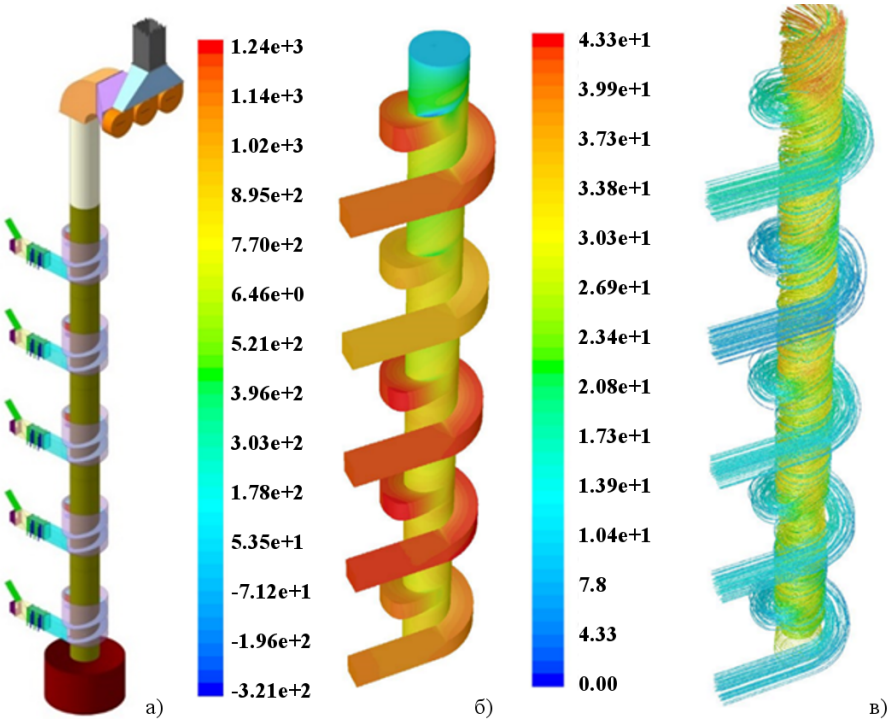


Рисунок 5. Скруббер: а) геометрия б) статическое давление в) линии тока

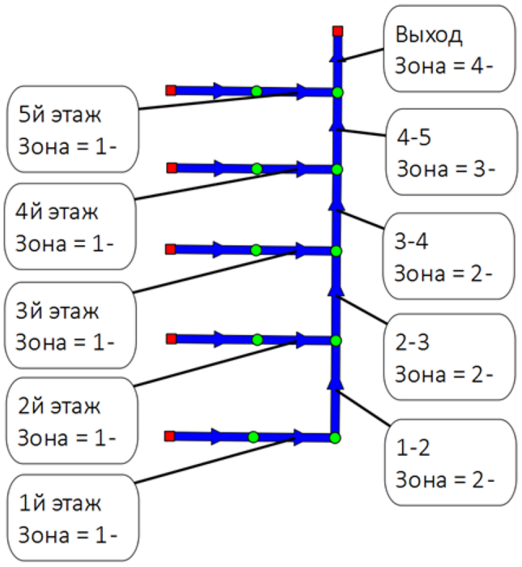


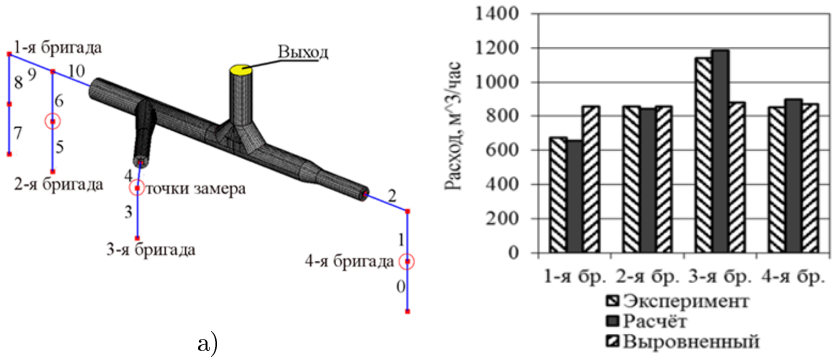
Рисунок 6. Скруббер: а) геометрия б) статическое давление в) линии тока

определения было выполнено три трехмерных расчета (три испытания), в которых варьировалась величина расходов на входах с этажей. В результате расчета по известным расходам на входах были построены зависимости перепада давления между различными входами и выходом, по которым, в свою очередь, и были определены необходимые значения гидравлического сопротивления.

Гидродинамически единая модель

Когда невозможно получить однозначную зависимость параметров одной части разномасштабной модели от другой, лучше использовать гидродинамически единую модель. В этом случае, обе части модели рассчитываются одновременно и обмен граничными условиями происходит через одну или несколько итераций. Таким образом снижается вероятность того, что разные части модели будут рассчитаны для разных режимов течения. В подавляющем большинстве случаев применения такого подхода, разные части модели рассчитываются в разных программных продуктах, следовательно, необходимо разработать способ передачи данных из одной программы в другую, например, при помощи сторонних библиотек, так для связи ANSYS и Flowmaster используется библиотека MpCCi [5], предназначенная для связи различных программ через API функционал, другие авторы используют для обмена дополнительные файлов [6]. Даже в случае если программный комплекс позволяет моделировать обе части модели, то и тогда вопрос передачи горничных условий остается актуальным. Например, в работе [7] о моделировании кровотока вниз по потоку предаются значения расхода, а в верх давления. В нашем программном продукте SigmaFlow мы пошли другим путем: для всей расчётной области строится единое уравнение на поправку давления, что позволяет получить неразрывное поле давления, а на границе пространственной и сетевой расчётных областях происходит интерполяция расходов [8]. Такой подход обеспечивает большую скорость сходимости по сравнению с традиционными методами и позволяет заранее не задавать направление расхода. В качестве примера практического использования такого подхода представлена задача о моделировании системы удаления анодных газов из электролизного цеха алюминиевого завода [9]. Данная система предназначена для сбора вредных газов, выходящих из бригад электролизных ванн, и передачи их в аппараты газоочистки. Была поставлена задача о выравнивании расходов от каждой ванны в четырёх бригадах (1-я и 2-я бригады – 24 ванны, 3-я бригада – 26 ванн и 4-я – 20 ванн). Предполагалось осуществить выравнивание расходов с помощью регулирующих заслонок, а также провести оценку изменения общего разрежения в системе до и после выравнивания. Главной особенностью данного газохода является наличие центрального сборного коллектора (пространственная часть представлена на рис. 7), потери давления в котором составляют примерно половину от общей потери давления в исследуемой части системы. В общем случае моделирование такой задачи в рамках одного из основных подходов (полностью 3D или полностью сетевым методом) невозможно. Размер расчётной сетки

для построения полностью пространственной модели всего корпуса будет слишком велик, так как длины некоторых участков имеют протяженность более 100м. При построении полностью сетевой модели необходимо определить гидравлическое сопротивление коллектора для разных режимов его работы, что также является достаточно трудоемкой задачей. Применение разделённой модели для определения гидравлического сопротивления каждого отвода коллектора также не подходит, так как есть предположение, что до и после выравнивания расходов оно будет сильно отличаться. Построение разномасштабной модели позволяет устранить это препятствие: протяженные элементы представлены в виде сети, сборный коллектор в виде пространственного элемента (см. рис. 7а).



а) б)

Рисунок 7. а) Разномасштабная модель системы выносных газоходов корпуса: №1, №2, №3, №4 – номера бригад, 0–10 номера ветвей, кругом выделены точки замеров; б) Результаты расчёта системы газоудаления

Геометрия коллектора строилась по чертежам, полученным от заказчика. Сетевые элементы гибридной модели можно разделить на три группы:

1. Ветви, параметры которых задаются исходя из геометрических характеристик (ветви 2, 9, 10).
2. Ветви, моделирующие область под вставку регулирующей заслонки (ветви 1, 4, 6, 8). Минимальная длина и сопротивление соответствуют открытой заслонке.
3. Ветви, описывающие бригаду подкорпусного газохода (ветви 0, 3, 5, 7).

Результаты гибридного расчета сравнивались с данными эксперимента (рис. 7б). Расчетное разрежение на выходе из коллектора равно 2416 Па. После процедуры определения дополнительного сопротивления регулирующих заслонок был проведён повторный расчет, результаты которого представлены на рис. 7б. Общее разрежение в системе выросло до 2868 Па, то есть на $\approx 20\%$. Рассмотрим гидрадинамически единую разномасштабную

модель с сопряжением по тепловой задаче - моделирование теплообмена в микротеплообменнике, состоящем из 15 микроканалов прямоугольного сечения. Размеры микроканалов были следующими: высота канала – 772мкм, ширина – 1100 мкм, длина – 5000мкм, количество микроканалов в блоке – 15. Схематично геометрию рассматриваемого теплообменника можно видеть на рис. 8а, где представлено распределение температуры на стенках для числа Рейнольдса, равного 100. Охлаждающая вода подается через круглый канал диаметром 5мм . Затем она подается в раздающий коллектор размерами 30мм на 15 мм и высота 2,5мм. Далее вода движется по микроканалам, нижняя стенка которых касается охлаждаемой поверхности. После этого нагретая вода поступает в собирающий коллектор и отводится через круглый канал. Охлаждаемая поверхность имеет размеры 30мм на 50 мм, что соответствует размерам типичных элементов микросхем, поэтому такие системы удобно использовать, например, для охлаждения процессоров ЭВМ.

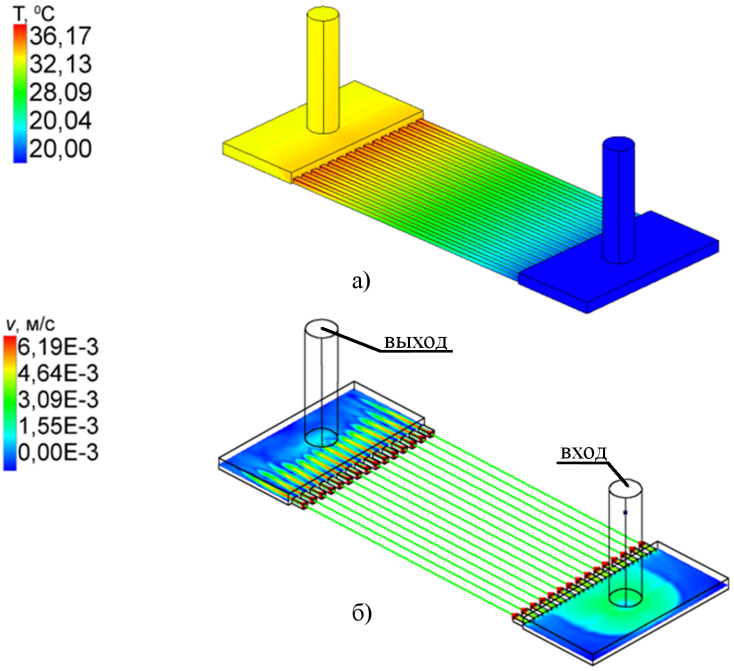


Рисунок 8. Два варианта постановки задачи о теплообмене в блоке микроканалов: а) пространственная постановка (поле температуры на стенках канала); б) гибридная постановка (модуль скорости в центральном сечении микроканалов)

Экспериментальное исследование микротеплообменника проведено в работе [10]. Детально эта задача в пространственной постановке была исследована в работе [11]. Была проведена серия расчётов, в которых число Рей-

нольдса варьировалось в диапазоне от 100 до 800. Рассматривалось только стационарное течение. Число Рейнольдса определялось через расход воды на входе в теплообменник и диаметр подводящего канала. Исследуемой величиной являлось падение давления между входом и выходом в теплообменник и нагрев воды в теплообменнике. Температура воды на входе в теплообменник задавалась равной 27^0. В каждом микроканале на нижней стенке задавалась постоянная плотность теплового потока, равная 10 кВт/м2. Остальные стенки рассматривались как адиабатические. Моделирование было проведено в рамках ламинарной стационарной постановки. Было рассчитано два варианта: в полной пространственной постановке (9а) и гибридной постановке (9б). Для расчета пространственной задачи использовалась неструктурированная гексагональная многоблочная сетка, состоящая из 480000 ячеек. Такая детализация была подобрана исходя из методических расчетов. В гибридном варианте часть микроканалов была заменена сетевыми элементами с оставлением области входа и выхода (для учета корректного установления профиля скорости). Таким образом, количество ячеек в сетке уменьшилось до 400000. Полученные расчётные данные сравнивались с экспериментальными [10] и между собой. На рис. 10а представлено сопоставление результатов численного моделирования с экспериментом. Сравнение проведено по величине перепада давления между входом и выходом в теплообменник и величине нагрева воды (рис. 9). Сравнение результатов расчетов в различных постановках и экспериментом показывает, что гибридный расчет, в целом, хорошо описывает поведение эксперимента во всем рассматриваемом диапазоне чисел Рейнольдса. Анализ временных затрат показал, что расчет в рамках гибридной постановки на 20% быстрее аналогичного расчета в пространственной постановке. Такой относительно не большой выигрыш обусловлен тем, что данный теплообменник состоит из небольшого числа каналов. С увеличением числа ветвей теплообменника или количества теплообменников, связанных в одну систему, выигрыш по времени будет возрастать.

гидродинамически не связанная модель

При моделировании объектов, которых происходит несвязанное или слабосвязанное течение нескольких жидкостей, можно использовать третий способ построения разномасштабных моделей. В такого рода моделях сетевые элементы «пронизывают» пространственную область, а связь между двумя частями разномасштабной модели выполнена через интегральные характеристики, как правило, давление или тепловой поток. К построению пространственной части модели можно выделить два подхода: первый – расчётная область описывает геометрию труб или каналов [12], второй – гидравлическое сопротивление пучка труб описывается моделью пористого тела. В «SigmaFlow» коде реализована возможность обоих подходов. Например, при реализации задачи о моделировании кожухотрубчатого теплообменника, представленного на рис. 10, необходимо разрешить более шестисот труб, что требует построение расчётной сетки порядка десяти миллионов ячеек.

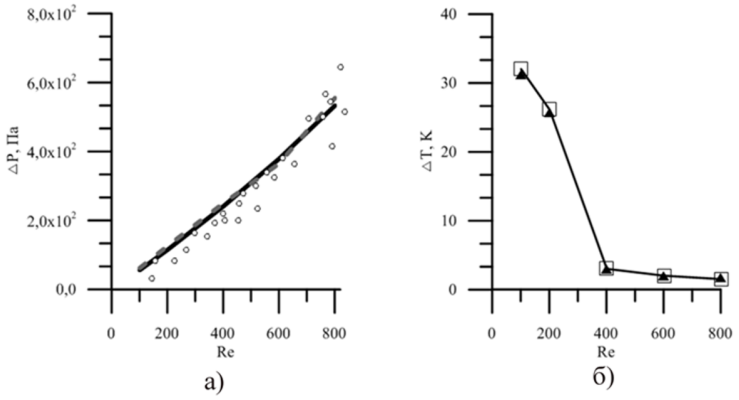


Рисунок 9. Сравнение результатов расчета: а) перепад давления (точки- экспериментальные данные, сплошная линия – пространственная постановка, пунктирная линия – гибридная постановка) б) перепада температуры (квадратный маркер – пространственная постановка, треугольный маркер – гибридная постановка).

Гибридный подход, совместно с моделью пористого тела, позволяет не только определить поля температуры и свойств вещества, но и перепад давления в системе. При расчёте такого рода теплообменника по эмпирическим фор-

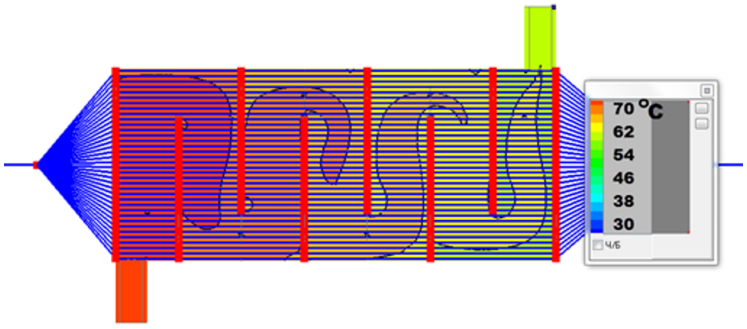
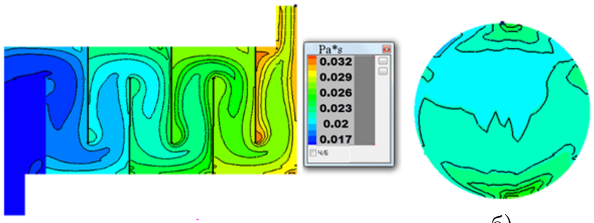


Рисунок 10. Поле температуры в центральном сечении разномасштабной модели теплообменника

мулам возникает ряд проблем, связанных с неравномерным распределением по объёму теплообменника не только температуры, но физических свойств теплоносителей (в данном случае масло – рис. 11). Пренебрежение этим обстоятельством может привести не только к некорректному определению теплового напора, но и некорректному определению гидравлического сопротивления трубного пучка, что в свою очередь, приводит к неправильному

расчёту обтекания трубного пучка, а, следовательно, ошибочному расчёту теплообмена и перепада давления.



а) б)

Рисунок 11. а) Поле динамической вязкости в двух сечениях теплообменника (сетевая часть задачи «погашена»)

Комбинированный подход

Все выше описанные подходы можно комбинировать. Примером комбинации второго и третьего подходов, является задача о моделировании теплообмена в блоке охлаждения электронного чипа системой разветвленных микроканалов [13] (рис. 12). С точки зрения моделирования - это сопряжённый теплообмен. Комбинация двух методов заключается в том, что часть микроканалов (где сильное влияние течения на теплообмен) выполнена в пространственной постановке, а другая – в сетевой, и связана с чипом только через теплообмен Качественная оценка результатов проводилась на основе сравнения полей температур, рассчитанных на основе CFD и гибридного подходов. Для количественной верификации представлено распределение температуры вдоль двух линий (пунктирные линии, рис. 13в, г). Результат сравнения показывает адекватность применения гибридного подхода для решения такого рода задач.

Выводы

Несмотря на значительный рост вычислительных мощностей, многие сложные задачи затратно реализовать простым распараллеливанием расчёта – экстенсивный подход. Одним из видов интенсивного подхода является применение гибридных моделей, в которых в зависимости от уровня необходимой информации разные части модели рассчитывают разными по масштабу моделями. Наиболее простой способ построения разномасштабных моделей – это полностью разделенная модель. В случае, когда невозможно получить однозначную зависимость между различными частями гибридной модели, предпочтительно применять второй и третий способы построения разномасштабных моделей, что позволяет существенно сократить размеры вычисли-

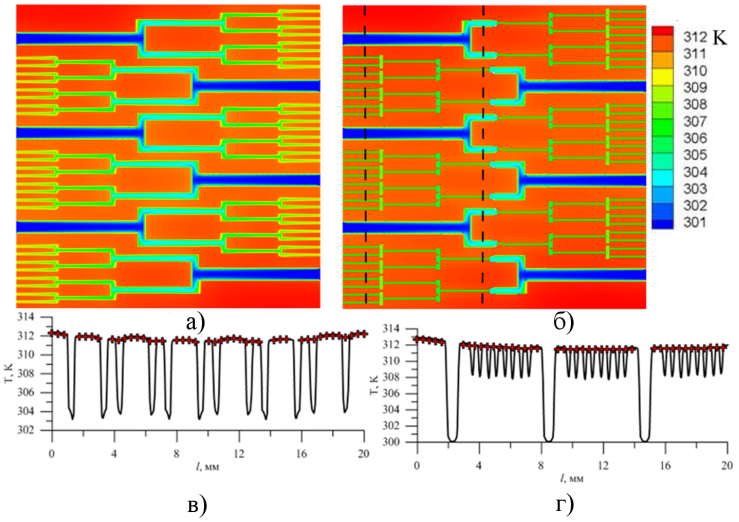


Рисунок 12. Сравнение полей температуры в центральном сечении: a) 3D, b) Гибрид; сравнение температуры вдоль линии: c) в сечении 2 мм от левого края, d) в сечении 9 мм от левого края (сплошная линяя – 3D, маркеры – гибрид)

тельной сетки (в сравнении с полностью трехмерной моделью) и избавляет от необходимости передавать расчётные значения вручную.

Список литературы

1. Меренков А.П., Хасилев В.Я.: Теория гидравлических цепей. М-НАУКА (1985)
2. Р. Уилсон: Введение в теорию графов, М.: Мир, (1977)
3. Патанкар С.: Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости, - М. : Энергоатомиздат (1984).
4. Новицкий Н.Н., Сухарев М.Г.,Тевяшев А.Д. и др.: Использование комплексного подхода при исследовании и оптимизации режимов работы систем газоходов. Трубопроводные системы энергетики: Методические и прикладные проблемы моделирования, Новосибирск, Наука, (2015).
5. MpCCI 4.4.2-1 Documentation (2015).
6. Wedding, W.C.: Multiscale modeling of the mine ventilation system and flow through the gob. Thses and Dissertations–Mining Engineering, University of Kentucky ed. (2014).
7. Добросердова Т.К.: Численное моделирование кровотока при наличии сосудистых имплантатов или патологий. Автореферат дисс. к.ф-м.н. 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (2013).
8. Михиенкова Е.И., Филимонов С.А., Дектерев А.А.: Гибридный алгоритм для совместного расчета многомасштабных гидравлических задач с учетом тепловых процессов. Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии , т. 17, № 4, pp. 380-392, (2016).

9. Филимонов С.А., Необъявляющий П.А.,. Михиенкова Е. И: Применение гибридного алгоритма моделирования для исследования системы удаления вредных газов алюминиевого производства. Вестн Том. гос. ун-та. Математика и механика. № 6(44). С.64-79 (2016).
10. Sameer , Gaurav Agarwal, Manoj Kumar Moharana: Thermo-Hydrodynamics of Developing Flow in a Rectangular Mini-Channel Array. pp. 1342-1349, (2010).
11. Лобасов А.С., Минаков А.В., Дектерёв А.А.: Моделирование гидродинамики и конвективного теплообмена в микроканалах. Вычислительная механика сплошных сред., т. Т5, № №4, pp. С. 481-488, (2012)
12. C. D'Angelo:"Multiscale 1D-3D models for tissue perfusion and applications. 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008), (2008)
13. Xiang-Qi , Arun S. Mujumdar, Christopher Yap.: Thermal characteristics of tree-shaped microchannel nets for cooling of a rectangular heat sink. International Journal of Thermal Sciences, vol. 45, p. 1103–1112, (2006).

Разработка системы моделирования процесса рассеивания вредных примесей в атмосферном воздухе города Усть-Каменогорска выбрасываемых автотранспортом

С. Адиканова, Н. Ф. Денисова, Е. А. Малгаждаров

Восточно-Казахстанский государственный
технический университет им. Д. Серикбаева,
Усть-Каменогорск, Казахстан
ersal_7882@mail.ru,ndenisova@ektu.kz,malgazhdarov_e@mail.ru

Аннотация Для осуществления моделирования процесса рассеивания вредных примесей от автотранспорта в атмосферном воздухе города Усть-Каменогорска на базе вероятностно-статистической модели переноса создана web-ориентированная информационная система, которая оценивает уровень загрязнения выбросов автомобильного транспорта в приземном слое атмосферы города.
Разработанное программное приложение позволяет задавать параметры алгоритма расчета эмиссии и переноса для одной итерации для ячеек сетки: дорожный граф, отображаемый на карте выбранного города, параметры узлов и ребер дорожного графа и общие характеристики, связанные с загрязнением от транспортных средств.

Ключевые слова: автотранспорт, улично-дорожные сети, система мониторинга, процесс рассеивания вредных примесей, загрязняющие вещества, web-приложение, js-модуля, вероятностно-статистическая модель, функциональная модель, компилятор .NET-языков программирования, тепловая карта, дорожный граф, расчетная сетка, json-вид.

По данным национальных природоохранных органов, практически все областные и крупные промышленные центры республики имеют повышенный уровень загрязнения атмосферного воздуха, что связано с выбросами углекислого газа от сжигания топлива в транспортном секторе. На сегодняшний день в наших городах с сильно загрязненной воздушной средой, таких как Алматы, Караганда, Усть-Каменогорск и Шымкент, до 80-90% вредных выбросов, загрязняющих атмосферу приходится на долю автомобильного транспорта. В этой связи возникает необходимость принятия координальных мер по контролю и снижению выбросов в атмосферу вредных веществ от автотранспортных средств.

Существуют уже разработанные прикладные программы решающие задачи оценки концентрации вредных веществ от автотранспорта в атмосфер-

ном воздухе, но для некоторых из них требуется, с одной стороны, включение дополнительных специальных функций, позволяющих реализовать выбранную методику решения задачи определения уровня загрязнений автомосферного воздуха в приграничном слое, а с другой, упрощение интерфейса, что вызывает необходимость создания специализированных прикладных программ.

В связи с этим возникает необходимость совершенствования моделей данных и разработки модели перемещения вредных выбросов от автотранспортных средств, позволяющих достичь большей точности анализа вредных выбросов в атмосферу, и разработать на их основе структуру программного средства, обладающего приемлемой производительностью.

С целью достижения этих задач нами разработана система мониторинга процесса рассеивания вредных примесей от автотранспорта в атмосферном воздухе на примере города Усть-Каменогорска Восточно-Казахстанской области, которая реализует алгоритм расчета загрязнений от выбросов вместе с сопутствующим инструментарием. Разработанная информационная система позволяет задавать параметры алгоритма: дорожный граф, отображаемый на карте выбранного города, параметры узлов и ребер дорожного графа и общие характеристики, связанные с загрязнением атмосферного воздуха от транспортных средств.

Программная система представляет собой Web-приложение, реализованное в среде Microsoft Visual Studio Community 2015. Данная среда является свободно распространяемым программным обеспечением, предоставляющим гибкие возможности для разработчика, такие как редактор исходного кода, подсветку синтаксиса, средства отладки и профилирования, компилятор .NET-языков, современные средства Web-разработки и многое другое.

Разрабатываемая информационная система реализовала средства работы с картами. Однако данная функция является весьма трудоёмкой, для ее осуществления есть множество готовых решений с открытым исходным кодом. Наиболее доступными и функционально богатыми являются Web -ориентированные решения, поэтому в качестве языка программирования нами был выбран стек JavaScript + HTML5 + CSS.

В качестве библиотеки при реализации множества решений стандартных задач в проекте использованы следующие библиотеки:

Leaflet.js (https://leafletjs.com/) - это ведущая JavaScript-библиотека для разработки веб-приложений ориентированных на интерактивные карты, ориентированная на разработку как настольных так и мобильных приложений.

Materialize.css (https://materializecss.com/) - это современный адаптивный front-end фреймворк, основанный на концепции Material Design. Данная библиотека позволяет быстро создавать адаптивный и привлекательный пользовательский Web -интерфейс.

JQuery (http://jquery.com/) - это быстрая, маленькая и многофункциональная библиотека JavaScript упрощающая манипулирование HTML-документами, обработку событий, анимации и выполнение Ajax-запросов с

помощью простого в использовании API, который работает во множестве браузеров.

Vue.js - (https://ru.vuejs.org) - это прогрессивный, доступный производительный и разносторонний JavaScript-фреймворк, позволяющий создавать легкие и многофункциональные одностраничные Web-приложения.

Heatmap.js - Leaflet – это плагин для отображения тепловой карты.

RTree.js – это маленькая JavaScript-библиотека для создания пространственных индексов на основе алгоритма r-tree.

Общее описание проекта. Вся бизнес-логика приложения реализуется на стороне браузера.

Описание пользовательского интерфейса. Основную часть рабочего пространства окна браузера занимает карта (рис.1). Сразу после запуска приложения карта имеет мировой масштаб и инструменты управления картой и рисованием отключены. Панель инструментов невидима, прокрутка и масштабирование так же отключены. Для того что бы начать работу с картой требуется создать новый проект или открыть существующий при помощи панели управления проектом, расположенной в нижней правой части рабочей области (рис.2).

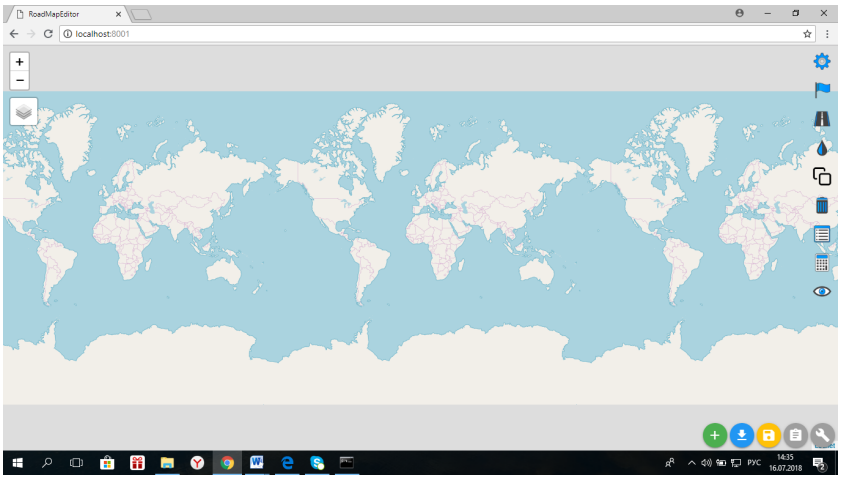


Рисунок 1. Интерфейс программной системы.

Управление слоями с подложкой. В левой верхней части рабочей области расположена кнопка . При наведении курсора на эту кнопку появляется всплывающее меню со списком радиокнопок для выбора доступных слоев подложки. Различные слои обладают различными цветовыми схемами и могут выбраны пользователем в зависимости от его предпочтений.

Опишем процесс использования панели управления проекта.

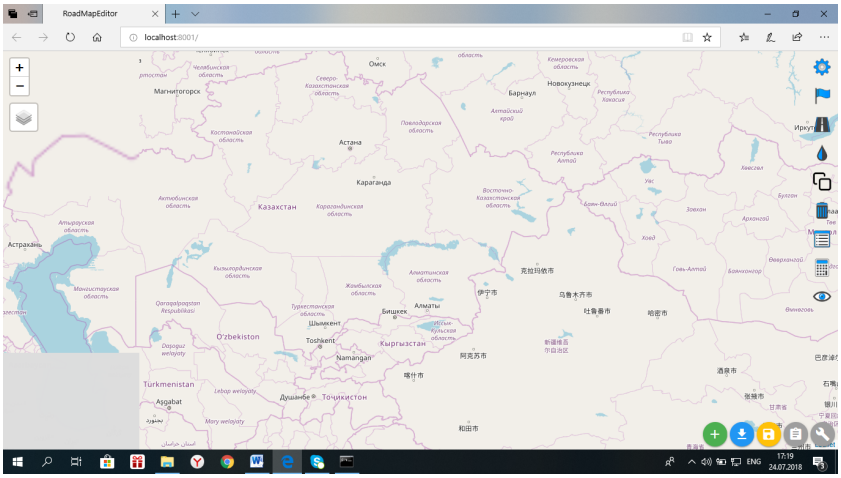


Рисунок 2. Создание карты.

В нижней части рабочей области справа располагается панель управления проектом. На данной панели расположены кнопки ”Создать“, ”Загрузить“, ”Сохранить“, ”Настройки“ и ”Консоль“.

При нажатии на кнопку ”Создать“ создается новый проект или пересоздается существующий, если в момент нажатия он был загружен.

При нажатии на кнопку ”Загрузить“ появляется диалоговое окно выбора ранее сохраненного файла с проектом.

Нажатие на кнопку ”Сохранить“ приведет к сохранению текущего проекта в отдельный файл. Сохранение на диск будет произведено способом, зависящим от того браузера в котором будет выполняться процедура сохранения.

Кнопка ”Настройки“ вызывает окно управления аргументами алгоритма относящихся к уровню всего города.

Кнопка ”Консоль“ позволяет скрывать и показывать панель контроля доменной модели проекта. Данная панель располагается слева и отображает текущее состояние проекта в json-виде.

Информационная система позволяет выбирать инструменты управления параметрами. Инструменты управления параметрами модели располагаются на панели инструментов в правой части рабочей области карты. При наведении и выборе инструмента иконка соответствующего инструмента увеличивается, сигнализируя о смене текущего инструмента. Повторное нажатие по иконке активного инструмента возвращает его в неактивное состояние. При наведении курсора на иконку инструмента появляется всплывающая подсказка с наименованием этого инструмента.

Почти все инструменты, кроме инструмента ”Расчет загрязнений“ работают с картой или нарисованными на ней элементами. Существует два

типа элементов – ”Перекрестки“ и ”Дороги“, которые соответствуют узлам и ребрам дорожного графа.

Элемент, к которому будет применен текущий инструмент определяется при помощи курсора мыши. Для работы с узлами требуется указать курсором непосредственно в тот узел, к которому должен быть применен инструмент. Для работы с узлом достаточно кликнуть по карте недалеко от ребра. Если в районе клика будет находиться несколько ребер, то инструмент будет применен к самому близкому из них.

В разработанной информационной системе предусмотрены ряд функций, реализованные через дополнительные инструменты:

1) ”Настройки“ - данный инструмент вызывает диалоговое окно управления параметрами элемента соответствующее типу этого элемента (рис.3). Например, введение параметров отрезка дороги: Длина перегона, количество полос дороги, максимальная допустимая скорость, нагрузка светофора.

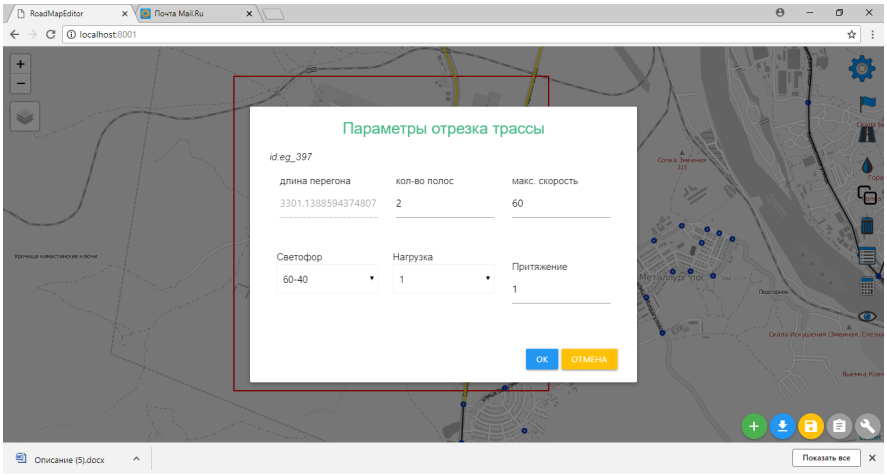


Рисунок 3. Применение инструмента ”Настройки“ для ведения параметров отрезка дороги.

2) Окно параметров ”Перекрестка“ содержит идентификатор перекрестка и поле управления радиусом этого перекрестка. Окно ”Параметры УДС и АТС“ содержит поля ввода коэффициентов загрязняющих веществ, параметры сигнала светофора, поле управления количеством полос, длину перегона, интервалы работы светофора и параметры интенсивности движения за сутки (рис.4, рис.5, рис.6, рис.7).

3) ”Перекрестки“ - данный инструмент позволяет создавать и редактировать перекрестки (рис. 8). Для создания нового перекрестка необходимо выбрать данный инструмент и кликнуть левой кнопкой мыши в том месте

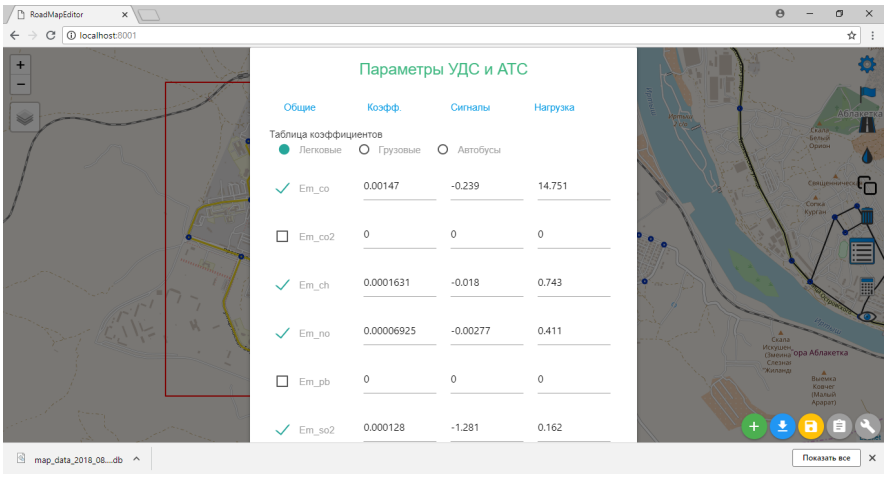


Рисунок 4. Применение инструмента "Настройки" для ведения коэффициентов загрязняющих веществ.

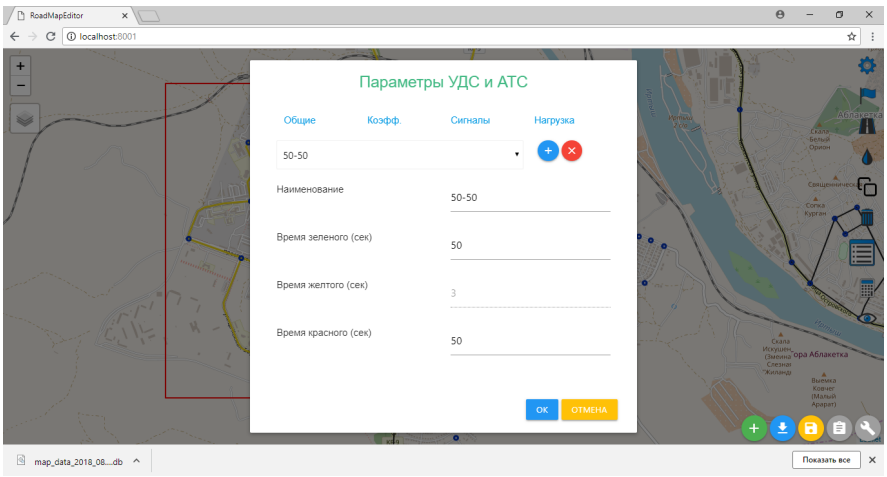


Рисунок 5. Применение инструмента "Настройки" для ведения параметров сигнала.

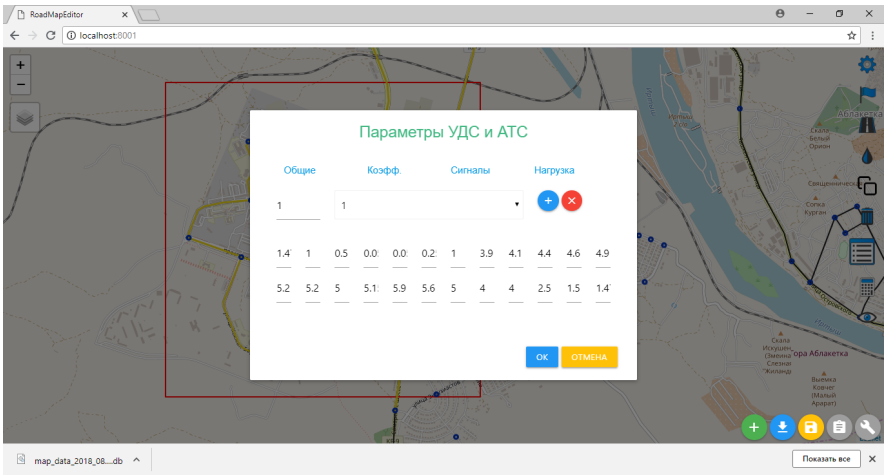


Рисунок 6. Применение инструмента "Настройки" для ведения параметров нагрузки.

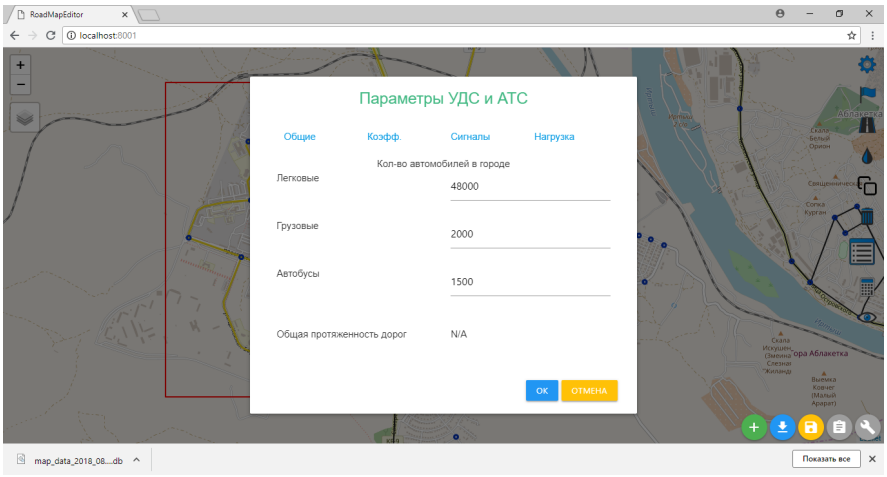


Рисунок 7. Применение инструмента "Настройки" для ведения количество автотранспортных средств.

на карте, где должен быть расположен этот перекресток. Для редактирования перекрестка необходимо выполнить двойной клик левой кнопкой мыши по этому перекрестку, в результате чего появятся управляющие маркеры. Перемещение маркера в центре перекрестка приведет к его перемещению на карте. Сдвиг маркера находящегося на границе перекрестка изменит текущий радиус этого перекрестка. Для того чтобы снять режим редактирования перекрестка, необходимо кликнуть мышью в свободное место на карте

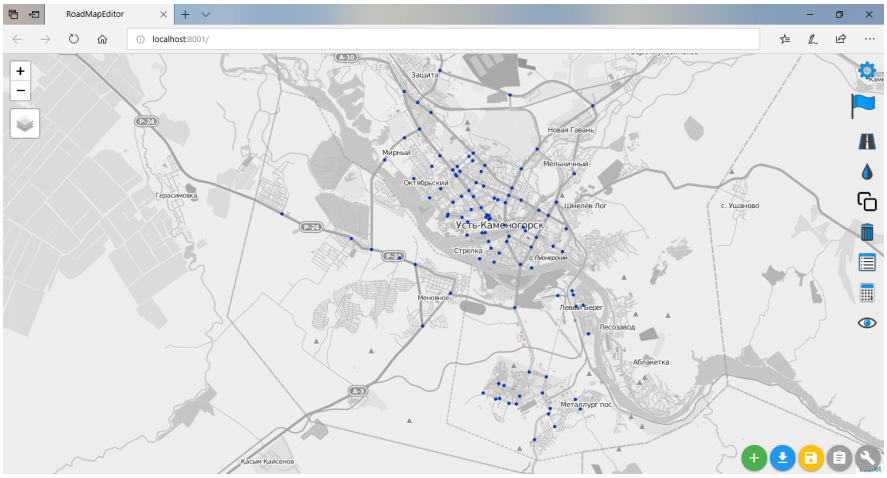


Рисунок 8. Применение инструмента ”Перекрестки“.

4) Инструмент ”Дороги“. Для того, чтобы создать участок дороги между двумя перекрестками, необходимо выбрать данный инструмент и кликнуть левой кнопкой мыши по перекрестку, в результате чего данный перекресток станет активным и выделится бардовым цветом (рис.9). Для завершения рисования отрезка дороги следует кликнуть по второму перекрестку. В результате этого будет нарисован соответствующий отрезок дороги, а конечный перекресток станет активным, что позволит продолжить рисование нового отрезка из текущего перекрестка. Для отмены рисования необходимо кликнуть мышкой в свободном месте карты. Для редактирования отрезка дороги необходимо кликнуть левой кнопкой мыши по ребру или по карте рядом с ребром, в результате чего оно перейдет в режим редактирования и на ребре появятся маркеры, позволяющие управлять сегментами отрезка. Для добавления сегмента надо переместить маркер находящийся в середине требуемого сегмента. Для удаления сегмента необходимо кликнуть по угловому маркеру, в результате чего два прилежащие к нему сегмента объединятся в один. Перемещение концевых участков дороги происходит при перемещении перекрестка, которому принадлежать эти участки. Для того

чтобы отменить режим редактирования, необходимо кликнуть в свободный участок карты.

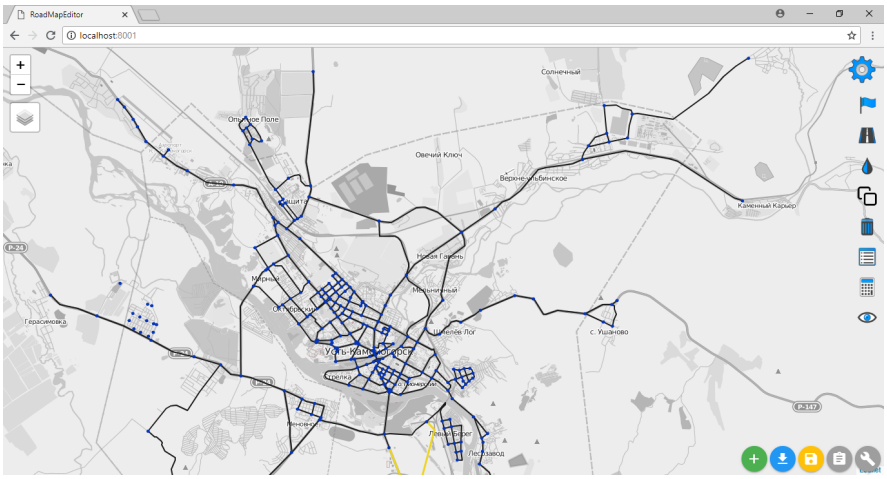


Рисунок 9. Применение инструмента ”Дороги“, выделение цветом участка дороги.

5) Инструмент ”Копирование стилей“ позволяет скопировать параметры одного отрезка дороги в другой (рис. 10).

Для этого необходимо выбрать, при помощи левой кнопки мыши, данный инструмент, затем выбрать отрезок являющийся источником, затем выбрать отрезок, которому надо назначить скопированный стиль. Активный перекресток выделяется бардовым цветом. Перекресток, у которого нет отредактированных параметров, рисуется черным цветом. Перекресток, у которого параметры были отредактированы, будет нарисован желтым цветом (рис.11).

5) Инструмент ”Удаление“ позволяет удалять перекрестки и отрезки дорог. Для удаления отрезка дорого необходимо выбрать данный инструмент, затем кликнуть по ребру необходимого отрезка дороги или рядом с ним. В результате выбранное ребро будет удалено. Для удаления перекрестка необходимо кликнуть непосредственно в требуемый перекресток. В результате будет удален как сам перекресток, соответствующий выбранному узлу, так и все смежные с ним ребра. Также данный инструмент приведёт к удалению расчетной сетки при двойном клике по ней.

6) Инструмент ”Расчетная сетка“. Данный инструмент применяется для выбора области, для которой будут производиться вычисления. Для выбора рабочей области необходимо активировать данный инструмент и, нажав левую кнопку мыши, протянуть его по карте. В результате появится прямоугольник по размерам соответствующей области расчета (рис.12). Двойной

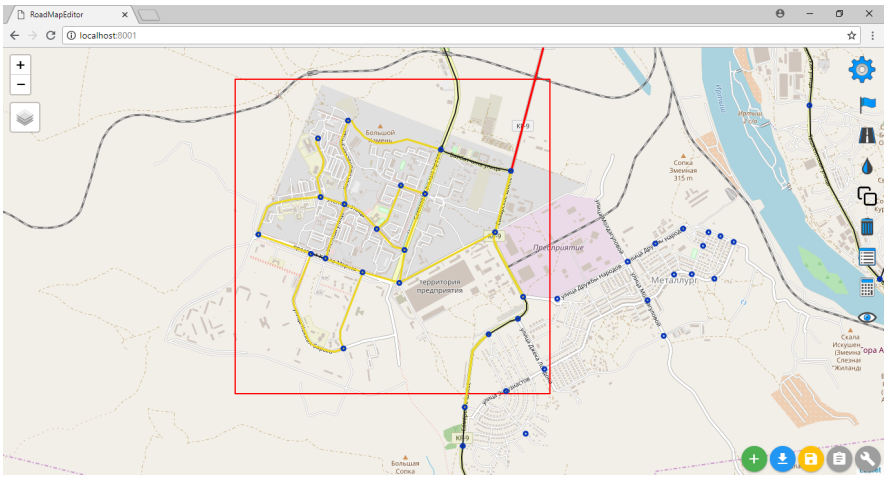


Рисунок 10. Применение инструмента ”Копирование стилей“.

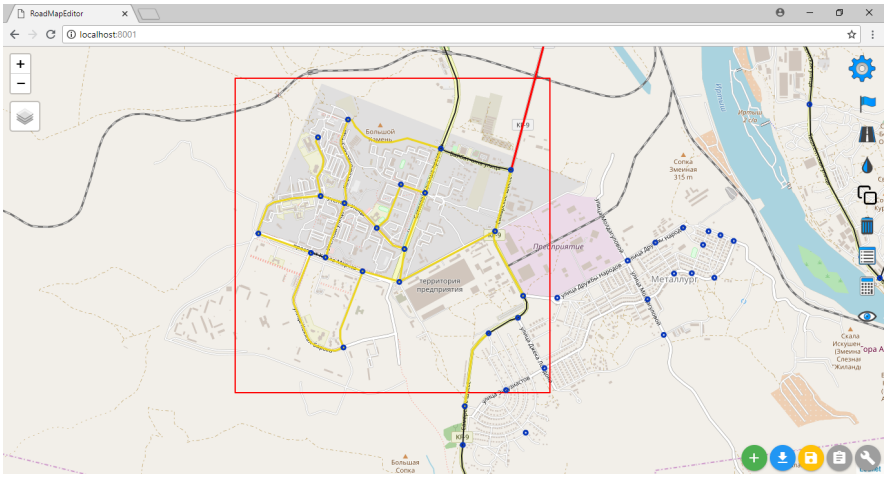


Рисунок 11. Рисование перекрестка желтым цветом инструментом ”Копирование стилей“.

клик по данному прямоугольнику вызовет диалоговое окно управления параметрами расчетной сетки, такими как ширина, длина, шаг сетки, а так же направление и скорость ветра (рис.13). Также, данное диалоговое окно содержит переключатель видимости загрязнений. Данный переключатель позволяет настраивать отображение видимости загрязнений. Изменения настроек данного диалогового окна вступают в силу после нажатия кнопки ”ОК“ в нижней части окна.

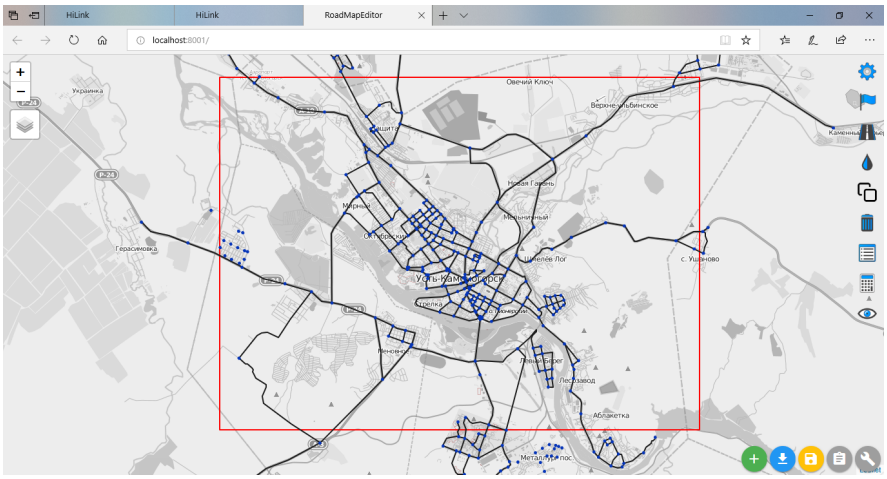


Рисунок 12. Выбор области вычислений инструментом ”Расчетная сетка“.

6) Инструмент ”Расчет загрязнений“. Для запуска процесса расчета загрязнений необходимо включить видимость источников загрязнений при помощи диалогового окна инструмента ”Расчетная сетка“, после чего выбрать данный инструмент, в результате чего начнется процесс расчета загрязнений (рис.14). Прервать процесс расчета можно повторным нажатием на данный инструмент. После завершения расчета появится соответствующее уведомление в середине рабочей области окна.

7) Активация инструмента ”Отображение загрязнений“ приведет к отображению рядом с курсором подсказки, содержащей значение загрязнения в том месте расчетной области, на которую указывает курсор мыши (рис.15). После деактивации инструмента эта подсказка не будет отображаться. Точность интерполяции значений загрязнения между ячейками расчетной сетки зависит от текущего масштаба карты. Это связано с фиксированным размером маркера тепловой карты, заданным в пикселах.

Приводим описание архитектуры разработанной Web -ориентированной информационной системы. Информационная система разбита на модули. Каждый модуль обеспечивает фиксированный круг потребностей приложения. Отдельный модуль представляет собой класс, содержащий необходи-

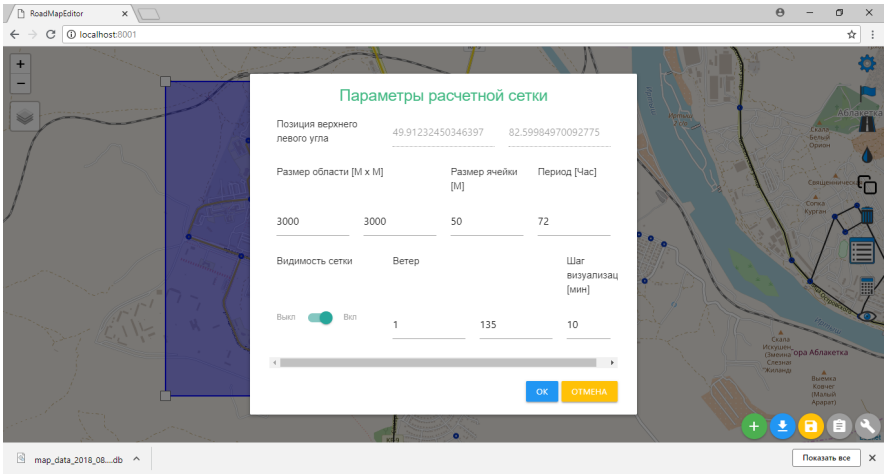


Рисунок 13. Диалоговое окно управления параметрами расчетной сетки.

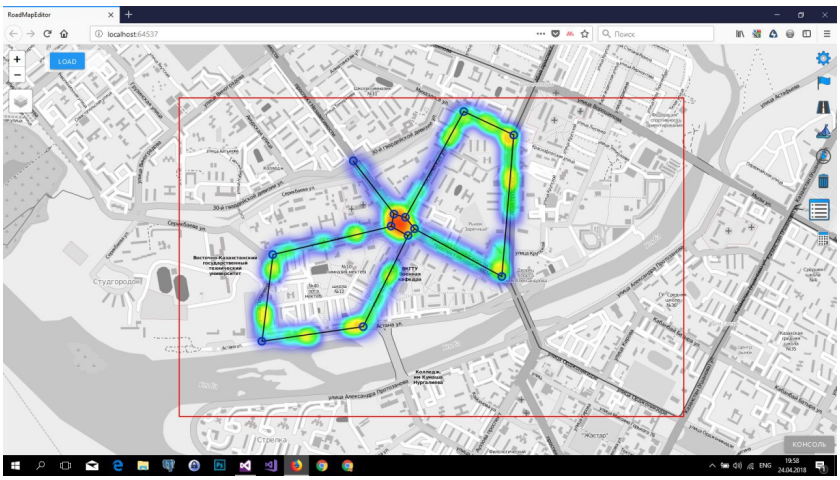


Рисунок 14. Запуск процесса расчета инструментом "Расчет загрязнений".

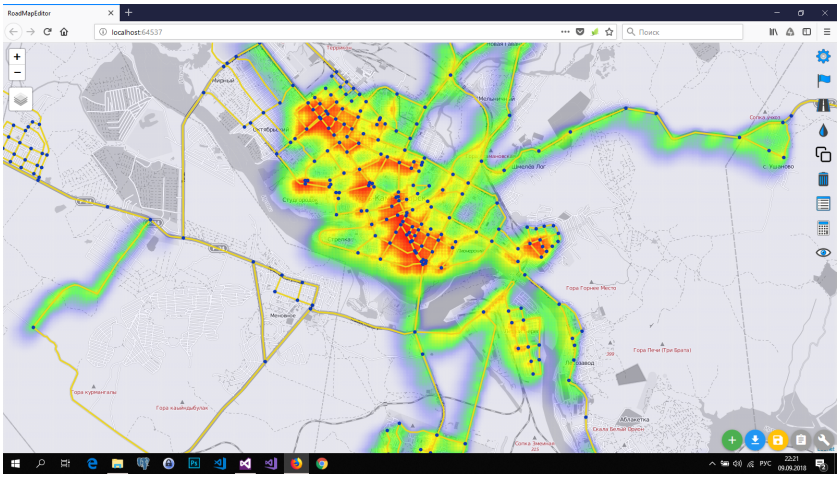


Рисунок 15. Подсказка, содержащая значение загрязнения при работе инструмента "Отображение загрязнений".

мые для его работы методы. В соответствии со спецификой JavaScript, фактически, каждый класс реализован в виде функции-прототипа объектов.

Вся html-разметка описана в единственном файле index.html.

Для поддержки реактивности, обеспечения двухсторонней привязки данных к элементам управления используется фреймворк Vue.js.

Команды управления, размещаемые на панели инструментов, реализуются независимо в отдельных классах. Это позволяет гибко управлять составом инструментов, используемых для редактирования параметров расчетной модели.

Главный контейнер (RoadMapEditorHost) Web-приложения служит точкой входа в приложение. Переменная, хранящая экземпляр данного класса, определяется в html-файле переменной MAP_HOST. Конструктор класса данного модуля принимает в качестве входных параметров идентификатор html-элемента для размещения рабочей области карты, бизнес-модель для хранения всех параметров и настроек необходимых для расчета загрязнений и ссылку на функцию, срабатывающую после завершения процесса создания карты и позволяющего выполнить особые условия инициализации карты.

При инициализации модуля выполняются следующие методы:

• Создание карты. При создании карты происходит инициализация библиотеки leaflet, в результате чего на html-странице появляется карта, используемая в качестве основы для рисования.

• Создание панели инструментов. После создания панели инструментов она фиксируется в правой части рабочей области и вызывается метод регистрации инструментов, принимающий массив с экземплярами классов инструментов.

• Создание слоев с подложками. Для отображения геоданных на карте необходимо подключить как минимум один тайловый слой. Так как используемые тайлы предоставляются в виде открытых источников, они имеют определенные ограничения производительности. Также, удобным является возможность изменить цветовую схему в процессе работы над созданием дорожного графа. Поэтому при создании карты создается не один, а несколько слоев с тайлами. Переключение между слоями осуществляется при помощи кнопки расположенной в верхней левой части рабочей области.

• Регистрация менеджера карты. Данный метод вызывается при инициализации модуля, в результате чего создается и сохраняется в переменной класса, экземпляра модуля RoadMapManager.

• Регистрация событий карты. События мыши, связанные с картой, регистрируются один раз при инициализации модуля RoadMapEditorHost. События карты вызывают соответствующие им методы модуля. В основном эти методы вызывают тот или иной метод текущего инструмента, передавая вызов менеджера карты, тип события, необходимые параметры события (например, координаты указателя мыши в виде широты и долготы).

• Внешние вызовы управления бизнес-моделью. Это такие операции как загрузка или сохранение модели в файл, создание нового проекта и т.д.

Менеджер карты (RoadMapManager) – это модуль, который предназначен для управления элементами карты. Все операции по управлению элементами карты реализованы в рамках данного модуля. При управлении указанными элементами также происходит синхронизация бизнес-модели. В данном модуле реализованы следующие методы:

• управление картой: создание слоев подложки, выставление масштаба и начальной позиции.

• восстановление модели при загрузке: восстановление расположения узлов, ребер, расчетной сетки и настроек, восстановление их взаимосвязей, восстановление событий элементов;

• управление узлами: добавление, удаление, редактирование, активация/деактивация, перемещение вместе со смежными ребрами;

• управление ребрами: добавление, удаление, управление количеством и расположением сегментов, активация/деактивация, обработка кликов мыши поблизости от ребер;

• управление расчетной сеткой: добавление сетки, перемещение расчетной области, управление расчетными параметрами;

• управление тепловой картой: создание, удаление слоя тепловой карты, редактирование массива визуализируемых значений, получение значения в заданной точке;

• управление процессом расчета: запуск и прерывание процесса расчета, обеспечение визуализации промежуточных шагов.

Бизнес-модель проекта (MapModel). Данный модуль обеспечивает хранение и реактивное управление данными, содержащими текущие значения расчетных параметров.

При создании экземпляра класса MapModel выбирается экземпляр класса Vue, принимающий идентификатор html-элемента, являющегося контейнером, содержащим всю рабочую область, включая карту, панели инструментов и отладочную консоль.

В данном модуле реализованы следующие методы:

- построение начальной модели: достаточно сложная структура модели требует отдельного метода для её инициализации

• управление данными модели: методы управления данными модели - такие как управление узлами, ребрами, всевозможными настройками и т.п. - вызываются Менеджером карты в процессе управления содержимым карты.

• построение пространственного индекса ребер: для эффективного поиска подходящих ребер требуется специальный механизм индексации пространственных данных. В данном проекте используется алгоритм построения пространственного индекса известный как r-tree.

Инструменты, размещаемые на панели инструментов (MapToolsPanel), должны соответствовать требованиям библиотеки leaflet. Также они должны одинаковым образом реагировать на обращенные к ним заросы в событиях карты и размещенных на ней элементов. Эти требования приводит к тому, что все инструменты являются наследниками класса L.EditControl, который, в свою очередь, является наследником класса L.Control, описанного в ядре библиотеки leaflet. Стоит пояснить, что механизм наследования, реализованный в leaflet, требует для создания потомка вызова метода extend. Например, код создания класса L.EditControl выглядит так:

```
L.EditControl = L.Control.extend({
options: {
position: 'topright',
icon: 'img/tool.svg',
title: 'Н/Д',
regEvents: 'click dblclick',
// событие активации инструмента
onSelect: function (host) { host.selectTool(this); },
// событие деактивации инструмента
onUnselect: function (host) { },
// событие использования инструмента без активации
onUse: function (host) { console.log('undefined onUse', this); },
// событие источником которого служит клик по карте
onMapAction: function (evnType, latlng, host) { },
// событие источником которого служит клик по элементу (слою)
onLayerAction: function (evn, layer, host) { },
// событие источником которого служит перетаскивание элемента (слоя)
onLayerMove: function (evn, latlng, layer, host) { },
},
onAdd: function (map) {
var container = L.DomUtil.create('div', 'leaflet-control');
var link = L.DomUtil.create('a', '', container);
```

```
link.href = '#';
link.title = this.options.title;
var img = L.DomUtil.create('img', 'map-ctrl', link);
img.src = this.options.icon;
// инструмент реагирует на выбор так, как описано в методе registerToolEvents хоста
this.host.registerToolEvents(this, link);
return container;
},
});
```

Как видите, данный класс содержит поле options, в котором заданы методы требующие реализации в дочерних инструментах. Эти методы вызываются в событиях карты или в событиях элементов карты, а также могут вызываться - при необходимости - Менеджером карты. В событиях они вызываются для текущего инструмента. Менеджер карты может самостоятельно определить тот инструмент, для которого следует вызвать требуемый метод.

Модуль Контроллера потока расчетов (CalcGridWorker) реализует логику, позволяющую выполнять длительную операцию в отдельном потоке без блокировки основного окна браузера. Данный модуль передается в качестве параметра для класса Worker используемого для запуска длительного процесса расчета в соответствующем методе Менеджера карты.

Модуль алгоритма расчета загрязнений (EMISSION_CALC_MODEL) изолирован в отдельном модуле, позволяющим обеспечить удобство и гибкость его использования в процессе расчета в Менеджере карты. Данный модуль содержит методы для задания параметров расчета, запуска остановки и сброса процесса расчета.

Процесс расчета представляет собой цикл по всем временным отрезкам заданного интервала расчета. На каждом отрезке для каждого узла рассчитываются параметры диффузии для значения загрязнения в текущем узле, в соответствии с рассчитанными значениями выполняется перенос определенной части загрязнений в соседние ячейки, затем значение загрязнения увеличивается на размер эмиссии в текущей ячейке.

Общая картина процесса работы разработанной информационной системы представлена на схеме рисунка 16.

Общая схема функционирования Web-ориентированной информационной системы мониторинга процесса рассеивания вредных примесей в атмосферном воздухе города представлена с помощью схемы на рисунке 17 и является верхним уровнем иерархии функциональной модели.

На рисунке 19 представлена схема взаимодействия между js-модулями разработанной информационной системы

Исследование расчета диффузий для ячеек сетки представлено на схеме рисунка 20.

В разработанной Web-ориентированной информационной системе мониторинга процесса рассеивания вредных примесей в атмосферном воздухе го-

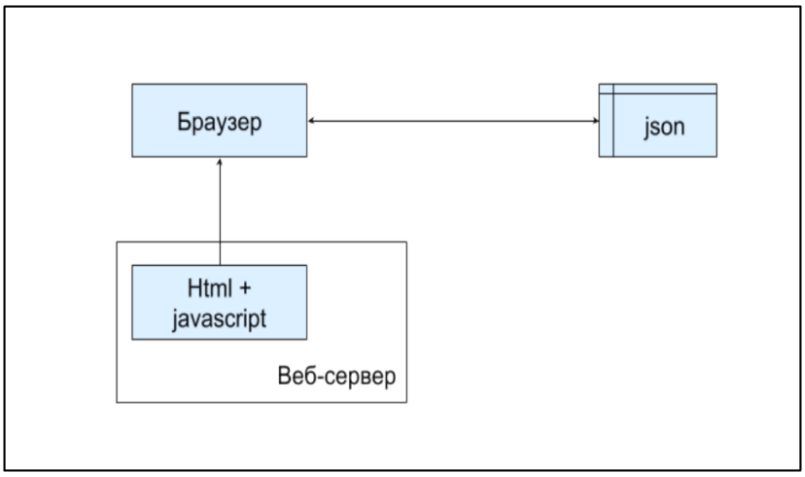


Рисунок 16. Схема загрузки данных Web-ориентированной информационной системы.

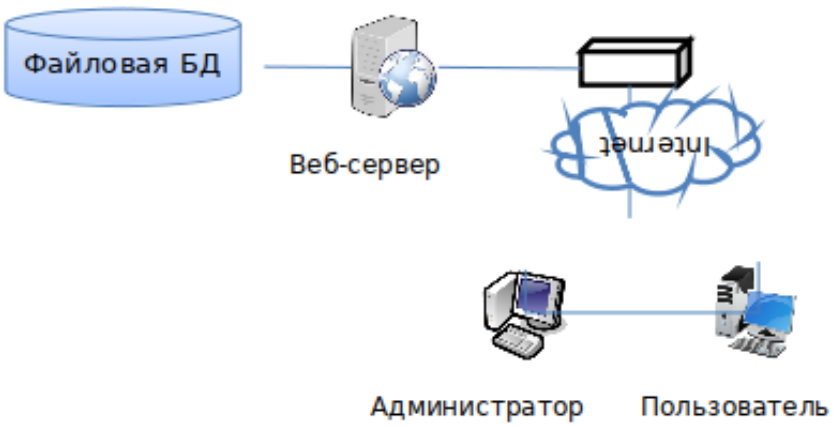


Рисунок 17. Структура информационной системы.

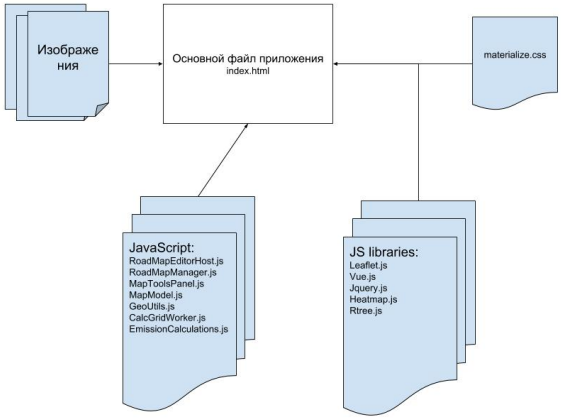


Рисунок 18. Схема функционирования Web-ориентированной информационной системы мониторинга процесса рассеивания вредных примесей в атмосферном воздухе города.

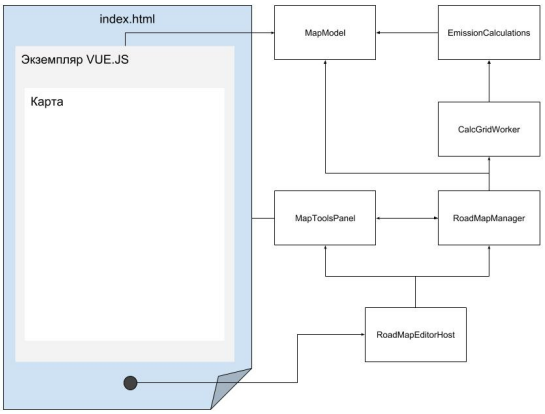


Рисунок 19. Схема взаимодействия между js-модулями информационной системы.

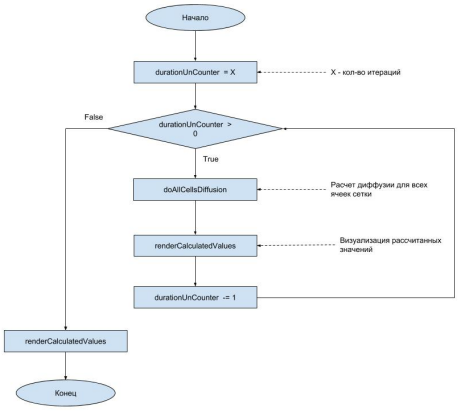


Рисунок 20. Схема расчета диффузий для ячеек сетки информационной системы мониторинга процесса рассеивания вредных примесей в атмосферном воздухе города.

рода реализован алгоритм расчета эмиссии и переноса для одной итерации для ячеек сетки (рис.21).

Таким образом, на рисунках проиллюстрирована зависимость визуализации процесса рассеивания вредных примесей в атмосферном воздухе города Усть-Каменогорска Восточно-Казахстанской области Республики Казахстан на базе разработанных алгоритмов. В предложенном подходе практически весь процесс мониторинга процесса рассеивания вредных примесей в атмосферном воздухе состоит из поэтапного преобразования шага сетки вероятностно-статистической модели с целью повышения эффективности применительно к поставленной задаче.

Созданная новая компьютерная технология позволяет на карте территории города отобразить графически уровень загрязнений в приземном слое атмосферы города, моделировать выбросы при различных вариантах организации дорожного движения, оценить степень экологического конфликта каждого из вариантов. Результаты мониторинга могут быть использованы при разработке маршрутов и графиков движения общественного транспорта с соблюдением санитарных норм загрязнения.

Список литературы

1. Луканин В.Н., Буслаев А.П., Яшина М.В. Автотранспортные потоки и окружающая среда – 2: Учеб. пособие для вузов /Под ред. В.Н. Луканина. – М.:ИНФРА-М, 2001. - 646 с.
2. Sugak E.V. Probabilistic-statistical modeling of turbulent gas-dispersed flows // Journal of Computational Technologies, 2003. Volume 8, №4, p. 81-96.

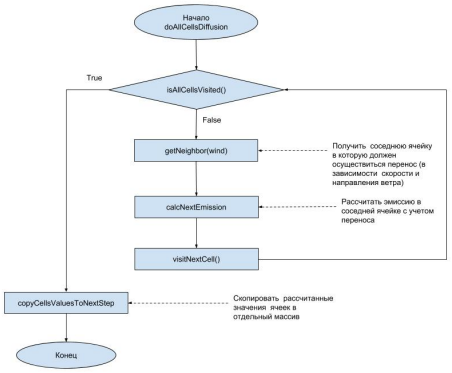


Рисунок 21. Схема расчета эмиссии и переноса для одной итерации для ячеек сетки информационной системы мониторинга процесса рассеивания вредных примесей в атмосферном воздухе города.

3. Temirbekov N.M., Abdoldina F.N., Madiyarov M.N., Malgazhdarov E.A. Computer technology for assessing the ecological state of the city's air basin, caused by the transport process. / / Scientific journal "Regional Vestnik Vostoka". -Ust-Kamenogorsk: Publishing house: S.Amanzholov EKSU, 2004. -№ 4 (24), – p. 3-11.
4. Temirbekov N.M., Abdoldina F.N., Madiyarov M.N., Malgazhdarov E.A. Adaptation of the numerical model of the microclimate of the city to the conditions of an industrial city located in a mountainous area // Proceedings of the international conference "Computational and Informational Technologies in Science, Engineering and Education". - Pavlodar, September 20-22, 2006. – Volume II, – p. 251-257.
5. Temirbekov N.M., Abdoldina F.N., Madiyarov M.N., Malgazhdarov E.A. Numerical modeling of atmospheric processes in a limited area and their adaptation for modeling the microclimate of Ust-Kamenogorsk // Journal of Computational Technologies, Special Issue. Tomsk, - 2006. Volume 11, Part 2, - p. 41-45.
6. Danaev N.T., Temirbekov A.N., Malgazhdarov E.A. Modeling of Pollutants in the Atmosphere Based on Photochemical Reactions // Eurasian Chemico-Technological Journal, Volume 16, number 1, 2014, p. 61-71.
7. Ник Рендольф, Дэвид Гарднер, Майкл Минутилло, Крис Андерсон. Visual Studio 2010 для профессионалов = Professional Visual Studio 2010. — М.: "Диалектика", 2011. — с. 1184

Содержание

Time series in forecasting the volumes of air transportation in Kazakhstan 7

J. Jumabayeva, S. Burgumbayeva, and A. Iskakova

Conceptual model of information system for resources storage 13

M. A. Sambetbayeva, O. A. Fedotova, A. M. Fedotov, A. G. Batyrkhanov

Applying spatial analysis methods in addressing city understanding issues 28

D. Shakenov, S. Smailova, and A. Nugumanova

Mathematical model of the monitoring system of university development . 39

L. Suleimenova, Ju. Vais, and S. Rakhmetullina

Mathematical modeling of the cylinder rotation system in a turbulent air flow 45

N. K. Tanasheva, B. R. Nusupbekov, A. N. Dyusembaeva, T. Kunakbaev, and M. Bazarbek

Iterative method for solving non-linear Navier-Stokes equations in complex domains taking into account boundary conditions with uniform accuracy 51

N. Temirbekov and Zh. Zhaksylykova

Using the CUDA technology to accelerate calculations in problems of chemical kinetics 58

B. Urmashev, M. Sarsembayev, A. Temirbekov, and M. Frenklach

Automated visual inspection in the endoprosthesis production 70

M. Yemelyanova and O. Baklanova

Mathematical modeling of elastic wave propagation in a homogeneous media 78

S. Zhuzbayev and D. Sabitova

Analysis and synthesis of typical behavioral structures for cyber physical systems' agents 90

D. Zyryanov and N. Denissova

Моделирование систем вентиляции методом теории гидравлических цепей 97

Д. В. Бойков

Статистикалық әдістер негізінде пәндік аймақ онтологиясын құру ... 112

Б.Б. Досанов, М.Е. Мансурова, А.Б. Нугуманова

Современные математические модели, численные методы и пакеты прикладных программ для решения задач фильтрации 121

Б. Жумагулов

Компьютерное моделирование распространения трещины из вершины острого v-образного выреза при антисимметричном изгибе.. 131

В. Кургузов

Использование метода конечных объемов для решения уравнения переноса излучения в прикладных задачах 147

К. Литвинцев

Комплекс некоммерческих программ «SigmaFlow» для решения задач гидродинамики, тепломасообмена и горения 163

К. Литвинцев, А. Гаврилов, А. Дектерев, С. Филимонов, Е. Харламов и А. Сентябов

Исследование поступательно-вращательного движения спутника с переменным тензорам инерции в поле притяжении сферического тела 179

М. Дж. Минглибаев и О. Б. Байсбаева

Применение методов многокритериальной оценки услуг в транспортной компании 195

Н. Набиева, Г. Жомарткызы, М. Базарова и А. Уркумбаева

Глубина освоения вариантов подэтажной геотехнологии с обрушением на примере Шерегешевского месторождения 202

С. А. Неверов, Ю. Н. Шапошник, А. А. Неверов и А. И. Конурин

Анализ сейсмических волн, генерируемых импульсным электромагнитным источником “Енисей”, с применением высокопроизводительных вычислений 215

В. М. Садовский и О. В. Садовская

Расчёт сложных гидродинамических систем с применением разномасштабных методов моделирования 224

С. Филимонов, А. Дектерев и Д. Боиков

Разработка системы моделирования процесса рассеивания вредных примесей в атмосферном воздухе города Усть-Каменогорска выбрасываемых автотранспортом 239

С. Адиканова, Н. Ф. Денисова, Е. А. Малгаждаров

Научное издание

Совместный выпуск

ВЕСТНИК
Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
Институт вычислительных технологий Сибирского отделения РАН

Том I. Часть Ш

ВЕСТНИК
Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева

Научный журнал

Издается с 1998 г.

Зарегистрирован Министерством информации и общественного согласия Республики Казахстан. Свидетельство № 145-ж от 27 февраля 1998 г.

Ответственные за выпуск:
Директор департамента-проректор по информатизации департамента информационных технологий *Н.Ф. Денисова*
Руководитель РИЦ *О.Н. Николаенко*
Верстка: *Д.Н. Зырянов, Д.Р. Байгереев*
Издание в авторской редакции

Подписано в печать 27.09.2018. Формат 84×108/16. Бумага офсетная.
Объем: 19,97 уч.-изд. л., 28,03 усл. печ. л. Тираж 350 экз.
Заказ № 2040-2018. Цена договорная.

Восточно-Казахстанский государственный технический университет
070004, г. Усть-Каменогорск, ул. Протозанова, 69

ISSN 1561-4212 Индекс 75678 Вестник ВКГТУ 2018 №3
ISSN 1560-7534 Вычислительные технологии 2018 №3