

ISSN 1998-6688 (Print)
ISSN 2959-8109 (Online)

**ҚАЗАҚСТАН-БРИТАН ТЕХНИКАЛЫҚ
УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ХАБАРШЫСЫ**



**HERALD
OF THE KAZAKH-BRITISH
TECHNICAL UNIVERSITY**



**ВЕСТНИК
КАЗАХСТАНСКО-БРИТАНСКОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Volume 20, Issue 4
October–December 2023

**ҚАЗАҚСТАН-БРИТАН
ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ХАБАРШЫСЫ**

**HERALD
OF THE KAZAKH-BRITISH
TECHNICAL UNIVERSITY**

**ВЕСТНИК
КАЗАХСТАНСКО-БРИТАНСКОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Алматы

№ 4 (67) 2023 г.

Издание зарегистрировано Министерством культуры и информации Республики Казахстан. Свидетельство о постановке на учет СМИ № 9757 – Ж от 03.12.2008 г.

Журнал зарегистрирован в Международном центре по регистрации сериальных изданий ISSN (ЮНЕСКО, г. Париж, Франция)

В журнале публикуются научные статьи на английском, казахском и русском языках по направлениям: компьютерные науки, математические науки, физические науки, нефтегазовая инженерия и геология, экономика и бизнес.

Подписной индекс – 74206

Издается с 2004 года. Выходит 4 раза в год.

УЧРЕДИТЕЛЬ
Казахстанско-Британский технический университет

ISSN 1998-6688 (Print)
ISSN 2959-8109 (Online)

© Казахстанско-Британский технический университет, 2023

Editor-in-chief – **B. Kulpeshov**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, corresponding member of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Professor, School of Applied Mathematics of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan

EDITORIAL BOARD

Section “Computer science”

- Akzhalova A.Zh.** - Candidate of Physical and Mathematical sciences, PhD, Professor, School of Information Technology and Engineering of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Pak A.A.** - Candidate of Technical Sciences, Associate professor, School of Information Technology and Engineering of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Samigulina Z.I.** - PhD, Professor, School of Information Technology and Engineering of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Ilyas Muhammad** - PhD, Professor, School of Information Technology and Engineering of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan.

Section “Mathematical Sciences”

- Kalmurzayev B.S.** - PhD, Associate professor, School of Applied Mathematics of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Sudoplatov S.V.** - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, Institute of Mathematics SB RAS; Head of Department, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia;
- Bazhenov N.A.** - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Mathematics SB RAS, Novosibirsk, Russia.

Section “Physical Sciences”

- Beisenkhanov N.B.** - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Dean, Professor, School of Materials Science and Green Technology of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Abdirakhmanov A.R.** - PhD, Head of Intellectual Property Service of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Beisenov R.Y.** - PhD, Dean, School of Natural and Social Sciences of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Nusupov K.Kh.** - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, School of Materials Science and Green Technology of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan.

Section “Oil and Gas Engineering and Geology”

- Ismailov A.A.** - Candidate of Technical Sciences, Dean, Professor, School of Energy and Oil and Gas Industry of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Korobkin V.V.** - Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, School of Geology of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Turgazinov I.K.** - PhD, Assistant professor, School of Energy and Oil and Gas Industry of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Kan Wanli** - PhD, Professor, Faculty of Oilfield Chemical Technology of China Petroleum University (East China), Qingdao, China;
- Sarsenbekuly B.** - PhD, Associate professor, School of Energy and Petroleum Engineering of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Moldabaeva G.Zh.** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Petroleum Engineering of K. Turysov Institute of Geology and Petroleum Engineering, KazNTU, Almaty, Kazakhstan.

Section “Economics and Business”

- Narbaev T.S.** - PhD, Professor, Business School of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Kozhakhmetova A.K.** - PhD, Assistant Professor, Business School of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Aldashev A.** - PhD, Professor, International School of Economics of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Batkeev B.B.** - PhD, Assistant professor, International School of Economics of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Seitkazieva A.M.** - Doctor of Economics, Professor, Business School of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Gabriel Castelblanco** - PhD, Assistant professor, University of Florida, Florida, USA.

Бас редактор – **Кулпешов Б.Ш.**, ф.-м.ғ.д., ҚР ҰҒА корреспондент-мүшесі, профессор,
«ҚБТУ» АҚ Қолданбалы математика мектебі, Алматы қ., Қазақстан

РЕДАКЦИЯ АЛҚАСЫ

«Компьютерлік ғылымдар» бөлімі

- Акжолова А.Ж.** - ф.-м.ғ.к, PhD, профессор, «ҚБТУ» АҚ Ақпараттық технологиялар және инженерия мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Пак А.А. - т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, «ҚБТУ» АҚ Ақпараттық технологиялар және инженерия мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Самигулина З.И. - PhD, профессор, «ҚБТУ» АҚ Ақпараттық технологиялар және инженерия мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Ilyas Muhammad - PhD, профессор, «ҚБТУ» АҚ Ақпараттық технологиялар және инженерия мектебі, Алматы қ., Қазақстан.

«Математикалық ғылымдар» бөлімі

- Калмурзаев Б.С.** - PhD, қауымдастырылған профессор, «ҚБТУ» АҚ Қолданбалы математика мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Судоплатов С.В. - ф.-м.ғ.д., профессор, РҒА СБ математика институтының бас ғылыми қызметкері; Новосібір мемлекеттік техникалық университеті, кафедра меңгерушісі, Новосібір қ., Ресей;
Баженов Н.А. - ф.-м.ғ.к., РҒА СБ математика институтының аға ғылыми қызметкері, Новосібір қ., Ресей.

«Физикалық ғылымдар» бөлімі

- Бейсенханов Н.Б.** - ф.-м.ғ.д., декан, профессор, «ҚБТУ» АҚ Материалтану және жасыл технологиялар мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Әбдірахманов А.Р. - PhD, «ҚБТУ» АҚ Зияткерлік меншік қызметінің басшысы, Алматы қ., Қазақстан;
Бейсенов Р.Е. - PhD, декан, «ҚБТУ» АҚ Жаратылыстану және әлеуметтік ғылымдар мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Нусупов К.Х. - ф.-м.ғ.д., профессор, «ҚБТУ» АҚ Материалтану және жасыл технологиялар мектебі, Алматы қ., Қазақстан.

«Мұнай газ инженериясы және геология» бөлімі

- Исмаилов А.А.** - т.ғ.к., декан, профессор, «ҚБТУ» АҚ Энергетика және мұнай-газ индустриясы мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Коробкин В.В. - геол.-минерал.ғ.к., профессор, «ҚБТУ» АҚ Геология мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Тургазинов И.К. - PhD, ассистент-профессор, «ҚБТУ» АҚ Энергетика және мұнай-газ индустриясы мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Кан Ванли - PhD, профессор, Мұнай кәсіпшілігінің химиялық технология факультеті, Қытай мұнай университеті (Шығыс Қытай), Циндао қ., Қытай;
Сарсенбекұлы Б. - PhD, қауымдастырылған профессор, «ҚБТУ» АҚ Энергетика және мұнай-газ индустриясы мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Молдабаева Г.Ж. - тех.ғ.д., профессор, мұнай инженериясы кафедрасы, Қ. Тұрысов атындағы геология және мұнай-газ институты, ҚазҰТУ, Алматы қ., Қазақстан.

«Экономика және бизнес» бөлімі

- Нарбаев Т.С.** - PhD, профессор, «ҚБТУ» АҚ Бизнес мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Кожаметова А.К. - PhD, ассистент-профессор, «ҚБТУ» АҚ Бизнес мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Алдашев А. - PhD, профессор, «ҚБТУ» АҚ Халықаралық экономика мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Баткеев Б.Б. - PhD, ассистент-профессор, «ҚБТУ» АҚ Халықаралық экономика мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Сейтказиева А.М. - э.ғ.д., профессор, «ҚБТУ» АҚ Бизнес мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Gabriel Castelblanco - PhD, ассистент-профессор, Флорида университеті, Флорида, АҚШ

Главный редактор – **Кулпешов Б.Ш.**, д.ф.-м.н., член-корреспондент НАН РК, профессор, Школа прикладной математики АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ

Раздел «Компьютерные науки»

- Акжолова А.Ж.** - к.ф.-м.н., PhD, профессор, Школа информационных технологий и инженерии АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Пак А.А.** - к.т.н., ассоциированный профессор, Школа информационных технологий и инженерии АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Самигулина З.И.** - PhD, профессор, Школа информационных технологий и инженерии АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Puys Muhammad** - PhD, профессор, Школа информационных технологий и инженерии АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан.

Раздел «Математические науки»

- Калмурзаев Б.С.** - PhD, ассоциированный профессор, Школа прикладной математики АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Судоплатов С.В.** - д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт математики СО РАН; зав. кафедрой, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия;
- Баженов Н.А.** - к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт математики СО РАН, г. Новосибирск, Россия;

Раздел «Физические науки»

- Бейсенханов Н.Б.** - д.ф.-м.н., декан, профессор, Школа материаловедения и зеленых технологий АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Әбдірахманов А.Р.** - PhD, руководитель Службы интеллектуальной собственности АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Бейсенов Р.Е.** - PhD, декан, Школа естественных и социальных наук АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Нусупов К.Х.** - д.ф.-м.н., профессор, Школа материаловедения и зеленых технологий АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан.

Раздел «Нефтегазовая инженерия и геология»

- Исмаилов А.А.** - к.т.н., декан, профессор, Школа энергетики и нефтегазовой индустрии АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Коробкин В.В.** - к.геол.-минерал.н., профессор, Школа геологии АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Тургазинов И.К.** - PhD, ассистент-профессор, Школа энергетики и нефтегазовой индустрии АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Кан Ванли** - PhD, профессор, Факультет нефтепромышленной химической технологии, Китайский нефтяной университет (Восточный Китай), г. Циндао, Китай;
- Сарсенбекұлы Б.** - PhD, ассоциированный профессор, Школа энергетики и нефтегазовой индустрии АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Молдабаева Г.Ж.** - д.тех.н., профессор, кафедра нефтяной инженерии, Институт геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова, КазНТУ, г. Алматы, Казахстан.

Раздел «Экономика и бизнес»

- Нарбаев Т.С.** - PhD, профессор, Бизнес-школа АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Кожаметова А.К.** - PhD, ассистент-профессор, Бизнес-школа АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Алдашев А.** - PhD, профессор, Международная школа экономики АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Баткеев Б.Б.** - PhD, ассистент-профессор, Международная школа экономики АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Сейтказиева А.М.** - д.э.н., профессор, Бизнес-школа АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Gabriel Castelblanco** - PhD, ассистент профессора, Университет Флориды, Флорида, США.

МАЗМҰНЫ – СОДЕРЖАНИЕ

1 КОМПЬЮТЕРЛІК ҒЫЛЫМДАР КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ

Duran V., Hazar E., Akhmetov I., Pak A.

From words to paragraphs: modeling sentiment dynamics in ‘notes from underground’ with GPT-4 via descriptive methods and differential equations 10

Muhammad Ilyas, Abdullah Aamir Hayat,

Prabakaran Veerajagadheswar, Mohan Rajesh Elara

3D Absolute pose estimation of a staircase cleaning robot utilizing staircase geometry and minimal low-cost sensors 27

Odarchenko R.S., Pinchuk A.D., Polihenko O.O.

LTE network deployment based on open-source solutions 40

Ibragim G.K., Umarov T.F.

The consideration of semantic gap between design and code 48

2 МАТЕМАТИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Shmygaleva T.A., Srazhdinova A.A.

Modeling of radiation processes of defect formation in materials irradiated with ions 55

Shiyapov K.M., Baishemirov Zh.D., Abdiramanov Zh.A., Zhanbyrbayev A.B.

Studying the features of simulating fluid movement in porous media 63

Мереке А.Л., Чекиева А.С., Умирзаков А.Г., Елемесов К.К.,

Абдугалимов А.Ш., Фасхутдинов М.Ф., Серикканов А.С.

Исследование и моделирование электрохимических процессов в ванадиевых батареях 72

Манапова А.К., Бекетаева А.О., Макаров В.В.

Численное моделирование существенно дозвуковых течений сжимаемого газа 85

3 ФИЗИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

Шиныкулова Н.Н., Шамбулов Н.Б., Татенов А.М., Ертурк С.,

Шиныкулова Г.Н., Мәжит Ж., Ашикбаева А.Б.

Исследование влияния гамма-облучения на монокристаллы феррита-шпинеля 97

Rakhimova A.Zh., Zhirkov I.V., Nussupov K.Kh, Beisenkhanov N.B., Sultanov A.T.

Effect of oxygen flow on electrical and optical properties of ITO films synthesized by magnetron sputtering method 109

4 МҰНАЙ ГАЗ ИНЖЕНЕРИЯСЫ ЖӘНЕ ГЕОЛОГИЯ НЕФТЕГАЗОВАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ГЕОЛОГИЯ

Аяганова А.И.

Классификация двухфазных углеводородных залежей
в связи с их промышленной разведкой на примере
месторождений Мангышлака 118

Басарбай А.Е., Тургазинов И.К.

Вовлечение в разработку недренируемых запасов м. Жетыбай 127

Чныбаева Д.М.

Вероятностный прогноз литологии по сейсмическим данным
в условиях слабой изученности скважинами 137

5 ЭКОНОМИКА ЖӘНЕ БИЗНЕС ЭКОНОМИКА И БИЗНЕС

Duisenbiyev A., Seitkazieva A., Ali Cem Kuzu

Digitalization of certification processes as a factor in improving
management efficiency in the maritime industry 144

Araslanova O.S.

Risk management strategy and methodology
of their analysis in logistics of Kazakhstan 157

CONTENTS

1 COMPUTER SCIENCE

Duran V., Hazar E., Akhmetov I., Pak A.

From words to paragraphs: modeling sentiment dynamics in ‘notes from underground’ with GPT-4 via descriptive methods and differential equations..... 10

Muhammad Ilyas, Abdullah Aamir Hayat,

Prabakaran Veerajagadheswar, Mohan Rajesh Elara

3D Absolute pose estimation of a staircase cleaning robot utilizing staircase geometry and minimal low-cost sensors..... 27

Odarchenko R.S., Pinchuk A.D., Polihenko O.O.

LTE network deployment based on open-source solutions 40

Ibragim G.K., Umarov T.F.

The consideration of semantic gap between design and code 48

2 MATHEMATICAL SCIENCES

Shmygaleva T.A., Srazhdinova A.A.

Modeling of radiation processes of defect formation in materials irradiated with ions 55

Shiyapov K.M., Baishemirov Zh.D., Abdiramanov Zh.A., Zhanbyrbayev A.B.

Studying the features of simulating fluid movement in porous media 63

Mereke A.L., Chekiyeva A.S., Umirzakov A.G., Elemesov K.K.,

Abdugalimov A.Sh., Faskhutdinov M.F., Serikkanov A.S.

Research and simulation of electrochemical processes in vanadium batteries..... 72

Manapova A., Beketaeva A. Makarov V.

Numerical modeling of essentially subsonic flows of compressible gas..... 85

3 PHYSICAL SCIENCES

Shinikulova N.N., Shambulov N.B., Tatenov A.M., Erturk S.,

Shinikulova G.N., Mazhit J, Ashikbayeva A.B.

Study of the influence of gamma irradiation on ferrite-spinel monocrystals..... 97

Rakhimova A.Zh., Zhirkov I.V., Nussupov K.Kh, Beisenkhanov N.B., Sultanov A.T.

Effect of oxygen flow on electrical and optical properties of ITO films synthesized by magnetron sputtering method..... 109

4 OIL AND GAS ENGINEERING, GEOLOGY

Ayaganova A.I.

Classification of two-phase hydrocarbon deposits in connection
with their industrial exploration on the example of Mangyshlak deposits 118

Bassarbay A.E., Turgazinov I.K.

Involvement in the development of underexploited reserves
of the Zhetybai oilfield 127

Chnybayeva D.M.

Probabilistic lithology targeting based on seismic data,
at underexplored areas by wells 137

5 ECONOMY AND BUSINESS

Duisenbiyev A., Seitzkazieva A., Ali Cem Kuzu

Digitalization of certification processes as a factor in improving
management efficiency in the maritime industry 144

Araslanova O.S.

Risk management strategy and methodology
of their analysis in logistics of Kazakhstan 157

COMPUTER SCIENCE
КОМПЬЮТЕРЛІК ҒЫЛЫМДАР
КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ

УДК 004.8
МРПТИ 28.23.21

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2023-20-4-10-26>

¹*DURAN V., ¹HAZAR E., ²AKHMETOV I., ²PAK A.

¹Iğdır University, 76000, Iğdır, Türkiye

²Institute of Information and Computational Technologies (IICT),
050000, Almaty, Kazakhstan

*E-mail: volkan.duran8@gmail.com

**FROM WORDS TO PARAGRAPHS: MODELING SENTIMENT
DYNAMICS IN ‘NOTES FROM UNDERGROUND’ WITH GPT-4 VIA
DESCRIPTIVE METHODS AND DIFFERENTIAL EQUATIONS**

Abstract

This study examines how the sentiment values in the first part of the book entitled as “Underground” of Fyodor Dostoevsky’s “Notes from Underground” change from words to sentences to paragraphs. Using the GPT-4 language model, we conducted a descriptive analysis of standardized sentiment values and calculated cumulative sentiment trajectories over the text. We then created differential equation models to model the sentiment tones using regression analysis. Our findings suggest that sentiment becomes less negative from words to paragraphs, indicating that context moderates negativity. Paragraph sentiment was also more stable with lower variability. There was a narrative arc of initial decline followed by an upward turn in sentiment. Paragraphs had the highest baseline sentiment, suggesting that they are able to capture more nuanced context. Paragraphs lost short-term sentiment quickly but retained long-term sentiment longest, aligning with paragraphs maintaining overall text sentiment over time. These findings suggest that there are complex dynamics between linguistic units contributing to perceived stability of sentiment. Quantitative decay rates are useful indicators but do not fully characterize sentiment stability.

Key words: Sentiment analysis, differential equations, GPT-4, curve fitting, hierarchical regression analysis.

1. Introduction

Opinion mining or sentiment analysis (SA) examines opinions in text using a blend of mathematics and linguistics [1]. It offers valuable insights for enhancing educational practices [2]. SA operates mainly at four levels: Document, Sentence, Phrase, and Aspect [3, 4]. Document level classifies the overall sentiment of a text, while Sentence level focuses on individual sentences. Phrase level mines opinion words, and Aspect level analyzes the emotional components of phrases, assigning polarity to each.

Sentiment analysis is a multifaceted field involving various NLP tasks like aspect extraction and sarcasm detection [5]. It employs diverse techniques including machine learning, lexicon-based, rule-based, and statistical models [6, 7, 8, 9]. Specialized methods like aspect-based analysis and deep learning have also been developed [10, 11, 12, 13, 14]. Moreover, multi-modal algorithms are emerging that analyze not just text but also visual data [15]. Recent research suggests that keyword-based techniques may be inadequate for nuanced texts [16].

Although differential equations have previously been used in social sciences [17], the contribution of this research lies in building sentiment models through curve fitting and regression analysis. This approach not only enhances credibility but also allows for the study of complex sentiment relationships across various textual levels. It opens up avenues for predicting sentiment behavior in different contexts. Sentiment analysis is already applied in diverse sectors like marketing, politics, and healthcare [18, 19, 20, 21]. By fusing AI-driven sentiment analysis with mathematical models, this research sets the stage for deeper exploration into sentiment dynamics, enriching its application across various fields.

Given the intricacies of text sentiment representation and the intersection of AI-driven sentiment analysis with mathematical models, it is evident that understanding sentiment behavior in various contexts is not only crucial but intricate. Drawing on the principles of mathematical modeling and physics, this research takes innovative steps in employing techniques from stratified symbolic regression, genetic programming, and the finite difference method. Such techniques have proven instrumental in extracting differential equations from data, as showcased by many researches [22, 23, 24, 25]. By bridging the gap between AI sentiment analysis and mathematical modeling, this research promises to provide a more credible, predictive, and enriched understanding of sentiment behavior across textual forms. Therefore, research on the development of sentiment representation using AI-driven analysis combined with mathematical modeling is undeniably relevant.

2. Methodology

This study is based on quantitative research design. We analyzed the sentiments in the first part of the book entitled as “Underground”. In the first part of the study, we descriptively investigated the general characteristics of the sentiments in standardized forms. Finally, we used regression models to get differential equations regarding the sentimental tones by using SPSS 25. We get the three given equations representing the sentiment points at different levels of text (word, sentence, and paragraph) as a function of x . The x variable could be interpreted as the position within the text.

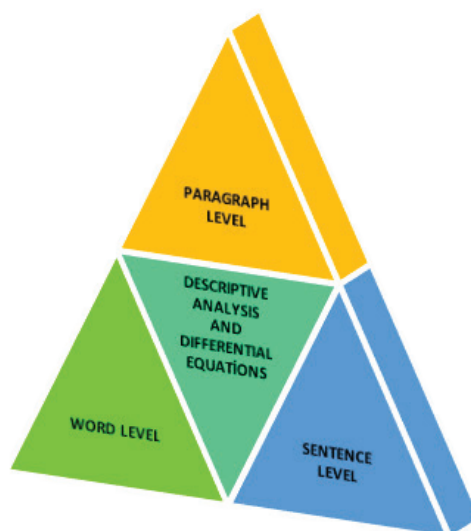


Figure 1– The main units of the analysis

We used GPT-4 which is a multimodal large language model created by OpenAI and the fourth in its GPT series to label sentiment values in word, sentence and paragraph levels. In this analysis we have three main units of the research as words, sentences and paragraphs (Figure 1) where GPT4 assigned sentiment scores between -1 and 0 (negative sentiments) and 0 and 1 (positive sentiments) to each word/phrase or to each sentence in a passage or to an entire passage of text.

2.1 Analysis

In the first part of our study, we focused on a descriptive analysis of sentiments, standardized forms. Standardization—transforming data values to have a mean of zero and a standard deviation of one—is achieved by subtracting the dataset's mean from each value and dividing the result by the standard deviation. We used the cumulative sum of sentiment values to assess the overall sentiment trajectory over a text. This takes into account the sentiments expressed at each point, whether at the word, sentence, or paragraph level. This cumulative total can help us identify patterns, trends, or variations in sentiment over time, offering insights into the text's general tone and emotional content.

Finally, we used regression models to get differential equations regarding the sentimental tones. Creating a differential equation model using the difference method of variables, curve fitting, and linear regression involves several steps by using IBM SPSS 25 and Wolfram Alpha online. Here's a general outline of the process:

1. Data Collection: We collected sentiment data generated by GPT-4, where the variable x can be interpreted as the position within the text.
2. Calculation of Differences: We computed the differences between consecutive data points to approximate derivatives such as the first and second derivatives. We used the finite forward difference method to calculate these numerical derivatives, denoted as metrics.
3. Curve Fitting: Curve fitting was performed on both the original sentiment data and the calculated differences.
4. Linear Regression Analysis: If the relationship between the original data and the calculated differences appeared to be linear, linear regression was used to find the best-fit line. The aim was to minimize the sum of the squared differences between the observed and predicted values. Hierarchical linear regression analysis was used to identify functions that could represent differential equations.
5. Formulation of the Differential Equation: Based on the results of curve fitting and linear regression, a differential equation model was formulated. Coefficients from the regression were used to define the relationship between the dependent variable(s) and their derivatives in the differential equation.
6. Final Equations: We derived three equations representing sentiment at different textual levels (word, sentence, and paragraph) as functions for the position within the text.

2.2 Limitations

- ♦ The main limitation of this study is that we chose the English translation of book rather than original one (Notes from Underground (Vintage Classics) by Fyodor Dostoevsky (Author), Richard Pevear (Translator), Larissa Volokhonsky (Translator). Although GPT-4 works well with Russian, it is supposed that it can analyze the results best in English since the main aim is to analyze sentiments.
- ♦ The second limitation is that we use GPT-4 model since there are a lot of different libraries and algorithms for this so that our results are restricted within the capabilities of GPT-4 chatbot.
- ♦ Sentiment analysis and NLP face a number of obstacles, including idiosyncrasies in writing style, sarcasm, irony, and linguistic peculiarities. Many terms in many languages have nuanced or shifting meanings based on the specific setting or field in which they are used.
- ♦ Performing regression analysis on a variable and its numerical derivative based on a difference method might not be ideal for several reasons like loss of information, amplification of noise, data requirements, assumption violations, non-stationarity, causality and interpretation issues. However, there are cases where using derivatives in a regression analysis could be beneficial. For example, if someone is interested in the rate of change or if the relationship between variables is best modeled by considering rates of change, then the derivative might be appropriate.

3. Findings

3.1 The Descriptive Interpretation of the Sentiment Values at Word Level

The descriptive values of the sentiment values at word level shows a generally negative sentiment at the word level (Table 1, p.13). Most descriptive statistics, like mean, median, and confidence intervals, are also in the negative range, confirming the same. Here is a lot of variation in the standardized values, and the distribution is negatively skewed.

Table 1– The descriptive values of tstandardized values of the cumulative sum chart of the sentiments of the words

Cumtopnor	Mean		-35,7602	,72815
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	-37,1887	
		Upper Bound	-34,3317	
	5% Trimmed Mean		-34,8997	
	Median		-28,8500	
	Variance		673,360	
	Std. Deviation		25,94918	
	Minimum		-96,86	
	Maximum		8,10	
	Range		104,96	
	Interquartile Range		43,14	
	Skewness		-,533	,069
	Kurtosis		-,811	,137

The standardized values of the waterflow chart (cumulative sum) chart of the sentiments of the words show that at the beginning of the graph, there is a decline in the sentiment values (Figure 2). The initial decline in the graph suggests that the initial words have a largely negative sentiment. This could indicate that the subject matter or tone at the beginning is unfavorable or pessimistic. However there's a point at which the graph starts to curve upwards. This could signify a turning point in the sentiment—perhaps where the content starts to become less negative. This could indicate a shift in the subject or a change in the narrative tone, perhaps offering solutions, resolutions, or a more optimistic outlook.

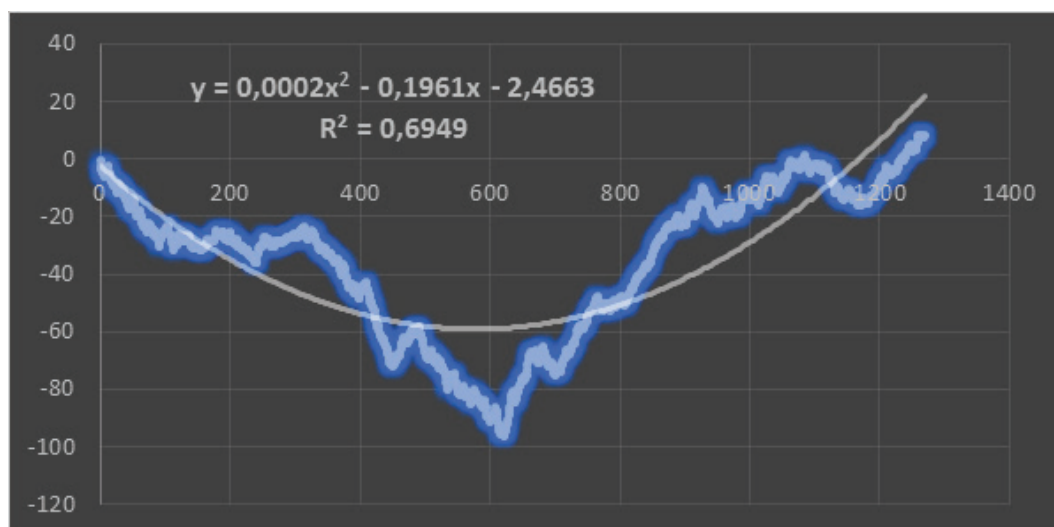


Figure 2 – The standardized values of the waterflow chart (cumulative sum) chart of the sentiments of the words and the relevant equation

3.2 The Descriptive Interpretation of the Sentiment Values at Sentence Level

The descriptive statistics indicate the cumulative sentiment trend in sentence level is negative on average, with a wide spread and skew towards more negative values with a lot of variation (Table 2, p. 14). There are some sentences with very negative sentiments, but there are also some sentences with relatively neutral sentiments.

Table 2 – The descriptive values of tstandardized values of the cumulative sum chart of the sentiments of the sentences

Snormcumsum	Mean		-14,5014	,57995
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	-15,6401	
		Upper Bound	-13,3627	
	5% Trimmed Mean		-13,5815	
	Median		-9,9024	
	Variance		228,379	
	Std. Deviation		15,11220	
	Minimum		-51,00	
	Maximum		4,56	
	Range		55,56	
	Interquartile Range		19,05	
	Skewness		-,929	,094
	Kurtosis		-,319	,187

The standardized values of the waterfall chart (cumulative sum) chart of the sentiments of the sentences show that at the beginning of the graph, there is a decline in the sentiment values (Figure 3). The initial decline in the graph suggests that the initial sentences have a largely negative sentiment. This could indicate that the subject matter or tone at the beginning is unfavorable or pessimistic. However there's a point at which the graph starts to curve upwards. This could signify a turning point in the sentiment—perhaps where the content starts to become less negative. This could indicate a shift in the subject or a change in the narrative tone, perhaps offering solutions, resolutions, or a more optimistic outlook. The leveling off at the end suggests that the change in sentiment is not a temporary spike but possibly a new sustained mood or theme possibly showing that the negative trend has plateaued and reached a steady state.

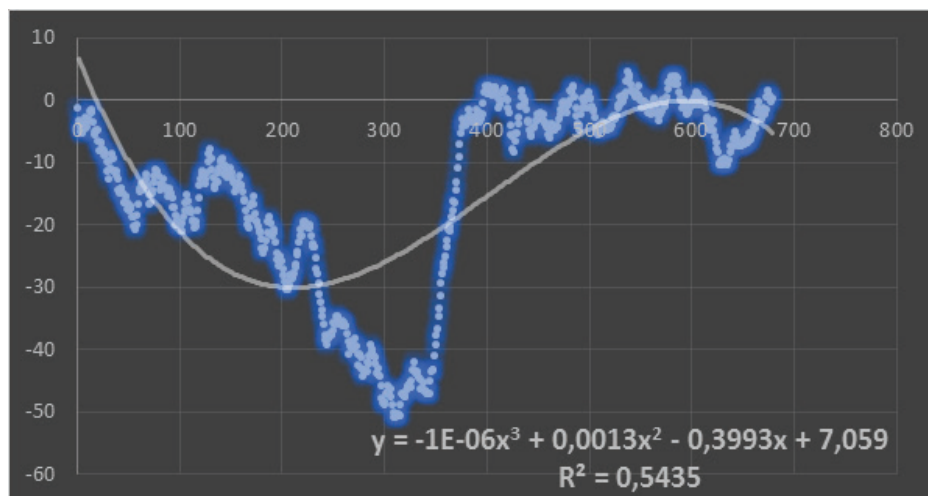


Figure 3 – The standardized values of the waterfall chart (cumulative sum) chart of the sentiments of the sentences and the relevant equation

3.3 The Descriptive Interpretation of the Sentiment Values at Paragraph Level

The descriptive statistics of the standardized values of the cumulative sum chart of the sentiments of the paragraphs suggest that the sentiments of the paragraphs are, on average, negative (Table 3, p. 15). Overall, the data suggests that the sentiments of the paragraphs are predominantly negative with a high degree of variability.

Table 3 – The descriptive values of tstandardized values of he cumulative sum chart of the sentiments of the paragraphs

			Statistic	Std. Error
Pnormcumsum	Mean		-8,1190	1,05517
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	-10,2289	
		Upper Bound	-6,0091	
	5% Trimmed Mean		-7,1696	
	Median		-5,6889	
	Variance		69,029	
	Std. Deviation		8,30839	
	Minimum		-32,50	
	Maximum		-,38	
	Range		32,12	
	Interquartile Range		3,46	
	Skewness		-2,472	,304
	Kurtosis		4,966	,599

The graph below represents the standardized values of the waterflow chart (cumulative sum) of the sentiments of the paragraphs (Figure 4). The initial decline in the graph suggests that the initial paragraphs have a largely negative sentiment. This could indicate that the subject matter or tone at the beginning is unfavorable or pessimistic. The stabilization at a lower level could mean that the negative sentiment is sustained over a period, but without worsening. This could represent a consistent theme or mood. The upward curve towards the end suggests a change in sentiment in the later paragraphs. This could indicate a shift in the subject or a change in the narrative tone, perhaps offering solutions, resolutions, or a more optimistic outlook.

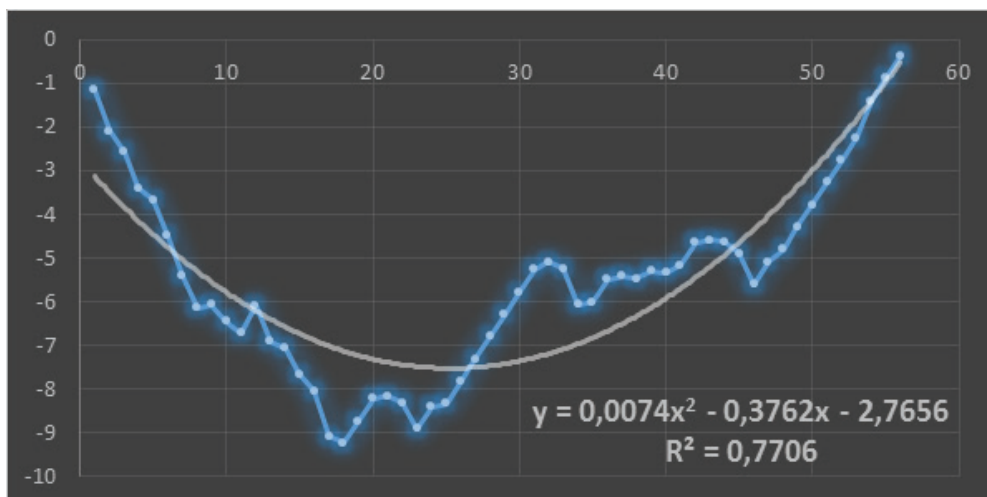


Figure 4 – The standardized values of the waterflow chart (cumulative sum) chart of the sentiments of the paragraphs and the relevant equation

3.4 The differential equations modelling for the words as the main unit of the research

In our sentiment analysis at the word level, we considered various models. The Cubic model has the highest R Square value (0.403) and a significant F statistic (284.935), making it the best fit among the models we could calculate (Table 4. p. 16). However, we opted for the linear model for its simplicity and because it also provided a good fit (R Square of 0.400). We plan to apply the same linear approach to sentence and paragraph levels but have omitted those results due to page constraints.

Table 4 – Model summary and parameter estimates for the sentiments in word level

Model Summary and Parameter Estimates									
Dependent Variable: dw/dx									
Equation	Model Summary					Parameter Estimates			
	R Square	F	df1	df2	Sig.	Constant	b1	b2	b3
Linear	,400	846,359	1	1268	,000	,006	-,800		
Logarithmica	.	.	.	.	.	.	.		
Inverse	,009	11,263	1	1268	,001	-,012	-,011		
Quadratic	,402	426,358	2	1267	,000	,057	-,798	-,066	
Cubic	,403	284,935	3	1266	,000	,063	-,868	-,075	,047
Compoundb	.	.	.	.	.	.	.		
Powera,b	.	.	.	.	.	.	.		
Sb	.	.	.	.	.	.	.		
Growthb	.	.	.	.	.	.	.		
Exponentialb	.	.	.	.	.	.	.		
Logisticb	.	.	.	.	.	.	.		
The independent variable is .									
a. The independent variable (wnormsent) contains non-positive values. The minimum value is -1,62. The Logarithmic and Power models cannot be calculated.									
b. The dependent variable (wnormderiv) contains non-positive values. The minimum value is -3,40. Log transform cannot be applied. The Compound, Power, S, Growth, Exponential, and Logistic models cannot be calculated for this variable.									

In a hierarchical regression analysis examining sentiments at the word and sentence levels, three models were built (Table 5). Model 1 used 'wnormsent' as a predictor and showed the highest explanatory power. Adding 'snormsent' in Model 2 and 'snormder' in Model 3 did not significantly improve the model, as indicated by non-significant Sig. F Change values (0.333 and 0.212). Therefore, we continue with the numerical derivatives of the variables in the same level.

Table 5 – Hierarchical regression analysis for the sentiments in word level and sentence level

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	,616a	,380	,379	,88553	,380	414,526	1	677	,000
2	,617b	,381	,379	,88557	,001	,939	1	676	,333
3	,618c	,382	,379	,88520	,001	1,564	1	675	,212
a. Predictors: (Constant), wnormsent b. Predictors: (Constant), wnormsent, snormsent c. Predictors: (Constant), wnormsent, snormsent, snormder d. Dependent Variable: wnormderiv									

In a hierarchical regression analysis focused on the second derivative of word-level sentiments, two models were compared. Model 2, which added 'dwdt' as a predictor, showed a significant improvement in predictive power, indicated by an Adjusted R Square of 0.792 and a Durbin-Watson statistic of 2.003, suggesting no autocorrelation in residuals (Table 6) The Standard Error of the Estimate also decreased in Model 2, confirming its efficiency. Thus, Model 2 is the more effective model for predicting the second derivative of word-level sentiments.

Table 6 – Model summary including the second derivative of the sentiments in word level as an additional predictor to Model 2.

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics					Durbin-Watson
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change	
1	,327 ^a	,107	,106	1,78921	,107	151,392	1	1268	,000	
2	,890 ^b	,793	,792	,86229	,686	4192,322	1	1267	,000	2,003
a. Predictors: (Constant), w b. Predictors: (Constant), w, dwdt c. Dependent Variable: d2wdt2										

The collinearity diagnostics table providing information about multicollinearity, which refers to a situation in regression analysis where predictor variables are highly correlated (Table 7). Belsley, Kuh, & Welsch [23] suggest that a condition index greater than 15 indicates a possible collinearity problem and a condition index greater than 30 indicates a serious problem. Even though the condition index for all dimensions is below 15, the variance proportions in Model 2 suggest that *dwdt* might be contributing to multicollinearity. Model 2 is more complex but may have multicollinearity issues, especially in Dimension 3.

Table 7 – The collinearity diagnostics table

Model	Dimension	Eigenvalue	Condition Index	Variance Proportions		
				(Constant)	W	Dwdt
1	1	1,007	1,000	,50	,50	
	2	,993	1,007	,50	,50	
2	1	1,633	1,000	,00	,18	,18
	2	1,000	1,278	1,00	,00	,00
	3	,367	2,108	,00	,82	,82

a. Dependent Variable: *d2wdt2*

The table 8 presents the coefficients for each predictor in the regression models. In the context of a regression equation, these coefficients are the weights that are multiplied by the predictors to estimate the dependent variable. The collinearity statistics (Tolerance and VIF) indicate whether the predictors are highly correlated with each other. Tolerance close to 0 and VIF (Variance Inflation Factor) much greater than 10 can indicate a problem with multicollinearity [24]. No multicollinearity issues are indicated by the Tolerance and VIF statistics in this respect (Table 9, p. 17).

Table 8 – The table presenting the coefficients for each predictor in the regression models

Model B		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	T	Sig. Zero-order	Correlations			Collinearity Statistics	
		Std. Error	Beta				Partial	Part	Tolerance	VIF	
1	(Constant)	-,004	,050		-,083	,934					
	W	,700	,057	,327	12,304	,000	,327	,327	,327	1,000	1,000
2	(Constant)	,007	,024		,271	,786					
	W	-,751	,035	-,350	-21,194	,000	,327	-,512	-,271	,600	1,667
	Dwdt	-1,814	,028	-1,070	-64,748	,000	-,848	-,876	-,828	,600	1,667

a. Dependent Variable: *d2wdt2*

We can write the significant model explaining % 79 of the variance of first derivative of sentiments in word level in a differential equation like follows:

Equation 1:

$$\frac{d^2w}{dx^2} = 0.007 - 0.751w - 1.814 \frac{dw}{dx} \quad (\text{explaining \%79 of the variance})$$

3.5 The Differential Equations Modelling for the Sentences as the Main Unit Of The Research

Just as Word level analysis, we made curve fitting for sentiments in sentence level. Out of the available models, the Cubic model has the highest R Square value (0.330), indicating it explains the most variance in the dependent variable *snormder* compared to the other models. However, the improvement over the Linear and Quadratic models is relatively small, and depending on the specific context, a simpler model might be preferred for ease of interpretation and application. According to Table 9, Model 2 showed stronger predictive power with an R^2 value of 0.754, confirmed as statistically significant by a low p-value. The Durbin-Watson statistic of 2.003 supports the model's validity.

Table 9 – Model summary presenting the results of regression analyses for two models attempting to predict the variable ds2dt2

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics					Durbin-Watson
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change	
1	,825 ^a	,681	,680	1,07739	,681	1440,924	1	676	,000	
2	,868 ^b	,754	,753	,94611	,073	201,619	1	675	,000	2,003

a. Predictors: (Constant), dsdt b. Predictors: (Constant), dsdt, s c. Dependent Variable: ds2dt2

Since the condition index for all dimensions is below 15, the data suggests that Model 2 is more complex and better conditioned to explain the dependent variable, but it might also be more susceptible to multicollinearity, especially in Dimension 3 (Table 10).

Table 10 – Collinearity Diagnostics

Model	Dimension	Eigenvalue	Condition Index	Variance Proportions		
				(Constant)	Dsdt	S
1	1	1,002	1,000	,50	,50	
	2	,998	1,002	,50	,50	
2	1	1,572	1,000	,00	,21	,21
	2	1,000	1,254	1,00	,00	,00
	3	,428	1,915	,00	,79	,79

a. Dependent Variable: ds2dt2

Based on Model 2 in the table below, the equation for the dependent variable snormder in terms of the predictor variables snormsent and snormsecondder given as follows (Table 11):

Equation 2:

$$\frac{d^2s}{dx^2} = 0.004 - 0.622s - 1.673 \frac{ds}{dx} \quad (\text{explaining } \%75 \text{ of the variance})$$

Table 11– Coefficients

Model B		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	T	Sig. Zero-order	Correlations			Collinearity Statistics	
		Std. Error	Beta					Partial	Part	Tolerance	VIF
1	(Constant)	,004	,041		,091	,927					
	Dsdt	-1,361	,036	-,825	-37,960	,000	-,825	-,825	-,825	1,000	1,000
2	(Constant)	,004	,036		,121	,904					
	Dsdt	-1,673	,038	-1,014	-43,586	,000	-,825	-,859	-,832	,673	1,485
	S	-,622	,044	-,330	-14,199	,000	,249	-,480	-,271	,673	1,485
a. Dependent Variable: ds2dt2											

3.6. The Differential Equations Modelling for the Paragraphs as the main unit of the research

Table given below shows that Model 2 slightly improves upon Model 1, explaining 75.1% of the variance compared to 70.3% in Model 1 (Table 12).

Table 12 – Model summary including the second derivative of the sentiments in paragraph level as an additional predictor to Model 2

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics					Durbin-Watson
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change	
1	,838a	,703	,697	,46556	,703	122,974	1	52	,000	
2	,867b	,751	,742	,42998	,049	9,963	1	51	,003	2,010

a. Predictors: (Constant), dpdt b. Predictors: (Constant), dpdt, p c. Dependent Variable: dp2dt2

Since the condition index for all dimensions is below 15, the data suggests that Model 2 is more complex and better conditioned to explain the dependent variable, but it might also be more susceptible to multicollinearity, especially in Dimension 3 (Table 13).

Table 13 – Collinearity Diagnosticsa

Model	Dimension	Eigenvalue	Condition Index	Variance Proportions		
				(Constant)	Dpdt	p
1	1	1,062	1,000	,47	,47	
	2	,938	1,064	,53	,53	
2	1	1,522	1,000	,01	,24	,24
	2	,988	1,241	,99	,01	,01
	3	,490	1,762	,00	,76	,75

a. Dependent Variable: dp2dt2

Based on Model 2 in the table, the equation for the dependent variable: Equation 3 (Table 14):

$$\frac{d^2p}{dx^2} = 0.035 - 1.622V \frac{dp}{dx} - 0.405p \quad (\text{explaining } \%74 \text{ of the variance})$$

Table 14 – Coefficients of the two hierarchical regression models with the dependent variable

Model B		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	T	Sig. Zero- order	Correlations			Collinearity Statistics	
		Std. Error	Beta				Partial	Part	Tolerance	VIF	
1	(Constant)	,039	,063		,618	,539					
	Dpdt	-1,404	,127	-,838	-11,089	,000	-,838	-,838	-,838	1,000	1,000
2	(Constant)	,035	,059		,605	,548					
	Dpdt	-1,622	,136	-,968	-11,944	,000	-,838	-,858	-,834	,741	1,349
	P	-,405	,128	-,256	-3,156	,003	,237	-,404	-,220	,741	1,349

a. Dependent Variable: dp2dt2

3.7 The Analysis of the Differential Equations

We get three differential equations where each one describes how a specific dependent variable (w, s, p standing for word, sentence and paragraph) changes with respect to an independent variable (x). The coefficients (0.007, 0.751, 1.814 for the first equation, etc.) indicate the magnitude of the respective terms' contribution to the change of the dependent variable.

$\frac{d^2w}{dx^2} = 0.007 - 0.751w - 1.814\frac{dw}{dx}$ (explaining %79 of the variance) with the general solutions for the differential equations by wolfram alpha:

$$w(x) = 0.00932091 + C[1] \cdot e^{-1.17467x} + C[2] \cdot e^{-0.639327x}$$

$\frac{d^2s}{dx^2} = 0.004 - 0.622s - 1.673\frac{ds}{dx}$ (explaining %75 of the variance) with the general solutions for the differential equations by wolfram alpha:

$$s(x) = 0.00643087 + C[1] \cdot e^{-1.11531x} + C[2] \cdot e^{-0.557695x}$$

$\frac{d^2p}{dx^2} = 0.035 - 0.405p - 1.622\frac{dp}{dx}$ (explaining %74 of the variance) with the general solutions for the differential equations by wolfram alpha:

$$p(x) = 0.0864198 + C[1] \cdot e^{-1.31371x} + C[2] \cdot e^{-0.308286x}$$

In summary, the general solutions suggest that over time, all three sentiment measures w, s, and p will stabilize to slightly positive values, with the speed of stabilization depending on the specific decay rates. For $w(x)$, $s(x)$, and $p(x)$, the constant terms are 0.00932091, 0.00643087, and 0.0864198,

respectively. These represent the base sentiment level for each. Among them, $p(x)$ has the highest base sentiment level. The finding that $p(x)$ has the highest base sentiment level implies that, in the long run (as x approaches infinity), the sentiment score for paragraphs will stabilize at a higher level compared to words and sentences.

4. Discussion

The 1864 novella “Notes from Underground” by Fyodor Dostoevsky introduces the Underground Man, a cynical recluse living in St. Petersburg. In the philosophical first half, he contends that human nature is irrational, making ideal societies impossible. Overall, the sentiments in the “Underground” section are dark, complex, and fraught with tension. They reflect a deep sense of disillusionment with both society and the self, as well as a profound existential despair. The second half follows a more conventional format. The opening “Underground” section establishes a gloomy, contemplative mood through the protagonist’s cynical monologues on society, reason, and the meaning of life. He grapples with complex ideas that lead to dark, nihilistic conclusions about human nature and the pursuit of happiness. The tone reflects his mental agony and sense of estrangement. Both the beginning and the end of the “Underground” section are negative, but the nature of this negativity shifts. The beginning is more confrontational and critical, actively challenging societal norms and intellectual trends. The end, in contrast, is more resigned and reflective, focusing on the inescapable suffering and irrationality of the human condition.

When the comparisons of the sentiment values at word, sentence and paragraph level based on descriptive results for the first part of the book following results can be given as follows:

- ♦ Mean Sentiment: The mean sentiment value becomes less negative as we move from word to paragraph level. This could imply that while individual words may be negative, the sentences and paragraphs they form could be less negative in sentiment, possibly due to the context in which they are used.

- ♦ Variability: The standard deviation decreases from word level to paragraph level, suggesting that the sentiment is more stable at the paragraph level. Stability in sentiment analysis in this article refers to the consistency or steadiness of sentiment scores over a particular level of text.

- ♦ Trends: All three levels show an initial decline in sentiment but have an upward curve later on. This may indicate that the text starts with a negative tone but gradually becomes less negative.

- ♦ Skewness & Kurtosis: Word and sentence levels are negatively skewed, while the paragraph level is even more so. This again confirms a generally negative sentiment.

- ♦ Interquartile Range: This range is highest at the word level, indicating more variability in the middle 50% of the data compared to sentence and paragraph levels.

The text likely starts off with a negative or pessimistic tone but shows signs of becoming less negative or more neutral as it progresses. This could indicate a narrative structure that starts with a problem or issue and gradually moves towards solutions or resolutions.

In the context of differential equations, $p(x)$ has the highest base sentiment level. The finding that $p(x)$ has the highest base sentiment level implies that, in the long run (as x approaches infinity), the sentiment score for paragraphs will stabilize at a higher level compared to words and sentences. Paragraphs are generally more context-rich than individual words or sentences. They can provide a more nuanced and complete representation of sentiment. The higher base sentiment level might reflect this richness and complexity.

In the context of decay components we found the following results:

Fast-Decay Component: The ranking in terms of losing fast-changing sentiment quickest is $p(x) > w(x) > s(x)$.

Slow-Decay Component: The ranking in terms of retaining slow-changing sentiment the longest is $p(x) < s(x) < w(x)$.

If we assume that the decay rates are indicative of the sentiments’ sensitivity to change and staying power. Sensitivity in sentiment analysis in this text refer to the degree to which the sentiment scores are affected by minor changes in the text.

$p(x)$ is the most sensitive to immediate changes, which means that it will change quickly in response to new information. However, it is also the most likely to retain a base level of sentiment over the long term. This is because $p(x)$ captures the overall sentiment of the text, which is not likely to change drastically unless there is a major event.

$w(x)$ is moderately sensitive to both immediate and long-term changes. This means that it will be affected by new information, but it will also be influenced by the text's overall sentiment.

$s(x)$ is the least sensitive to immediate changes, but it is moderately sensitive to long-term changes. This means that it will not be swayed by new information, but it will be affected by the text's overall sentiment over time.

It should be kept in mind that slower decay rates don't necessarily mean greater stability. Magnitude of sentiment shifts also contributes to stability. Starting sentiment score provides context for subsequent shifts. Interactions between linguistic units affect overall stability. Operational definition of stability depends on application. Quantitative decay rates don't fully capture perceived stability.

In this respect, based on the descriptive analysis and the results of differential equations, there are a couple reasons why paragraph-level sentiment analysis tends to be more stable and sensitive than word- or sentence-level analysis:

1) Paragraphs capture more context. Paragraphs contain multiple sentences and thus provide more context to interpret the sentiment of any given word or sentence. Paragraphs can be both stable and sensitive, depending on the nature of the changes they experience. They are stable against minor fluctuations but sensitive to major shifts that affect the broader context they encapsulate. A paragraph may be less sensitive to small, local changes that affect only one or a few words or sentences within it. This is because the broader context can absorb these fluctuations. A paragraph may be more sensitive to large, global changes that affect its overall sentiment. In such cases, the additional context provided by the paragraph actually amplifies the impact of the change.

2) Less sensitivity to order effects. The sentiment of a paragraph is less susceptible to the order in which words or sentences appear. The overall sentiment of a well-written paragraph remains largely the same regardless of structural variations. Word- or sentence-level analysis, on the other hand, is more prone to being influenced by the specific ordering of the text's components, reducing stability.

3) Aggregation Effects. When analyzing at the paragraph level, the sentiments of various sentences are aggregated. This aggregation could amplify sensitivity to changes if the new information significantly shifts the aggregated sentiment.

4) Complexity of Analysis. Sentiment analysis at the paragraph level may involve more complex linguistic features such as subjectivity, tone, and rhetorical devices, which could make it more sensitive to changes.

5) Order of Components. A single, strong sentence could potentially sway the sentiment of an entire paragraph.

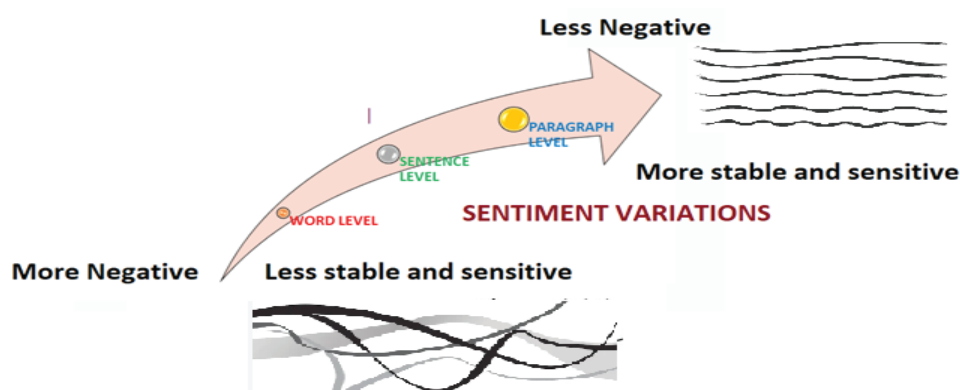


Figure 5 – The comparison shows that the sentiment variations are more rapid and decay faster at the word level, while they are slower and more stable at the paragraph level

5. Conclusion

This research aims to understand the dynamics of sentiment evolution in textual units ranging from individual words to expansive paragraphs. One of the most striking revelations is that sentiment becomes increasingly less negative as we traverse from the granularity of words to the complexity of paragraphs. This not only emphasizes the moderating role of context in toning down negativity but also spotlights the multi-layered intricacies of human language and sentiment.

The study also found that paragraph-level sentiment is more stable than word or sentence sentiment. This means that the sentiment of a paragraph is less likely to change over time than the sentiment of a word or sentence. This is because paragraphs are typically longer and contain more information, which makes them more resistant to change.

Our study also uncovers a general narrative arc in sentiment, characterized by an initial decline followed by an upward turn. This pattern is reflective of a common narrative structure, moving from a problem or conflict to a potential resolution. This observation can be particularly useful for literary analysis, scriptwriting, or even in the evaluation of user-generated content.

Finally, the study found that paragraphs lose short-term sentiment more quickly than words or sentences but are adept at retaining long-term sentiment. This nuanced behavior of paragraphs makes them uniquely suited for applications where both immediate and enduring sentiments are of interest. It suggests that paragraphs are more responsive to new or emerging information while also serving as a stable repository for the overall sentiment landscape over extended periods.

Intriguingly, our findings echo the famous quote: “Watch your thoughts, they become your words; watch your words, they become your actions; watch your actions, they become your habits; watch your habits, they become your character; watch your character, it becomes your destiny.” Just as the proverb underscores the progression from thoughts to destiny, our study reveals a similar progression in sentiment from isolated words to contextualized paragraphs. A single word may express intense negativity. However, as these words come together into phrases, sentences, and paragraphs, the contextual relationships between them moderate the overall sentiment. The negativity of individual words becomes diluted within the broader meaning. Just as the proverb shows our habits and character evolving from small thoughts and words, our analysis reveals how the sentiment of language grows more nuanced as words gain context. The volatility of isolated words gives way to balanced, subtle shades of meaning in paragraph form. This parallels how fleeting thoughts solidify into steady character over time.

The insights from this research have broad implications, not just for the academic community but also for industries like marketing, journalism, and mental health services, where understanding sentiment can be pivotal. Future work could focus on expanding the dataset, incorporating multilingual texts, or even exploring how these findings translate to spoken language.

Acknowledgment

This research is conducted within the Committee of Science of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan under the grant number AP09260670 “Development of methods and algorithms for augmentation of input data for modifying vector embeddings of words”.

REFERENCES

- 1 Misuraca M., Forciniti A., Scepi G., Spano M. (2020) Sentiment Analysis for Education with R: packages, methods and practical applications. arXiv:2005.12840.
- 2 Dietz-Uhler B. & Hurn E.J. (2013) Using learning analytics to predict (and improve) student success: A faculty perspective. *Journal of Interactive Online Learning*, 12, pp. 17–26.

- 3 Liu B. (2012) Sentiment Analysis and Opinion Mining. <https://www.cs.uic.edu/~liub/FBS/SentimentAnalysis-and-OpinionMining.pdf>.
- 4 Wankhade M., Rao A.C.S. & Kulkarni C. (2022) A survey on sentiment analysis methods, applications, and challenges. *Artif Intell Rev* 55, pp. 5731–5780. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10144-1>.
- 5 Xing FZ, Cambria E., Welsch RE (2018) Natural language based financial forecasting: a survey. *Artif Intell Rev* 50(1), pp. 49–73.
- 6 Collomb A., Costea C., Joyeux D., Hasan O., Brunie L. (2014) A Study and Comparison of Sentiment Analysis Methods for Reputation Evaluation. *Rapport de Recherche RR-LIRIS-2014-002*.
- 7 Hemmatian F., Sohrabi MK (2019). A survey on classification techniques for opinion mining and sentiment analysis. *Artif Intell Rev* 52(3), pp. 1495–1545. <https://doi.org/10.1007/s10462-017-9599-6>.
- 8 Pontiki M. et al. (2016) SemEval-2016 task 5: aspect based sentiment analysis. In: *Proceedings of the 10th international workshop on semantic evaluation (SemEval-2016)*, Association for Computational Linguistics, San Diego, CA, pp. 19–30.
- 9 Yadav A., Vishwakarma DK (2020) Sentiment analysis using deep learning architectures: a review. *Artif Intell Rev* 53(6), pp. 4335–4385.
- 10 Do H.H., Prasad P., Maag A., Alsadoon A. (2019) Deep learning for aspect-based sentiment analysis: a comparative review. *Expert Syst Appl* 118, pp. 272–299.
- 11 Zhang L., Wang S., Liu B. (2018) Deep learning for sentiment analysis: a survey. *Wiley Interdiscip Rev* 8(4), pp. e1253.
- 12 Maglogiannis I. et al. (2020) A deep learning approach to aspect-based sentiment prediction. In: *Artificial intelligence applications and innovations 16th IFIP WG 125 international conference, AIAI 2020, Neos Marmaras, Greece, June 5–7, 2020. Proceedings, Part I* 583, pp. 397–408.
- 13 Meškelė D., Frasincar F. (2020) Aldonar: a hybrid solution for sentence-level aspect-based sentiment analysis using a lexicalized domain ontology and a regularized neural attention model. *Inf Process Manag* 57(3), pp. 102211. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2020.102211>.
- 14 Schouten K. & Frasincar F. (2018) Ontology-driven sentiment analysis of product and service aspects. In *15th Extended Semantic Web Conference (ESWC 2018)*, LNCS, Springer International Publishing, vol. 10360, pp. 608–623.
- 15 Birjali M., Kasri M., Beni-Hssane A. (2021) A comprehensive survey on sentiment analysis: approaches, challenges and trends. *Knowl-Based Syst* 226, pp. 107134.
- 16 Leippold, M. (2023) Sentiment spin: Attacking financial sentiment with GPT-3. *Finance Research Letters*. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2023.103957>.
- 17 Fan, David P., Cook, R. Dennis (2003) A differential equation model for predicting public opinions and behaviors from persuasive information: Application to the index of consumer sentiment. *The Journal of Mathematical Sociology*, 27(1), pp. 29–51. doi:10.1080/00222500305886.
- 18 Casillo M. et al. (2020) Chat-bot: a cultural heritage aware teller-bot for supporting touristic experiences. *Pattern Recogn Lett* 131, pp. 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2020.01.003>.
- 19 Chang M. et al. (2020) Building ontology-driven tutoring models for intelligent tutoring systems using data mining. *IEEE Access* 8, pp. 48151–48162. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2979281>.
- 20 Colace F. de Santo M., Greco L. (2014) Safe: a sentiment analysis framework for e-learning. *Int J Emerg Technol Learn* 9(6), pp. 37–41. <https://doi.org/10.3991/ijet.v9i6.4110>.
- 21 D’Aniello G., Gaeta M. & La Rocca I. (2022) KnowMIS-ABSA: an overview and a reference model for applications of sentiment analysis and aspect-based sentiment analysis. *Artif Intell Rev* 55, pp. 5543–5574. <https://doi.org/10.1007/s10462-021-10134-9>.
- 22 Chen Z., Liu Y. & Sun H. (2021) Physics-informed learning of governing equations from scarce data. *Nat Commun* 12. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26434-1>.
- 23 Belsley D.A., Kuh E. & Welsch R.E. (1980) *Regression Diagnostics: Identifying Influential Data and Sources of Collinearity*. New York: Wiley.
- 24 Alpar R. (2022) *Uygulamalı İstatistik ve Geçerlik Güvenirlik*. Ankara: Detay Yayıncılık.
- 25 Schmidt M.D. & Lipson H. (2009) Distilling free-form natural laws from experimental data. *Science* 324, pp. 81–5.
- 26 Xue L. & Zou H. (2006) Parameter Estimation for Differential Equation Models Using a Framework of Measurement Error in Regression Models. *Journal of the American Statistical Association*, 101(475), pp. 1570–1583. <https://doi.org/10.1198/016214506000000691>.

^{1*}ДЮРАН В., ¹ХАЗАР Е., ²АХМЕТОВ И., ²ПАК А.

¹Ығдыр университеті, 76000, Ығдыр қ., Түркия

²Ақпараттық және есептеу технологиялары институты (АЕТИ),

Қазақстан, 050000, Алматы қ., Құрманғазы көш., 29

*E-mail: volkan.duran8@gmail.com

**СӨЗДЕРДЕН ПАРАГРАФТАРҒА: СИПАТТАМАЛЫҚ ӘДІСТЕР
МЕН ДИФФЕРЕНЦИАЛДЫҚ ТЕҢДЕУЛЕР АРҚЫЛЫ
GPT-4 КӨМЕГІМЕН «ЖЕР АСТЫНДАҒЫ ЖАЗБАЛАРДА»
КӨҢІЛ-КҮЙ ДИНАМИКАСЫН МОДЕЛЬДЕУ**

Андатпа

Бұл зерттеу Федор Достоевскийдің «Жер астындағы жазбалар» кітабының «Жер асты» деп аталатын бірінші бөліміндегі көңіл-күй мағынасының сөздерден сөйлемдерге, абзацтарға қалай өзгеретінін зерттейді. GPT-4 тіл үлгісін пайдалана отырып, біз стандартталған сезім мәндерінің сипаттамалық талдауын жүргіздік және мәтін бойынша жинақталған көңіл-күй траекторияларын есептедік. Содан кейін регрессиялық талдауды пайдалана отырып, көңіл-күй реңктерін модельдеу үшін дифференциалдық теңдеу үлгілерін жасадық. Біздің қорытындыларымыз сөздерден абзацтарға дейін көңіл-күйдің теріс болмайтынын, бұл контекст негативтілікті төмендететінін көрсетеді. Аз өзгергіштікпен параграфтың көңіл-күйі де тұрақталды. Бастапқы құлдыраудың баяндау доғасы болса, содан кейін көңіл-күй көтерілді. Параграфтар неғұрлым нюансты контекстті түсіре алатынын білдіретін ең жоғары негізгі ойға ие болды. Абзацтар қысқа мерзімді көңіл-күйді тез жоғалтты, бірақ уақыт өте келе жалпы мәтіндік сезімді сақтай отырып, абзацтармен сәйкестендірілген ұзақ мерзімді көңіл-күйді ұзаққа сақтады. Бұл тұжырымдар сезімнің тұрақтылығын қамтамасыз ететін тілдік бірліктер арасында күрделі динамика бар екенін көрсетті. Сандық ыдырау жылдамдығы – пайдалы көрсеткіштер, бірақ ол көңіл-күй тұрақтылығын толық сипаттамайды.

Тірек сөздер: көңіл-күйді талдау, дифференциалдық теңдеулер, GPT-4, қисық аппроксимация, иерархиялық регрессиялық талдау.

^{1*}ДЮРАН В., ¹ХАЗАР Э., ²АХМЕТОВ И., ²ПАК А.

¹Университет Ығдыр, 76000, Ығдыр, Түркия

²Институт информационных и вычислительных технологий (ИИВТ),

050000, Almaty, Kazakhstan

*E-mail: volkan.duran8@gmail.com

**ОТ СЛОВ К ПАРАГРАФАМ: МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ
НАСТРОЕНИЙ В «ЗАПИСКАХ ИЗ ПОДПОЛЬЯ» С ПОМОЩЬЮ
GPT-4 ЧЕРЕЗ ОПИСАТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ
И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ**

Аннотация

В данном исследовании рассматривается, как изменяются значения настроения в первой части книги «Записки из подполья» Федора Достоевского, озаглавленной как «Подполье», от слов к предложениям и абзацам. Используя языковую модель GPT-4, мы провели описательный анализ стандартизированных значений настроения и рассчитали кумулятивные траектории настроения по тексту. Затем мы создали модели дифференциальных уравнений для моделирования оттенков настроения с помощью регрессионного анализа. Полученные нами результаты свидетельствуют о том, что от слов к абзацам настроение становится менее негативным, что указывает на то, что контекст регулирует негативность. Настроение абзацев также было более стабильным и отличалось меньшей вариативностью. Наблюдалась дуга повествования с первоначальным снижением, за которым следовал подъем настроения. Абзацы имели самые высокие исходные настроения, что говорит о том, что они способны отражать более тонкий контекст. Абзацы быстро теряли краткосрочное настроение, но дольше всего сохраняли долгосрочное настроение, что согласуется с тем, что абзацы сохраняют общее настроение текста с течением времени. Полученные результаты позволяют предположить, что существует сложная динамика между языковыми единицами, способствующая ощутимой стабильности настроения. Количественные показатели распада являются полезными индикаторами, но не в полной мере характеризуют стабильность настроения.

Ключевые слова: анализ настроений, дифференциальные уравнения, GPT-4, аппроксимация кривой, иерархический регрессионный анализ.

Information on the authors

Duran V.

Psychology Department, Iğdır University, 76000, Iğdır, Türkiye

ORCID ID: 0000-0003-0692-0265

E-mail: volkan.duran8@gmail.com

Hazar E.

Mathematics Department, Iğdır University, 76000, Iğdır, Türkiye

ORCID ID: 0000-0001-9886-244X

E-mail: elman.hazar@igdir.edu.tr

Akhmetov I. (corresponding author)

Institute of Information and Computational Technologies (IICT), 29 Kurmangazy St.,

Almaty, 050000, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-3221-9352

E-mail: i.akhmetov@kbtu.kz

Pak A.

Institute of Information and Computational Technologies (IICT), 29 Kurmangazy St.,

Almaty, 050000, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-8685-9355

E-mail: a.pak@kbtu.kz

Авторлар туралы мәліметтер

Дюран В.,

психология факультеті, Ығдыр университеті, 76000, Ығдыр қ., Түркия

ORCID ID: 0000-0003-0692-0265

E-mail: volkan.duran8@gmail.com

Хазар Э.

Математика факультеті, Ығдыр университеті, 76000, Ығдыр қ., Түркия

ORCID ID: 0000-0001-9886-244X

E-mail: elman.hazar@igdir.edu.tr

Ахметов И.

Ақпараттық және есептеу технологиялары институты (АЕТИ), Қазақстан,

050000, Алматы қ., Құрманғазы көш., 29

ORCID ID: 0000-0002-3221-9352

E-mail: i.akhmetov@kbtu.kz

Пак А.

Ақпараттық және есептеу технологиялары институты (АЕТИ), Қазақстан,

050000, Алматы қ., Құрманғазы көш., 29

ORCID ID: 0000-0002-8685-9355

E-mail: a.pak@kbtu.kz

Информация об авторах

Дюран В.,

факультет психологии, Университет Ыгдыр, 76000, г. Ыгдыр, Турция

ORCID ID: 0000-0003-0692-0265

E-mail: volkan.duran8@gmail.com

Хазар Э.

Математический факультет, Университет Ыгдыр, 76000, г. Ыгдыр, Турция

ORCID ID: 0000-0001-9886-244X

E-mail: elman.hazar@igdir.edu.tr

Ахметов И.

Институт информационных и вычислительных технологий (ИИВТ),
Казахстан, 050000, г. Алматы, ул. Курмангазы, 29
ORCID ID: 0000-0002-3221-9352
E-mail: i.akhmetov@kbtu.kz

Пак А.

Институт информационных и вычислительных технологий (ИИВТ),
Казахстан, 050000, г. Алматы, ул. Курмангазы, 29
ORCID ID: 0000-0002-8685-9355
E-mail: a.pak@kbtu.kz

УДК 004.896
МРПТИ 28.23.27

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2023-20-4-27-39>

¹MUHAMMAD ILYAS, ¹ABDULLAH AAMIR HAYAT,
¹PRABAKARAN VEERAJAGADHESWAR, ¹MOHAN RAJESH ELARA
¹ROAR Lab, Engineering Product Development Pillar,
Singapore University of Technology and Design (SUTD), Singapore 487372
*E-mail: milyasmeo2005@gmail.com

3D ABSOLUTE POSE ESTIMATION OF A STAIRCASE CLEANING ROBOT UTILIZING STAIRCASE GEOMETRY AND MINIMAL LOW-COST SENSORS

Abstract

Thanks to its shape-shifting abilities, the sTetris robot can climb stairs while performing the cleaning task. The sTetris robot's overall system operation depends on localization and positioning data, which are essential for its goal of autonomously navigating multi-floor environments. The mobile robots designed to work indoors generally rely on external systems for localization information. Regretfully, this frequently requires additional hardware fixing or changes to the indoor working environment in order to achieve accurate three-dimensional (3D) position and orientation (pose) for successful operation of the mobile platform. Nonetheless, the robot can be localized on the staircase by utilizing the information of the staircase's geometry measurements, which are known ahead of time. This article demonstrates how the known geometry of staircases and measurements from minimal number of sensors can be used to accomplish 3D pose of the robot. Experiments carried out on a real robot in an authentic indoors setting successfully demonstrate the effectiveness of the suggested approach.

Key words: Indoor environment; three-dimensional localization; staircase geometry; reconfigurable robot; low-cost sensors.

Introduction

While many systems and subsystems are necessary for any mobile robotic system to function properly, three essential modules—the path planner, and the localization and positioning and the control system modules—are required to enable the autonomous functionality of the mobile robots [1, 2]. Of them, the localization module is responsible for giving the mobile platform's precise position and orientation information [3]. The accuracy of the localization system has a big impact on how well the other important modules of a robotic system work.

Absolute positioning systems and incremental/relative positioning systems are the two main categories of localization/positioning systems [4, 5]. When a system is used for absolute positioning, such as GPS, the position data is accessible in relation to a global reference coordinate frame and often is not dependent on space or time. On the other hand, the position update in an incremental or relative positioning system comes from the steps that came before it. The disadvantage of the latter is that pose drifts with time, such as inertial measurement unit and wheel encoder-based position calculation, and sensor error is also aggregated, resulting in mistakes in the pose estimation [8, 9].

Literature Review

When it comes to outdoor mobile robots, GPS is the primary source of localization data, either by itself or in conjunction with other sensors or systems like an IMU, camera, Lidar, vision sensors, etc. [10, 11]. Since GPS is not always available for interior mobile robotic platforms, alternative methods of absolute pose estimation are applied, such as estimating the absolute position of mobile devices using WiFi signals, UWB, vision, RFID signals, or indoor Global Positioning System, for instance [12]. To determine a mobile platform's exact location inside a building, various beacon-

based absolute positioning methods are used [3, 6, 13–18]. Nevertheless, this necessitates a few more hardware adjustments in the workspace, which raises the system's overall cost and/or complexity.

In this study, we introduce a novel yet straightforward technique for estimating the three-dimensional absolute pose (position and orientation) information of an indoor mobile robot—dubbed sTetris—developed at SUTD's RoAR Laboratory using a limited number of low-cost sensors [19]. The location of the sensors and the robot's typical working environment are depicted in Figure 1. Using low-cost onboard sensor measurements, the previously known staircase geometry is utilized to estimate localization information because the sTetris robot operates in a staircase with fixed and known tread and riser dimensions for each step.

Figure 2 (p. 29) provides a list of some terminology pertaining to staircase geometry. The robot has two time-of-flight (TF) sensors mounted on its left and right sides. The y-axis position on the tread is determined using the distance measurements collected from these two TF sensors. The x- and z-axis positions are determined by the known staircase geometry as the robot ascends the stair steps because the tread and riser dimensions are known a priori. Furthermore, the robot has two TF sensors positioned in front of it, oriented toward the front riser. The heading angle of the sTetris robot is determined by utilizing the range/distance measurements from frontal sensors as robot moves left and right on a step of stair.

The remaining contents of this article are arranged as follows: An overview of the sTetris robot is given in the second section. The sTetris 3D localization computation method is shown in the third section, and the orientation estimation scheme is introduced in the fourth. The experimental setup and findings are covered in the fifth section. The final section wraps up this work and suggests some future lines of inquiry for additional study and advancement.

Materials and Methods

sTetris: Introduction to Staircase Cleaning Robot

The sTetris is a re-configurable robot that climbs stairs using a vertical conveyor belt mechanism, as shown in Figure 1. This robot is designed to clean staircases and inspired from the famous Tetris game [20] and the transformation design ideas described in [21] are the sources of sTetris operating principle. The three cuboids that make up the sTetris robot's body are joined by two sliders that are fastened to either side of the cuboid in the center. The sweeping mechanism, vacuum/suction tools, and electronic units are enclosed in the hollow spaces inside each parallelepiped block. Because of the modular design of the blocks, many system components can be reused. The robot's movement can be customized by the user with the help of a graphical user interface (GUI). With the help of the reconfiguration mechanism, the sTetris robot can move quickly across the multi-floor environment which is impossible with existing commercial home cleaning robots.

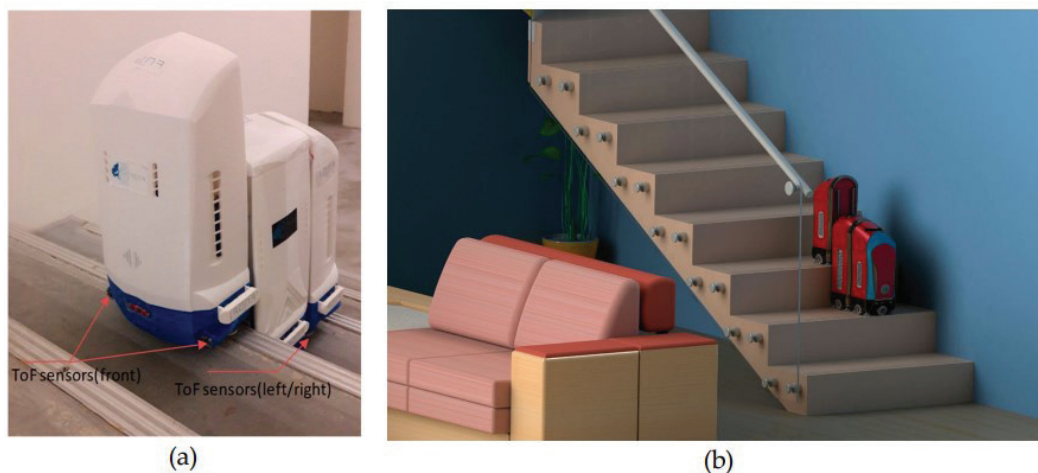


Figure 1 – sTetris Robot: a) equipped with sensors specifically designed for this task; b) robot's operating environment.

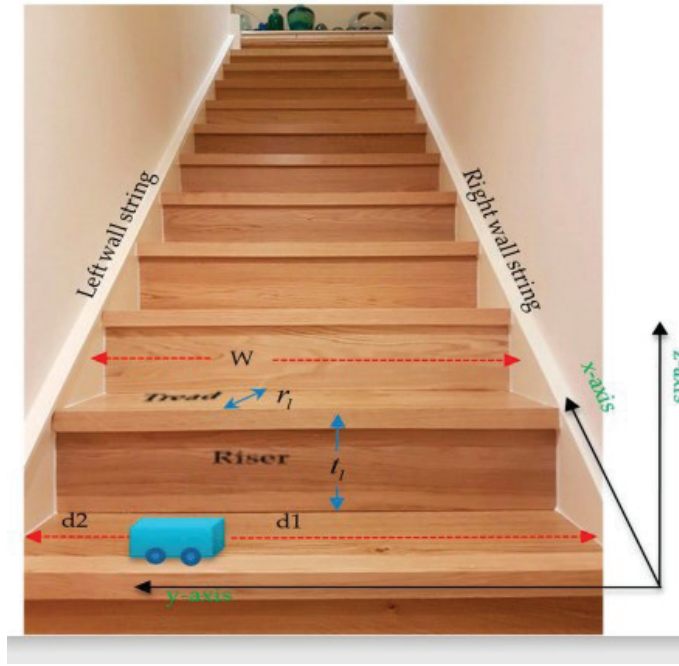


Figure 2 – Geometry of staircase to determine the robot's 3D position and orientation.

Absolute 3D Position of sTetris

In this study, TF sensors are used to measure the y-axis (lateral) position in order to obtain 3D absolute position information. The staircase's known geometry is used to calculate the position along the other two axes, i.e. x-axis and z-axis. For example, the riser height and the stair step's tread width are fixed and known of a staircase and can be measurable manually or from 3D drawing. If the step number on a staircase is known, it is possible to calculate the distance traveled along the x- and z-axes as the robot climbs the staircase. Equation (1) is used to calculate the sTetris 3D absolute position,

$$\begin{aligned} x_i &= t_l \times \text{step}_i - \left(\frac{t_l}{2}\right) \\ z_i &= r_l \times \text{step}_i ; i = 1, 2, \dots, N. \\ y_i &= \begin{cases} d_j & ; \text{if sensor output} < 120 \text{ cm} \\ W - d_j & ; \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

where W is the staircase's width, i is the step number counter, t_l and r_l are the staircase's tread and riser lengths, x_i and z_i are their respective positions in the x- and z-axes, and d_j is the y-axis's TF sensor measurement.

The robot's position along the y-axis is calculated using the data from distance sensors positioned at its two sides. Two Time-of-Flight sensors are positioned on the left and right sides of sTetris because their limited range (120 cm) makes it impossible for the sensors to reliably measure distance when the robot is on the extreme left or right side of the stair. In this instance, the position on the stair along the y-axis is determined using the output from the sensor on the opposite side of the robot. Algorithm I below provides the full pseudo-code for estimating 3D pose i.e. position and orientation (heading) of the robot.

Algorithm I: Pseudo code for 3D localization and heading estimation of sTetro.

Initializ: $x_0 \leftarrow 0, y_0 \leftarrow Y_0, z_0 \leftarrow 0$

$i = 1$ //step number

Loop : while ($i \leq N$)

$x_k \leftarrow t_l \times (i) - 0.5t_l$

$z_k \leftarrow r_l \times (i)$

```

if (sensor output < limitMax) // limitMax = 120cm
     $y_k \leftarrow d_k$ 
else
     $y_k \leftarrow W - d_k$ 
 $\theta_k \leftarrow \tan^{-1} \left( \frac{d_2 - d_1}{D} \right)$ 
if ( $\theta_k > 0$ )
    rotateCW ()
if ( $\theta_k < 0$ )
    rotateCCW ()
i  $\leftarrow$  readStep ()
end loop

```

Main provision

Orientation Calculation and Misalignment Correction

Since the staircase in which sTetris operates has nearly flat treads, during normal robot operation, sTetris roll and pitch angles are almost zero. When going left or right on the treads, only the heading angle (rotation about the z-axis) can vary. The sTetris robot's front end is equipped with two TF sensors to monitor the heading angle. These two sensors' job is to use their respective range measurements to determine the robot's heading angle. Direct distance measurements are provided by time-of-flight sensors in relation to the step's front riser. Equation (2) can be used to calculate the heading angle.

$$\theta_k = \tan^{-1} \left(\frac{d_2 - d_1}{D} \right) \quad (2)$$

where D is the sTetris robot's width and d_1 and d_2 are distance readings from TF sensors positioned in front of the robot. The robot is aligned with the front riser and the heading angle is almost zero if the two distances are almost equal. A positive or negative heading angle indicates the robot's misalignment with the front riser if the two range measurements are not equal. Then, in order to maintain sTetris' alignment with the front riser for smooth motion, the control system tells actuators to rotate it either clockwise (CW) or counterclockwise (CCW). Figure 3 below depicts the heading angle estimation and correction scheme used in this work.

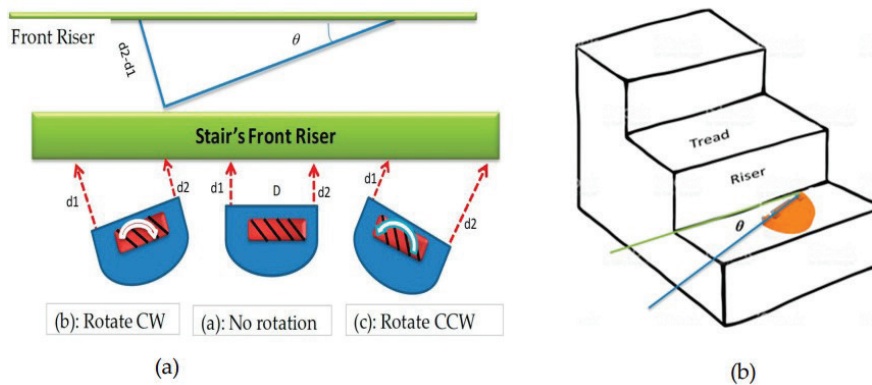


Figure 3 – a) Computation of heading angle based on Time-of-Flight sensor reading;
b) show how robot may go misaligned on a stair tread.

Table 1 – Staircase geometry and sTetris main parameters

Parameters	Value (cm)	Remarks
Riser height (rl)	14	
Tread length (tl)	32	
ToF's Reliable range (max)	120	
sTetro size (l, w, h)	$45 \times 20 \times 40$	
No. of steps (N)	16	
Staircase size	$480 \times 205 \times 165$	(L × W × H)

We have fully detailed the design and operation of the sTetris robot in our earlier work [19]. The staircase cleaning robot is outfitted with four extra TF sensors for the experiments carried out in this work. Up to two meters can be measured absolutely by the distance sensor (VL53L0X). Figure 4 depicts an experimental setup used for this work.

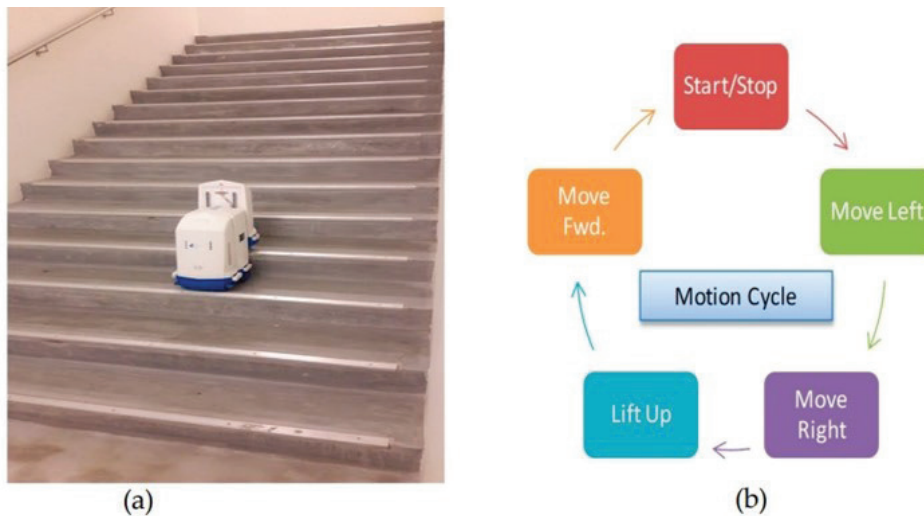


Figure 4 – Experimental setup: a) sTetris robot moving across the staircase;
b) A single motion cycle of sTetris.

The sTetris robot is propelled to move across the stairwell, as seen in Figure 4(a). The motion cycle for finishing a single stair step is depicted in Figure 4(b). The left and right wall strings limit the robot's range of motion. The first block of sTetris has two TF sensors in front of it, and the central block has two TF sensors on either side of it. The robot started to follow the tread of the step from right to left.

The robot moves toward the right on the tread after reaching the far left of the tread, where its left bumper makes contact with the left wall string. The robot's right bumper touches the right wall string when it reaches the farthest right side. It stops when it reaches the halfway point of the tread and raises the final and central blocks to ascend to the next level. Every time the robot moves up to the next step, the software increments a counter, counting the steps. The first step of the stairs is followed by a repetition of this motion cycle on the second step and so on. All four sensors measure the distances to the front riser of the staircase and the left and right wall strings during the left and right motion. These measurements are used to determine the robot's y-position and heading angle, respectively.

Results and Discussion

Static Test: Heading Angle:

The heading angle of the robot in the first test is determined using the range data (d_1, d_2) from the two front sensors. A static test is conducted initially to evaluate the suggested method's correctness. The robot rotates continuously from $+45^\circ$ to -45° about z-axis with its back away from the stair's

front riser. Using an angle protector, straight lines are indicated at 0° , $+45^\circ$, and -45° for the specified angles.

Beginning with the robot facing the riser (i.e., heading angle 0°), it is rotated leftwards i.e. CCW, increasing the left sensor's d_1 distance in relation to the right sensor's d_2 distance. From 0° to -45° , the heading angle begins to increase. The robot is held motionless for some time at around -45° before rotating back in a CW direction. Now that d_1 is starting to decrease, the heading angle measures roughly 0° when both distances (d_1, d_2) are almost equal once more at zero degrees. After then, the robot is spun in a CW direction. As a result, the heading angle increases to -45° because distance d_1 is now increasing faster than d_2 .

A rotation cycle is completed when the robot rotates leftward towards zero degrees after being maintained still for a moment at -45° . Figures 5 present the findings from this static experiment. The heading estimation results obtained with TF sensors are compared with a commercially available Attitude Heading Reference System (AHRS) sensor from VectorNav Inc. This sensor has an absolute heading angle precision of 2° RMS [22]. A zoom-in view of the heading angle calculation at various rotation stages is provided in Figure 5-ii (a-d).

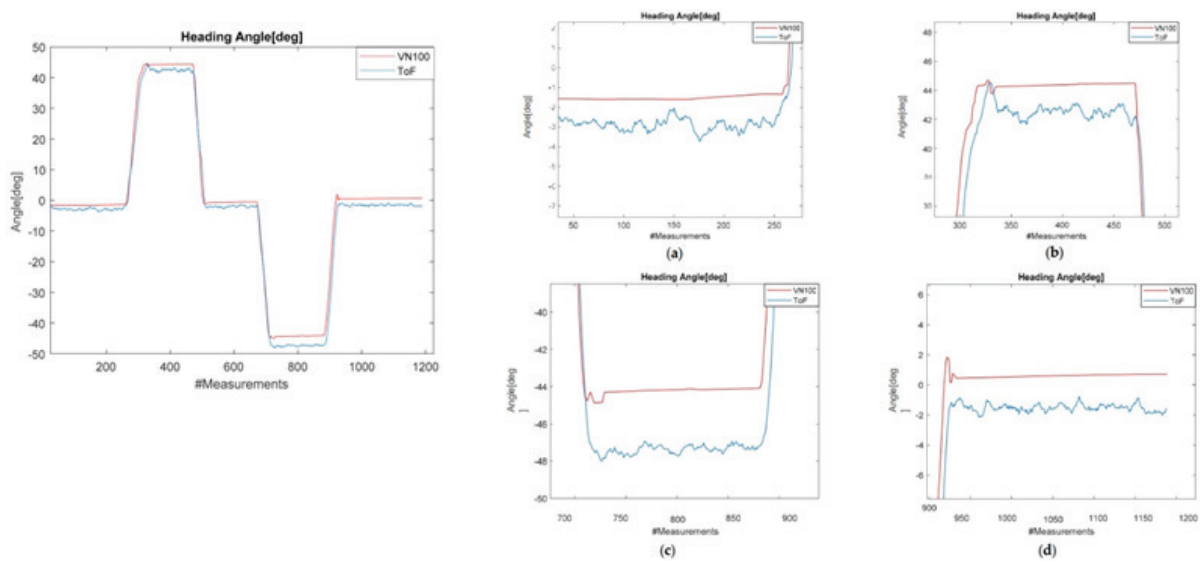


Figure 5 – i) Heading angle comparison with reference sensor: AHRS VN100: 0° to $+45^\circ$, back to 0° to -45° , ii) Zoom-in view of heading angle approximately at 0° , $+45^\circ$, and -45°

Comparing the angle measurements from the reference AHRS with those from the suggested approach yields the heading angle error, as Table 2 below illustrates. A little rotation about the z-axis is observed to improve the accuracy of the heading angle calculation using the proposed method. When employing TF sensors, the heading angle error is more noticeable at greater rotation degrees (about $+45^\circ$). The cause of the increased heading calculation errors for large rotation degrees along the vertical axis is due to the fact that at oblique angles, the inaccuracy in range readings from TF sensors grows.

Dynamic Test: 3D Position and Orientation:

Through the use of the staircase geometry and only onboard TF range sensors, the 3D localization of sTetris robot is established. Certain parameters of the TF sensors and the sTetris robot, as well as the shape of the staircase, are given in Table 1. A reliable range of only approximately 120 cm is measured between the left and right TF sensors. The range measurement data in Figure 6(a) confirms that the range data is unreliable for calculating location above this point in the experiment.

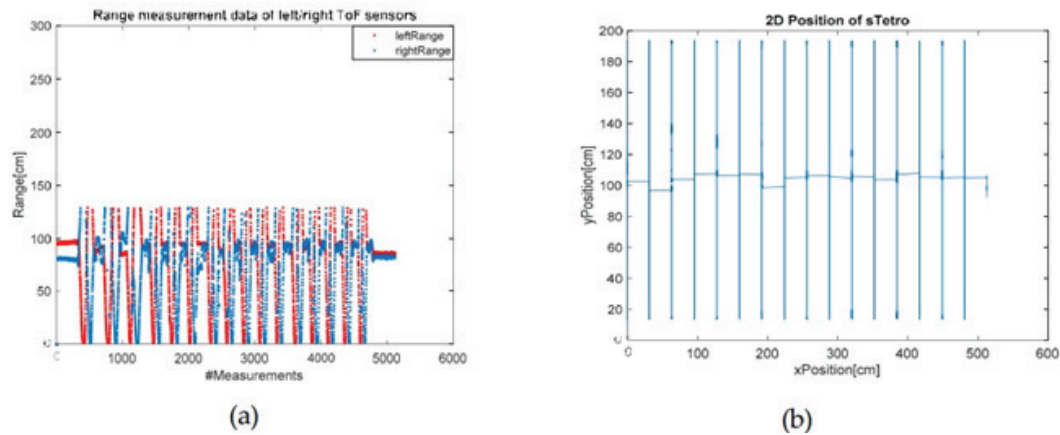


Figure 6 – a) Range measurements of the left and right TF sensors. b) sTetris 2D position (x, y).

The robot is initially placed at $(x_0 = 0, y_0 = Y_0, z_0 = 0)$, which is roughly halfway up the first step of the staircase. The robot moves rightwards until right bumper hits the right string of staircase, maintaining a constant x- and z-position ($x = const., y = d_j, z = const.$ throughout rightward mobility) based on distance readings from the right-side TF sensor. The robot first touches the wall on the right before advancing leftward till its left bumper makes contact with the staircase's left wall string. Subsequently, the robot returns to the center of the staircase. With this, robot's one traversal on the stair step is finished.

In order to reach the next level, the robot then begins to raise its second and third blocks. When it is lifted up, its z-position shifts up but its y- and x-positions stay the same (i.e., $(x = const., y = const., z = .)$). Once the lift-up motion is finished, the robot advances to the tread's center to begin the subsequent stair step traverse. Its x-position changes as it moves forward, but its y- and z-positions stay the same ($x = x_i, y = const., z = const.$).

Figure 6 (a) displays the range measurements of the left and right TF sensors (d_3, d_4). After roughly 120 cm, these range measurands lose their usefulness. This is due to maximum range of the sensor used. The robot's y-position on the staircase is determined using measurements from the left and right range sensors. Figure 6 (b) displays the sTetris 2D position (x, y). When excluding robot width from the y-axis distance calculation, the robot travels approximately 480 cm in the x-axis and 180 cm in the y-axis. In Figure 7, the 3D position plot is displayed.

The left and right TF sensors' raw range readings (d_3, d_4) are displayed in Figure 6(a). Calculating the robot's y-position on the stairs requires range measurements from the both sensors installed on right and left of sTetris. See Figure 6(b) for the 2D position (x, y) of sTetris. When y-axis distance is calculated without accounting for robot width, the robot moves approximately 180 cm in the y-axis and 480 cm in the x-axis direction. As seen in 3D position plot given in Figure 7 (p. 34).

When comparing the 3-axis position data with the staircase's real geometry (dimensions), it is clear that the data is extremely smooth and accurate. As seen in this picture, the robot travels around 165 cm along the z-axis. Figure 8 (p. 34) displays the estimated heading angle. The observation is made that the absolute orientation stays within $+1^\circ$ for the whole staircase. The heading error's computed standard deviation is roughly 0.9 degrees. In this experiment, the misalignment correction (control) is not used.

Error analysis

Error in the sensor's own range measurements is the cause of heading angle error. It is seen that the heading angle inaccuracy is around $+1^\circ$, with a range error of approximately +3cm. In this work, we conducted studies to compare heading angle accuracy with the commercially available AHRS sensor. Figure 8 shows the absolute heading angle estimation using the suggested scheme and its error with respect to the reference AHRS sensor.

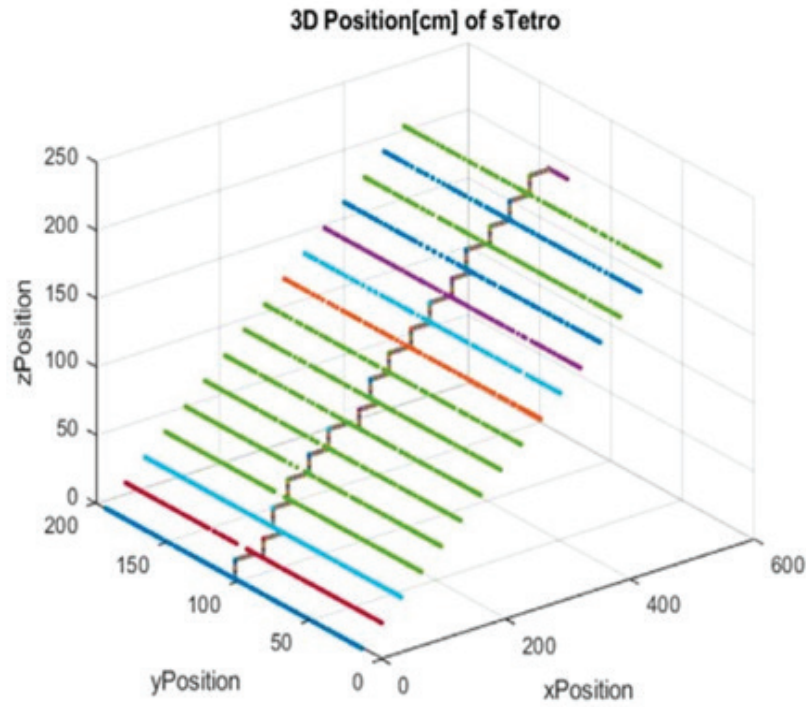


Figure 7 – Three dimensional absolute position (x,y,z) plot of sTetro on a 16-step staircase

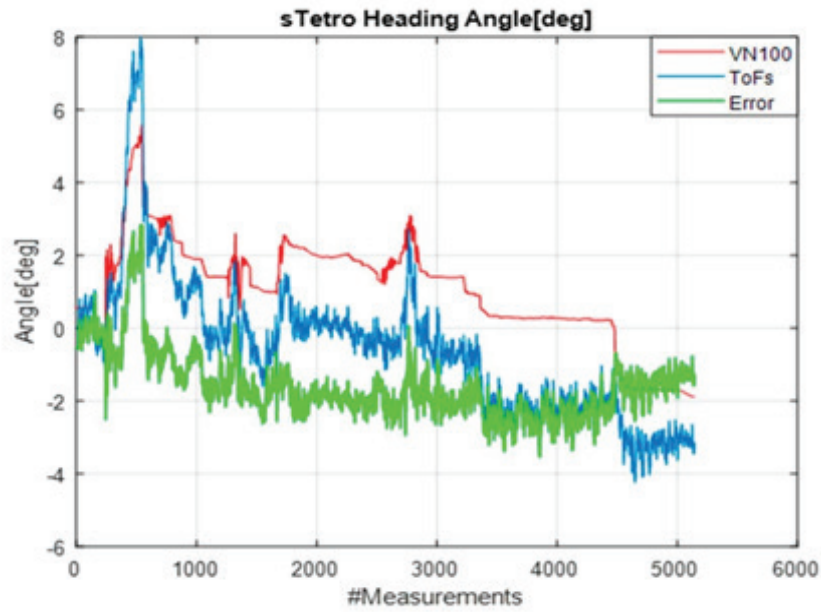


Figure 8 – Absolute heading angle estimation of sTetro

Equation (3) is used to calculate the y-position error. In this case, we calculated the error in the total distance estimated for each step in the y-axis relative to the width of the staircase. Table 3 displays the results.

$$Error = W - \left[\left(y_{m_{ax}} - y_{m_{in}} \right) + R_w \right] \quad (3)$$

In this case, y_{max} and y_{min} are the maximum and minimum range measurements of the left and right TF sensors on a specific step, and W is the width of the stair step and R_w is the width of the robot. The distance covered on a tread is determined by subtracting the robot width from the maximum and minimum range measurements for each step. By deducting this variance from the stair's manually measured width, the error is computed.

Table 2 – Accuracy of proposed scheme: Orientation error.

Rotation angle	VN100 (deg)	ToF (deg)	Error (deg)
0 degree	-1.80	-2.80	1.0
+45 degree	-44.2	-46.1	1.90
0 degree	1.60	0.40	1.20
-45 degree	44.4	42.60	1.80
0 degree	-1.83	-2.94	1.11

Table 3 – Accuracy of proposed scheme: Positional error

Staircase Step #	y_{max} (cm)	y_{min} (cm)	Error [cm]	Heading angle error
1	193.1	14.0	2.9	Mean =0.99° StdDev. =0.93°
2	193.0	14.1	3.1	
3	193.2	14.3	3.1	
4	193.1	14.1	3.0	
5	192.9	14.2	3.3	
6	193.1	14.3	3.2	
7	193.0	14.3	3.3	
8	193.1	13.9	2.8	
9	193.1	14.2	3.1	
10	193.2	14.1	3.1	
11	193.3	14.3	3.0	
12	193.1	14.2	3.1	
13	192.9	14.0	3.2	
14	193.1	14.3	3.1	
15	193.2	14.3		
16	193.0	14.0		

Conclusion

Here, we report a new and simple technique that takes advantage of the staircase geometry to compute the staircase cleaning robot's 3D absolute position and orientation with the least number of onboard sensors. By assuming that the robot moves through a known environment, we can precisely determine its position and orientation by using the staircase's known geometry. The position calculation algorithm receives manual measurements of the stair's tread and riser, which increases its accuracy. A moving average of the TF sensor measurements is used to reduce the amount of uncertainty in the y-axis that results from random noise in the range sensors. The primary cause of the y-axis error is the intrinsic measurement error in the sensor (3 cm according to the datasheet). The mean position error is only 3.1 cm with a standard deviation of 0.13 cm only. In a similar vein, the heading angle has a mean error of 0.99 degrees and a standard deviation of 0.93 degrees. To maintain alignment with the front step riser, the sTetris robot's heading angle should ideally stay within +5 degrees. The suggested approach faithfully satisfies this requirement. To improve the overall redundancy and reliability of the system, this technique could be integrated with other indoor positioning systems in the future.

REFERENCES

- 1 Ilyas M., Cho K., Baeg S.H., Park S. (2015) Drift reduction in IMU-only pedestrian navigation system in unstructured environment. 2015 10th Asian Control Conference: Emerging Control Techniques for a Sustainable World, ASCC 2015.
- 2 George M.B.K.W. (1988) A Navigation Control System for an Autonomous Mobile Robot. *Robotics and Factories of the Future '87*. Springer, pp. 678–686.
- 3 Da Mota F.A.X., Rocha M.X., Rodrigues J.J.P.C., De Albuquerque V.H.C., De Alexandria A.R. (2018) Localization and navigation for autonomous mobile robots using petri nets in indoor environments. *IEEE Access*, 6, 31665–31676.
- 4 Burgard W., Fox D., Hennig D. (1996) Estimating the absolute position of a mobile robot using position probability grids. *Proceedings of the Thirteenth National Conference on Artificial Intelligence*, pp. 1–15.
- 5 Goel P., Roumeliotis S.I., Sukhatme G.S. (1999) Robust localization using relative and absolute position estimates. 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol. 2, pp. 1134–1140.
- 6 Gorostiza E.M., Galilea J.L.L., Meca F.J.M., Monzú D.S., Zapata F.E., Puerto L.P. (2011) Infrared sensor system for mobile-robot positioning in intelligent spaces. *Sensors*, 11, 5416–5438.
- 7 Borenstein J., Everett H.R., Feng L., Wehe D. (1997) Mobile robot positioning: Sensors and techniques. *Journal of Robotics and Systems*, 14, 231–249.
- 8 Alatisé M.B., Hancke G.P. (2017) Pose estimation of a mobile robot based on fusion of IMU data and vision data using an extended Kalman filter. *Sensors (Switzerland)*, 17.
- 9 Cho B.S., Moon W., Seo W.J., Baek K.R. (2011) A dead reckoning localization system for mobile robots using inertial sensors and wheel revolution encoding. *Journal of Mechanical Science and Technology*, no. 25, 2907–2917.
- 10 North E., Georgy J., Tarbouchi M., Iqbal U., Noureldin A. (2009) Enhanced mobile robot outdoor localization using INS/GPS integration. *Proceedings of the 2009 International Conference on Computer Engineering and Systems*, pp. 127–132.
- 11 Hammouche M., Sakhi S., Belhocine M., Elourdi A., Bouaziz S. (2016) A Fuzzy Controller for GPS/INS/Odom Integrated Navigation System. *Proceedings of the 13th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, pp. 390–397.
- 12 Biswas J., Veloso M. (2010) WiFi localization and navigation for autonomous indoor mobile robots. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4379–4384.
- 13 Lim J., Lee S., Tewolde G., Kwon J. (2015) Indoor localization and navigation for a mobile robot equipped with rotating ultrasonic sensors using a smartphone as the robot's brain. *IEEE International Conference on Electro Information Technology*, vol. 2015–June, pp. 621–625.
- 14 Xu D., Han L., Tan M., Li Y.F. Ceiling-based visual positioning for an indoor mobile robot with monocular vision. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2009, 56, 1617–1628.
- 15 Lee T.J., Kim C.H., Cho D.I.D. A Monocular Vision Sensor-Based Efficient SLAM Method for Indoor Service Robots. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2019, 66, pp. 318–328.
- 16 Park S., Hashimoto S. Autonomous navigation system for mobile robot using randomly distributed passive RFID tags. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences* 2010, E93–A, pp. 711–719.
- 17 Falsi C., Dardari D., Mucchi L., Win M.Z. (2006) Time of arrival estimation for UWB localizers in realistic environments. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing* 2006, pp. 1–13.
- 18 Tedeschi A., Calcaterra S., Benedetto F. Ultrasonic Radar system (URAS): Arduino and virtual reality for a light-free mapping of indoor environments. *IEEE Sensors Journal* 2017, 17, 4595–4604.
- 19 Ilyas M., Yuyao S., Mohan R.E., Devarassu M., Kalimuthu M. (2018) Design of sTetro: A Modular, Reconfigurable, and Autonomous Staircase Cleaning Robot.
- 20 Tetris game. <https://en.wikipedia.org/> (Accessed on 2 Feb. 2023).
- 21 Hayat A.A., Yi L., Kalimuthu M., Elara M., Wood K.L. (2022) Reconfigurable robotic system design with application to cleaning and maintenance. *Journal of Mechanical Design*, 144, 063305.

**¹МУХАММАД ИЛЬЯС, ¹АБДУЛЛА ААМИР ХАЯТ,
¹ПРАБАКАРАН ВИРАДЖАГАДЕШВАР, ¹МОХАН РАДЖЕШ ЭЛАРА**
¹ROAR Lab, Инженерлік өнімді әзірлеу бөлімі, Сингапур технология
және дизайн университеті (SUTD), Сингапур, 487372
*E-mail: milyasmeo2005@gmail.com

БАСПАЛДАҚ ГЕОМЕТРИЯСЫН ЖӘНЕ МИНИМАЛДЫ АРЗАН ДАТЧИКТЕРДІ ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, БАСПАЛДАҚ ТАЗАЛАУШЫ РОБОТТЫҢ АБСОЛЮТТІ ЖАҒДАЙЫН 3D БАҒАЛАУ

Аңдатпа

Пішінін өзгерту қабілетінің арқасында sTetris роботы тазалау кезінде баспалдақпен көтеріле алады. STetris робот жүйесінің жалпы жұмысы көп қабатты кеңістіктердегі офлайн навигация үшін қажетті локализация мен орналасу деректеріне байланысты. Ғимарат ішінде жұмыс істеуге арналған мобильді роботтар әдетте локализация туралы ақпаратты алу үшін сыртқы жүйелерге сүйенеді. Өкінішке орай мобильді платформаның сәтті жұмыс істеуі дәл үш өлшемді (3D) позицияға және бағдарға (позаға) қол жеткізу үшін жиі қосымша жабдықты бекіту немесе ішкі жұмыс ортасын өзгертуді қажет етеді. Дегенмен роботты алдын ала белгілі баспалдақтың геометриялық өлшемдері туралы ақпаратты пайдалана отырып, баспалдақта локализациялауға болады. Бұл мақалада роботтың үш өлшемді позициясын құру үшін белгілі баспалдақ геометриясы мен датчиктердің ең аз санын өлшеуді қалай қолдануға болатындығы көрсетілген. Шынайы кеңістіктегі нақты роботта жүргізілген тәжірибелер ұсынылған тәсілдің тиімділігін дәлелдеді.

Тірек сөздер: ішкі орта, үш өлшемді локализация, баспалдақ геометриясы, қайта конфигурацияланатын робот, арзан датчиктер.

**¹МУХАММАД ИЛЬЯС, ¹АБДУЛЛА ААМИР ХАЯТ,
¹ПРАБАКАРАН ВИРАДЖАГАДЕШВАР, ¹МОХАН РАДЖЕШ ЭЛАРА**
¹ROAR Lab, Отдел разработки инженерной продукции, Сингапурский университет
технологий и дизайна (SUTD), Сингапур, 487372
*E-mail: milyasmeo2005@gmail.com

3D-ОЦЕНКА АБСОЛЮТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ РОБОТА–УБОРЩИКА ЛЕСТНИЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОМЕТРИИ ЛЕСТНИЦЫ И МИНИМАЛЬНЫХ НЕДОРОГИХ ДАТЧИКОВ

Аннотация

Благодаря своим способностям менять форму робот sTetris может подниматься по лестнице, выполняя уборку. Общая работа системы робота sTetris зависит от данных локализации и позиционирования, которые необходимы для автономной навигации по многоэтажным помещениям. Мобильные роботы, предназначенные для работы внутри помещений, обычно полагаются на внешние системы для получения информации о локализации. К сожалению, часто требуется дополнительная аппаратная фиксация или изменения рабочей среды в помещении для достижения точного трехмерного (3D) положения и ориентации (позы) для успешной работы мобильной платформы. Тем не менее робота можно локализовать на лестнице, используя информацию о геометрических размерах лестницы, которая известна заранее. В данной статье показано, как известная геометрия лестниц и измерения минимального количества датчиков могут быть использованы для создания трехмерного позиционирования робота. Эксперименты, проведенные на реальном роботе в аутентичном помещении, успешно демонстрируют эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: внутренняя среда, трехмерная локализация, геометрия лестницы, реконфигурируемый робот, недорогие датчики.

Information about the authors**Mohammad Ilyas** (Corresponding author)

Researcher in the ROAR lab, Engineering Product Development Unit,
Singapore University of Technology and Design (SUTD), Singapore 487372

ORCID ID: 0000-0001-7555-3839

E-mail: milyasmeo@gmail.com

Abdullah Aamir Hayat

Researcher in ROAR Lab, Engineering Product Development Unit, Singapore University
of Technology and Design (SUTD), Singapore 487372

ORCID ID: 0000-0001-6141-4600

E-mail: abdullaamir@sutd.edu.sg

Prabhakaran Veerazhagadheswar

Researcher in ROAR lab, Engineering Product Development Unit, Singapore University
of Technology and Design (SUTD), Singapore 487372

ORCID ID: 0000-0002-5612-2619

Email: prabakaran@sutd.edu.sg

Mohan Rajesh Elara

Professor, Vice-Chancellor's Chair and Associate Professor, Engineering Product Development,
Engineering Product Development Division, Singapore University of Technology and Design (SUTD),
Singapore 487372

ORCID ID: 0000-0001-6504-1530

E-mail: rajeshelara@sutd.edu.sg

Авторлар туралы мәліметтер**Мохаммад Ильяс** (корреспонденция авторы)

ROAR зертханасының зерттеушісі, Инженерлік өнімді әзірлеу бөлімі,
Сингапур технология және дизайн университеті (SUTD), Сингапур 487372

ORCID ID: 0000-0001-7555-3839

Email: milyasmeo@gmail.com

Абдуллах Аамир Хаят

ROAR зертханасының зерттеушісі, Инженерлік өнімді әзірлеу бөлімі,
Сингапур технология және дизайн университеті (SUTD), Сингапур 487372

ORCID ID: 0000-0001-6141-4600

E-mail: abdullaamir@sutd.edu.sg

Прабакаран Вееражагадхесвар

ROAR зертханасының зерттеушісі, Инженерлік өнімді әзірлеу бөлімі,
Сингапур технология және дизайн университеті (SUTD), Сингапур 487372

ORCID ID: 0000-0002-5612-2619

Email: prabakaran@sutd.edu.sg

Мохан Ражеш Елара

Инженерлік өнімді әзірлеу кафедрасының проректоры және доценті, профессор,
Инженерлік өнімді әзірлеу бөлімі, Сингапур технология және дизайн
университеті (SUTD), Сингапур 487372

ORCID ID: 0000-0001-6504-1530

Email: rajeshelara@sutd.edu.sg

Информация об авторах

Мохаммад Ильяс (автор для корреспонденции)

Исследователь в лаборатории ROAR, Отдел разработки инженерной продукции,
Сингапурский университет технологий и дизайна (SUTD), Сингапур 487372

ORCID ID: 0000-0001-7555-3839

E-mail: milyasmeo@gmail.com

Абдуллах Аамир Хаят

Исследователь в лаборатории ROAR, Отдел разработки инженерной продукции,
Сингапурский университет технологий и дизайна (SUTD), Сингапур 487372

ORCID ID: 0000-0001-6141-4600

E-mail: abdullaahaamir@sutd.edu.sg

Прабакаран Вееражагадхесвар

Исследователь в лаборатории ROAR, Отдел разработки инженерной продукции,
Сингапурский университет технологий и дизайна (SUTD), Сингапур 487372

ORCID ID: 0000-0002-5612-2619

E-mail: prabakaran@sutd.edu.sg

Мохан Ражеш Елара

Профессор кафедры проректора и доцент кафедры разработки инженерной продукции,
Отдел разработки инженерной продукции, Сингапурский университет технологий
и дизайна (SUTD), Сингапур 487372

ORCID ID: 0000-0001-6504-1530

E-mail: rajeshelara@sutd.edu.sg

UDC 621.39 (043.2)
IRSTI 49.33.29

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2023-20-4-40-47>

¹*ODARCHENKO R.S., ¹PINCHUK A.D., ¹POLIHENKO O.O.

¹National Aviation University, 03058, Kyiv, Ukraine

*E-mail: odarchenko.r.s@ukr.net

LTE NETWORK DEPLOYMENT BASED ON OPEN-SOURCE SOLUTIONS

Abstract

In recent years, the landscape of LTE network deployment has experienced a significant shift from reliance on proprietary solutions provided by established vendors to the exploration of open-source alternatives. Open-source solutions have gained traction due to their cost-effectiveness and flexibility, allowing network operators to customize their deployments according to specific requirements and preferences. This article examines the deployment of a 4G LTE network based on open-source solutions. In the context of open-source, the options of using software and hardware for network deployment were discussed. Through meticulous analysis and testing procedures, a viable and robust solution for 4G LTE deployment based on open-source projects is outlined. The aim of this paper is to explore the possibility of 4G deployment based on open-source projects and provide a potential option for deployment. Through this exploration, the article contributes valuable findings to the evolving field of telecommunications, paving the way for future advancements and innovations in open-source LTE network technologies.

Key words: LTE, open-source, private network, deployment.

Introduction

Nowadays, open-source solutions allow for the implementation of a large number of different projects, and every year, the open-source movement is becoming more and more popular in the engineering community. The field of cellular communication networks is no exception.

LTE cellular mobile networks have long been in use around the world, and a large number of commercial solutions have been implemented. They have also become the starting point for further progress beyond the current generation of mobile cellular networks to lead the way to fifth-generation mobile networks. Open-source solutions have emerged as a viable option for LTE network deployment (private networks, testbeds), offering advantages such as cost-effectiveness, flexibility, and customization options. By leveraging open-source software, organizations can reduce dependency on proprietary vendors, lower costs, and have more control over their network infrastructure. However, it's crucial to acknowledge that while open-source LTE solutions provide significant benefits, they may not be universally applicable to all use cases or requirements. A lot of open-source projects were created for testing, experimental purposes, etc. That is, these projects are PoC (proof-of-concept) solutions. But, at the same time, it is a good option for students to studying this network generation.

Literature review

While commercial solutions for LTE network deployment have traditionally dominated the market, there is a growing interest in leveraging open-source solutions to build and optimize LTE networks. This literature overview explores the evolution and significance of LTE network deployment using open-source solutions.

A number of scientific papers have been devoted to 4G test networks deployed on the basis of open source in various aspects of use. In particular, [1] shows how to set up an LTE cellular network for experimental research and measurements, relying on standard equipment and open-source software. Paper [2] describes how to build an enterprise-level private LTE/5G network. There

are recommendations on the use of certain software and hardware. The article also provides a basic deployment scheme.

This article [3] describes a network testbed that allows students to experiment with a fully functional 4G LTE system without a radio. This test system simulates a realistic 4G LTE deployment, helping students gain valuable knowledge of cellular networking.

The next researches works are concerned with the use of OAI (OpenAirInterface) solutions for LTE testbeds deployment. In the first paper [4], the network was deployed using the OAI and OAISIM (OpenAirInterface System Emulation) modules to emulate an LTE network. The second paper [5] shows OAI as a flexible platform for the open LTE ecosystem and playground. It demonstrated a case study of using OAI to deploy a low-cost open LTE network using common hardware with standard LTE-compatible devices. It also shows the possibilities of platform reconfiguration.

The landscape of LTE network deployment is continually evolving, with emerging technologies such as 5G and beyond posing new challenges and opportunities. Researchers are exploring the integration of open-source solutions with these advanced technologies to create synergistic and future-proof telecommunications infrastructures. Exploring novel approaches, such as edge computing and network slicing, is also a focus of ongoing research [6-9].

Thus, the literature reviewed underscores the growing interest in utilizing open-source solutions for LTE network deployment. The studies discussed highlight practical applications, such as LTE testbeds and private networks, emphasizing the flexibility and adaptability of open-source solutions.

Main provisions

The aim of this article is to provide information about the successful deployment and results of testing a 4G LTE network based on open-source solutions. To achieve this goal, the following scientific tasks were solved:

1. To explore existing open-source projects for the implementation of 4G networks and select potential solutions.
2. To develop a network diagram.
3. To deploy and test the LTE network.

An overview of open-source projects for LTE. Generally, open-source LTE solutions provide the necessary components for building and operating an LTE network, including the evolved packet core (EPC), radio access network (RAN), and user equipment (UE).

Software. There are a large number of different open-source projects for EPC deployments. Open-source implementations of the 4G core have become a viable alternative to proprietary solutions, offering greater transparency, flexibility, and cost-effectiveness. Thus, the following popular open-source solutions can be identified for deploying the core of the fourth-generation cellular network:

- ♦ srsEPC [10];
- ♦ SD-CORE (OMEC) [11];
- ♦ Magma [12].

All projects use virtualization of network functions to ensure the operation of basic network functions. It is important to note that there are many homebrew projects with separate network functions implemented in different languages and ways that meet 3GPP requirements.

Both for EPC and RAN deployments, there are a large number of different open-source projects. All of them comply with 3GPP specifications. Therefore, the following projects can be considered for LTE RAN deployment:

- ♦ OpenAirInterface eNB [13];
- ♦ srsRAN [14].

Hardware. Based on a number of recommendations from various sources, the equipment for deploying private cellular networks should be divided into two components: devices for deploying network core and software part of the BS, and the device for receiving and transmitting signals.

Network Core:

- ♦ physical and virtual servers;
- ♦ using virtual machines;
- ♦ example: a virtual machine on a server or on your PC.

♦ Radio Access Network:

- ♦ for the software solution, similar to the kernel, the use of single-board computers (for example, the Raspberry PI);
- ♦ for signal receiving and transmission, use SDR (Software Defined Radio) devices [15].

Recommendations to making choice regarding hardware. It is worth noting that all hardware should be selected in accordance with the requirements of the software that will be used in the deployment process. Thus, we should pay attention to the following technical characteristics of the devices:

- ♦ processor manufacturer (most open-source projects work exclusively with Intel Core processors);
- ♦ number of processor cores;
- ♦ RAM and ROM capacities;
- ♦ availability of all necessary physical input and output interfaces;
- ♦ SDR manufacturer (some open-source projects for RAN support work with specific SDRs);
- ♦ SDR operating frequency and sampling rate (sometimes there may be problems with the configuration of eNodeB files due to non-compliance with the requirements).

LTE network deployment. First of all, the general network scheme was developed. It consists of the following components (Figure 1):

- ♦ CORE – network core;
- ♦ RAN – base station;
- ♦ UE – user equipment.



Figure 1 – The network scheme

To deploy an LTE network based on open solutions, the following software and hardware solutions were selected (all located on the same subnet and connected to the same virtual switch (Figure 2, p. 43), (Table 1). The diagram of the deployed network is shown in Figure 3 (p. 43). It includes the connection between all deployed network components, IP addresses, software and hardware. Additionally, Grafana monitoring systems (Monitoring-4G, RAN Logging and Monitoring) were deployed.

Table 1 – Software and hardware projects for network deployment

#	Component	Software/hardware solution
1.	Network Core	SD-CORE/Virtual machine on the server
2.	RAN (Radio Access Network)	srsENB/Raspberry PI, LimeSDR
3.	RIC (RAN Intelligent Controller)	SD-RAN/ Virtual machine on the server
4.	SMO (Service Management Orchestration)	Aether ROC/Virtual machine on the server
5.	UE (User Equipment)	GRSIMWrite4.2.10/smartphone with LTE support, blank SIM-card

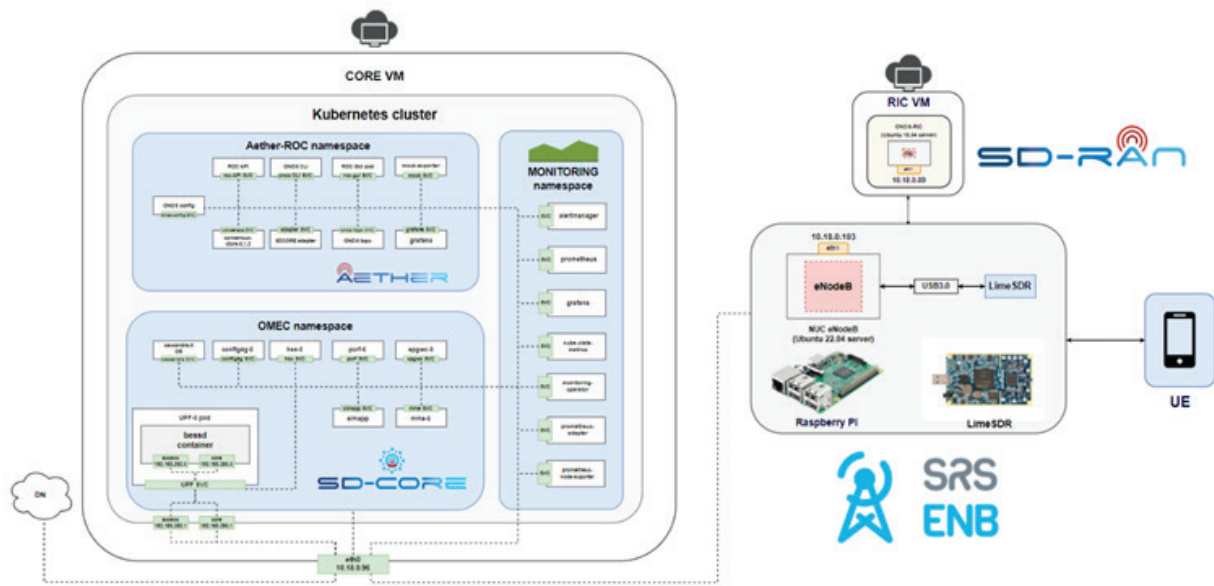


Figure 2 – The full deployment scheme

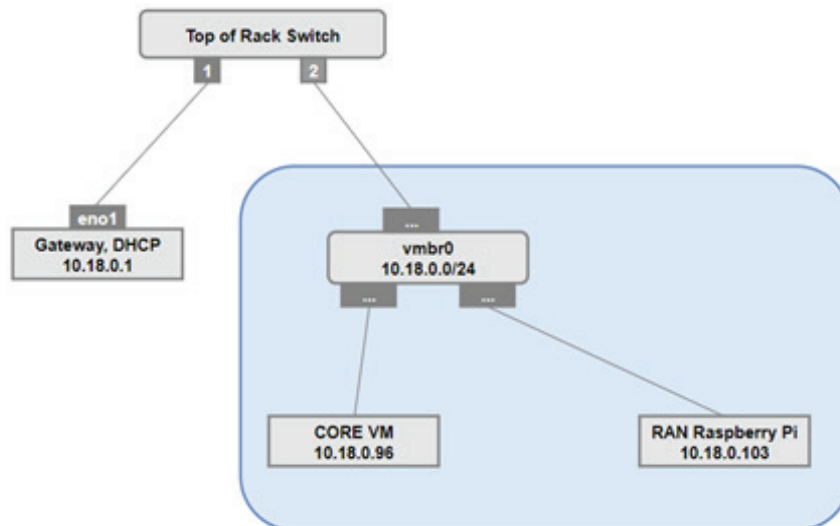


Figure 3 – The network diagram

Network testing. After all the necessary configurations the base station was launched, the network core is in a constantly working state (Figure 4).

```
root@raspberrypi: ~/config/srsran
- PAD: 0.00 dB
- IAMP: 0.00 dB
Rx antenna set to LNAL
Tx antenna set to BAND1

==== eNodeB started ====
Type <t> to view trace
[INFO] RX LPF configured
Setting frequency: DL=1878.4 Mhz, UL=1783.4 MHz for cc_idx=0 nof_prb=15
[INFO] Tx calibration finished
[INFO] Rx calibration finished
```

Figure 4 – Base station launching

```
LRACH: tti=1811, cc=0, pci=1, preamble=50, offset=42, temp_crnti=0x46
User 0x46 connected
```

Figure 5 – UE attachment

The srsENB also is providing function of metrics trace. In our case, we saw the next metrics during testing (Figure 6).

--DL--										--UL--									
rat	pci	rnti	cqi	ri	mcs	brate	ok	nok	(%)	pusch	pucch	phr	mcs	brate	ok	nok	(%)	bsr	
lte	1	46	15	0	19	1.1M	121	0	0%	18.5	18.5	40	22	194k	47	0	0%	0.0	
lte	1	46	14	0	20	1.1M	118	0	0%	14.0	14.0	40	17	163k	52	6	10%	0.0	
lte	1	46	14	0	19	1.1M	119	0	0%	6.5	6.6	40	9	149k	89	5	5%	39.0	
lte	1	46	13	0	19	1.1M	131	12	8%	6.4	6.3	40	8	143k	98	3	2%	0.0	
lte	1	46	14	0	20	1.1M	119	6	4%	6.6	6.7	40	9	102k	56	3	5%	0.0	
lte	1	46	14	0	20	1.1M	125	12	8%	6.9	6.9	40	10	216k	135	17	11%	0.0	
lte	1	46	13	0	18	1.1M	135	3	2%	7.2	8.1	40	9	211k	120	2	1%	0.0	
lte	1	46	12	0	19	1.1M	128	12	8%	15.7	16.0	40	19	294k	70	7	9%	0.0	
lte	1	46	13	0	19	1.1M	128	0	0%	19.5	19.6	40	21	251k	68	0	0%	0.0	
lte	1	46	13	0	20	1.1M	143	16	10%	19.4	19.6	40	22	497k	109	4	3%	0.0	
lte	1	46	13	0	19	1.1M	128	1	0%	19.8	19.9	40	22	306k	68	0	0%	0.0	

Figure 6 – metrics trace

As a result of this variant of deploying an LTE network based on open-source solutions, a user was successfully registered in this network, which can be seen on the monitoring (Figure 7). The following information is available: the status of the base station (eNodeB Status), the number and information (IMSI) about active users (Active subscribers and Subscriber info, respectively), graphically displayed active user time in the network and throughput on two channels Tx Bitrate (Transmitter), Rx Bitrate (Receiver) (current and for the entire time the user is in the network).

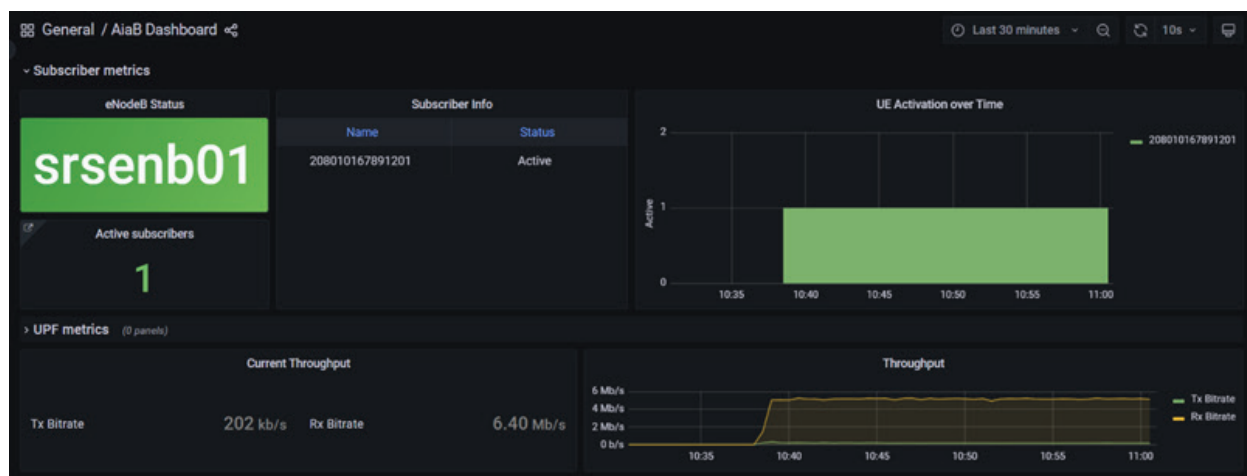


Figure 7 – 4G monitoring system

The network performance was tested in various ways, including downloading files to and from the device to the cloud, and video communication using Google Meet. During this, data transfer speeds were measured.

Material and methods

Analyzing existing research in this area, collecting the necessary data, and synthesizing it.

Results and Discussion

With the open-source community, even such complex projects as the deployment of private cellular networks, which require significant practical skills and theoretical knowledge, can be implemented.

Despite a number of difficulties during the project, the network was successfully deployed in the laboratory, which allows for further testing, improvement, and study by students.

Work is currently underway to improve the fourth-generation network by deploying near-RT RIC (near Real Time) and xApps (microservice-based applications to continuously improve the efficiency of RAN spectrum use), which will generally allow controlling and optimizing RAN functions and resources. We are also testing the network with more number of UEs.

Conclusion

Thus, this research contributes valuable insights and practical experiences to the telecommunications industry, affirming that open-source solutions offer a promising avenue for future cellular network deployments, in particular LTE. As open-source projects continue to evolve and expand, they hold the potential to drive further advancements and innovations in the telecommunications field.

Furthermore, the deployed network has successfully passed laboratory tests, paving the way for further improvements and study by students. This demonstrates the prospects for using open solutions for education and research in higher education institutions, helping to improve the quality of education and the training of future specialists in this field.

REFERENCES

- 1 Boussad Y., Legout A., Dabbous W., Lizzi L., Ferrero F. and Mahfoudi M.N. (2020) Open-Source 4G Experimental Setup, 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, Montreal, QC, Canada, pp. 1399–1400. doi.org/ 10.1109/IEEECONF35879.2020.9330245.
- 2 Mazur M. Introduction to open source private LTE and 5G networks | Ubuntu. Ubuntu. <https://ubuntu.com/blog/introduction-to-open-source-private-lte-and-5g-networks>.
- 3 De Britto e Silva E., Slamnik-Kriještorac N., Hadiwardoyo S.A. and Marquez-Barja J.M. (2020) Bringing 4G LTE closer to students, in GoodTechs '20: 6th EAI Int. Conf. Smart Objects Technol. Social Good, Antwerp Belgium. New York, NY, USA, ACM, pp. 126–131. <https://doi.org/10.1145/3411170.3411231>.
- 4 Nahum C., Soares J., Batista P. and Klautau A. (2017) Emulation of 4G/5G Network Using OpenAirInterface, in XXXV Simp. Bras. Telecomunicacoes Process. Sinais. Soc. Bras. Telecomunicacoes, pp. 989–990. <https://doi.org/10.14209/sbrt.2017.247>.
- 5 Nikaein N. et al (2014) Demo: OpenAirInterface, in MobiCom'14: 20th Annu. Int. Conf. Mobile Comput. Netw., Maui Hawaii USA. New York, NY, USA: ACM, pp. 305–308. <https://doi.org/10.1145/2639108.2641745>.
- 6 Dreibholz T. (2020) Flexible 4G/5G Testbed Setup for Mobile Edge Computing Using OpenAirInterface and Open Source MANO, in Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham: Springer Int. Publishing, pp. 1143–1153. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44038-1_105.
- 7 Dreibholz T. (2020) A 4G/5G Packet Core as VNF with Open Source MANO and OpenAirInterface, in 2020 Int. Conf. Software, Telecommun. Comput. Netw. (SoftCOM), Split, Hvar, Croatia, 17–19 sept. 2020. IEEE. <https://doi.org/10.23919/softcom50211.2020.9238222>.
- 8 Botez R., Costa-Requena J., Ivanciu I.-A., Strautiu V. and Dobrota V. (2021) SDN-Based Network Slicing Mechanism for a Scalable 4G/5G Core Network: A Kubernetes Approach, Sensors, vol. 21, no. 11, pp. 3773, May. <https://doi.org/10.3390/s21113773>.
- 9 Garcia-Aviles G., Gramaglia M., Serrano P., Gringoli F., Fuente-Pascual S. та I. Labrador Pavon. Experimenting with open source tools to deploy a multi-service and multi-slice mobile network, Comput. Commun., vol. 150, pp. 1–12, Jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.11.003>.
- 10 Introduction – srsRAN 4G 23.04 documentation. https://docs.srsran.com/projects/4g/en/latest/usermanuals/source/srsepc/source/1_epc_intro.html.
- 11 Introduction, Magma Documentation. GitHub, GitHub Pages. <https://magma.github.io/magma/docs/basics/introduction>.
- 12 Introduction – SD-Core Docs 1.4.0-dev documentation. <https://docs.sd-core.opennetworking.org/master/overview/introduction.html>.
- 13 Towards Open Cellular Ecosystem – OpenAirInterface. OpenAirInterface – 5G software alliance for democratising wireless innovation. <https://openairinterface.org/openairinterface-an-open-cellular-ecosystem/>.
- 14 srsRAN 4G 23.04 Documentation – srsRAN 4G 23.04 documentation. srsRAN Documentation — srsRAN documentation. <https://docs.srsran.com/projects/4g/en/latest/>.
- 15 SDR. Open, Programmable, and Virtualized 5G Networks. <https://open5g.info/sdr/>.

¹*ОДАРЧЕНКО Р.С., ¹ПИНЧУК А.Д., ¹ПОЛИГЕНЬКО О.О.¹Ұлттық авиация университеті, 03058, Киев қ., Украина

*E-mail: odarchenko.r.s@ukr.net.

АШЫҚ БАСТАПҚЫ КОД НЕГІЗІНДЕ LTE ЖЕЛІСІН ОРНАТУ**Андатпа**

Соңғы жылдары LTE желілерін орнату саласында белгілі вендорлар ұсынатын меншікті шешімдерге тәуелділіктен ашық бастапқы кодты баламаларды зерттеуге қарай жылжу өзгерісі байқалады. Ашық кодты шешімдер үнемділігі мен икемділігімен танымал болды, бұл желі операторларына оларды нақты талаптар мен артықшылықтарға сәйкес реттеуге мүмкіндік берді. Мақалада ашық бастапқы кодты шешімдер негізінде 4G LTE желісін орнату қарастырылады. Open-source контекстінде желіні орнату үшін бағдарламалық жасақтама мен аппараттық құралдарды пайдалану жағдайлары айқындалды. Мұқият талдау мен тестілеу нәтижесінде ашық бастапқы кодты жобаларға негізделген 4G LTE желісін орнату үшін өміршең әрі сенімді шешім ұсынылды. Мақаланың мақсаты ашық бастапқы кодты жобалар негізінде 4G желісін орнату мүмкіндігін зерттеу және орнату нұсқаларын ұсыну. Осы зерттеудің арқасында мақала болашақ ашық бастапқы кодты LTE желілік технологиясының жетістіктері мен инновацияларына жол аша отырып, телекоммуникацияның дамып келе жатқан саласына құнды үлес қосады.

Тірек сөздер: LTE, open-source, жеке желі, орналастыру.**¹*ОДАРЧЕНКО Р.С., ¹ПИНЧУК А.Д., ¹ПОЛИГЕНЬКО О.О.**¹Национальный авиационный университет, 03058, г. Киев, Украина

*E-mail: odarchenko.r.s@ukr.net.

**РАЗВЕРТЫВАНИЕ СЕТИ LTE НА ОСНОВЕ
РЕШЕНИЙ С ОТКРЫТЫМ ИСХОДНЫМ КОДОМ****Аннотация**

В последние годы в сфере развертывания сетей LTE наблюдается значительный сдвиг от зависимости от проприетарных решений, предлагаемых известными вендорами, к изучению альтернатив с открытым исходным кодом. Решения с открытым кодом завоевали популярность благодаря своей экономичности и гибкости, позволяющей операторам сетей настраивать их в соответствии с конкретными требованиями и предпочтениями. В данной статье рассматривается развертывание сети 4G LTE на базе решений с открытым исходным кодом. В контексте open-source рассмотрены варианты использования программного и аппаратного обеспечения для развертывания сети. В результате тщательного анализа и тестирования было предложено жизнеспособное и надежное решение для развертывания сети 4G LTE на основе проектов с открытым исходным кодом. Цель данной статьи – изучить возможность развертывания сети 4G на базе проектов с открытым исходным кодом и предложить потенциальный вариант развертывания. Благодаря этому исследованию статья вносит ценный вклад в развивающуюся область телекоммуникаций, прокладывая путь для будущих достижений и инноваций в области технологий сетей LTE с открытым исходным кодом.

Ключевые слова: LTE, open-source, частная сеть, развертывание.**Information about authors****Odarchenko Roman** (corresponding author)

Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department of Telecommunication and Radio Electronic Systems, National Aviation University, Lyubomyr Gusar Ave 1, Kyiv, 03058, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-7130-1375

E-mail: odarchenko.r.s@ukr.net

Pinchuk Alla

Bachelor student, Department of Telecommunication and Radio Electronic Systems, National Aviation University, Lyubomyr Gusar Ave 1, Kyiv, 03058, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-3567-0445

E-mail: pinchuk.ad87@gmail.com

Polihenko Oleh

Doctoral candidate, Department of Telecommunication and Radio Electronic Systems,
National Aviation University, Lyubomyr Gusar Ave 1, Kyiv, 03058, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-2427-4976
E-mail: o.poligenko@ukr.net

Авторлар туралы мәліметтер

Одарченко Роман (корреспонденция авторы)

Техника ғылымдарының докторы, профессор, телекоммуникация және радиоэлектрондық жүйелер кафедрасының меңгерушісі, Ұлттық авиация университеті,
03058, Любомир Гусар даң., 1, Киев қ., Украина
ORCID: 0000-0002-7130-1375
E-mail: odarchenko.r.s@ukr.net

Пинчук Алла

Бакалавр, телекоммуникация және радиоэлектрондық жүйелер кафедрасы,
Ұлттық авиация университеті, 03058, Любомир Гусар даң., 1, Киев қ., Украина
ORCID: 0000-0003-3567-0445
E-mail: pinchuk.ad87@gmail.com

Полигенько Олег

Докторант, телекоммуникация және радиоэлектрондық жүйелер кафедрасы,
Ұлттық авиация университеті, 03058, Любомир Гусар даң., 1, Киев қ., Украина
ORCID: 0000-0002-2427-4976
E-mail: o.poligenko@ukr.nett

Информация об авторах

Одарченко Роман (автор для корреспонденции)

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой телекоммуникационных и радиоэлектронных систем, Национальный авиационный университет,
пр-т Любомира Гузара, 1, г. Киев, 03058, Украина
ORCID: 0000-0002-7130-1375
E-mail: odarchenko.r.s@ukr.net

Пинчук Алла

Бакалавр, кафедра телекоммуникационных и радиоэлектронных систем,
Национальный авиационный университет, пр-т Любомира Гузара, 1, г. Киев, 03058, Украина
ORCID: 0000-0003-3567-0445
E-mail: pinchuk.ad87@gmail.com

Полигенько Олег

Докторант, кафедра телекоммуникационных и радиоэлектронных систем,
Национальный авиационный университет, пр-т Любомира Гузара, 1, г. Киев, 03058, Украина
ORCID: 0000-0002-2427-4976
E-mail: o.poligenko@ukr.net

UDC 20.53
IRSTI<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2023-20-4-48-54>¹**IBRAGIM G.K.**, ²**UMAROV T.F.**¹Kazakh-British Technical University, 050000, Almaty, Kazakhstan²British Management University, Tashkent, Uzbekistan

*E-mail: g.ibragim@kbtu.kz

**THE CONSIDERATION OF SEMANTIC GAP
BETWEEN DESIGN AND CODE****Abstract**

In project management on creation of program application, specialists from different subject areas are involved, who include their contributions, for instance, UI/UX designers who create mock-ups of the future application or developers who write the code according to the prototype. The design conception may go beyond the possibilities of interpreting it from a technical point of view of implementation. The realization of such idea could not to be able to collect on only one defined program platform or language, and accordingly the problem is appeared. To eliminate semantic gap between the designers' concepts and opportunity of program developers in technical affordance, released methodology, Model Driven Architecture (MDA), which is, on the one hand, a concept for implementation of software, on the other hand a standard. In paper, considerate the MDA and its transformation levels with determine a pragmatism semantics of mapping, reasons of chosen a class diagram as model of transformation and Java language for code generation.

Key words: MDA, UML, transformation, mapping, semantic gap, pragmatics, class diagram, Java.

Introduction

Model Driven Architecture (MDA) is a methodology for the implementation processes of program applications. The MDA was realized in 2001 year by the Object Management Group (OMG). OMG is an international, open membership, not-for-profit technology standards consortium. Founded in the 1989 year. Figure 1 illustrates the inherent pragmatics of the relationship between Model Driven Engineering, Model Driven Development and Model Driven Architecture.

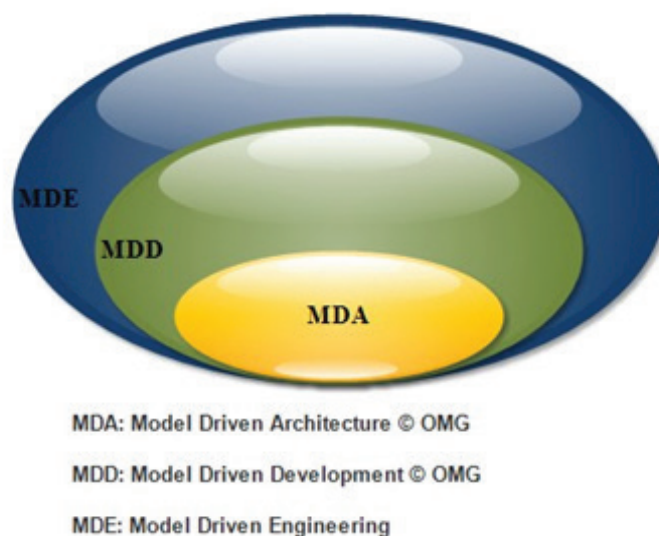


Figure 1 – The structure of MDE

MDA is a core of Model Driven Engineering (MDE). MDE is a software development methodology that basis on defining and utilizing domain models.

The syntax of a programming language defines the processes of microprocessor, so it defines semantics of functioning the microprocessor by executed program. Semantics in UML diagram defines abstract functioning of executable program. And these two semantics is distinct. So, semantic gap between UML diagram and the code representations of future application are emerged.

Semantics of programming language consist of domain semantics and semantic mapping. Semantic mapping relates the syntactic expression to the components of the semantic domain. Semantic domain is an ontology, description of concepts of construction of programming language, in this context. The notion semantic domain may use in describing the semantics of design part of development. UML diagrams have components which describe the processes of functioning of implementing application. Hence it follows that UML diagram components depict semantic domain.

A semantic gap is a discrepancy in the logical connection of elements of one model in another, transformed because of the first. The basic importance to Model Driven Architecture is a notion of metamodel, above that it obtains model transformations. Metamodels determined using the Meta Object Facility (MOF) standard. OMG defined also a specific standard language for models' transformation which called Query/Views/Transformations (QVT). And defined mechanism based on XML, which provide interchange between models.

QVT is not success concept, it has no complete implementation, no industrial support, and not used much by developers. For MDA implementation released Eclipse Metamodel Framework (EMF) tool. EMF is used for a research project and affords to support a metamodel.

Materials and methods

Transformation

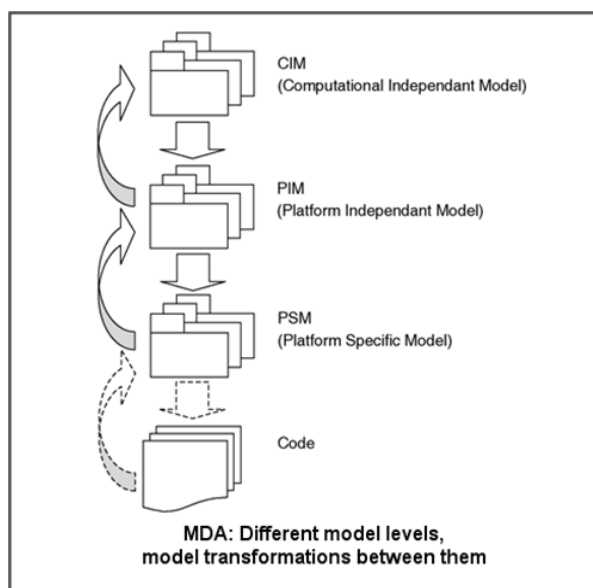


Figure 2 – Sequential transformations between models of MDA

Figure 2 explains the sequential transformations up Computational Independent Model (CIM) level to executed code. The CIM level consider specifications, scenario, and requirements to software application. It contains semantics of domain elements of conceptual model of application. Platform Independent Model (PIM) is transformed version of CIM level. On transformation between CIM and PIM levels the scenario of implementing application turn into UML diagram, which is understandable design not only for domain specialist. On transformation of PIM to Platform Specific Model (PSM) level, which demonstrated on Figure 3, the model of application turns into detailed version of PIM. On that level all UML diagram elements acquire more detailed features, which give opportunity to

transform it to code. Behind all that transformations hidden notion which identifies metamodels and contain domain semantics.

Main provisions

Mapping is not easy part of MDA. The semantics of domain specification should not change on transformation levels. Mapping feasible based on NLP and Graph theory.

Mapping based on matching. The notion of second suppose the use of Model Management Algebra (MMA). The match in MMA presented as an operator which takes two models as input and returns a mapping of them. Mapping identifies combinations of objects in the input models that are either equal or similar, based on the external meaning of equality and similarity. That definitions set leads to two versions of the operator: Elementary and Complex matches.

Elementary is when one element is a modified version of another. The complex is based on the complex meanings of the equation. That match, in its case, should distinguish sets of equal objects from similar ones. Similarity implies that the object is related, but with uncertainty, how are objects interconnected. Elementary and complex matching are not algorithms. But these matching's rules have their usage in graph isomorphism to detect structural similarity in complex models, and not only. In NLP to identify, analyze similarity in text of a model.

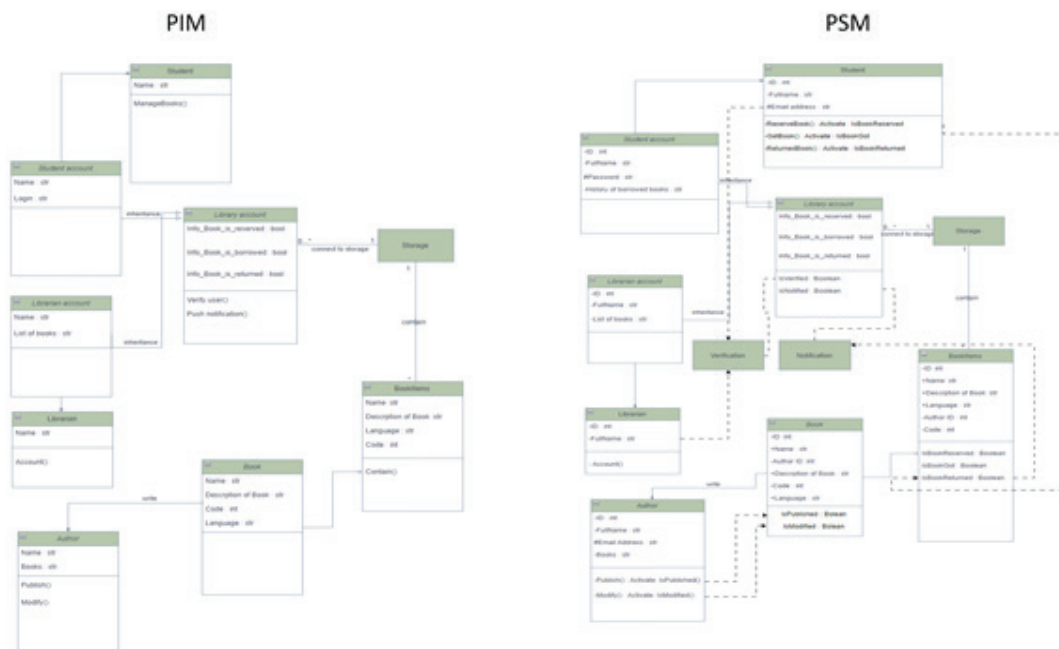


Figure 3 – Transformation PIM to PSM

Results and discussion

Pragmatics of mapping

In sequential of all written above may conclude following definition which contained in the notion of matching according to software development:

Semantic pragmatics is a comparison of two models by separating the essential from the non-essential. For instance, semantic pragmatics between model programming language and the model of PSM level, which in case the transformed model of previous levels of MDA, reveals in cutting off elements do not correspond to the syntax of programming language and domain-driven design specifications.

Semantic pragmatics is embedded in matching, which means it is embedded in mapping, which in case embedded in transformations of levels of MDA.

Literature review

MDA reviewed in papers [1, 2, 3, 4]. In articles considered MDA methodology in detailed position from statement to levels transformation description.

In the paper of Peter D. Mosses et al. [5] a semantics of programming language is determined as conceptual meaning of a program. It means that semantics provides abstract version of how the application will work in real. The form and structure of semantics of any program are determined by their syntax. So, the syntax has the defining role in collecting a semantics of implementing application.

In [6], considered the solution of bridging translating problems between pseudo-code and code with using NLTK library functions. NLP is a developing sphere of information technology. Nowadays, most applications based on trained “AI”, the abbreviation AI in parenthesis, because it is not complete version of human brain, it works similar and with human written algorithms. It is not existing by itself. NLP use machine learning methods and related to data science, because from the namespace, it processes the text. Data is textual and symbolic information. NLP use in automatic word detection, words translator. Tokenization and summarization are the main parts of NLP. In paper, the primary objective in research was to translate the pseudo-code to code automatically. The method to solve was using seq2seq technique. The prevented technique solves the 26% blank pseudo-code problem of SPoC dataset.

In [7], authors present an approach to automatically transform textual business rules to an SBVR model, Semantics of Business Vocabulary and Business Rule is a standard of OMG. The approach state on NLP and SBRV model, which include semantic notations of each rule. The semantics contained as XMI file.

In paper [8], presented approach of automatic generation of code using smart contract code examples from Solidity PSM. then the generated smart contract code compile on the Ethereum blockchain JavaScript virtual machine, compare with original contract code in terms of Solidity code metrics, similarity scores and execution costs. Authors elaborate on how the Solidity PSM is used for Solidity smart contract code generation by employing model-to-text transformations.

In [9], proposed transformation from PIM to PSM as a process. Authors extend it as separating mapping specification and transformation definition. The proposed process involves a metamodel based on MOF and Ecore, a UML metamodel, a mapping and transformation language model, and a transformation engine.

The mapping model specifies a relationship between the source and target metamodel, which is an UML.

A transformation model generates from a mapping model. The transformation program implements on the base of the transformation model. Transformation accomplishes according to the transformation engine, which executes the transformation program. Then the transformation engine on output produces the target model.

Three categories of mapping given in the article based on the concept of similar structure and semantics between the elements of metamodels. There are: one – to – one, one – to – many, many – to – one.

A one - to - one mapping is defined by one element from a target metamodel that equal to similar structure and semantics of one element from a source metamodel. A one – to – many mapping is defined by non-empty and non-unitary set of elements from a target metamodel with similar semantics to one element from a source metamodel. The last mapping is opposite definition of the one – to – many mapping.

Article [10] describe tool and approach of automatic generation code from UML class diagram in software development, consequently. Authors in their article describe the Eclipse modeling tool in concrete and Java code generation from UML diagram file. In [11] given approach of automatically generating Java code. Authors created GenCode named tool as solution for mobile application development. GenCode is open access and generate Java code from UML only. The algorithm of GenCode tool is as follows: First, the diagram is fixed and sorted into the “structure” and “sequence” packages. The structure package contains a class diagram, and sequence contains a sequence diagram. After that, the “models’ generator” package will generate code for Android generator and CSharpgenerator for the selected one. First, the structural code is generated, then the behavioral code.

In article [13], the authors research focuses on identification of significance of class diagram in software development. And formulated the class diagram description.

In article [14], a metamodel of Java language and model-based code transformations are touched upon. There are presented the scratch of Java meta-based code as an example of applying modeling tools like QVT. Besides, marked the definition blackbox.

Class diagram and Java

Unified Model Language is easy implementable to any Independent Development Environment (IDE) for its paradigm. In software engineering there are some IDE to generate code from UML directly: Eclipse Metamodel Framework IDE, NetBeans IDE, IntelliJ IDEA, Visual studio, Android Studio.

IDE transform the PSM level to code not from the initial CIM level. There are many research in using that IDEs but one is not yet described. It is Android studio. All these IDE based on class diagram and implement transformation from PIM to PSM, then to code. To get such result it requires Visual Paradigm plugin. The reason of using Visual Paradigm by developers is that the Visual Paradigm is an aggregate of design, analysis, management tools, which provide code generation. The noticed detail in research of software development that most code transformations based on class diagram and interpretation on Java language. The question why class diagram chosen as optimal variant arises, and why code interpreted in Java not Python or C++. The class diagram relates to structural type, so it is static and used to model static view of a software application. The static view describes the vocabulary of the prototype of application. Beside that the class diagram is a consideration for component and deployment diagrams and used to build the executable code. UML diagrams not entirely based on OOP, but exactly the class diagram present the mapping of object-oriented languages. One of these object-oriented languages is Java. The choose exactly that language comes from its semantic modelling. Because of the class diagram is static, and static semantics are sufficient to construct the most used Java refactoring. Java metamodel reflects static semantics.

Conclusion

The implementation of any software application is based on semantics. Semantics in MDA is presented in the form of a CIM level specification, which interpreted as a UML diagram at the PIM level. Then, the PIM model converts to the PSM model. By comparing models, the semantic gap is eliminated. The mapping is based on semantic pragmatics. Each transformation is a set of rules that is determined by semantic pragmatics. The article also presents a literature review of articles by other researchers related to this topic. Many software developers use IDE to automatically generate code from UML diagrams. And each of them is associated with class diagrams and the Java language. The reason of chosen is their similar semantic structure. Due to that, the class diagram correctly converts into the Java code, and thereby the semantic gap between design and code is eliminated.

REFERENCES

- 1 Silega N., Noguera M., Rogozov Y. I., Lapshin V. S. & Gonzalez T. (2022) Transformation from CIM to PIM: A systematic mapping. *IEEE Access*, 10, 90857-90872.
- 2 Niepostyn S.J. (2015) Consistent model driven architecture. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2015*.
- 3 Natek H., Elmounadi A. & Guerouate, F. (2022). Overview in the eclipse model-driven architecture tools. *ITM Web of Conferences*, 46, 02001.
- 4 Safitri A. G. & Atqiya F. (2022). Automatic model transformation on multi-platform system development with model driven architecture approach. *Computer Science and Information Technologies*, 3(3), pp. 157–168.
- 5 Mosses P. D. (2006). Formal semantics of programming languages. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 148(1), pp. 41–73.
- 6 Acharjee U.K., Arefin M., Hossen K.M., Uddin M.N., Uddin M.A. & Islam L. (2022) Sequence-to-sequence learning-based conversion of pseudo-code to source code using neural translation approach. *IEEE Access*, 10, 26730-26742.

- 7 Haj A., Jarrar A., Balouki Y. & Gadir T. (2021) The semantic of business vocabulary and business rules: An automatic generation from textual statements. IEEE Access, 9, 56506-56522.
- 8 Jurgelaitis M., Ceponiene L. & Butkiene R. (2022) Solidity code generation from UML state machines in model-driven smart contract development. IEEE Access, 10, 33465-33481.
- 9 Lopes D., Hammoudi S., Bézivin J. & Jouault, F. (2006) Mapping specification in MDA: From theory to practice. Interoperability of Enterprise Software and Applications, pp. 253–264.
- 10 Fouquet F., Nain G., Morin, B., Daubert E., Barais, O., Plouzeau N., & Jézéquel J. (2012) An eclipse modelling framework alternative to meet the Models@Runtime requirements. Model Driven Engineering Languages and Systems, pp. 87–101.
- 11 Parada A., Marques M. & Brisolara L.B. (2015) Automating mobile application development: UML-based code generation for Android and Windows phone. Revista de Informática Teórica e Aplicada, 22(2), 31.
- 12 Yang S. & Sahraoui H. (2022) Towards automatically extracting UML class diagrams from natural language specifications. Proceedings of the 25th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems: Companion Proceedings.
- 13 Yashwant W. (2014) Significance of class diagram in software development. Conference Managelization at Osmanabad.
- 14 Hamioud S. & Atil F. (2015) Model-driven Java code refactoring. Computer Science and Information Systems, 12(2), pp. 375–403.

¹*ИБРАГИМ Г.К., ²УМАРОВ Т.Ф.

¹Қазақстан-Британ техникалық университеті, 050000, Алматы қ., Қазақстан

²Британ менеджмент университеті, Ташкент қ., Өзбекстан

*E-mail: g.ibragim@kbtu.kz

ДИЗАЙН МЕН КОД АРАСЫНДАҒЫ СЕМАНТИКАЛЫҚ АЛШАҚТЫҚТЫ ҚАРАСТЫРУ

Андатпа

Жобаларды басқару кезінде, бағдарламалық қосымшаны құруға әртүрлі салалардың мамандары қатысады және әр маман жобаға өз үлесін қосады. Мысалы, болашақ қосымшаның макеттерін жасаушы – UI/UX дизайнерлер мен сол прототипке сәйкес код жазатын бағдарламалаушылар. Дизайн тұжырымдамасы іске асырудың техникалық тұрғысынан, жүзеге асырылу мүмкіндіктерінен тыс болуы мүмкін. Жүзеге асыруды тек белгілі бір бағдарламалық платформа немесе бағдарламалау тілінде жинау мүмкін емес, сәйкесінше дамытуда да қиындықтар туындайды. Дизайнерлердің тұжырымдамалары мен бағдарламалық жасақтама жасаушылардың техникалық қол жетімділік мүмкіндіктері арасындағы семантикалық алшақтықты жою үшін Model driven Architecture (MDA) әдістемесі шығарылды, бұл бір жағынан бағдарламалық жасақтаманы енгізу тұжырымдамасы, екінші жағынан стандарт. Мақалада MDA және оның түрлендіру деңгейлерінің арасындағы прагматикалық семантика, түрлендіру моделі ретінде класс диаграммасы мен кодты құру үшін Java тілін таңдау себептері зерттелді.

Тірек сөздер: MDA, UML, трансформация, сәйкестендіру, семантикалық алшақтық, прагматика, класс диаграммасы, Java.

¹*ИБРАГИМ Г.К., ²УМАРОВ Т.Ф.

¹Казахстанко-Британский технический университет, 050000, г. Алматы, Казахстан

²Британский университет менеджмента, г.Ташкент, Узбекистан

*E-mail: g.ibragim@kbtu.kz

РАССМОТРЕНИЕ СЕМАНТИЧЕСКОГО РАЗРЫВА МЕЖДУ ДИЗАЙНОМ И КОДОМ

Аннотация

В управление проектами при создании программного приложения вовлечены специалисты разных предметных областей, которые делают свой вклад. Например, дизайнеры UI/UX, которые создают макеты будущего приложения, или разработчики, которые пишут код в соответствии с прототипом. Концепция дизайна может выходить за рамки возможностей ее интерпретации с технической точки зрения реализации. Реализа-

цию невозможно собрать только на одной определенной программной платформе или языке, и, соответственно, появляются проблемы в разработке. Для устранения семантического разрыва между концепциями дизайнеров и возможностями разработчиков программ в технической доступности была выпущена методология Model Driven Architecture (MDA), которая является, с одной стороны, концепцией внедрения программного обеспечения, с другой – стандартом. В статье рассматривается MDA и его уровни преобразования с определением прагматической семантики отображения, причин выбора диаграммы классов в качестве модели преобразования и языка Java для генерации кода.

Ключевые слова: MDA, UML, трансформация, сопоставление, семантический разрыв, прагматика, диаграмма классов, Java.

About authors

Ibrahim Gulnur Kuandykizi

Master's degree, Kazakh-British Technical University, 59, Tole bi str.,
050000, Almaty, Kazakhstan.

ORCID ID: 0000-0003-0974-106X

E-mail: g.ibragim@kbtu.kz

Timur Faridovich Umarov

Professor, British Management University, Tashkent, Uzbekistan.

ORCID ID: 0009-0008-0044-7159

E-mail: t.umarov@bmu-edu.uz

Авторлар туралы мәліметтер

Ибрагим Гүлнұр Қуандықызы

Магистр, Қазақстан-Британ техникалық университеті, Төле би көш., 59,
050000, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0003-0974-106X

E-mail: g.ibragim@kbtu.kz

Умаров Тимур Фаридович

Профессор, British Management University, Ташкент қ., Өзбекстан

ORCID ID: 0009-0008-0044-7159

E-mail: t.umarov@bmu-edu.uz

Информация об авторах

Ибрагим Гүлнұр Қуандықызы

Магистр, Казахстанско-Британский технический университет, ул. Толе би, 59,
050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0003-0974-106X

E-mail: g.ibragim@kbtu.kz

Умаров Тимур Фаридович

Профессор, British Management University, г. Ташкент, Узбекистан

ORCID ID: 0009-0008-0044-7159

E-mail: t.umarov@bmu-edu.uz

MATHEMATICAL SCIENCES
МАТЕМАТИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

UDC 53.072;53:681.3.
IRSTI 29.03.77

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2023-20-4-55-62>

¹*SHMYGALEVA T.A., ²SRAZHDINOVA A.A.

¹Al-Farabi Kazakh National University, 050040, Almaty, Kazakhstan

²Kazakh-British Technical University, 050000, Almaty, Kazakhstan

*E-mail: shmyg1953@mail.ru

**MODELING OF RADIATION PROCESSES
OF DEFECT FORMATION IN MATERIALS
IRRADIATED WITH IONS**

Abstract

The consumption of materials is growing every day, which means that we will increasingly have to cope with the problems of natural resources and supply. Therefore, humanity is forced to expand its resource base finding ways to use existing raw materials more efficiently, turn previously unusable substances into useful materials and also produce completely new materials from substances that are available in abundance. One of the ways to create new materials is to irradiate a substance with charged ions. The article discusses this technique based on the cascade-probabilistic method, the purpose of which is to obtain as well as the next ensuing use of cascade-probabilistic functions (CPF) considering energy losses for ions. The CPF computations were executed depending on the number of collisions and the depth of surveillance for various incident ions and samples. When computing cascade-probabilistic functions and spatial distributions of vacancy clusters patterns of conduct and finding the real resulting region in gold and silver alloys were obtained. Selection of step and boundaries for calculation were automated. Results of the calculations performed are illustrated in the form of graphs and tables.

Key words: modeling, regularity, cascade-probabilistic function, concentration, ion irradiation.

Introduction

When materials are irradiated with various particles, corresponding defects are formed. To date, ion beams are mainly used to produce heavy-duty parts and materials in the case of ion radiation exposure defects in the form of cascade regions are formed [1–3]. The presence of defects in materials significantly accelerates or slows down various processes. As a result, this affects the formation of compounds and structures, the physicochemical properties of irradiated materials change. Simultaneously, it is needful take into consideration the full “physical” picture of the interaction process considering the types of falling particles (light or heavy) [4, 5]. When computing probabilistic characteristics difficulties arise in the case of ion irradiation, problems associated with the complexity of the mathematical description of these processes which served to create mathematical models describing the phenomena of the formation of vacancy clusters in dynamics [6–10].

For computations of cascade-probabilistic functions, spectra of primary knock-on atoms, concentrations of radiation defects (CRD) in gold and silver irradiated with various incident ions, an approximation expression for the interaction cross section was selected and the conforming approximation parameters were found.

Gold is a metal and a chemical element, the atomic number of which is according to the periodic table. Gold is a financial unit in the global economy and in the field of investment as well as a jewel that is used in the jewelry industry. Silver is a metal and a chemical element whose atomic number is according to the periodic table. Silver is not only a popular metal for investment in bullion, but also one of the most useful metals in the history of mankind and in the modern world. As the best conductor of heat and electricity of all metals, silver is used in a huge number of industrial, technological, and medical/hygienic products. Silver and gold are among the most common metals used in industry; therefore, alloys based on them will be considered in this paper.

Materials and methods

The interaction cross section for ions is computed according to the Rutherford formula [11]. The approximation cross section is computed using the following formula [1]:

$$\sigma(h) = \sigma_0 \left(\frac{1}{a(E_0 - kh)} - 1 \right), \quad (1)$$

where σ_0, a, k, E_0 – approximation parameters.

With ion irradiation, the mathematical model for calculating CPF, considering energy losses, is calculated by the formula [1]:

$$\psi_n(h', h, E_0) = \frac{1}{n! \lambda_0^n} \left(\frac{E_0 - kh'}{E_0 - kh} \right)^{-l} \exp \left(\frac{h - h'}{\lambda_0} \right) \left[\frac{\ln \left(\frac{E_0 - kh'}{E_0 - kh} \right)}{ak} - (h - h') \right]^n. \quad (2)$$

To calculate $\psi_n(h', h, E_0)$ a formula convenient for computations was used [1]:

$$\psi_n(h', h, E_0) = \exp \left[\begin{aligned} & -\ln(n!) - n \ln(\lambda_0) - \frac{1}{\lambda_0 ak} \ln \left(\frac{E_0 - kh'}{E_0 - kh} \right) + \\ & + \frac{h - h'}{\lambda_0} + n \ln \left(\frac{\ln \left(\frac{E_0 - kh'}{E_0 - kh} \right)}{ak} - (h - h') \right) \end{aligned} \right]. \quad (3)$$

For ion irradiation, the following ratio is used to calculate the CRD [1]:

$$C_k(E_0, h) = \int_{E_c}^{E_{2\max}} W(E_0, E_2, h) dE_2, \quad (4)$$

$$E_{2\max} = \frac{4E_1(m_1c^2m_2c^2)}{(m_1c^2 + m_2c^2)^2}.$$

Using the Bethe-Bloch formula we find the corresponding surveillance depths, considering that $\Delta E(h) = E_0 - E_1(h)$.

The spectrum of primary knock-on atoms (SPKA) is calculated by the formula [1]:

$$W(E_0, E_2, h) = \sum_{n=n_0}^{n_1} \int_{h-k\lambda_2}^h \psi_n(h') \exp \left(-\frac{(h - h')}{\lambda_2} \right) \frac{w(E_1, E_2, h') dh'}{\lambda_1(h') \lambda_2}. \quad (5)$$

In the range of acceptable values $\psi_n(h', h, E_0)$ n_0, n_1 are the minimum and maximum values of the number of collisions.

Computations of SPKA in the elementary act are executed according to the formula [1]:

$$\omega(E_1, E_2) = \frac{d\sigma(E_1, E_2)}{dE_2} \cdot \frac{1}{\sigma(E_1)}. \quad (6)$$

Main provisions

The aim of the study is to optimize the algorithms for calculating the probabilistic characteristics of the processes of radiation defect formation under ion irradiation. The object of research is metals, namely gold and silver. The subject of the study is cascade-probabilistic functions depending on the number of interactions and the depth of penetration of particles. The obtained mathematical models can be used in the future for numerical calculations of the spectra of primary knock-on atoms and the concentration of radiation defects in other metals and semiconductors, as well as in the study of similar phenomena. The obtained physical models and calculation results allow a deeper understanding of the processes of radiation defect formation in condensed media and can be used in their work by experimenters.

Literature review

It should be noted that many works have been devoted to the problems of radiation defect formation during the interaction of ions with matter, for example [2–10]. Energy losses due to ionization and excitation of the electron shells of the atoms of the medium were not considered, so the simplest CPF was used. When charged particles interact with matter, continuous energy losses occur along the path of their movement. These losses lead to a strong dependence of both the energy spectra of the incoming particles themselves and the primary knocked-out atoms (PKA) on the penetration depth. The range of interaction for the formation of PKA significantly depends on energy, and therefore it became necessary to obtain physical and mathematical models that consider the real dependences of various parameters of the elementary act on energy, depth. Previously, in most cases, the simplest cascade probability function (CPF) was mainly used for specific calculations, this is not always justified, since the interaction path depends on the energy [11]. It is necessary to investigate the behavior of the obtained CPF considering the energy losses for ions, to prove the properties that they should possess both from a physical and mathematical point of view, to develop calculation algorithms and perform calculations of CPF depending on the number of interactions and the depth of penetration of particles, and the concentration of radiation defects.

Results and discussions

To calculate $\psi_n(h', h, E_0)$ it is needful to calculate the interaction cross-section according to the Rutherford formula [11], find the surveillance depths from the tables of parameters of the spatial distribution of ion-implanted impurities [12] and determine the approximate parameters calculated by the formula (1), which are also included in the expressions for the PKA spectra, concentrations of radiation defects. The results of the selection of approximations are shown in figure 1. The approximation parameters and the correlation index for indium in gold at various values of E_0 are shown in table 1 (p. 58).

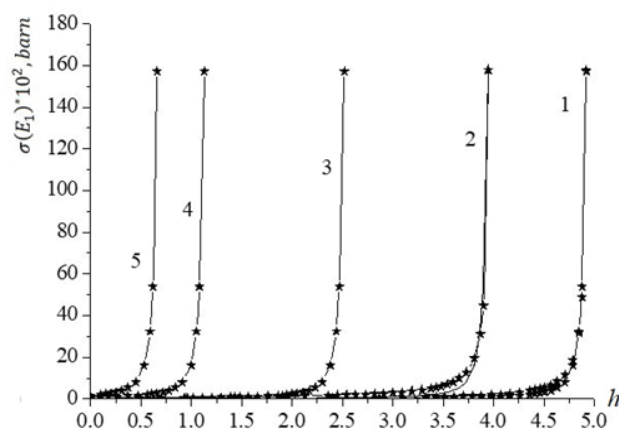


Figure 1 – Approximation of the modified $\psi(h', h, E_0)$ cross section for indium in gold:
 $E_0 = 1000$ (1), 800 (2), 500 (3), 200 (4), 100 (5) keV . Curves – approximation lines,
asterisks – calculated data of the section dependence on h

Table 1 – Approximation coefficients for indium in gold

E_0	$\sigma_0 \cdot 10^9$	α	E'_0	k	η	χ^2
1000	53.53353	0.23606	0.00599	8.57545	0.99667	33292.43045
800	102.8195	0.95274	0.00698	0.5697	0.99126	94088.98762
500	128.15188	0.52176	0.0222	143.41385	0.99095	109625.1123
200	163.07921	0.1802	0.05376	2524.30618	0.99641	66123.10731
100	129.54471	0.04733	0.12437	12034.90155	0.99925	20334.99881

Next, computations were executed $\psi(h', h, E_0)$, the areas of finding the result were revealed, the patterns that emerged when determining this region were set. Figure 2 and table 2 illustrate the results of the calculations.

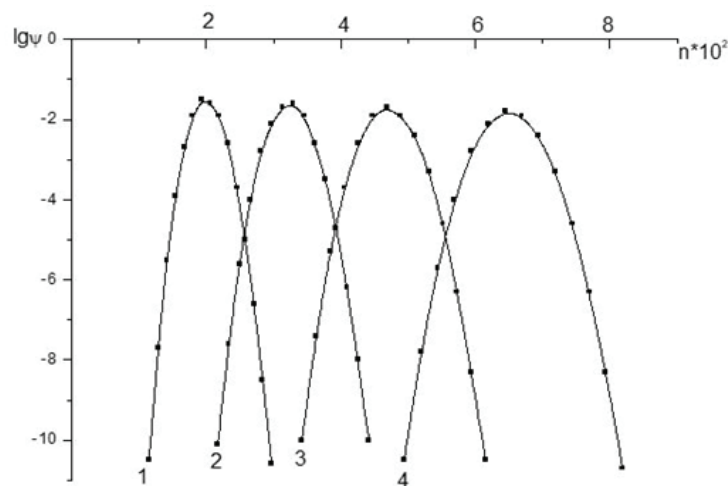


Figure 2 – Addition of $E_0 = 100 \text{ keV}$ on for nitrogen in gold at
 $h = 0,5 \cdot 10^{-2}; 0,9 \cdot 10^{-2}; 0,13 \cdot 10^{-1}; 0,17 \cdot 10^{-1} \text{ cm}$ and $E_0 = 100 \text{ keV}$

Table 2 – Addition of the percentage of displacement of the left and right boundaries of the resulting region on the surveillance depth for silver in gold at $E_0 = 1000 \text{ keV}$

$h \cdot 10^6, \text{cm}$	$\frac{h}{\lambda}, \text{cm}$	$C_3, \%$	$C_3, \%$	N_h	$C_3, \%$
10	8682	-7,79	21	100	13,2
15	15483	-15,89	25	150	9,1
20	25015	-22,579	29	225	6,42
25	38912	-27,67	32	325	4,33
30	60433	-30,38	32,8	600	2,42
35	97168	-29,37	30,5	1300	1,13
40	171765	-22,835	23,1	5500	0,265
45	396151	-11,26007	11,2627	500000	0,00263

The results of computations of the concentration of radiation defects are illustrated in table 3 (p. 59).

After the calculations $\psi(h', h, E_0)$ depending on the number of collisions and the depth of particles surveillance, the regularities of the behavior of the step and the resulting region for computation were identified.

Let's pick out the patterns when choosing step:

1. For small values of the atomic mass A_r of the incident particle and small values of the depths, the step is significantly small (approximately in the range of 10–20) with an increase in the value of the surveillance depth, the step begins to increase.

2. Increasing the A_r value of the incident particle it also leads to an increase in the step.
3. If the A_r value of the incident particle is large and the sample is small, then the step begins to increase significantly.

Table 3 – Boundaries of the CRD determination area for titanium in silver at
 $E_c = 50 \text{ keV}, E_0 = 1000 \text{ keV}$

$h * 10^5, \text{cm}$	C_k, cm	E_1, keV	n_0	n_1	t
0,1	31762,9	1000	6	142	7"
3	34925,6	900	1559	2331	32"
6,1	39102,9	800	3617	4748	72"
9,1	44196,7	700	5930	7354	2'
12,2	51079,3	600	8731	10442	3'
15,3	60469,0	500	12092	14092	5'
18,4	74001,0	400	16272	18584	7'
19,9	82838,5	350	18722	21199	9'
21,5	95016,9	300	21778	24446	11'
22,1	100401,3	280	23076	25822	12'
22,7	106368,0	260	24477	27304	13'
23,3	112991,09	240	25996	28912	15'
23,9	120342,19	220	27661	30667	16'
24,4	126202,89	200	29176	32263	17'
25,0	134643,69	180	31183	34375	19'
25,6	143506,49	160	33445	36753	22'
26,2	152073,69	140	36036	39471	24'
26,7	153675,79	120	38525	42078	26'
27,3	151251,19	100	42057	45774	29'
27,9	124648,19	80	46458	50371	32'
28,1	83424,29	70	48202	52190	34'
28,4	13628,49	60	51186	55300	38'
28,7	0	50	54763	59027	43'

When calculating $\psi(h', h, E_0)$ depending on h , the regularities of the step behavior are revealed:

1. With a small value of A_r of the incident particle the step is significantly small, an increase in the value of the surveillance depth leads to a growth in the step at the end of the mileage it is significantly strong.
2. Reducing the particle E_0 will lead to a growth in the step, provided that the value of the surveillance depths does not change.
3. As the A_r value of the incident particle increases, the step begins to grow gradually and then very sharply, provided that the value of the surveillance depths does not change.
4. The dependence of the step on A_r can be represented as an increasing curve.

Patterns of conduct of the resulting domain for $\psi(h', h, E_0)$ calculated depending on n :

1. The maximum value of $\psi(h', h, E_0)$ is shifted to the region of shallow depths concerning to $\frac{h}{\lambda}$ when the value of A_r of the incident particle is large and at large depths the result is in a narrow region.
2. The most limited resulting region is turned out with a large value of A_r of the incident particle and a small value of the sample at the end of the mileage.
3. As the value A_r of the incident particle increases, the resulting finding area narrows and moves to the region of shallow depths concerning to $\frac{h}{\lambda}$.

Finding the resulting CRD region under ion irradiation revealed the following patterns:

1. The values of the CRD at the same depth of surveillance are significantly reduced.

2. Depending on h , the values of the CRD increase.
3. If the E_0 of the primary particle increases at the same value of threshold energy E_c and h then the values of the CRD begin to decrease.
4. Depending on E_c the boundaries of the resulting region remain constant provided that E and h remain unchanged.
5. The boundaries of the resulting CRD region, depending on h , increase and move to the region of great depths and the interval of boundary changes in the interval ranges from 0 to 5000.
6. The counting time t increases significantly for heavy incident particles and light samples.

Conclusion

In this paper, the expressions of the CPF are obtained, considering the energy losses for ions in an analytical form. The approximation expression is selected, and the approximation parameters are chosen so that the correlation index is close to one. Computation algorithms have been developed and computation of cascade probabilistic functions has been optimized, considering energy losses depending on the number of interactions and the depth of surveillance particles, the concentration of vacancy clusters under ion irradiation. Computations were executed and patterns of conduct of the resulting region of the CPF and the step for computation were found depending on the number of collisions and the depth of surveillance particles. It is shown that the resulting region is significantly affected by the initial energy of the primary particle, the surveillance depth, the atomic number of the incident particle and the sample. Comparisons of the computation results by time before and after optimization are performed. The computations were executed using a software package developed in Microsoft Visual Studio 2017 and the database was created in MS SQL Server 2019.

REFERENCES

- 1 Boos E.G., Kupchishin A.A., Kupchishin A.I., Shmygalev E.V., Shmygaleva T.A. (2015) Kaskadno-veroyatnostnyj metod, reshenie radiacionno-fizicheskikh zadach, uravnenij Bol'mana. Svyaz' s cepyami Markova. Kaskadno-veroyatnostnyj metod, reshenie radiacionno-fizicheskikh zadach, uravnenij Bol'mana. Svyaz' s cepyami Markova. Kaskadno-veroyatnostnyj metod, reshenie radiacionno-fizicheskikh zadach, uravnenij Bol'mana. Svyaz' s cepyami Markova. Almaty: KazNPU im. Abaya, NII NHT i M KazNU im. al'-Farabi, 388 p.
- 2 Dubovichenko S.B., Dzhazairov-Kakhramanov A.V., Shmygaleva T.A. (2021) Reaction Rate of Radiative p 13N Capture. Russian Physics Journal, vol. 64, no 6, pp. 961–969.
- 3 Komarov F.F., Shmygaleva T.A., Akanbay, N., Shafii S.A., Kumatbayeva A.A. (2019) Optimization calculation algorithms on cascade and probabilistic functions and radiation defects concentration at the ionic radiation. International Journal of Mathematics and Physics, vol. 10, no 1, pp. 88–98.
- 4 Shmygaleva T.A., Kupchishin A.I., Kupchishin, A.A., Shafii C.A. (2019) Computer simulation of the energy spectra of PKA in materials irradiated by protons in the framework of the Cascade- Probabilistic method. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 510, no 1, (012024).
- 5 Komarov F.F., Konstantinov S.V., Zuk J., ...Chizhov I.V., Zaikov V.A. (2022) Structure and Mechanical Properties of TiAlN Coatings under High-Temperature Ar+ Ion Irradiation. Acta Physica Polonica A, vol. 142, no 6, pp. 690–696.
- 6 Fan J.Y., Huang J.C. and Pan J.Y. (2019) An adaptive multi-step Levenberg-Marquardt method, Journal of Scientific Computing, vol. 78, pp. 531–548.
- 7 Shmygaleva T.A., Srazhdinova A.A., Shafii, S. (2021) Computer-based modeling of radiation defect parameters in materials irradiated with charged particles. Journal of Physics: Conference Series, vol. 2032, no 1, (012050).
- 8 Komarov F.F., Shmygaleva T.A., Kumatbayeva A.A., Srazhdinova A.A. (2020) Computer simulation of vacancy clusters concentration in titanium irradiated with ions. International Journal of Mathematics and Physics, vol. 11, no 2, pp. 20–26.
- 9 Wallace J. B., Bayu A L. B. and Kucheyev S. O. (2019) Radiation defect dynamics in solids studied by pulsed ion beams. Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res. Section B: Beam Inter with Mat. and Atoms, vol. 460, pp. 125–127.
- 10 Velisa G., Wendler E., Wang L.L., Zhang Y. and Weber W.J. (2019) Ion mass dependence of irradiation-induced damage accumulation in KTaO3. Journal of Mat. Science, vol. 54, pp. 149–158.

11 Boss E.G. and Kupchishin A.I. (1988) Reshenie fizicheskikh zadach kaskadno-veroyatnostnym metodom. Alma-Ata: Nauka.

12 Komarov F.F. and Kumahov M.A. (1980) Tablicy parametrov prostranstvennogo raspredeleniya ionno-implantirovannykh primesej. Minsk: izd-vo BGU, im. V.I. Lenina.

^{1*}ШМЫГАЛЕВА Т.А., ²СРАЖДИНОВА А.А.

¹әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, 050040, Алматы қ., Қазақстан

²Қазақ-Британ техникалық университеті, 050000, Алматы қ., Қазақстан

*E-mail: shmyg1953@mail.ru

ИОНДАРМЕН СӘУЛЕЛЕНГЕН МАТЕРИАЛДАРДАҒЫ АҚАУДЫҢ ПАЙДА БОЛУЫНЫҢ РАДИАЦИЯЛЫҚ ПРОЦЕСТЕРІН МОДЕЛЬДЕУ

Андатпа

Материалдарды тұтыну күн сайын артып келеді, бұл өз кезегінде табиғи ресурстар және жабдықтау мәселелерімен жиі күресудің пайда болуын білдіреді. Сондықтан адамзат қолданыстағы шикізатты тиімді пайдалану, бұрын жарамсыз болған заттарды пайдалы материалдарға айналдыру мен қолданылған заттардан мүлдем жаңа материалдар шығару жолдарын табу арқылы өзінің ресурстық базасын кеңейтуге мәжбүр. Жаңа материалдарды жасау тәсілдерінің бірі – затты зарядталған иондармен сәулелендіру. Мақалада иондар үшін энергия шығынын ескере отырып, каскадты ықтималдық функцияларын (КЫФ) алу және пайдалану мақсатындағы каскадты ықтималдық әдісіне негізделген тәсіл қарастырылады. КЫФ есептеулері соқтығыстардың санына және әртүрлі құлаған иондар мен үлгілердің бақылау тереңдігіне байланысты жүргізілді. Каскадты ықтималдық функцияларын және бос кластерлердің кеңістіктікте таралуын есептеу кезінде алтын мен күміс қорытпаларындағы нақты нәтиже аймағын табу мен метал қасиеттерінің заңдылықтары алынды. Есептеу үшін қадамдар мен шекараларды таңдау автоматтандырылған. Орындалған есептеулердің нәтижелері графиктер мен кестелер түрінде ұсынылған.

Тірек сөздер: модельдеу, заңдылық, каскадты ықтималдық функциясы, концентрация, иондық сәулелену.

^{1*}ШМЫГАЛЕВА Т.А., ²СРАЖДИНОВА А.А.

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, 050040, г. Алматы, Казахстан

²Казахстанско-Британский технический университет, 050000, г. Алматы, Казахстан

*E-mail: shmyg1953@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В МАТЕРИАЛАХ, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ

Аннотация

Потребление материалов растет с каждым днем, а это значит, что нам все чаще придется справляться с проблемами природных ресурсов и снабжения. Поэтому человечество вынуждено расширять свою ресурсную базу, находя способы более эффективно использовать существующее сырье, превращать ранее непригодные вещества в полезные материалы, а также производить совершенно новые материалы из веществ, которые доступны в изобилии. Одним из способов создания новых материалов является облучение вещества заряженными ионами. В статье рассматривается данный способ, основанный на каскадно-вероятностном методе, цель которого состоит в получении, а также последующем использовании каскадно-вероятностных функций (КВФ) с учетом потерь энергии для ионов. Проведены расчеты КВФ в зависимости от количества соударений и глубины наблюдения для различных падающих ионов и образцов. При расчете каскадно-вероятностных функций и пространственных распределений вакансионных кластеров получены закономерности поведения и нахождения реальной результирующей области в сплавах из золота и серебра. Автоматизирован подбор шага и границ для расчета. Результаты выполненных вычислений проиллюстрированы в виде графиков и таблиц.

Ключевые слова: моделирование, закономерность, каскадно-вероятностная функция, концентрация, ионное облучение.

Information about authors

Shmygaleva Tatiana Alexandrovna

Doctor of Technical Sciences, Professor, Al-Farabi Kazakh National University,
71, Al-Farabi street, 050040, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0001-6750-253X

E-mail: shmyg1953@mail.ru

Srazhdinova Aziza Abdulkерimovna (corresponding author)

Master of Technical Sciences, Kazakh-British Technical University, 59, Tole bi street,
050000, Almaty, Kazakhstan.

ORCID ID: 0000-0003-1963-0005

E-mail: aziza0167@gmail.com

Авторлар туралы мәліметтер

Шмыгалева Татьяна Александровна

Техника ғылымдарының докторы, профессор, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық
университеті, әл-Фараби даң., 71, 050040, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0001-6750-253X

E-mail: shmyg1953@mail.ru

Сраждинова Азиза Абдулкеримовна (корреспонденция авторы)

Техника ғылымдарының магистрі, Қазақстан-Британ техникалық университеті,
Төле би көш., 59, 050000, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0003-1963-0005

E-mail: aziza0167@gmail.com

Информация об авторах

Шмыгалева Татьяна Александровна

Доктор технических наук, профессор, Казахский национальный университет
имени аль-Фараби, ул. Аль-Фараби, 71, 050040, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0001-6750-253X

E-mail: shmyg1953@mail.ru

Сраждинова Азиза Абдулкеримовна (автор для корреспонденции)

Магистр технических наук, Казахстанско-Британский технический университет,
ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан.

ORCID ID: 0000-0003-1963-0005

E-mail: aziza0167@gmail.com

UDC 51-73
IRSTI 27.35.25

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2023-20-4-63-71>

^{1,2}*SHIYAPOV K.M., ^{1,2}BAISHEMIROV ZH.D.,
^{1,2}ABDIRAMANOV ZH.A., ^{1,2}ZHANBYRBAYEV A.B.

¹Abai Kazakh National Pedagogical University,
050010, Almaty, Kazakhstan

² Institute of Information and Computational Technologies,
050010, Almaty, Kazakhstan

*E-mail: kadrzhan2019@gmail.com

STUDYING THE FEATURES OF SIMULATING FLUID MOVEMENT IN POROUS MEDIA

Abstract

The study of fluid flow in porous media, differing from traditional pipe flow is crucial for developing efficient methods in oil extraction and minerals, considering the challenges associated with ambiguous flows and diverse porous structures. This paper addresses the complexity of investigating fluid flow in porous media, a phenomenon significantly distinct from fluid movement in pipes. Emphasis is placed on the absence of clearly defined flow tubes in porous media, complicating measurements, and analysis. The study introduces a new approach incorporating both analytical and numerical methods, applied to various porous media. The research proposes a mathematical model based on laws and correlations to describe systems, including concepts such as permeability, flow velocity potential, characteristics of single-phase and multiphase systems, and fluid compressibility. Special attention is given to the characteristics of oil reservoirs, determined based on fluid properties in the reservoir, including porosity and saturation, as assessed by engineers. Numerical results represent fluid displacement in a flat channel and a one-dimensional problem in a porous medium, performed using finite-difference approximation of equations with an explicit scheme. The numerical results of this model were implemented in the Matlab software.

Key words: mathematical modeling, porous media, filtration, Darcy's law, permeability, fluid flow.

Introduction

Studying fluid flow in porous media is a complex phenomenon that cannot be described as simply as the movement of fluid in pipes. Unlike the ease of measuring the length and diameter of a pipe to determine its conductivity based on pressure, the flow in porous media has its peculiarities. A distinctive feature is the absence of clearly defined flow tubes with measurable cross-sections.

Research on fluid movement in porous media has evolved in two directions: analytical and experimental [1–5]. In works [6–8], the behavior of fluids in porous media ranging from sand to crushed glass was analyzed, and based on these studies, laws, and correlational dependencies were developed for the analytical description of such systems. The study presented in [9] explores the flow of liquid in heterogeneous porous media, which holds fundamental significance for the operation of many systems and applications. Such environments typically exhibit heterogeneity in the form, size, connectivity, and surface structure of pores on small scales, as well as spatial changes in porosity, permeability, and elastic moduli on larger scales.

The research emphasizes that any attempt to model flow in porous media requires the ability to handle large volumes of data used to calculate the spatial distribution of pressure, fluid velocity, etc., throughout the pore space. The development of efficient prediction algorithms has always been an active area of research. In the study described in [10], the effects of stress-dependent deformation of pores on the properties of multiphase flow in porous media are discussed. Key parameters characterizing multiphase liquid flow in porous media for various natural and industrial applications are relative permeability and capillary pressure.

Literature review

The study shows that while the influence of porous media deformation on single-phase liquid flow is well-studied, the dependence of flow on stress in multiphase systems is not fully explored. Concepts such as permeability, flow velocity potential, characteristics of single-phase and multiphase systems, and fluid compressibility are used to describe flow characteristics in porous media [11-13]. Characteristics of oil reservoirs are determined based on fluid properties in the reservoir, with assessments of reservoir porosity and saturation conducted by engineers.

Fundamental principles

One of the key tasks is to determine the rock's ability to conduct fluid, that is, to assess its permeability. Permeability is a petrophysical constant determined by Darcy's law [14-16].

$$V_s = -\frac{k}{\mu\nu} \left(\nu \frac{\partial p}{\partial s} + \frac{\partial z}{\partial s} \right) \quad (1)$$

where (V_s) is the mass flow rate and permeability for a homogeneous fluid, (μ) is a dynamic viscosity, (p) is a pressure, (z) is a vertical coordinate, (ν) is a specific volume, and (ρ) fluid density – all these parameters play a crucial role in characterizing the process. Permeability in porous media can be determined using equation (1), and the sum $\left(\nu \frac{\partial p}{\partial s} + \frac{\partial z}{\partial s} \right)$ characterizes the fluid filtration velocity potential. Then equation (1) can be expressed in the following form:

$$V_s = -\frac{k}{\mu\nu} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial s} \quad (2)$$

During studies conducted by Darcy [17-19], fundamental assumptions were established, delimiting the application domain of his renowned law. Firstly, it assumes that the fluid is a homogeneous substance existing in a single phase. This significantly simplifies the modeling process by excluding the need to account for more complex characteristics of multiphase fluids. Furthermore, it assumes the absence of chemical interaction between the fluid and its surrounding environment, implying their chemical inertness. It is also asserted that the permeability of the medium is a constant, unaffected by the properties of the liquid, such as its type, temperature, pressure, or spatial distribution, simplifying computational operations. It is essential to note that in the Darcy model, flow is considered laminar, excluding more complex turbulent flows from consideration. Additionally, the electrokinetic effect arising from potential differences during fluid movement under pressure through a porous capillary structure is not considered [18-21]. Finally, the Klinkenberg effect, describing permeability changes induced by the presence of gas phases in porous materials, is ignored within this model. These assumptions establish conditions under which Darcy's law provides the most accurate description of fluid behavior in porous media. However, it is important to consider that adapting or supplementing the Darcy model may be necessary for a more precise description of changing physical conditions [22].

The unit of permeability is called a Darcy (D), and its dimension can be defined as follows:

$$V_s = -\frac{k}{\mu\nu} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial s} \quad (3)$$

If we express the parameters of the Darcy equation in terms of mass M , length L , and time T :

$$V_s = \frac{L}{T}; \rho = \frac{M}{L^3}; \frac{\partial p}{\partial s} = \frac{M}{L^2 T^2}; \mu = \frac{M}{L T}; g = \frac{L}{T^2} \quad (4)$$

Let's $\frac{k}{L T}$ correspond to $\frac{L}{T}$, then $k = L^2$

$$\frac{k}{LT} = \frac{L^2}{LT} = \frac{L}{T} \quad (5)$$

Therefore, the permeability unit is equivalent to the square of the length dimension.

In fluid dynamics, two distinct types of processes can be identified: fast and slow. This division is based on the speed at which changes occur in the fluid state. Fast processes are characterized by short-term, intense changes, such as instantaneous flows or surges. Slow processes occur more smoothly and persistently, such as the gradual movement of a mass of liquid or constant circulation flows. By separating these processes, it is possible to simplify the study of fluid dynamics, especially in complex systems. Applying such a division allows for the derivation of the averaged motion equation, which represents an averaged model of fluid dynamics, excluding short-term fluctuations and focusing on larger and more constant flows. Such divisions are due to the fact that the characteristic hydrodynamic times for fast and slow processes differ significantly (6). The characteristic hydrodynamic time is the time scale over which significant changes in fluid flow occur. Fast processes have short characteristic times, whereas slow processes occupy significantly longer periods. This difference allows for the analytical separation of fast oscillations from slower, systematic changes in fluid motion.

$$\omega \gg \frac{\nu}{L^2} \quad (6)$$

To describe the dynamic processes of fluid in porous media at the microscale, linear Stokes equations are applied, intended for a fluid that is incompressible and possesses zero viscosity. Since the filtration process is very slow and in dimensionless variables, the reduced viscosity is of the order ε_0^2 , where ε_0 is the average dimensionless pore diameter, and when averaging the obtained microscopic model, the reduced viscosity together with the average pore size tends to zero. Dissolving soil with an active admixture induces flow into the pore space. For the chosen system of dynamic equations, such a boundary condition is natural. However, for the Stokes equations of viscous incompressible fluid, this boundary condition leads to practically insurmountable mathematical and computational difficulties.

Materials and methods

The motion of two distinct viscous liquids, which do not mix and have different constant densities, inside a capillary occurs under the influence of external pressure: $\Omega = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2 : -1 < x < 1, -h < y < h\}$. The moving boundary separates the zones and is filled with various liquids. Next, the flow patterns can be described by the following equations: Stokes (7), continuity (8), and state (9):

$$\alpha_p \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = \operatorname{div} \mathbf{P} + \rho \vec{e}, \quad (7)$$

$$\frac{1}{\alpha_p} \frac{\partial p}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{u} = 0, \quad (8)$$

$$\mathbf{P} = \alpha_\mu D(x, \vec{u}) - p \mathbf{E}. \quad (9)$$

As for the boundary conditions they are defined as:

$$S^\pm : \mathbf{P} \vec{n} = -p_0 \vec{n}, \quad S^0 : \vec{u} = 0 \quad (10)$$

At the boundaries of «inlet» and «outlet», boundary conditions are specified

($S^- = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2 : x_1 = -1, -h < x_2 < h\} \subset S$, $S^+ = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2 : x_1 = 1, -h < x_2 < h\} \subset S$ respectively):

$$\mathbf{P}(\mathbf{u}, p) \cdot \mathbf{n} = -p^0 \mathbf{n}, \quad \mathbf{x} \in S^\pm. \quad (11)$$

here $\mathbf{P}(\mathbf{u}, p) = 2\mu\mathbf{D}(\mathbf{u}) - p\mathbf{I}$, $\mathbf{D}(\mathbf{u}) = \frac{1}{2}(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^*)$,

where $\mathbf{I}$ is the unit tensor, $p^0(\mathbf{x})$ is a given linear function, $\mathbf{n} = (1, 0)$ is the unit vector normal to $S^\pm$.

Finally, the initial conditions are described as:

$$\vec{u}|_{t=0} = u^*, \quad p|_{t=0} = p^*$$

At the initial stage of the time interval, when, the considered density is represented as a function with piecewise-constant values. This assumption is based on the representation of density by two separate positive quantities, each corresponding to different phases of the flow:

$$\rho(\mathbf{x}, 0) = \rho_0(\mathbf{x}) = \begin{cases} \rho^+, & \mathbf{x} \in \Omega^+(0), \\ \rho^-, & \mathbf{x} \in \Omega^-(0), \end{cases} \quad \rho^\pm = \text{const}, \quad \rho^- > \rho^+ > 0 \quad (12)$$

In this case, the initial conditions for density can be represented as a surface $\Gamma(0) = \Gamma_0$, separating two regions $\Omega^\pm(0)$, initially filled with different liquids. For simplicity, let's assume that $\Gamma_0 = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2 : x_1 = 0, -h < x_2 < h\}$. The task is to determine $\mathbf{u}$, p and $\rho(\mathbf{x}, t)$ densities according to equations (7) - (9), which correspond to the initial and boundary conditions. The problem has a nonlinear nature since equation (9) includes an additional term $\mathbf{u} \cdot \nabla \rho$. To facilitate the analysis, we will switch to uniform boundary conditions by introducing a new parameter $p \rightarrow p - p^0(\mathbf{x})$:

$$\mu\Delta\mathbf{u} - \nabla p = \mathbf{f} \equiv \nabla p^0 - g\rho\mathbf{e}, \quad (13)$$

$$\mathbf{P}(\mathbf{u}, p) \cdot \mathbf{n} = 0, \quad \mathbf{x} \in S^\pm. \quad (14)$$

The motion defined by these equations supports the continuous coexistence of two distinct zones $\Omega^\pm(t)$, where each zone includes one of the specified liquids. These zones are always separated by an unchanging dynamic boundary. Therefore, the considered process reduces to determining the parameters $\mathbf{u}$, p and their influence on the displacement of this boundary $\Gamma(t)$.

Results and Discussion

Numerical calculations were performed to simulate the displacement of one liquid by another in a flat channel, and a detailed study and formulation of a one-dimensional problem in a porous medium were conducted. A Finite-difference approximation of the equations using an explicit scheme was implemented, allowing for an accurate modeling of the physical processes in the given environment. Calculations for the one-dimensional problem were carried out using the Matlab software environment, ensuring the required precision and clarity of results. One of the key findings is presented below, showing the dynamic change in the free boundary in a unitary capillary (Figure 1, p. 67). This boundary represents the difference between the liquids inside the channel or pore, significantly influenced by the physicochemical characteristics of the considered liquids in the porous medium.

Throughout the study, we conducted a comprehensive analysis of fluid flow in porous media, relying on both analytical and numerical methods. Modeling flow in porous media, especially in the context of oil reservoirs, requires consideration of numerous variables and intricate interdependencies. The results confirm that traditional approaches based on Darcy's law may be insufficient to describe all aspects of such complex systems, particularly in the presence of multiphase flows and changes in fluid properties under the influence of pressure and temperature. The proposed mathematical model incorporates concepts such as permeability, flow velocity potential, characteristics of single-phase and multiphase systems, as well as fluid compressibility. These elements were integrated within the developed numerical scheme implemented in the Matlab software environment. It is essential to note that our findings underscore the need for further research in this field. Specifically, issues related to pore deformation, and the impact of stress on multiphase systems remain open and require deeper

analysis. The search for more efficient computational methods and algorithms for the analysis and modeling of flows in porous media, especially under conditions of high heterogeneity and structural complexity, remains a pertinent aspect.

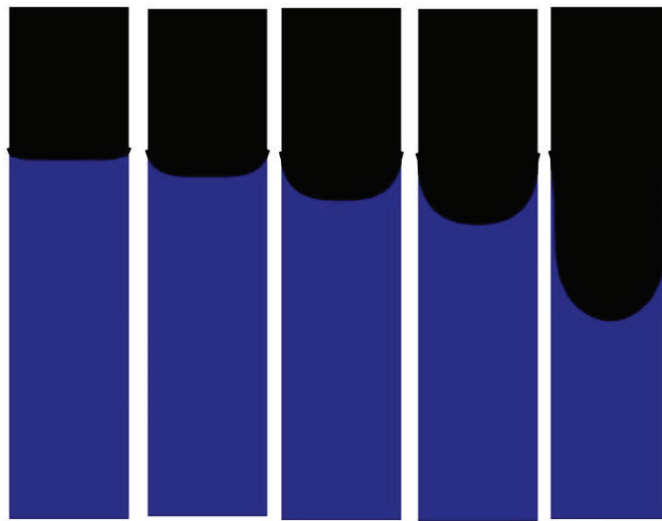


Figure 1 – Dynamics of a free boundary in a single capillary

Conclusion

This work proposes an approach that involves understanding the fundamental processes occurring in porous media, serving as a foundation for the development of specific new approaches to oil extraction and the modeling of processes such as mineral leaching. However, it emphasizes the importance of ongoing research in this field to enhance existing technologies and develop new ones.

Acknowledgments

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP09261179).

REFERENCES

- 1 Gymora-Figueroa P., Camacho-Velázquez R.G., (2019) Guadarrama-Cetina, J. and Guerrero-Sarabia, I.T. Oil emulsions in naturally fractured Porous Media. *Petroleum*: vol. 5(3), pp. 215–226, <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2018.12.004>.
- 2 Feldmann F., Hagemann B., Ganzer L. et al. (2016) Numerical simulation of hydrodynamic and gas mixing processes in underground hydrogen storages. *Environ Earth Sci* 75, 1165, <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5948-z>.
- 3 Hagemann B., Rasoulzadeh M., Panfilov M. et al. (2016) Hydrogenization of underground storage of natural gas. *Comput Geosci* 20, pp. 595–606, <https://doi.org/10.1007/s10596-015-9515-6>.
- 4 Panfilov M., Fourar M. (2006) Physical splitting of nonlinear effects in high-velocity stable flow through porous media. *Advances in Water Resources*, vol. 29(1), pp. 30–41, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.05.002>.
- 5 Kim D., Yeo I.W. (2022) Flow visualization of transition from linear to nonlinear flow regimes in rock fractures. *Water Resources Research*, vol. 58(11), <https://doi.org/10.1029/2022WR032088>.
- 6 Salih Ozen Unverdi, Gretar Tryggvason (1992) A front-tracking method for viscous, incompressible, multi-fluid flows // *Journal of Computational Physics*, vol.100(1), pp. 25–37.
- 7 Lions J.L. (1969) *Quelques methodes de resolution des problemes aux limites non lineaires* Dunod, Gauthier-Villars, Paris.
- 8 Ladyzhenskaya O.A. (1969) *The mathematical Theory of Viscous Incompressible Flow*, Gordon and Breach, New York.

- 9 Kamrava S., Sahimi M. and Tahmasebi P. (2021) Simulating fluid flow in complex porous materials by integrating the governing equations with deep-layered machines. *npj Comput Mater* 7, 127, <https://doi.org/10.1038/s41524-021-00598-2>.
- 10 Haghi A.H., Chalaturnyk R. and Talman S. (2019) Stress-Dependent Pore Deformation Effects on Multiphase Flow Properties of Porous Media. *Sci Rep* 9, 15004, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51263-0>.
- 11 Kirk W. A., Sims B. (2001) *Handbook of Metric Fixed Point Theory*. Kluwer Academic, London.
- 12 Nguetseng G. (1989) A general convergence result for a functional related to the theory of homogenization. *SIAM J. Math. Anal.* 20, pp. 608 – 623.
- 13 Siegel M., Caffish R.E., Howison S. (2004) Global existence, singular solutions, and ill-posedness for the Muskat problem, *Comm. on Pure and Appl. Math.* LVII, pp. 1–38.
- 14 Mahdi D.S., Al-Khdheawi E.A., Yuan Y. et al. (2021) Hydrogen underground storage efficiency in a heterogeneous sandstone reservoir. *Advances in Geo-Energy Research*, vol. 5(4): 437–443, <https://doi.org/10.46690/ager.2021.04.08>.
- 15 Riaz A., Hesse M., Tchelepi H. and Orr F. (2006) Onset of convection in a gravitationally unstable diffusive boundary layer in porous media. *Journal of Fluid Mechanics*, 548, pp. 87–111, <https://doi.org/10.1017/S0022112005007494>.
- 16 Panfilov M.B., Baishemirov Z.D. and Berdyshev A.S. (2020) Macroscopic Model of Two-Phase Compressible Flow in Double Porosity Media. *Fluid. Dyn.*, vol. 55, pp. 936–951, <https://doi.org/10.1134/S001546282007006X>.
- 17 Panfilov M. Underground and pipeline hydrogen storage (2015) *Compendium of Hydrogen Energy: Hydrogen Storage, Distribution and Infrastructure*: vol. 2, pp. 91–115, <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-362-1.00004-3>.
- 18 Van Odyck Daniel E.A., Bell John B., Monmont Franck and Nikiforakis Nikolaos (2009) The mathematical structure of multiphase thermal models of flow in porous media *Proc. R. Soc. A*. 465:523–549, <https://doi.org/10.1098/rspa.2008.0268>.
- 19 Zeng Z. and Grigg R. (2006) A criterion for non-Darcy flow in porous media, *Transport Porous Med.*, 63, pp. 57–69, <https://doi.org/10.1007/s11242-005-2720-3>.
- 20 Scheidegger A. E. (1958) The physics of flow through porous media, *Soil Sci.*, 86, pp. 355–362, <https://doi.org/10.3138/9781487583750>.
- 21 Clement C. (2009) Finite volume scheme for two-phase flows in heterogeneous porous media involving capillary pressure discontinuities *ESAJM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis*, vol. 43, pp. 973–1001.
- 22 Shiyapov K. (2015) The oil-to-water displacement in porous media with and without surface tension: classical models and 1d numerical upscaling. *Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference “Problems of Innovative Development of the Oil and Gas Industry”*, Almaty, KBTU, pp. 365–369.

^{1,2*}ШИЯПОВ К.М., ^{1,2}БАЙШЕМИРОВ Ж.Д.,

^{1,2}АБДИРАМАНОВ Ж.А., ^{1,2}ЖАНБЫРБАЕВ А.Б.

¹Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті,

050010, Алматы қ., Қазақстан

²ҚР ҒЖБМ ҒК Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институты,

050010, Алматы қ., Қазақстан

*E-mail: kadrzhan2019@gmail.com

КЕУЕКТІ ОРТАДА СҰЙЫҚ ҚОЗҒАЛЫСЫН МОДЕЛЬДЕУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Андатпа

Құбырлардағы дәстүрлі ағыннан ерекшеленетін кеуекті ортадағы сұйықтық ағынын зерттеу дұрыс анықталмаған ағындармен және кеуекті құрылымдардың әртүрлілігімен байланысты қиындықтарды ескере отырып, мұнайды және басқа да пайдалы қазбалар өндірудің тиімді әдістерін әзірлеудің кілті. Бұл жұмыста кеуекті ортадағы сұйықтық ағынын зерттеудің күрделілігі қарастырылады, бұл құбылыс құбырлардағы сұйықтық ағынынан айтарлықтай ерекшеленеді. Өлшеу мен талдауды қиындататын кеуекті ортада нақты анықталған ағын түтіктерінің болмауына назар аударылды. Зерттеу әртүрлі кеуекті орталарға қолданылатын аналитикалық және сандық әдістерді қамтитын жаңа тәсілді ұсынады. Зерттеу өткізгіштік, ағынның жылдамдығы потенциалы, бір фазалы және көп фазалы жүйелердің сипаттамалары мен сұйықтықтың сығылғыштығы ұғымдарын қамтитын жүйелерді сипаттау үшін заңдар мен корреляцияға негізделген математикалық

модельді ұсынады. Инженерлер бағалаған қабаттағы сұйықтықтардың қасиеттеріне, оның ішінде кеуектілігі мен қанықтылығына қарай анықталатын мұнай қабаттарының сипаттамаларына ерекше назар аударылады. Сандық нәтижелер тегіс арнадағы сұйықтықтың орын ауыстыруын және кеуекті ортадағы бір өлшемді есепті ұсынады, ол айқын схеманы пайдалана отырып, теңдеулердің соңғы айырмашылығын жақындату арқылы орындалады. Бұл модельдің сандық нәтижелері Matlab бағдарламалық ортасында жүзеге асырылды.

Тірек сөздер: математикалық модельдеу, кеуекті орта, сүзгілеу, Дарси заңы, сұйықтық ағыны.

^{1,2*}**ШИЯПОВ К.М., ^{1,2}БАЙШЕМИРОВ Ж.Д.,**
^{1,2}**АБДИРАМАНОВ Ж.А., ^{1,2}ЖАНБЫРБАЕВ А.Б.**

¹Казахский национальный педагогический университет имени Абая,
050010, г. Алматы, Казахстан

² Институт информационных и вычислительных технологий КН МНВО РК,
050010, г. Алматы, Казахстан

*E-mail: kadrzhan2019@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Аннотация

Исследование потока жидкости в пористых средах, отличающегося от традиционных потоков в трубах, имеет ключевое значение для разработки эффективных методов добычи нефти и других полезных ископаемых, учитывая сложности, связанные с нечетко определенными течениями и разнообразием пористых структур. В данной работе рассматривается сложность изучения потока жидкости в пористых средах, явление, которое значительно отличается от движения жидкости в трубах. Акцентируется внимание на отсутствии четко определенных трубок тока в пористой среде, что усложняет измерения и анализ. Исследование представляет собой новый подход, включающий как аналитические, так и численные методы, с применением к разнообразным пористым средам. В рамках исследования предложена математическая модель, основанная на законах и корреляциях для описания систем, включающих в себя концепции проницаемости, потенциала скорости течения, характеристик однофазных и многофазных систем, а также сжимаемости жидкости. Особое внимание уделяется характеристикам нефтяных пластов, определяемым на основе свойств жидкостей в пласте, включая пористость и насыщенность, оцениваемые инженерами. Численные результаты представляют вытеснения жидкости в плоском канале и одномерной задаче в пористой среде, выполненные с применением конечно-разностной аппроксимации уравнений по явной схеме. Численные результаты данной модели были реализованы в программной среде Matlab.

Ключевые слова: математическое моделирование, пористая среда, фильтрация, закон Дарси, поток жидкости.

Information about authors

Shiyapov Kadrzhan (corresponding author)

PhD, Department of Mathematics and Mathematical Modelling, Abai Kazakh National Pedagogical University, 050010, Dostyk ave., 13, Almaty, Kazakhstan; researcher Institute of Information and Computational Technologies, 050010, Shevchenko Str., 28, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0001-9596-3173

E-mail: kadrzhan2019@gmail.com

Baishemirov Zharasbek

PhD, acting professor, postdoctoral student, Abai Kazakh National Pedagogical University, 050010, Dostyk ave., 13, Almaty, Kazakhstan; leading researcher Institute of Information and Computational Technologies, 050010, Shevchenko Str., 28, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-4812-4104

E-mail: zbai.kz@gmail.com

Abdiramanov Zhanars

PhD student, Abai Kazakh National Pedagogical University, 050010, Dostyk ave., 13, Almaty, Kazakhstan; researcher Institute of Information and Computational Technologies, 050010, Shevchenko Str., 28, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0003-3820-7253

E-mail: a_janars@mail.ru

Zhanbyrbayev Adilbek

Cand. Sc. (Phys.-Math), Department of Informatics and Information of Education, Abai Kazakh National Pedagogical University, 050010, Dostyk ave., 13, Almaty, Kazakhstan; Leading Researcher of Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, 050010, Shevchenko Str., 28, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-5206-7405

E-mail: zhanbyr_a@mail.ru

Авторлар туралы мәліметтер**Шияпов Кадыржан Мауленжанович** (корреспонденция авторы)

PhD, Математика және математикалық модельдеу кафедрасының аға оқытушысы, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, 050010, Достық даңғылы, 13, Алматы қ., Қазақстан; ҚР ҒЖБМ ҒК Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институтының ғылыми қызметкері, 050010, Шевченко к., 28, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0001-9596-3173

E-mail: kadrzhan2019@gmail.com

Байшемиров Жарасбек Дуйсембекович

PhD, профессордың м.а., Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университетінің пост-докторанты, 050010, Достық даңғылы, 13, Алматы қ., Қазақстан; ҚР ҒЖБМ ҒК Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институтының жетекші ғылыми қызметкері, 050010, Шевченко к., 28, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0002-4812-4104

E-mail: zbai.kz@gmail.com

Абдираманов Жанарс Алда-онгарович

Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университетінің докторанты, 050010, Достық даңғылы, 13, Алматы қ., Қазақстан; ҚР ҒЖБМ ҒК Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институтының ғылыми қызметкері, 050010, Шевченко к., 28, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0003-3820-7253

E-mail: a_janars@mail.ru

Жанбырбаев Адильбек Бегалиевич

Ф.-м.ғ.к., Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университетінің Информатика және білімді ақпараттандыру кафедрасының аға оқытушысы, 050010, Достық даңғылы, 13, Алматы қ., Қазақстан; ҚР ҒЖБМ ҒК Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институтының жетекші ғылыми қызметкері, 050010, Шевченко к., 28, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0002-5206-7405

E-mail: zhanbyr_a@mail.ru

Информация об авторах**Шияпов Кадыржан Мауленжанович** (автор для корреспонденции)

PhD, старший преподаватель кафедры математики и математического моделирования Казахского национального педагогического университета имени Абая, пр. Достык, 13, 050010, г. Алматы, Казахстан; научный сотрудник Института информационных технологий

КН МНВО РК, 050010, ул. Шевченко, 28, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0001-9596-3173

E-mail: kadrzhan2019@gmail.com

Байшемиров Жарасбек Дүйсембекович

PhD, и.о. профессора, постдокторант Казахского национального педагогического университета имени Абая, пр. Достык, 13, 050010, г. Алматы, Казахстан; ведущий научный сотрудник Института информационных технологий КН МНВО РК, 050010, ул. Шевченко, 28, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0002-4812-4104

E-mail: zbai.kz@gmail.com

Абдираманов Жанарс Алда-Онгарович

Докторант Казахского национального педагогического университета имени Абая, пр. Достык, 13, 050010, г. Алматы, Казахстан; научный сотрудник Института информационных технологий КН МНВО РК, 050010, ул. Шевченко, 28, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0003-3820-7253

E-mail: a_janars@mail.ru

Жанбырбаев Адильбек Бегалиевич

К.ф.-м.н., кафедра информатики и информатизации образования Казахского национального педагогического университета имени Абая, пр. Достык, 13, 050010, г. Алматы, Казахстан; ведущий научный сотрудник Института информационных технологий КН МНВО РК, 050010, ул. Шевченко, 28, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0002-5206-7405

E-mail: zhanbyr_a@mail.ru

УДК 51-74
МРНТИ 27.35.37; 29.03.77

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2023-20-4-72-84>

^{1,2*}МЕРЕКЕ А.Л., ²ЧЕКИЕВА А.С., ²УМИРЗАКОВ А.Г., ¹ЕЛЕМЕСОВ К.К.,
³АБДУГАЛИМОВ А.Ш., ²ФАСХУТДИНОВ М.Ф., ^{1,2,4}СЕРИККАНОВ А.С.

¹Satbaev University, 050032, г. Алматы, Казахстан

²Физико-технический институт, г. Алматы 050032, Казахстан

³Евразийский национальный университет, г. Астана 010000, Казахстан

⁴Национальная академия наук Республики Казахстан, г. Алматы 050032, Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВАНАДИЕВЫХ БАТАРЕЯХ

Аннотация

Постановка проблемы: в современном мире разработка эффективных источников энергии становится все более важной проблемой. Одним из перспективных направлений в области электрохимических источников энергии являются ванадиевые батареи. Эти батареи основаны на электрохимических процессах, происходящих с участием ванадия в различных окислительных состояниях. Исследование и моделирование электрохимических процессов в ванадиевых батареях имеют важное значение для оптимизации их работы и повышения эффективности использования энергии. Исследование и моделирование электрохимических процессов в ванадиевых батареях играют ключевую роль в разработке эффективных источников энергии. Понимание основных принципов работы ванадиевых батарей, а также разработка точных математических моделей и их численное моделирование позволяют оптимизировать процессы, связанные с хранением и высвобождением энергии. Дальнейшие исследования и разработки в этой области могут привести к созданию более эффективных и устойчивых источников энергии, способных удовлетворить потребности современного общества в устойчивой энергетике. Цель: моделирование процессов ванадиевых редокс проточных батарей (ВРПБ) путем варьирования потока электролита для оптимизации электрохимических процессов, происходящих в граничных условиях мембрана – электрод. Результаты: данное исследование проводит моделирование в пакете программного обеспечения COMSOL Multiphysics электрохимические характеристики ВРПБ в зависимости от потока электролита. Были проведены испытания, в ходе которых были исследованы параметры скорости потока, чтобы оценить их влияние на распределение потенциала и плотности тока. Практическая значимость: энергия в ВРПБ хранится в жидком электролите, который прокачивается через ячейку. Электролит хранится во внешних резервуарах, а не в пористых электродах, как в обычных батареях. Результаты способствуют повышению эффективного хранения энергии, выравниванию нагрузки и сглаживанию пиковой мощности ВРПБ. Построение моделей позволяет предсказать влияние на эффективность перемешивания электролитов, учитывая гидродинамические условия внутри батареи, чтобы определить, как они влияют на перенос ионов ванадия с учетом скорости потока электролита.

Ключевые слова: моделирование, ванадиевые редокс проточные батареи, электролит, расход, поляризация, плотность тока.

Введение

Еще каких-то 15 лет назад в области аккумуляторов не возникало проблем: мобильные телефоны требовали зарядки всего раз в неделю, для небольших переносных устройств хватало недорогих батарей, а электромобилей для массового использования вообще не существовало. Но с появлением новых мобильных устройств ситуация с источниками питания изменилась. На данный момент обладатели мощных смартфонов счастливы, если заряда аккумулятора хватает на сутки [1, 2]. А мечты о запасе хода электромобиля привели к уровню аналогичного бензинового двигателя. Производители практически исчерпали все возможности для улучшения аккумуляторов, но все же находятся в поиске новых материалов и технологий. Что позволяет мобильным устройствам развиваться стремительными темпами, но технологии разработки источников питания не успевают за ними [3–5].

Одним из решений являются ВРПБ, способные накапливать большие объемы энергии, сохраняя ее на длительный срок и высвобождая по необходимости. Их принцип работы очень

похож на тот, что используется в обычных аккумуляторах: есть анод и катод, между которыми происходит реакция окисления и восстановления с высвобождением электронов [6, 7].

Отличительной особенностью от традиционных аккумуляторов является то, что эти реакции происходят в жидких электролитах, а не в твердых электродах. Это приносит ряд преимуществ по сравнению с обычными аккумуляторами. Прежде всего, такие устройства способны сохранять энергию в течение длительного времени практически без потерь, в то время как обычные аккумуляторы сталкиваются с потерями из-за внутренних процессов, приводящих к саморазряду [8–11].

Энергию в проточных окислительно-восстановительных батареях сохраняют в жидких электролитах, которые прокачиваются через элемент. Эти батареи хранятся во внешних резервуарах, а не в пористых электродах, как в обычных батареях [12]. Такой подход предлагает инновационные решения для доступного хранения энергии, выравнивания нагрузки и сглаживания пиковой мощности. В ВРПБ используются два разных раствора электролита: один для отрицательной стороны ячейки и другой для положительной стороны [13]. Оба раствора в ячейке разделяются ионообменной мембраной, которая обеспечивает транспорт ионов, в основном протонов, между двумя частями ячейки. Схема работы ВРПБ показана на рисунке 1 [15].

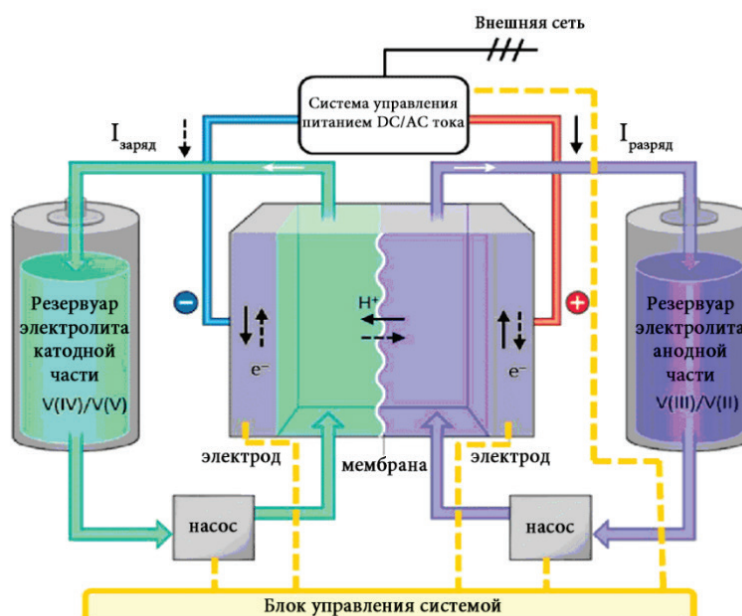


Рисунок 1 – Схематическое изображение системы ВРПБ [15]

Литературный обзор

Современные научные работы в области ВРПБ и наноматериалов способствуют качественному изучению свойств наноматериалов, что способствует разработкам перспективных решений и позволяет достигнуть более эффективных и устойчивых решений в хранении энергии [11–13, 16–22]. Все эти работы не только расширяют знания в области наноматериалов, но также раскрывают потенциальные пути для повышения эффективности и стабильности ВРПБ. Однако вследствие дороговизны обширных тестовых систем для исследований зачастую приходится исследователям работать с небольшими мембрано-электродными ячейками либо маленькими стеками с площадью активной области не более 25 см^2 , что мешает объективному исследованию ряда факторов, влияющих на работу ВРПБ.

В работе [17] для разработки и оптимизации систем ВРПБ для различных состояний нагрузки, маршрутов распределения, расходов или качеств материалов была разработана вычислительная гидродинамическая модель в качестве альтернативного инструмента. На основе одномерной модели в работе Vivona и др. [18] были проанализированы лимитирующие про-

цессы в кинетике и массопереносе. Большой вклад в исследования внесены командой Knehr и др. [19], где рассматривались три фундаментальных механизма, а именно диффузия, конвекция и миграция. You и др. [20] исследовали работу ячейки ВРПБ при уменьшении толщины электродов. Ozgoli и др. [21] использовали двумерную модель для изучения гидродинамических и электрохимических характеристик, чтобы оценить распределение ванадия при различных параметрах электродов и мембран. Работа Emmel и др. [22] фокусировалась на электрохимический активной области и исследовала поток электролита через электрод, чтобы определить наиболее активные области, где были зафиксированы самые высокие значения скорости.

Моделирование играет ключевую роль в целях контроля внутри ВРПБ, что позволяет описывать реальное поведение системы, предоставляя информацию и знания о работе системы. Более того, эти модели очень важны для анализа и улучшения систем управления, контроля и средств оценки параметров. Все это улучшит их производительность и сделает их еще более безопасными и надежными устройствами.

Основные положения. Материалы и методы

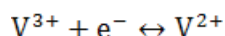
Модель построения включает две части ячейки с разным составом ионов и электродными реакциями, разделенные ионообменной мембраной.

Виды жидких электролитов и электродные реакции.

Отрицательный электролит содержит следующие ионы:

- ♦ H^+
- ♦ HSO_4^-
- ♦ SO_4^{2-}
- ♦ V^{3+}
- ♦ V_2^{3+}

Отрицательная электродная реакция:



Равновесный потенциал этой реакции рассчитывается по уравнению Нернста по формуле

$$E_{eq,neg} = E_{0,neg} + \frac{RT}{F} \ln\left(\frac{a_{V^{3+}}}{a_{V^{2+}}}\right)$$

где $E_{0,neg}$ представляет собой опорный потенциал электродной реакции в единицах СИ (вольт), a_i обозначает химическую активность частицы i (безразмерная величина), R – это молярная газовая постоянная (8,31 Дж/(моль·К)), T – температура ячейки в единицах СИ (кельвины), а F – постоянная Фарадея (96 485 кулонов в секунду на моль).

Для реакции с отрицательным электродом используется кинетическое выражение Батлера-Фольмера в соответствии с:

$$i_{neg} = A i_{0,neg} \left(\exp\left(\frac{((1 - a_{neg})F\eta_{neg})}{RT}\right) - \exp\left(\frac{(-a_{neg})F\eta_{neg}}{RT}\right) \right)$$

$$i_{neg} = F k_{neg} (a_{V^{2+}})^{1-a_{neg}} (a_{V^{3+}})^{a_{neg}}$$

где A обозначает удельную поверхность пористого электрода в единицах СИ (m^2/m^3), α_{neg} безразмерный коэффициент передачи, а k_{neg} представляет собой константы скорости. Перенапряжение η_{neg} (в вольтах) вычисляется как

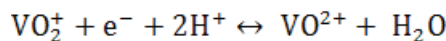
$$\eta = \phi_s - \phi_l - E_{eq}$$

где ϕ_s – электрический потенциал твердой фазы электрода и ϕ_l – потенциал электролита.

Положительный электролит содержит следующие ионы:

- ♦ H^+
- ♦ HSO_4^-
- ♦ SO_4^{2-}
- ♦ VO^{2+}
- ♦ VO_2^+

Катодная реакция:



с равновесным потенциалом, рассчитанным по формуле:

$$E_{eq,pos} = E_{0,pos} + \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{a_{VO_2^+} (a_{H^+})^2}{a_{VO^{2+}}} \right)$$

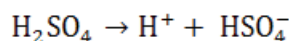
$$i_{pos} = A i_{0,pos} \left(\exp \left(\left(\frac{(1 - a_{pos}) F \eta_{pos}}{RT} \right) \right) - \exp \left(\left(\frac{(-a_{pos}) F \eta_{pos}}{RT} \right) \right) \right)$$

$$i_{0,pos} = F k_{pos} (a_{VO_2^+})^{1-a_{pos}} (a_{VO^{2+}})^{a_{pos}}$$

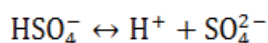
Ионообменная мембрана обеспечивает транспорт следующих ионов:

- ♦ H^+
- ♦ HSO_4^-
- ♦ SO_4^{2-}
- ♦ VO^{2+}
- ♦ VO_2^+
- ♦ V^{3+}
- ♦ V^{2+}

Считается, что процесс диссоциации серной кислоты в первой стадии завершен.



второй шаг:



Рассматривается с использованием понятия источника диссоциации, r_d :

$$r_d = k_d \left(\frac{a_{H^+} - a_{HSO_4^-}}{a_{H^+} + a_{HSO_4^-}} - \beta \right)$$

где k_d – параметр скорости, β – степень диссоциации.

Уравнения переноса ионов

В этой модели уравнения Нернста–Планка используются для описания потока ионов и переноса заряда, уравнение описывает молярный поток частиц i , N_i , обусловленный диффузией, миграция и конвекция:

$$N_i = -D_i \nabla c_i - z_i u_{mob,i} F c_i \nabla \phi_1 + c_i u$$

Первый элемент – это диффузионный поток, где D_i представляет собой коэффициент диффузии в единицах СИ (m^2/s). Термин «миграция» включает в себя зарядовое число z_i , подвижность частиц $u_{mob,i}$ и электролитный потенциал (ϕ_1). В контексте конвекции u представляет собой векторную скорость жидкости (m/s).

Плотность тока электролита рассчитывается с использованием закона Фарадея путем суммирования вкладов молярных потоков, умноженных на видовые заряды, с учетом того, что конвективный член исчезает из-за условий электронейтральности:

$$i_l = F \sum_{i=1}^n z_i (-D_i \nabla c_i - z_i u_{mob,i} F c_i \nabla \phi_1) \quad (1)$$

Далее применяется закон сохранения заряда для определения потенциала электролита.

$$\nabla_{i_1} = F \sum_{i=1}^n z_i R_i$$

где члены R_i представляют собой источники реакции, обусловленные реакциями пористого электрода.

В модели используется уравнение 1 для определения потенциала электролита в пористых электродах с помощью третичного распределения тока, интерфейса Нернста–Планка. В областях отрицательного и положительного пористого электрода, где присутствует свободный электролит, концентрации всех ионов одного порядка, а градиенты c_i пренебрежимо малы. Однако мембрана состоит из полимерного электролита с дополнительными отрицательными ионами, зафиксированными в полимерной матрице, что означает, что концентрация для этого вида постоянна. В области ионообменной мембраны при расчете суммы зарядов ρ_{fix} в условии электронейтральности добавляется фиксированный объемный заряд:

$$\rho_{\text{fix}} + F \sum_{i=1}^n z_i c_i = 0 \quad (2)$$

Фиксированный объемный заряд задается через концентрацию заряда мембраны, которая в этой модели варьируется с помощью вспомогательной развертки.

Граничные условия

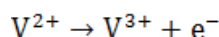
Правила Доннана, на границе между мембраной и пористыми областями электрода устанавливаются определенные условия. Для веществ, присутствующих с обеих сторон мембраны электрода, существует определенная связь между потенциалами и концентрациями:

$$\Phi_{l,m} = \Phi_{l,e} - \frac{RT}{z_i F} \ln\left(\frac{c_{i,m}}{c_{i,e}}\right) \quad (3)$$

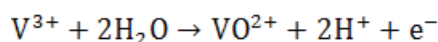
где $c_{i,m}$ – концентрация частиц в мембране, $c_{i,e}$ – концентрация частиц в свободном электролите, а z_i – соответствующий заряд. Сдвиг потенциала, вызванный уравнением 3, называется потенциалом Доннана. Функция «Граница ионообменной мембраны» в Третичном распределении тока, интерфейс Нернста–Планка определяется условиями Доннана [14].

Реакции саморазряда

Предполагается, что на границе мембрана-катод V^{3+} и V^{2+} немедленно окисляется



и



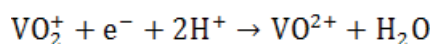
после

$$c_{V^{3+}} = c_{V^{2+}} = 0 \quad (4)$$

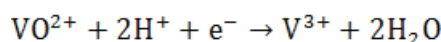
Соответственно, VO^{2+} и VO^{2+} концентрация считается равной нулю у границы мембрана – анод:

$$c_{VO^{2+}} = c_{VO^{2+}=0} \quad (5)$$

в результате реакций восстановления



и



быстрые реакции окисления/восстановления реализуются с помощью необратимого процесса.

Результаты и обсуждение

Кривые на рисунке 2 показывают поляризацию и плотность мощности для скорости потока 25 и 50 мл/мин., хорошая корреляция наблюдается между экспериментальными и числовыми результатами. Дополнительные вклады в перенапряжение при больших плотностях тока вносятся за счет массового переноса.

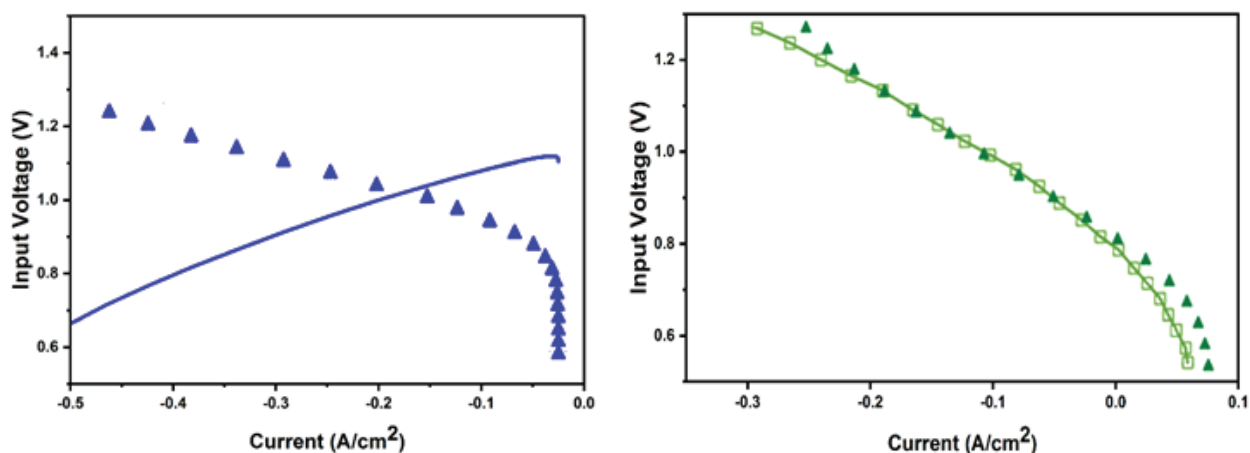


Рисунок 2 – Кривая поляризации и плотности мощности (а) для скорости потока 25 мл/мин и (б) для скорости потока 50 мл/мин

Изменения скорости потока

Еще один важный рабочий параметр, который следует учитывать, – это скорость потока. Тот же анализ, что и раньше, был выполнен с фиксацией состояния заряда 0,55, входного напряжения 0,5В. Для теста было взято два значения скорости потока: 25 мл/мин и 50 мл/мин. На рисунке 3 показано, что скорость демонстрирует пропорциональную зависимость.

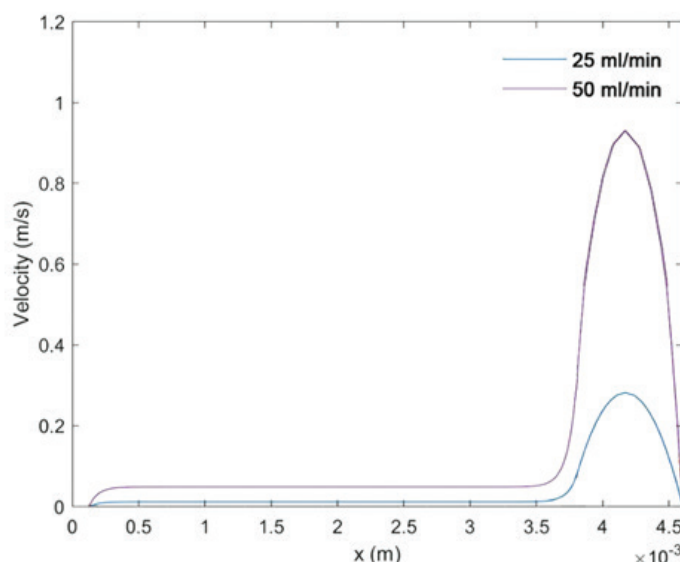


Рисунок 3 – Кривые скорости потока электролита

Скорость реакции зависит от изменения в скорости потока, о чем свидетельствуют данные, представленные на рисунке 4. В частности, при скорости потока установлено, что на уровне 25 мл/мин пиковое значение реакции происходит на границе мембрана – электрод. Это говорит о том, что кинетика реакции особенно активна в этой области при данном потоке условий. При скорости потока 25 мл/мин. отчетливое изменение в распределении скорости реакции, также

изображено на рисунке 4. В этом случае максимальные значения скорости реакции достигаются как на границе мембрана – электрод, так и на границе канал – электрод. Более высокая скорость потока, по-видимому, улучшает транспортировку реагирующих частиц по направлению к обеим границам раздела, тем самым способствуя более интенсивным электрохимическим реакциям в конкретных областях.

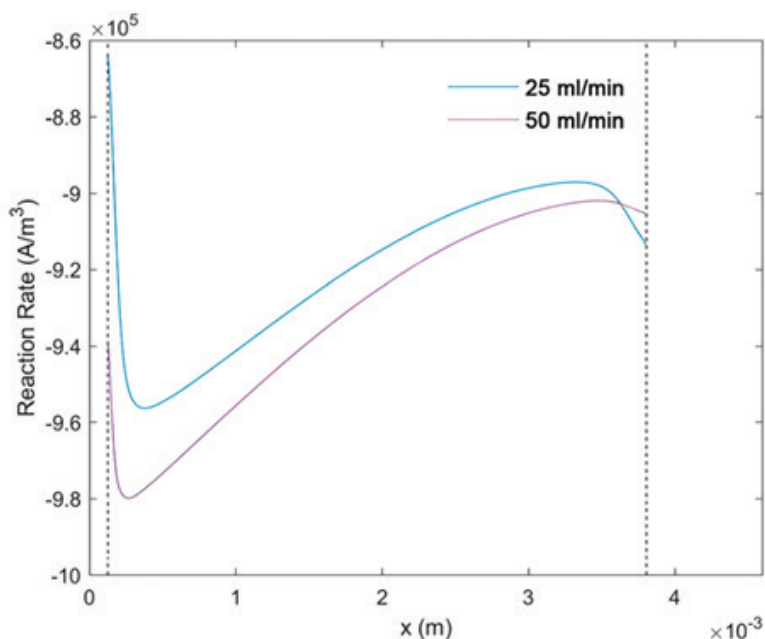


Рисунок 4 – Распределение скорости реакций

Интересно, что при дальнейшем увеличении скорости потока на 50 мл/мин. заметный сдвиг наблюдается на месте максимальной скорости реакции. Он приближается к границе раздела канал – электрод, что свидетельствует о более высокой концентрации реагентов в области из-за увеличения конвективного переноса, вызванного более высокими скоростями потока. Скорость потока оказывает существенное влияние на градиенты концентрации, как показано на рисунке 5.

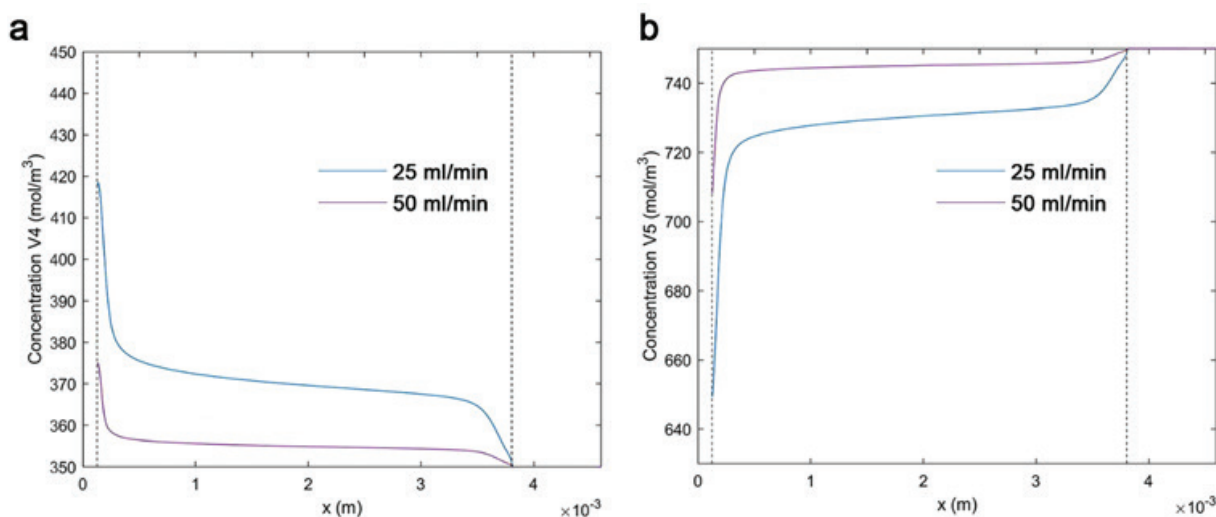


Рисунок 5 – Кривые (a) V(IV) и (b) V(V) концентрации реагентов в электролите

Более низкие скорости потока приводят к более высокому градиенту концентрации из-за более длительного времени пребывания электролита внутри ячейки. Явное неравенство наблюда-

ется при скорости потока 25 мл/мин., где достигается наивысшая концентрация $V(IV)$. Данное поведение объясняется снижением скорости потока, что положительно влияет на более равномерное распределение электролита. Примечательно, что градиенты концентрации демонстрируют быстрые изменения в электрод-мембранных взаимодействиях и границы электрод – канал для всех скоростей потока, а линейное поведение наблюдается при прохождении всей ячейки. Крайне важно тщательно сбалансировать преимущества увеличенного времени прохождения и градиенты концентрации против потенциальных недостатков повышенного перенапряжения, как показано на рисунке 6. Достижение оптимальной скорости потока имеет решающее значение для обеспечения эффективного и контролируемого электрохимического процесса, так как низкий поток имеет тенденцию приводить к более высоким перенапряжениям.

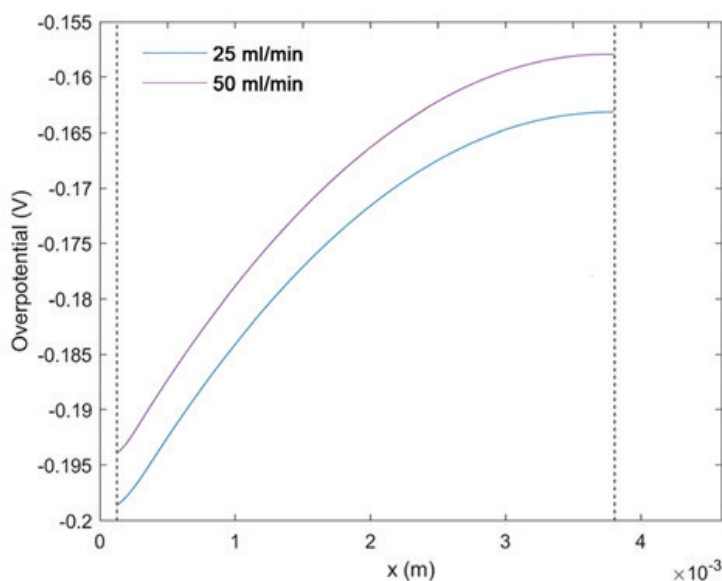


Рисунок 6 – Градиенты концентрации в зависимости от потенциальных недостатков повышенного перенапряжения

Заключение

Настоящая работа представляет собой вычислительную модель половины ячейки ВРПБ. Производительность ячейки была протестирована при различной скорости потока электролита в пакете программного обеспечения COMSOL Multiphysics.

Скорость потока электролита влияет на градиент концентрации и скорость реакций. Было обнаружено, что более низкая скорость потока приводит к более выраженным градиентам концентрации из-за увеличения времени пребывания электролита в ячейке. Более того, скорость реакции была выше на границе электрод – канал при более низких скоростях потока, хотя наблюдается однородность на протяжении моделирования всего электрода при более высоких скоростях потока. Однако важно отметить, что более низкие скорости потока также могут привести к значительным перенапряжениям.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках проекта BR18574141 «Комплексная многоцелевая программа повышения энергоэффективности и ресурсосбережения в энергетике и машиностроении для промышленности Казахстана», за что авторы выражают огромную благодарность.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Iwakiri I., Antunes T., Almeida H., Sousa J.P., Figueira R.B., Mendes A. (2021) Redox flow batteries: materials, design and prospects, *Energies* 14, [https://doi.org/ 10.3390/en14185643](https://doi.org/10.3390/en14185643).
- 2 Lourenssen K., Williams J., Ahmadpour F., Clemmer R., Tasnim S. (2019) Vanadium redox flow batteries: a comprehensive review, *J. Energy Storage* 25, <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100844>.
- 3 Khazaeli A., Vatani A., Tahouni N., Panjeshahi M.H. (2015) Numerical investigation and thermodynamic analysis of the effect of electrolyte flow rate on performance of all vanadium redox flow batteries, *J. Power Sources*, 293, pp. 599–612, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.05.100>.
- 4 Wen Y., Neville T.P., Sobrido A.J., Shearing P.R., Brett D.J.L., Jervis R. (2023) Bismuth concentration influenced competition between electrochemical reactions in the all-vanadium redox flow battery, *J. Power Sources* 566, 232861.
- 5 Sum E. and Skyllas-Kazacos M. (1985) *Power Sources* 16(2), 85, [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(85\)80082-3](https://doi.org/10.1016/0378-7753(85)80082-3).
- 6 Rong Y. (2015) Study on Stability and Electrochemical Performance of New Vanadium Battery Electrolyte, Beijing University of Chemical Technology.
- 7 Rao P. and Jayanti S. (2021) *Power Source*, 482, 228988, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228988>.
- 8 Tai Z., Hanawa K., Ju D. and Luo W., *Chem J.* (2021) (1), <https://doi.org/10.1155/2021/6646256>.
- 9 Messaggi M., Rabissi C., Gambaro C., Meda L., Casalegno A. and Zago M. (2020) *Power Sources*, 449, 227588, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227588>.
- 10 Gencten M., Gursu H., Sahin Y. (2017) Anti-precipitation effects of TiO₂ and TiOSO₄ on positive electrolyte of vanadium redox battery, *Hydrog. Energy*, 42, 25608–25618.
- 11 Bafekry A., Faraji M., Stampfl C., Abdolhosseini Sarsari I., Abdollahzadeh Ziabari A., Hieu N.N., Karbasizadeh S. and Ghergherechi M. (2021) *Phys. D Appl.*, 55, 035301, <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac2cab>.
- 12 Bafekry A., Faraji M., Fadlallah M.M., Jappor H.R., Karbasizadeh S., Ghergherechi M., Abdolhosseini Sarsari I. and Abdollahzadeh Ziabari A. (2021) *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 23(34), 18752, <https://doi.org/10.1039/D1CP02590B>.
- 13 Bafekry A., Faraji M., Fadlallah M.M., Mortazavi B., Ziabari A.A., Khatibani A.B., Nguyen C.V., Ghergherechi M. and Godova D. (2021) *Phys. Chem. C*, 125(23), 13067, <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c03749>.
- 14 Electrochemistry module user's guide (2023) COMSOL Multiphysics, v. 5.5. COMSOLAB, Stockholm, Sweden, URL: www.comsol.com.
- 15 Trovò A. (2020) Battery management system for industrial-scale vanadium redox flow batteries: Features and operation, *Journal of Power Sources*, 465, 228229, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228229>.
- 16 Bafekry A., Faraji M., Karbasizadeh S., A.B.A.A. Ziabari, Godova D. and Ghergherechi M. (2021) *Phys. Chem*, 23(42), 24301, <https://doi.org/10.1039/D1CP03421A>.
- 17 Aramendia I., Fernandez-Gamiz U., Martinez-San-Vicente A., Zulueta E. and Lopez-Guede J.M. (2020) *Energies* 14(1), 176, <https://doi.org/10.3390/en14010176>.
- 18 D. Vivona, M. Messaggi, A. Baricci, A. Casalegno, and M. Zago // *J. Electrochem. Soc.* 2020, <https://doi.org/10.1149/1945-7111/aba36b>.
- 19 Knehr K.W., Agar E., Dennison C.R., Kalidindi A.R. and Kumbur E.C. (2012). *Electrochem. Soc.*, 159(9), A1446, <https://doi.org/10.1149/2.017209jes>.
- 20 You D., Zhang H. and Chen J. (2009) *Electrochim. Acta*, 54(27), 6827, <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.06.086/>.
- 21 Ozgoli H.A., Elyasi S. and Mollazadeh M. (2015). *Mech. Ind.* 16(2), 201, <https://doi.org/10.1051/meca/2014071>.
- 22 Emmel D., Hofmann J.D., Arlt T., Manke I., Wehinger G.D., Schroder D. and Appl A.C.S. (2020) *Energy Mater.* 3(5), 4384 <https://doi.org/10.1021/acsaem.0c00075>.

^{1,2*}МЕРЕКЕ А.Л., ²ЧЕКИЕВА А.С., ²УМИРЗАКОВ А.Г., ¹ЕЛЕМЕСОВ К.К.,
³АБДУГАЛИМОВ А.Ш., ²ФАСХУТДИНОВ М.Ф., ^{1,2,4}СЕРИККАНОВ А.С.

¹Satbaev University, 050032, Алматы қ., Қазақстан

²Физика-техникалық институты, 050032, Алматы қ., Қазақстан

³Еуразия ұлттық университеті, 010000, Астана қ., Қазақстан

⁴Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы, 050032, Алматы қ., Қазақстан

Ванадий батареяларындағы электрохимиялық процестерді зерттеу және модельдеу

Андатпа

Мәселені қалыптастыру: қазіргі әлемде тиімді энергия көздерін дамыту барған сайын маңызды мәселеге айналады. Электрохимиялық энергия көздері саласындағы перспективті бағыттардың бірі – ванадий батареялары. Бұл батареялар ванадийдің әртүрлі тотығу күйлеріндегі электрохимиялық процестерге негізделген. Ванадий батареяларындағы электрохимиялық процестерді зерттеу және модельдеу олардың жұмысын оңтайландыру және энергия тиімділігін арттыру үшін маңызды. Ванадий батареяларындағы электрохимиялық процестерді зерттеу және модельдеу тиімді энергия көздерін дамытуда шешуші рөл атқарады. Ванадий батареяларының жұмысының негізгі принциптерін түсіну, сондай-ақ дәл математикалық модельдерді әзірлеу мен оларды сандық модельдеу энергияны сақтау және босатумен байланысты процестерді оңтайландыруға мүмкіндік береді. Осы саладағы одан әрі зерттеулер мен әзірлемелер заманауи қоғамның тұрақты энергия қажеттіліктерін қанағаттандыра алатын тиімдірек және тұрақты энергия көздерін құруға әкелуі мүмкін. Мақсат: мембраналық-электродтық шекаралық жағдайларда жүретін электрохимиялық процестерді оңтайландыру үшін электролит ағынын өзгерту арқылы ванадий-тотықсыздандырғыш батареяларының (ВТБ) процестерін модельдеу. Нәтижелер: бұл зерттеу COMSOL Multiphysics бағдарламалық пакетінде электролит ағынының функциясы ретінде ВТБ электрохимиялық сипаттамаларын модельдейді. Ағыс жылдамдығының параметрлері олардың потенциалды бөлуге және ток тығыздығына әсерін бағалау үшін сынақтар жүргізіліп, зерттелді. Практикалық маңызы: ВТБ-да энергия жасуша арқылы айдалатын сұйық электролитте сақталады. Электролит кәдімгі аккумуляторлардағыдай кеуекті электродтарда емес, сыртқы резервуарларда сақталады. Нәтижелер энергияны тиімді сақтауды жақсартуға, жүктемені теңестіруге және ВТБ қуатының максималды тегістелуіне ықпал етеді. Модельдерді құрастыру электролит ағынының жылдамдығын ескере отырып, олардың ванадий иондарын тасымалдауға қалай әсер ететінін анықтау үшін аккумулятор ішіндегі гидродинамикалық жағдайларды ескере отырып, электролиттерді араластыру тиімділігіне әсерін болжауға мүмкіндік береді.

Тірек сөздер: модельдеу, ванадий тотықсыздандырғыш батареялары, электролит, шығын, поляризация, ток тығыздығы

^{1,2*}MEREKE A.L., ²CHEKIYEVA A.S., ²UMIRZAKOV A.G., ¹ELEMESOV K.K.,
³ABDUGALIMOV A.SH., ²FASKHUTDINOV M.F., ^{1,2,4}SERIKKANOV A.S.

¹Satbaev University, 050032, Almaty, Kazakhstan

²Physico-Technical Institute, Almaty, 050032, Almaty, Kazakhstan

³Eurasian National University, Astana, 010000, Kazakhstan

⁴National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Almaty 050032, Kazakhstan

RESEARCH AND SIMULATION OF ELECTROCHEMICAL PROCESSES IN VANADIUM BATTERIES

Abstract

Formulation of the problem: In the modern world, the development of efficient energy sources is becoming an increasingly important issue. One of the promising areas in the field of electrochemical energy sources is vanadium batteries. These batteries are based on electrochemical processes involving vanadium in various oxidative states. Research and modeling of electrochemical processes in vanadium batteries are important to optimize their performance and improve energy efficiency. Research and modeling of electrochemical processes in vanadium batteries play a key role in the development of efficient energy sources. Understanding the basic principles of operation of vanadium

batteries, as well as the development of accurate mathematical models and their numerical simulation, allows optimizing the processes associated with storing and releasing energy. Further research and development in this area could lead to the creation of more efficient and sustainable energy sources that can meet the sustainable energy needs of modern society. Objective of the project: modeling the processes of vanadium redox flow batteries (VRFB) by varying the electrolyte flow to optimize electrochemical processes occurring under membrane-electrode boundary conditions. Results: this study simulates in the COMSOL Multiphysics software package the electrochemical characteristics of HFSC as a function of electrolyte flow. Tests were carried out in which the flow velocity parameters were examined to evaluate their effect on the potential distribution and current density. Practical significance: the energy in an HFSC is stored in a liquid electrolyte that is pumped through the cell. The electrolyte is stored in external reservoirs rather than in porous electrodes as in conventional batteries. The results contribute to improved efficient energy storage, load balancing, and peak power smoothing of the GRPB. The construction of models allows us to predict the effect on the efficiency of mixing electrolytes, taking into account the hydrodynamic conditions inside the battery to determine how they affect the transport of vanadium ions, taking into account the electrolyte flow rate.

Key words: modeling, vanadium redox flow batteries, electrolyte, flow rate, polarization, current density

Информация об авторах

Мереке Алмаз Лукматулы ((автор для корреспонденции))

Научный сотрудник, Satbaev University, Физико-технический институт, 050032,
г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0002-8945-9648

E-mail: mereke.almaz@mail.ru.

Чекиева Аружан Сунгатолдакызы

Младший научный сотрудник, Физико-технический институт, 050032, г. Алматы, Казахстан,

ORCID ID: 0000-0002-5343-5054

E-mail: aruqkz@gmail.com

Умирзаков Арман Ганидинович

Научный сотрудник, Физико-технический институт, 050032, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0002-0941-0271

E-mail: a.umirzakov@sci.kz

Елемесов Касым Коптлеуович

Кандидат технических наук, ассоциированный профессор, директор Института энергетики и машиностроения, Satbaev University, 050032, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0001-6168-2787

E-mail: k.yelemessov@satbayev.university

Абдугалимов Алишер Шериязданович

Аспирант Евразийского национального университета, 010000, г. Астана, Казахстан

ORCID ID: 0009-0004-8864-9230

E-mail: abdugalimov@gmail.com

Фасхутдинов Марат Флурович

Кандидат химических наук, Satbaev University, 050032, г. Алматы, Казахстан

E-mail: fffmarat@mail.ru

Серикканов Абай Серикканович

Кандидат физико-математических наук, вице-президент, Национальная академия наук
Республики Казахстан, 050032, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0001-6817-9586

E-mail: a.serikkanov@gmail.com

Авторлар туралы мәліметтер

Мереке Алмаз Лукматулы (корреспонденция авторы)

Ғылыми қызметкер, Satbaev University, Физика-техникалық институты, 050032,

Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0002-8945-9648

E-mail: mereke.almaz@mail.ru.

Чекиева Аружан Сунгатолдақызы

Кіші ғылыми қызметкер, Физика-техникалық институты, 050032, Алматы қ., Қазақстан,

ORCID ID: 0000-0002-5343-5054

E-mail: aruqkz@gmail.com

Умирзаков Арман Ганидинович

Ғылыми қызметкер, Физика-техникалық институты, 050032, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0002-0941-0271

E-mail: a.umirzakov@sci.kz

Елемесов Касым Коптлеуович

Техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Энергетика және машина жасау институтының директоры, Satbaev University, 050032, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0001-6168-2787

k.yelemessov@satbayev.university

Абдугалимов Алишер Шериязданович

Еуразия ұлттық университетінің аспиранты, 010000, Астана қ., Қазақстан

ORCID ID: 0009-0004-8864-9230

E-mail: abdugalimov@gmail.com

Фасхутдинов Марат Флурович

Химия ғылымдарының кандидаты, Satbaev University, 050032, Алматы қ., Қазақстан

E-mail: ffmarat@mail.ru

Серикканов Абай Серикканович

Физика-математика ғылымдарының кандидаты, вице-президент, Қазақстан Республикасының

Ұлттық ғылым академиясы, 050032, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0001-6817-9586

Email: a.serikkanov@gmail.com

Information about authors

Mereke Almaz Lukmatuly (corresponding author)

Researcher, Satbaev University, Institute of Physics and Technology, 050032, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-8945-9648

E-mail: mereke.almaz@mail.ru.

Chekiyeva Aruzhan Sungatoldakyzy

Junior Researcher, Institute of Physics and Technology, 050032, Almaty, Kazakhstan,

ORCID ID: 0000-0002-5343-5054

E-mail: aruqkz@gmail.com

Umirzakov Arman Ganidinovich

Researcher, Institute of Physics and Technology, 050032, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-0941-0271

E-mail: a.umirzakov@sci.kz

Yelemesov Kasym Koptleuovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director, Institute of Power Engineering and Mechanical Engineering, Satbaev University, 050032, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0001-6168-2787

k.yelemessov@satbayev.university

Abdugalimov Alisher Sheriyazdanovich

Postgraduate student, Eurasian National University, 010000, Astana, Kazakhstan

ORCID ID: 0009-0004-8864-9230

E-mail: abdugalimov@gmail.com

Faskhutdinov Marat Flurovich

Candidate of Chemical Sciences, Satbaev University, 050032, Almaty, Kazakhstan

E-mail: ffmarat@mail.ru

Serikkanov Abay Serikkanovich

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Vice-President, National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 050032, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0001-6817-9586

E-mail: a.serikkanov@gmail.com

УДК 517.958:533.7; 532.517.4
МРНТИ 27.35.17; 30.17.27

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2023-20-4-85-96>

^{1*}МАНАПОВА А.К., ²БЕКЕТАЕВА А.О., ^{3,4}МАКАРОВ В.В.

¹Академия гражданской авиации, 050039, г. Алматы, Казахстан

²Институт математики и математического моделирования КН МОН РК,
050010, г.Алматы, Казахстан

³Институт проблем управления РАН, 117997, г. Москва, Россия

⁴Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, г. Москва, Россия

*E-mail: manapova.a.k.math@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУЩЕСТВЕННО ДОЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ СЖИМАЕМОГО ГАЗА

Аннотация

Предлагается новый метод решения существенно дозвуковых течений, который представляет собой значительный шаг в области численного моделирования течений на основе системы уравнений Навье-Стокса. В методе используется ENO (Essentially Non-Oscillatory) схема третьего порядка точности, которая обеспечивает более высокую точность при расчетах течений с низкой скоростью звука. Одной из ключевых особенностей этого метода является введение параметров обезразмеривания. Эти параметры позволяют адаптировать уравнения Навье-Стокса к различным физическим условиям и избежать жесткости уравнений, что часто встречается в задачах численного моделирования. Это делает метод более гибким и применимым к разнообразным инженерным и физическим задачам. Для проверки и апробации данной методики проводятся вычисления для двух важных задач – течения внутри каверны и течения Пуазейля. Рассматривается значение числа Рейнольдса, $Re=100$, а также различные размеры вычислительных сеток. Полученные результаты сравниваются с экспериментальными данными, и наблюдается высокая степень согласования между моделью и реальными явлениями. Это свидетельствует об эффективности и точности предложенного метода в решении сложных течений в различных инженерных и физических задачах.

Ключевые слова: сжимаемый газ, уравнения Навье-Стокса, обезразмеривание, каверна, течение Пуазейля, число Маха.

Введение

В большинстве прикладных задач физические процессы проходят при малых числах Маха и теоретическое изучение дозвуковых турбулентных течений является существенно важным и актуальным при конструировании, например, энергетических установок и транспортных средств.

Методы решения уравнений сжимаемого газа, хорошо работающие при умеренно дозвуковых и сверхзвуковых скоростях потока, оказываются неэффективными и даже непригодными для расчета течений с числами Маха ниже 0.1–0.3. Это проявляется и выражается в ухудшении точности получаемых при $M \ll 1$ стационарных решений.

При численном решении такого рода задач необходимо использование полных уравнений Навье-Стокса для течения сжимаемого вязкого газа с малыми числами Маха.

Собственные значения матрицы Якоби A уравнений Навье-Стокса имеют вид:
 $\lambda_1 = u$, $\lambda_2 = u - c$, $\lambda_3 = u + c$. Здесь $c = \sqrt{\gamma dp / d\rho}$ – скорость звука. После обезразмеривания к скорости звука получим $\bar{\lambda}_1 = M$, $\bar{\lambda}_{2,3} = M \pm 1$, где $M = u_0 / c$ – число Маха, u_0 – характерная скорость течения, γ – показатель адиабаты. Число обусловленности матрицы Λ определяется следующим образом $r = \frac{\max|\lambda_i|}{\min|\lambda_i|} = \frac{M+1}{M} \rightarrow \infty$ при $M \rightarrow 0$ и с уменьшением числа Маха может стать существенно больше единицы. Это обстоятельство определяется как жест-

кость исходных уравнений, что может приводить к некоторым проблемам, например, малое изменение исходных параметров будет кардинально сказываться на результатах численного решения уравнения. Также если рассмотреть условие устойчивости Куранта-Фридрихса-Леви (КФЛ) для явных схем, которое определяется наибольшим собственным значением матрицы $A \max_k |\lambda_k| \Delta t \leq \Delta x$, то видно, что шаг интегрирования по времени должен определяться скоростью наиболее быстрой волны. В то же время для самой медленной волны имеет место $\min_k |\lambda_k| \Delta t \leq \frac{\Delta x}{R}$ и слишком большое число обусловленности уменьшает эффективность распространения конвективных волн, что приводит к медленной сходимости численного решения. Таким образом, при стремлении числа Маха к нулю численное решение исходных уравнений для сжимаемого газа сопровождается определенными трудностями.

Основные положения

На данный момент известны два численных подхода, позволяющих решать существенно дозвуковые течения. Традиционно эти подходы подразделяются на методы, основанные на преобразовании давления, и на методы, основанные на преобразовании плотности.

Метод, основанный на преобразовании давления (Pressure-based method), разрабатывался для решения уравнений Навье-Стокса, описывающих несжимаемые течения. Здесь вводилась так называемая искусственная сжимаемость, а для давления записывалось уравнение путем модификации уравнений неразрывности, импульса или энергии, и также вводилась переменная скорости звука. Из уравнения состояния определялись плотность или температура.

Обзор литературы

При таком подходе изменение давления остается конечным независимо от числа Маха, что делает решение уравнений приемлемым для всего спектра чисел Маха [1]. Первая реализация метода, основанного на преобразовании давления, разработана в ранних работах Харлоу и Амсен [2, 3] на основе полуявного конечно-разностного алгоритма. Метод коррекции давления или проекционные методы с коррекцией для скорости и давления [4] были также использованы в работах [5]. Такие методы эффективно использовались в рамках метода конечных объемов и известны под названием семейства схем SIMPLE (Semi-Implicit Pressure Linked Equations) [6]. Карки и Патанкар [1] разработали метод SIMPLE для сжимаемых течений, применяемый для широкого диапазона скоростей рассматриваемого течения. Так, например, Мюнц и др. [7] применили SIMPLE для решения течения с малыми числами Маха с несколькими переменными давления, каждый из которых связан с различной физикой рассматриваемой задачи. Аналогичные процедуры были разработаны и другими авторами [8–10]. Проекционный метод применялся в конечно-разностной схеме со вторым порядком точности Ван Каном [11]. Кроме того, в рамках метода конечных элементов Донеа и др. [12] ввели проекционный метод с дробным шагом, разработанный с целью значительно снизить вычислительные расходы в переходных течениях несжимаемых вязких потоков.

Как уже было сказано, данный метод предназначен в основном для решения уравнений для динамически несжимаемой среды, что также позволяет производить расчет различных течений с малыми числами Маха, однако для течений с существенными эффектами сжимаемости данный подход неприемлем.

Методы, основанные на преобразовании плотности (Density-based method), представляют собой большой класс схем, разработанных для сжимаемых течений [13]. Здесь решаются полные уравнения для течения сжимаемого газа, что позволяет применять данный метод для решения задач как с малыми, так и с умеренными числами Маха. В рамках этого метода были предложены два подхода для решения уравнения Навье-Стокса при низких режимах числа Маха, которые позволяют устранить вышеописанные проблемы жесткости уравнений – это предобуславливание (preconditioning) и асимптотический метод. Оба метода направлены на достижение перемасштабирования числа обусловленности системы. Метод предобуславливания состоит в умножении производной по времени на матрицу предобуславливания, которая подбирается

так, чтобы скорости распространения возмущений имели один порядок при числе Маха, стремящемся к нулю [14].

В работе [15] авторы разработали оригинальные методы предобуславливания с низким числом Маха для схем распространения волн, которые представлены в работе [16] для модели двухфазного сжимаемого потока с жесткой релаксацией давления, где, расширяя метод Гийара–Виоза для однофазных уравнений Эйлера, были получены предобуславливатель типа Тюркеля для метода типа Роу для двухфазной системы. Анализ с помощью асимптотических разложений предобусловленных дискретных двухфазных уравнений Роу показал, что предобусловливание действует так же, как и в однофазном случае, а именно поправка на малое число Маха позволяет восстановить правильное масштабирование возмущений давления.

Работа [17] направлена на реализацию и исследование нового предобуславливания, который включает в себя две разные методологии, разработанные по [18, 19]. Авторами был разработан CFD код для численного расчета уравнений Эйлера и Навье-Стокса для стационарного режима на основе метода конечного объема с центром в ячейке с использованием усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Метод локального передобуславливания был реализован из-за его надежности при прогнозировании потоков с низким числом Маха в среде сжимаемого кода CFD.

Авторы работы [20] оценили комбинацию локального предобуславливания Вейсса-Смита и Чой-Меркла в сочетании с методом конечных элементов нелинейной многомасштабной вязкости на основе плотности для решения устойчивых сжимаемых течений при низких числах Маха. Формулировка авторов основана на стратегии разделения масштабов, в которой пространство подсеточного масштаба заполняется пузырьковыми функциями.

В работе [21] пространственная координата, время, плотность, энергия, давление, температура обезразмеривались к параметрам набегающего потока и глубине полости D , скорость обезразмеривалась к скорости звука. Было выявлено, что течение становится неустойчивым при увеличении числа Маха до $M_\infty \approx 0,6$. В [22] разработана программа Cascade Technologies, который используется для решения полных уравнений Навье-Стокса (NS) сжимаемых жидкостей и исследования течений в открытой полости, а параметры обезразмеривания принялись как в предыдущей работе.

Таким образом, исходя из вышеописанного обзора исследований, все еще сохраняется потребность в экономичном и универсальном численном методе, позволяющем рассчитывать движения сжимаемого вязкого газа в реальных аэродинамических установках в широком диапазоне характерного числа Маха потока. В данной работе предлагается эффективный метод решения уравнений Навье-Стокса на основе ENO схемы третьего порядка точности, который хорошо зарекомендовал себя для расчета течений при больших и умеренных числах Маха и позволит его применение на течение с $M \ll 1$ при помощи введения новых параметров обезразмеривания. Для апробации метода рассматриваются задачи течение в каверне и течение Пуазейля.

Материалы и методы

На стенках полости принимаются граничные условия прилипания и также считаются непроницаемыми. Теплопередача через стенки отсутствует, так как они адиабатичны. При постоянной температуре (T), давлении (P), плотности (ρ) жидкости рассчитывают в каждый интервал времени по мере движения нижней стенки.

Граничные условия:

$$u = 0, v = 0, w = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0, z = 0, 0 \leq x \leq 0.00051, y = 0, t > 0;$$

$$u = u_0, v = 0, w = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0, z = 0.00051, 0 \leq x \leq 0.00051, y = 0, t > 0;$$

$$u = 0, v = 0, w = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0, x = 0, 0 \leq z \leq 0.00051, y = 0, t > 0;$$

$$u = 0, v = 0, w = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0, x = 0.00051, 0 \leq z \leq 0.00051, y = 0, t > 0.$$

Параметры течения приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры расчета

Параметр	Единица измерения	Значение
Скорость, u	[м/с]	17.3205
Длина, L	[м]	0.00051
Высота, H	[м]	0.00051
Давление, P	[Па]	101325
Температура, T	[K]	300
Вязкость, μ	[Н с/м ³]	0.000026112

Начальные условия:

$$u = 0, v = 0, w = 0, t = 0, 0 \leq x \leq L_1, 0 \leq z \leq L_2, 0 \leq y \leq L_3;$$

$$\left. \begin{aligned} T_i &= T_\infty \\ \rho_i &= \rho_\infty \\ P_i &= P_\infty \end{aligned} \right\}, t = 0, 0 \leq x \leq L_1, 0 \leq z \leq L_2, 0 \leq y \leq L_3;$$

Исходной является система трехмерных осредненных по Фавру уравнений Навье-Стокса для сжимаемого турбулентного газа, записанная в декартовой системе координат в консервативной форме.

В качестве определяющих принимаются параметры потока на входе $u_\infty, \rho_\infty, T_\infty$, давление и полная энергия отнесены к значению $\frac{\rho_\infty u_\infty^2}{M_\infty}$, плотность к $\frac{\rho_\infty}{M_\infty}$, температура к температуре потока T_∞ , внутренняя энергия к u_∞^2 :

$$\bar{u} = \frac{u}{u_\infty}, \bar{v} = \frac{v}{u_\infty}, \bar{w} = \frac{w}{u_\infty}, \bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_\infty} M_\infty,$$

$$\bar{T} = \frac{T}{T_\infty}, \bar{e} = \frac{e}{u_\infty^2}, \bar{P} = \frac{P}{\rho_\infty u_\infty^2} M_\infty, \bar{c} = \frac{c}{u_\infty}, \bar{E}_t = \frac{E_t}{\rho_\infty u_\infty^2} M_\infty.$$

В этом случае система уравнений примет вид:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{E} - \bar{E}_v)}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{F} - \bar{F}_v)}{\partial z} + \frac{\partial (\bar{G} - \bar{G}_v)}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\bar{U} = \begin{pmatrix} \bar{\rho} \\ \bar{\rho u} \\ \bar{\rho v} \\ \bar{\rho w} \\ \bar{E}_t \end{pmatrix}, \bar{E} = \begin{pmatrix} \bar{\rho u} \\ \bar{\rho u^2 + P} \\ \bar{\rho uv} \\ \bar{\rho uw} \\ (\bar{E}_t + \bar{P})\bar{u} \end{pmatrix}, \bar{F} = \begin{pmatrix} \bar{\rho w} \\ \bar{\rho uw} \\ \bar{\rho vw} \\ \bar{\rho w^2 + P} \\ (\bar{E}_t + \bar{P})\bar{w} \end{pmatrix}, \bar{G} = \begin{pmatrix} \bar{\rho v} \\ \bar{\rho uv} \\ \bar{\rho v^2 + P} \\ \bar{\rho vw} \\ (\bar{E}_t + \bar{P})\bar{v} \end{pmatrix},$$

а компоненты $\bar{E}_v$, $\bar{F}_v$, $\bar{G}_v$ связаны с вязкими напряжениями:

$$\begin{aligned} \bar{E}_v &= \left(0, \quad \bar{\tau}_{xx}, \quad \bar{\tau}_{xy}, \quad \bar{\tau}_{xz}, \quad \bar{u}\bar{\tau}_{xx} + \bar{v}\bar{\tau}_{xy} + \bar{w}\bar{\tau}_{xz} - \bar{q}_x \right)^T, \\ \bar{F}_v &= \left(0, \quad \bar{\tau}_{xz}, \quad \bar{\tau}_{yz}, \quad \bar{\tau}_{zz}, \quad \bar{u}\bar{\tau}_{xz} + \bar{v}\bar{\tau}_{yz} + \bar{w}\bar{\tau}_{zz} - \bar{q}_z \right)^T, \\ \bar{G}_v &= \left(0, \quad \bar{\tau}_{xy}, \quad \bar{\tau}_{yy}, \quad \bar{\tau}_{yz}, \quad \bar{u}\bar{\tau}_{xy} + \bar{v}\bar{\tau}_{yy} + \bar{w}\bar{\tau}_{yz} - \bar{q} \right)^T. \end{aligned}$$

Тензоры напряжений, потоки тепла и уравнение энергий в безразмерных переменных примут вид:

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_{xx} &= \frac{2\bar{\mu}}{3} \text{Re} M_\infty \left(2\bar{u}_x - \bar{w}_z - \bar{v}_y \right), \quad \bar{\tau}_{zz} = \frac{2\bar{\mu}}{3} \text{Re} M_\infty \left(2\bar{w}_z - \bar{u}_x - \bar{v}_y \right), \\ \bar{\tau}_{yy} &= \frac{2\bar{\mu}}{3} \text{Re} M_\infty \left(2\bar{v}_y - \bar{u}_x - \bar{w}_z \right), \\ \bar{\tau}_{xz} = \bar{\tau}_{zx} &= \bar{\mu} \text{Re} M_\infty \left(\bar{u}_z + \bar{w}_x \right), \quad \bar{\tau}_{xy} = \bar{\tau}_{yx} = \bar{\mu} \text{Re} M_\infty \left(\bar{u}_y + \bar{v}_x \right), \\ \bar{\tau}_{yz} = \bar{\tau}_{zy} &= \bar{\mu} \text{Re} M_\infty \left(\bar{w}_y + \bar{v}_z \right), \\ \bar{q}_x &= \frac{\bar{\mu}}{(\gamma-1)M_\infty^2 \text{RePr}} \bar{T}_x, \quad \bar{q}_y = \frac{\bar{\mu}}{(\gamma-1)M_\infty^2 \text{RePr}} \bar{T}_y, \quad \bar{q}_z = \frac{\bar{\mu}}{(\gamma-1)M_\infty^2 \text{RePr}} \bar{T}_z, \\ \bar{E}_t &= \bar{\rho} \left(\bar{e} + \frac{\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2}{2} \right). \end{aligned}$$

M_∞ – число Маха потока, $\text{Re} = u_\infty L \rho / \mu$ – число Рейнольдса, Pr – число Прандтля. Далее для удобства знак черты над параметрами опускается.

В безразмерном виде граничные условия приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Безразмерные величины параметров каверны

Параметры	u	v	w	ρ	P	T	E_t
Величины	1	0	0	0.05	14.4337741	1	36.1094352

В безразмерном виде начальные и граничные условия имеют вид:

$$u=0, v=0, w=0, t=0, 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq z \leq 1;$$

$$\left. \begin{aligned} T_i &= T_\infty \\ \rho_i &= \rho_\infty \\ P_i &= P_\infty \end{aligned} \right\}, t=0, 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq z \leq 1;$$

$$u_1(0, y, z, t) = u_0 \left[\cos \left(\frac{\pi z}{2l} \right) \right]^2,$$

$$u_2(0, y, z, t) = 0,$$

$$T(0, y, z, t) = T_\infty,$$

$$u_1(x, y, z, t) = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p^{exact}}{\partial x} (l^2 - z^2),$$

$$T(x, y, z, t) - T_\infty = -\frac{\mu u_m^2}{\lambda} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} (z/l)^4 - (z/l)^2 \right),$$

$$\frac{\partial p^{exact}}{\partial x} = -1.5 \nu \frac{\rho_\infty \dot{m}_{inlet}}{l^3} = -1.5 \text{Re}^{-1} \frac{\rho_\infty u_\infty^2}{l},$$

$$M_\infty = \frac{u_\infty}{c} = 0.1.$$

Уравнения будут решаться в новой системе координат, которая предполагает сгущение сетки вблизи стенки, если это необходимо. В данной работе новая система определяется в виде:

$$\xi = x, \quad \eta = z, \quad \zeta = y.$$

При этом система уравнений (1) в обобщенных координатах запишется в виде:

$$\frac{\partial \tilde{U}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \tilde{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \tilde{G}}{\partial \zeta} = \frac{\partial \tilde{E}_{v2}}{\partial \xi} + \frac{\partial \tilde{E}_{vm}}{\partial \xi} + \frac{\partial \tilde{F}_{v2}}{\partial \eta} + \frac{\partial \tilde{F}_{vm}}{\partial \eta} + \frac{\partial \tilde{G}_{v2}}{\partial \zeta} + \frac{\partial \tilde{G}_{vm}}{\partial \zeta} \quad (2)$$

где

$$\tilde{U} = \frac{1}{J} U, \quad \tilde{E} = \left(\frac{\xi_x}{J} \right) E, \quad \tilde{F} = \left(\frac{\eta_z}{J} \right) F, \quad \tilde{E}_{v2} = \left(\frac{\xi_x}{J} \right) E_{v2}, \quad \tilde{E}_{vm} = \left(\frac{\xi_x}{J} \right) E_{vm},$$

$$\tilde{F}_{v2} = \left(\frac{\eta_z}{J} \right) F_{v2}, \quad \tilde{F}_{vm} = \left(\frac{\eta_z}{J} \right) F_{vm}, \quad \tilde{G}_{v2} = \left(\frac{\zeta_y}{J} \right) G_{v2}, \quad \tilde{G}_{vm} = \left(\frac{\zeta_y}{J} \right) G_{vm},$$

$J = \frac{\partial(\xi, \eta, \zeta)}{\partial(x, z, y)}$ – якобиан преобразования, $\tilde{E}_{vm} \tilde{E}_{v2}$ – диффузионные члены, содержащие смешанные и вторые производные.

В соответствии с принципом построения ENO-схемы исходная система уравнений формально представляется следующим образом:

$$\frac{\partial \tilde{U}}{\partial t} + (\hat{A}^+ + \hat{A}^-) \frac{\partial \mathbf{E}^m}{\partial \xi} + (\hat{B}^+ + \hat{B}^-) \frac{\partial \mathbf{F}^m}{\partial \eta} + (\hat{Q}^+ + \hat{Q}^-) \frac{\partial \mathbf{G}^m}{\partial \zeta} -$$

$$- \left[\frac{\partial(\tilde{\mathbf{E}}_{v2} + \tilde{\mathbf{E}}_{vm})}{\partial \xi} + \frac{\partial(\tilde{\mathbf{F}}_{v2} + \tilde{\mathbf{F}}_{vm})}{\partial \eta} + \frac{\partial(\tilde{\mathbf{G}}_{v2} + \tilde{\mathbf{G}}_{vm})}{\partial \zeta} \right] = 0 \quad (3)$$

здесь $\mathbf{E}^{n+1} \approx A^n \mathbf{U}^{n+1}$, $\mathbf{F}^{n+1} \approx B^n \mathbf{U}^{n+1}$, $\mathbf{G}^{n+1} \approx Q^n \mathbf{U}^{n+1}$, $A = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial U}$, $B = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial U}$, $Q = \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial U}$ – матрицы

$$\text{Якоби, } \hat{A}^\pm = R \hat{\Lambda}_\xi R^{-1} = R \left(\frac{1 \pm \text{sign}(\Lambda_\xi)}{2} \right) R^{-1}, \quad \hat{B}^\pm = T \hat{\Lambda}_\eta T^{-1} = T \left(\frac{1 \pm \text{sign}(\Lambda_\eta)}{2} \right) T^{-1},$$

$$\hat{Q}^\pm = S \hat{\Lambda}_\zeta S^{-1} = S \left(\frac{1 \pm \text{sign}(\Lambda_\zeta)}{2} \right) S^{-1}, \quad \mathbf{E}^m = \tilde{\mathbf{E}} + \mathbf{E}_i + \mathbf{D}_i, \quad \mathbf{F}^m = \tilde{\mathbf{F}} + \mathbf{E}_\zeta + \mathbf{D}_\zeta,$$

$\mathbf{G}^m = \tilde{\mathbf{G}} + \mathbf{E}_\omega + \mathbf{D}_\omega$ – модифицированные потоки в узловых точках (i,j,k) , состоящие из исходных конвективных векторов $(\tilde{\mathbf{E}}, \tilde{\mathbf{F}}, \tilde{\mathbf{G}})$ и добавочных членов высокого порядка точности $(\mathbf{E}_i, \mathbf{D}_i, \mathbf{E}_\zeta, \mathbf{D}_\zeta, \mathbf{E}_\omega, \mathbf{D}_\omega)$.

После факторизации одношаговой конечно-разностной схемы для интегрирования по времени уравнения (3) получается следующее равенство:

$$\left\{ I + \Delta t \left[(\hat{A}^+ + \hat{A}^-)^n \frac{\partial}{\partial \xi} A_\xi^n \bullet - \frac{\partial}{\partial \xi} \tilde{\mu}_\xi \frac{\partial}{\partial \xi} \frac{1}{\tilde{U}_i} \bullet \right] \right\} \times$$

$$\left\{ I + \Delta t \left[(\hat{B}^+ + \hat{B}^-)^n \frac{\partial}{\partial \eta} B_\eta^n \bullet - \frac{\partial}{\partial \eta} \tilde{\mu}_\eta \frac{\partial}{\partial \eta} \frac{1}{\tilde{U}_i} \bullet \right] \right\} \times$$

$$\times \left\{ I + \Delta t \left[(\hat{Q}^+ + \hat{Q}^-)^n \frac{\partial}{\partial \zeta} Q_\zeta^n \bullet - \frac{\partial}{\partial \zeta} \tilde{\mu}_\zeta \frac{\partial}{\partial \zeta} \frac{1}{\tilde{U}_i} \bullet \right] \right\} \tilde{U}^{n+1} =$$

$$= \tilde{U}^n + \Delta t \left[\frac{\partial \tilde{\mathbf{E}}_{v22}^n}{\partial \xi} + \frac{\partial \tilde{\mathbf{F}}_{v22}^n}{\partial \eta} + \frac{\partial \tilde{\mathbf{G}}_{v22}^n}{\partial \zeta} + \frac{\partial}{\partial \xi} (2\tilde{\mathbf{E}}_{vm}^n - \tilde{\mathbf{E}}_{vm}^{n-1}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (2\tilde{\mathbf{F}}_{vm}^n - \tilde{\mathbf{F}}_{vm}^{n-1}) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (2\tilde{\mathbf{G}}_{vm}^n - \tilde{\mathbf{G}}_{vm}^{n-1}) \right] -$$

$$- \Delta t \left[(\hat{A}^+ + \hat{A}^-) \frac{\partial}{\partial \xi} (\mathbf{E}_\xi + \mathbf{D}_\xi) + (\hat{B}^+ + \hat{B}^-) \frac{\partial}{\partial \eta} (\mathbf{E}_\eta + \mathbf{D}_\eta) + (\hat{Q}^+ + \hat{Q}^-) \frac{\partial}{\partial \zeta} (\mathbf{E}_\zeta + \mathbf{D}_\zeta) \right]^n \quad (4)$$

где $A_\xi = \xi_x A$, $B_\eta = \eta_z B$, $Q_\zeta = \zeta_y Q$, причем $\hat{A}^+ + \hat{A}^- = I$, I – единичная матрица,

$$\tilde{\mu}_\xi = \frac{\mu \xi_x^2}{ReJ}, \quad \tilde{\mu}_\eta = \frac{\mu \eta_z^2}{ReJ}, \quad \tilde{\mu}_\zeta = \frac{\mu \zeta_y^2}{ReJ}.$$

Конвективные члены выделенной части (4) были аппроксимированы с использованием следующего оператора:

$$\left(A^- + A^+ \right) \frac{\partial}{\partial \xi} f \Big|_{ij} = \frac{A_{i+1/2j}^- (f_{i+1j} - f_{ij}) + A_{i-1/2j}^+ (f_{ij} - f_{i-1j})}{\Delta \xi} \quad (5)$$

Аппроксимации диффузионных слагаемых имеют следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \varphi \frac{\partial}{\partial \eta} f \Big|_{ij} = \frac{\varphi_{i+1j}(f_{i+1j+1} - f_{i-1j+1}) - \varphi_{i-1j}(f_{i+1j-1} - f_{i-1j-1})}{4\Delta\xi\Delta\eta} + O(\Delta\xi^2; \Delta\eta^2)$$

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \varphi \frac{\partial}{\partial \eta} f \Big|_{ij} = \left(\frac{(\varphi_{ij+1} + \varphi_{ij})(f_{ij+1} - f_{ij}) - (\varphi_{ij} + \varphi_{ij-1})(f_{ij} - f_{ij-1})}{2\Delta\eta^2} \right) + O(1/2\Delta\eta^2)$$

Результаты и обсуждение

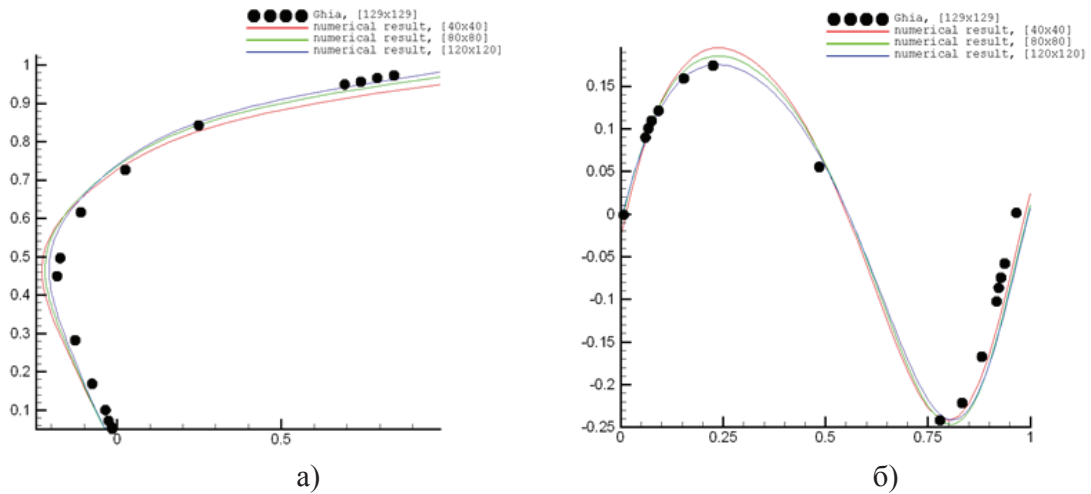


Рисунок 1 – Сравнение профиля скорости а) u б) v с экспериментом для сеток 40x40, 80x80, 120x120 при $M=0.05$ и $Re=100$.

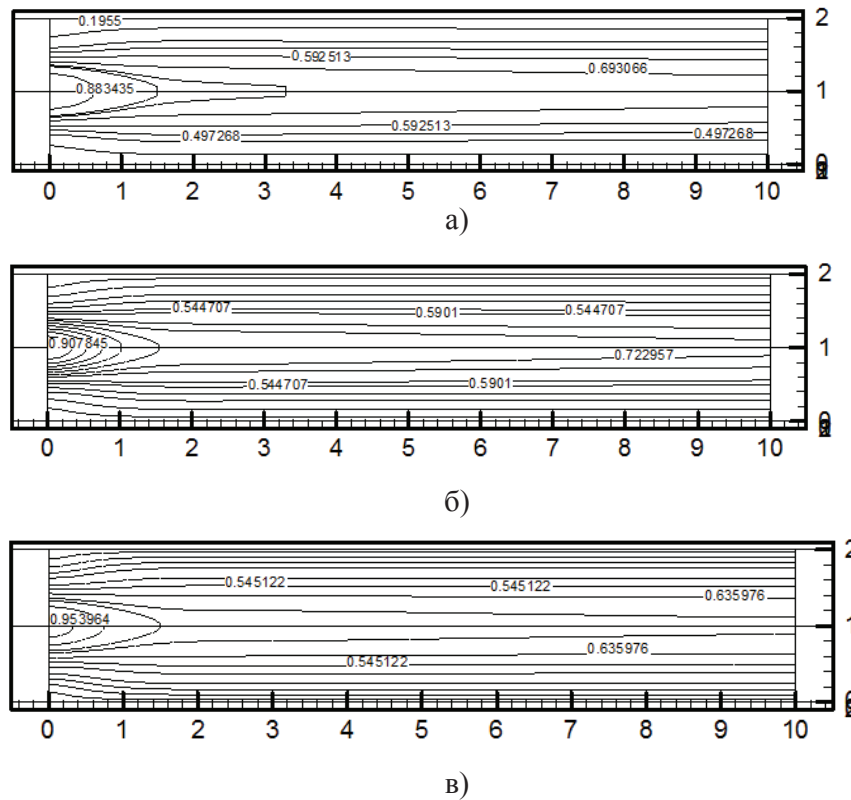


Рисунок 2 – Контуры скорости при сетках а) 60x30, б) 120x60, в) 180x90 при $M=0.1$ и $Re=750$.

Верхняя стенка движется с постоянной горизонтальной скоростью, а остальные стенки неподвижны, стороны полости равны 1.0. Начальное поле скоростей однородно во всей области. Число Маха находится в диапазоне $0.005 \leq M \leq 0.05$.

На рисунке 3 сравниваются профили продольной и поперечной скоростей с использованием трех разных сеток с экспериментов в работе [26], полученных на сетке 129×129 при $M=0.05$, $Re = 100$. Решение для самой грубой 40×40 сетки показывают некоторые отличия от других более мелких сеток. Решения с использованием сеток 80×80 и 120×120 хорошо согласуются с решениями [26].

Результаты, полученные с помощью алгоритма решения Nav3D для стационарного течения в каверне с подвижной границей, свидетельствуют о хорошем согласии полученных результатов с эталонными решениями [26]. Были использованы три различные сетки: грубая – 40×40 , средняя – 80×80 , мелкая – 120×120 . Шаг по времени для двумерного течения в каверне при различных числах Маха составляет 0.0001-0.0007.

Скорость сходимости представляется в виде логарифма от нормы невязки для плотности $|\rho^{n+1} - \rho^n|$ в зависимости от итерационных шагов по времени. Скорость сходимости решения достаточно высокая.

Увеличение числа узлов расчетной сетки приводит к тому, что, начиная с числа узлов 80×80 и выше, решение сходилось немного быстрее. Как показано на этом графике, решение для мелкой сетки сходилось немного быстрее.

Как было сказано ранее, результаты почти не меняются и выбор сетки 80×80 – компромисс между грубой и мелкой сеткой. Таким образом, можно говорить о достаточной точности схемы для сеток с числовым узлом 80×80 и выше, что позволяет проводить расчет задачи на сетках этих размеров.

Таким образом, на данной тестовой задаче видно, что введение новых параметров обезразмеривания позволяет решающим образом улучшить работоспособность численного метода, а именно улучшает сходимость и точность получаемого стационарного решения. Скорость сходится лучше с уменьшением числа Маха.

При $Re = 100$ образование вторичной циркуляции на дне каверны отсутствует, а имеет место только первичная циркуляция в направлении вверх каверны. Чем выше скорость крышки, тем быстрее происходит образование вторичной циркуляции. Повышение температуры и давления влияет на расположение и размер первичной и вторичной циркуляции.

Для настоящего исследования делается вывод, что метод решения подходит для текущей задачи с подвижной крышкой.

Для расчета используются параметры $M=0.1$, $Re=750$ и три различные сетки грубая – 60×30 , средняя – 120×60 , мелкая – 180×90 .

Профили скоростей очень быстро сходятся к точному решению [27].

На рисунке 2 приводятся потоки скорости, где видно, что к концу канала скорость достигает значения ~ 0.5 .

Вблизи истечения образуются сильные градиенты давления и температуры (рисунок 2). В поведении пограничного слоя, проявляющемся в контурах температуры вблизи выходного сечения, наблюдается небольшое возмущение профилей температуры вблизи выхода.

Закключение

В настоящей работе исследованы существенно дозвуковые течения (задачи каверны и Пуазейля), где исходной является система трехмерных сжимаемых уравнений Навье-Стокса. Был предложен новый метод обезразмеривания, который позволил устранить жесткости в уравнениях. Система решена ENO схемой третьего порядка точности. Предложенные параметры обезразмеривания позволили сжимаемым уравнениям Навье-Стокса сходиться при диапазоне числа Маха $0.0005 \leq M \leq 0.05$. Полученные результаты показали хорошее согласие с экспериментальными данными.

В решении задачи каверны с увеличением скорости крышки образовались вторичные вихри на дне полости, на их расположения повлияли повышения температуры и давления. Для проведения расчетов была выбрана вычислительная сетка 80×80 .

В исследовании течения Пуазейля с числами $Re=750$ и $M=0.1$ изменения в вычислимой сетке (60×30 , 120×60 , 180×90) не повлияли на полученные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Karki K., Patankar S. V. Pressure based calculation procedure for viscous flows at all speeds in arbitrary configurations. *AIAA journal*, vol. 27, no. 9, pp. 1167–1174.
- 2 Harlow F.H., Amsden A. Numerical calculation of almost incompressible flow. *Journal of Computational Physics*, vol. 3, pp. 80–93.
- 3 Harlow F.H., Amsden A. (1971) A numerical fluid dynamics calculation method for all flow speeds, vol. 8, pp. 197–213.
- 4 Peyret R. and Taylor T.D. *Computational methods for fluid flow* Springer, Verlag, New York.
- 5 Temam R. (1969) Sur l'approximation de la solution de Navier-Stokes par la méthode des pas fractionnaires. *Archiv. Ration. Mech. Anal*, vol. 32, pp. 377–385.
- 6 Patankar S.V. *Numerical heat transfer and fluid flow*, McGraw-Hill, New York.
- 7 Munz C.-D., Roller S., Klein R. and Geratz K.J. (2003) The extension of incompressible flow solvers to the weakly compressible regime. *Computers and Fluids*, vol. 32, no. 2, pp. 173–196.
- 8 Bijl H., Wesseling P. (1998) A unified method for computing incompressible and compressible flows in boundary-fitted coordinates. *J. Com. Phys.*, vol 141, no. 2, pp. 153–173.
- 9 Mary I., Sagaut P. and Deville M. (2000) An algorithm for low Mach number unsteady flows. *Computers and Fluids*, vol. 29, no. 2, pp. 119–147.
- 10 Roller S., Munz C.D. (2000) A low Mach number scheme based on multi-scale asymptotics. *Computing and Visualization in Science*, vol. 3, no. 1/2, pp. 85–91.
- 11 Van Kan J. (1986) A second-order accurate pressure-correction scheme for viscous incompressible flow. *SIAM J. Sci. Comp.*, vol. 7, pp. 870–891.
- 12 Donea J., Giuliani S.L.H., Quarpelle L. (1982) Finite element solution of the unsteady Navier-Stokes equations by fractional step method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 30, pp. 53–73.
- 13 Zienkiewicz O.C., Nithiarasu P., Codina R., Vazquez M., Orti. P. (1999) The characteristic-based-split procedure: An efficient and accurate algorithm for fluid problems. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 31, pp. 359.
- 14 Zienkiewicz O.C., Codina R. (1995) A general algorithm for compressible and incompressible flow. Part I. The split characteristic-based scheme. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 20, pp. 887–913.
- 15 Zienkiewicz O.C., Morgan K., Sataya Sal, B.V.K., Codin R., Vasquez M. (1995) A general algorithm for compressible and incompressible flow. Part II. Test on the explicit form. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 20, pp. 887–913.
- 16 Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. (2000) *The finite element method, 3: fluid dynamics*, Butterworth and Heinemann.
- 17 Turkel E. (1997) Preconditioning – Square methods for multidimensional aerodynamics. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, vol. 2025, 856 p.
- 18 Pelanti M. (2017) Low Mach number preconditioning techniques for Roe-type and HLLC-type methods for a two-phase compressible flow model. *Applied Mathematics and Computation*, vol. 310, pp. 112–133.
- 19 Pelanti M., Shyue K.M. (2014) A mixture-energy-consistent six-equation two-phase numerical model for fluids with interfaces, cavitation and evaporation wave. *J. Comput. Phys.*, vol. 259, pp. 331–357.
- 20 Maia A.A.G., Kapat J.S., Tomita J.T., Silva J.F., Bringham C., Cavalca D.F. (2020) Preconditioning methods for compressible flow CFD codes: Revisited. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 186.
- 21 Darmofal D.L., Siu K. (1999) A robust multigrid algorithm for the Euler equations with local preconditioning and semi-coarsening. *J. Compu. Phys.*, vol. 151, no. 2, pp. 728–756.
- 22 Turkel E., Vatsa V.N., Radaspiel R. (1996) Preconditioning methods for low-speed flows. *AIAA*, vol. 96.

^{1*}МАНАПОВА А., ²БЕКЕТАЕВА А. ^{3,4}МАКАРОВ В.

¹Civil Aviation Academy, 050039, Almaty, Kazakhstan

²Institute of mathematics and mathematical modeling CS MES RK,
050010, Almaty, Kazakhstan

³Institute of control sciences RAS, 117997, Moscow, Russia

⁴National research nuclear university «MEPhI», 115409, Moscow, Russia

E-mail: manapova.a.k.math@gmail.com

NUMERICAL MODELING OF ESSENTIALLY SUBSONIC FLOWS OF COMPRESSIBLE GAS

Abstract

A new method for solving essentially subsonic flows is proposed, which represents a significant step in the field of numerical modeling of flows based on the Navier-Stokes system of equations. The method uses an ENO (Essentially Non-Oscillatory) scheme of third order accuracy, which provides higher accuracy when calculating flows with low speed of sound. One of the key features of this method is the introduction of nondimensionalization parameters. These parameters make it possible to adapt the Navier-Stokes equations to different physical conditions and avoid the rigidity of the equations, which is often encountered in numerical modeling problems. This makes the method more flexible and applicable to a variety of engineering and physical problems. To check and appraise this technique, calculations are carried out for two important problems - flow inside a cavern and Poiseuille flow. The value of the Reynolds number, $Re=100$, as well as various sizes of computational grids are considered. The obtained results are compared with experimental data, and a high degree of agreement between the model and real phenomena is observed. This indicates the effectiveness and accuracy of the proposed method in solving complex flows in various engineering and physical problems.

Key words: compressible gas, Navier-Stokes equations, dimensionlessness, cavity, Poiseuille flow, Mach number.

^{1*}МАНАПОВА А.Қ., ²БЕКЕТАЕВА А.О., ^{3,4}МАКАРОВ В.В.

¹Азаматтық авиация академиясы, 050039, Алматы қ., Қазақстан

²ҚР БҒМ ҒК Математика және математикалық модельдеу институты,
050010, Алматы қ., Қазақстан

³РҒА Басқару мәселелері институты, 117997, Мәскеу қ., Ресей

⁴«МИФИ» Ұлттық ядролық зерттеу университеті 115409, Мәскеу қ., Ресей

E-mail: manapova.a.k.math@gmail.com

СЫҒЫЛАТЫН ГАЗДЫҢ ДЫБЫС ЖЫЛДАМДЫҒЫНА ДЕЙІНГІ АҒЫНДАРЫН САНДЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Андатпа

Навье-Стокс теңдеулер жүйесіне негізделген ағындарды сандық модельдеу саласындағы маңызды кадамды білдіретін, мәні бойынша дыбысқа дейінгі ағындарды шешудің жаңа әдісі ұсынылды. Әдісте дыбыстың төмен жылдамдығы бар ағындарды есептеу кезінде жоғары дәлдікті қамтамасыз ететін үшінші ретті дәлдіктің ENO (Essentially Non-Oscillatory) схемасы қолданылады. Бұл әдістің негізгі ерекшеліктерінің бірі өлшемсіз параметрлерді енгізу. Бұл параметрлер Навье-Стокс теңдеулерін әртүрлі физикалық жағдайларға бейімдеуге мүмкіндік береді және сандық модельдеу есептерінде жиі кездесетін теңдеулердің қатандығын болдырмайды. Бұл әдісті икемді етеді және оны әртүрлі инженерлік, физикалық мәселелерге қолдануға болады. Бұл әдістемені тексеру және апробациялау үшін үңгір ішіндегі ағын және Пуазейль ағыны сияқты екі маңызды мәселе бойынша есептеулер жүргізіледі. Рейнольдс санының мәні, $Re=100$, сондай-ақ есептеу торларының әртүрлі өлшемдері қарастырылады. Алынған нәтижелер эксперименттік мәліметтермен салыстырылып, модель мен нақты құбылыстардың жоғары дәрежеде сәйкестігі байқалды. Бұл әртүрлі инженерлік және физикалық есептерде күрделі ағындарды шешуде ұсынылған әдістің тиімділігі мен дәлдігін көрсетеді.

Тірек сөздер: сығылатын газ, Навье-Стокс теңдеулері, өлшемсіздендіру, каверна, Пуазейль ағыны, Мах саны.

Информация об авторах**Мананова Айнур Қабдешқызы** (автор для корреспонденции)

Магистр прикладной математики и информатики, сениор-лектор Академии гражданской авиации, ул. Ахметова, 44, 050039, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0003-1548-7061

E-mail: manapova.a.k.math@gmail.com

Бекетаева Асель Орозалиевна

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института математики и математического моделирования КН МОН РК, ул. Пушкина, 125, 050010, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0003-4360-3728

E-mail: azimaras10@gmail.com

Макаров Вадим Владимирович

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем управления РАН, ул. Профсоюзная, 65, 117997, г. Москва, Россия

ORCID ID: 0000-0003-4874-5418

E-mail: makfone@mail.ru

Авторлар туралы мәліметтер**Мананова Айнур Қабдешқызы** (корреспонденция авторы)

Қолданбалы математика және информатика магистрі, Азаматтық авиация академиясының сениор-лекторы, 050039, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0003-1548-7061

E-mail: manapova.a.k.math@gmail.com

Бекетаева Асель Орозалиевна

Физика-математика ғылымдарының докторы, ҚР БҒМ ҒК Математика және математикалық модельдеу институтының бас ғылыми қызметкері, Пушкин к., 125, 050010, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0003-4360-3728

E-mail: azimaras10@gmail.com

Макаров Вадим Владимирович

Техника ғылымдарының кандидаты, РҒА Басқару мәселелері институтының жетекші ғылыми қызметкері, Профсоюзная к., 65, 117997, Мәскеу қ., Ресей

ORCID ID: 0000-0003-4874-5418

E-mail: makfone@mail.ru

Information on the authors**Manapova Ainur** (corresponding author)

Master of applied mathematics and computer science, Senior Lecturer of Civil Aviation Academy, 050039, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0003-1548-7061

E-mail: manapova.a.k.math@gmail.com

Beketaeva Assel

Доктор физико-математических наук, Главный научный сотрудник института математики и математического моделирования КН МОН РК, ул. Пушкина, 125, 050010, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0003-4360-3728

E-mail: azimaras10@gmail.com

Makarov Vadim

Кандидат технических наук, Ведущий научный сотрудник Института проблем управления РАН, ул. Профсоюзная, 65, 117997, Moscow, Russia

ORCID ID: 0000-0003-4874-5418

E-mail: makfone@mail.ru

PHYSICAL SCIENCES
ФИЗИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР
ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 538.9
МРНТИ 29.19.41

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2023-20-4-97-108>

^{1*}ШИНЫКУЛОВА Н.Н., ¹ШАМБУЛОВ Н.Б., ¹ТАТЕНОВ А.М., ²ЕРТУРК С.,
³ШИНЫКУЛОВА Г.Н., ³МӘЖИТ Ж., ⁴АШИКБАЕВА А.Б.

¹Казахский национальный женский педагогический университет,
050000, г. Алматы, Казахстан

²Университет Нийде Омер Халисдемир, Турция

³Алматинский технологический университет,
050061, г. Алматы, Казахстан

⁴Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050000, г. Алматы, Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ
НА МОНОКРИСТАЛЛЫ ФЕРРИТА-ШПИНЕЛЯ

Аннотация

Механизмы перераспределения ионов металла и образования дефектов в феррит-шпинели при облучении сложны и зависят от целого ряда факторов. Поэтому компьютерное моделирование и экспериментальные исследования важны для понимания поведения физических свойств этих материалов под воздействием радиации. Разработка новых материалов, способных противостоять радиационному повреждению, имеет большое значение для целого ряда приложений, включая физику твердого тела, ядерную физику, космические исследования и применение в медицине. В данной работе проведено исследование влияния гамма-облучения на монокристаллы феррита $\text{Co}_{0.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Fe}_2\text{O}_4$. Ранее было проведено исследование с использованием мессбауэровской спектроскопии, которое позволило определить изменение содержания ионов металлов в подрешетках ферритов-шпинелей. Эти изменения влияют на магнитную кристаллографическую анизотропию материала [1]. В научной литературе можно найти данные, которые указывают на то, что гамма-облучение приводит к изменению магнитной восприимчивости материалов и к изменению кривой намагничивания [2, 3]. Эти изменения физических свойств могут быть объяснены перераспределением ионов металлов в октаэдрических и тетраэдрических подрешетках, так как ионы металлов в подрешетках имеют расщепление атомных уровней.

Ключевые слова: феррит-шпинель, моделирование, облучение, кристаллическая решетка.

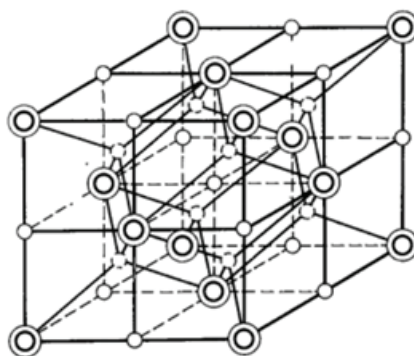
Введение

Перераспределение ионов металла в феррит-шпинельных подрешетках – это сложный процесс, который включает несколько механизмов, таких как образование дефектов, миграция и кластеризация. Образование дефектов в кристаллической решетке, таких как вакансии, интерстиции и дислокации, может обеспечить места для миграции ионов металла. Эти дефекты могут действовать как ловушки для ионов металла, что приводит к образованию радиационно-индуцированных фаз.

Миграция ионов металла происходит, когда смещенные ионы металла перемещаются через кристаллическую решетку, чтобы занять другие участки. Эта миграция зависит от концентрации дефектов и энергии ионизирующего излучения. Ионы металла также могут объединяться в кластеры, образуя наноразмерные осадки, которые могут влиять на свойства материала. Феррит-шпинель – это класс материалов, состоящих из двух взаимопроникающих кристаллических решеток: решетки шпинели и решетки феррита. Решетка шпинели состоит из катионов, расположенных в кубической плотной структуре, а решетка феррита состоит из комбинации катионов железа и анионов кислорода. При облучении ионы металла в феррите-шпинели могут перераспределяться между двумя подрешетками [4–6].

Во время облучения высокоэнергетические частицы, такие как нейтроны, могут проникать в материал и смещать атомы с их мест в решетке. Эти вытесненные атомы могут мигрировать через решетку и в итоге приходят в состояние покоя на новом месте решетки. Этот процесс известен как индуцированная облучением диффузия [7].

В феррите-шпинели ионы металла, такие как железо, могут быть вытеснены из своих первоначальных мест решетки в подрешетку феррита и мигрировать в подрешетку шпинели. Аналогично ионы металла в подрешетке шпинели могут мигрировать в подрешетку феррита. Перераспределение ионов металла может влиять на свойства материала, такие как электропроводность, магнитные свойства и механическая прочность.



○ - Октаэдрические междоузлия; ◐ - Тетраэдрические междоузлия;
⊙ - Анионы кислорода

Рисунок 1 – Элементарная ячейка ГЦК-решетки шпинели с показанным окружением тетраэдрических и октаэдрических междоузлий

Степень перераспределения ионов металла в феррите-шпинели при облучении зависит от нескольких факторов, включая энергию и флюенс облучающих частиц, состав материала и температуру, при которой происходит облучение. Понимание механизмов перераспределения ионов металла в феррите-шпинели важно для разработки материалов, способных противостоять радиационному повреждению в ядерных реакторах и других высокорadiационных средах.

Перераспределение ионов металла в феррите-шпинели может иметь важные последствия для свойств материала. Например, миграция ионов железа из подрешетки феррита в подрешетку шпинели может привести к образованию магнитных наночастиц, которые могут найти применение в магнитных накопителях данных и биомедицинской визуализации. Миграция ионов других металлов, таких как хром или никель, также может повлиять на коррозионную стойкость материала [8].

Помимо перераспределения ионов металлов, облучение может также вызывать дефекты в кристаллической решетке, такие как вакансии, которые могут влиять на механические свойства материала. Например, наличие дефектов может увеличить твердость материала и уменьшить его пластичность. Образование дефектов также является ключевым фактором в эволюции микроструктуры и формировании радиационно-индуцированных фаз в феррите-шпинели при облучении.

Цель исследования:

Исследования наличия дефектов в феррите-шпинели при гамма-облучении, так как перераспределение ионов металла может влиять на свойства материала, такие как электропроводность, магнитные свойства и механическая прочность.

Материалы и методы

Октаэдрические вакансии в кристаллах могут быть заполнены ионами как из октаэдрических, так и из тетраэдрических междоузлий. Чем выше температура кристалла, тем интенсивнее становится этот процесс. Аналогичное явление происходит и с тетраэдрическими вакансиями. При высоких температурах облучения ионы из октаэдрических позиций могут перемещаться в тетраэдрические позиции, увеличивая концентрацию вакансий. То же самое происходит и в тетраэдрической подрешетке феррита. Для описания всех этих процессов необходимо более 20 кинетических уравнений. Аналитическое решение такой системы уравнений невозможно, поэтому предпочтительным является численный метод решения с использованием компьютерных программ. Для этой цели мы выбрали программное обеспечение Fortran и Origin.

Фортран хорошо известен своей эффективностью в численных расчетах и способностью выполнять крупномасштабные научные и инженерные расчеты. Он предлагает такие функции, как обработка массивов, подпрограммы и функции, что делает его пригодным для научных и инженерных приложений.

Программное обеспечение Origin, с другой стороны, является мощным инструментом для анализа данных и построения графиков. Он широко используется в исследованиях и образовании различных научных дисциплин, включая физику. Его гибкость и возможности делают его ценным для ученых, преподавателей и студентов.

Мы разработали программу на Фортране под названием Sys_Adams_1 для решения системы нелинейных уравнений. Программа использует программное обеспечение Fortran и Origin для достижения точных и эффективных результатов.

Для решения системы нелинейных уравнений, использовались два метода:

а) Адамса-Мултона – метод хорд с пользовательским якобианом;

Метод Адамса-Мултона (также известный как метод хорд) является численным методом решения обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Он является явным методом, который использует информацию о предыдущих шагах для вычисления текущего значения. Для использования метода Адамса-Мултона с пользовательским якобианом необходимо иметь явное выражение для якобиана системы. Якобиан представляет собой матрицу, состоящую из частных производных системы уравнений. Обычно якобиан вычисляется аналитически для конкретной системы уравнений;

б) гира-метод хорд с пользовательским якобианом разделенной разностей интегрированием назад.

Главным преимуществом гира-метода хорд с пользовательским якобианом и разделенными разностями интегрирования назад является его способность решать системы ОДУ с более высокой точностью и стабильностью. Пользовательский якобиан позволяет учесть особенности системы и улучшить точность решения. Разделенные разности интегрирования назад учитывают производные на нескольких шагах, что также способствует повышению точности.

Основные положения

Феррит-шпинель – класс керамических материалов, привлекла значительное внимание благодаря своему уникальному сочетанию электропроводности, магнитных свойств и механической прочности. Однако наличие дефектов в этих материалах может существенно повлиять на их эксплуатационные характеристики. Гамма-облучение, распространенный метод создания дефектов в материалах, широко изучалось, чтобы понять его влияние на ферритовую шпинель [6, 9–10].

Феррит шпинели $\text{Co}_{0,75}\text{Cu}_{0,25}\text{Fe}_2\text{O}_4$ имеет общую формулу $(\text{M}_\delta\text{Fe}_{1-\delta})[\text{M}_{1-\delta}\text{Fe}_{1+\delta}]\text{O}_4$, где δ представляет степень инверсии. Кристаллический феррит кобальта CoFe_2O_4 со структурной формулой $(\text{Co}^{2+}_{1-\delta}\text{Fe}^{3+})[\text{Co}^{2+}\text{Fe}^{3+}_{2-\delta}]$ имеет обратную структуру шпинели при комнатной температуре. Феррит кобальта обладает умеренной намагниченностью насыщения, хорошими электрическими свойствами, высокой магнитокристаллической анизотропией, хорошими механическими свойствами и химической стабильностью, что делает его перспективным магнитным материалом [5,6].

При γ -облучении ферритов $\text{Co}_{0,75}\text{Cu}_{0,25}\text{Fe}_2\text{O}_4$ первая константа анизотропии K_1 демонстрирует немонокотное изменение. Вначале она снижается при определенных дозах облучения, а затем заметно возрастает по мере увеличения дозы. Добавление цинка в состав феррита усложняет дозовую зависимость K_1 , но характерное минимальное значение все же существует. Предыдущие исследования с использованием мессбауэровской спектроскопии показали, что ионы кобальта перераспределяются по подрешеткам под действием γ -облучения, однако в этих исследованиях доза облучения не превышала 10^8 рад. Однако другие исследования марганец-цинковых ферритов показали, что при больших дозах γ -облучения (до $5 \cdot 10^8$ рад) магниторезистивные эффекты стабилизируются [11]. Это свидетельствует о том, что с ростом дозы γ -облучения радиационно-чувствительные магнитные характеристики ферритов достигают минимума, а затем выходят на плато. Этот эффект можно объяснить строением кристаллической решетки феррита-шпинели, состоящей из двух подрешеток со специфическими междоузлиями, благоприятными для заполнения ионами металлов [12, 13].

Облучение феррита приводит к выталкиванию ионов металлов из их позиций в структуре феррита. Это приводит к изменению физических свойств материала, таких как магнитная анизотропия. Также радиационное воздействие может привести к перераспределению ионов по структуре феррита, что приводит к упорядочению материала и снижению свободной энергии. В результате конкуренции этих эффектов возникает экстремум на кривой зависимости структурно-чувствительного свойства феррита от дозы облучения. Исследования показывают, что изменение этого свойства феррита при облучении зависит от перераспределения ионов в его структуре, а не от упорядочения или разупорядочения. Для более детального изучения этого эффекта была разработана модель перераспределения ионов в кобальт-медном феррите. Ранее такая модель была использована для изучения концентрационных максимумов дефектов в меди, облученной электронами [11, 12].

Обзор литературы

Неель [14] разработал теоретические модели НМА, в которых основное внимание уделялось анизотропной природе обменных взаимодействий между парами ионов. Ему удалось объяснить спонтанную намагниченность феррошпинелей, у которых намагниченность подрешеток не компенсирована и полная намагниченность отлична от нуля. Подрешетка должна обладать периодичностью и эквивалентностью всех узлов, хотя заполняющие их ионы могут быть неэквивалентны по типу. Вблизи области температур T_c существует только ближнее спиновое упорядочение за счет обменных сил между соседними спинами. Такие факторы, как ионный радиус и заряд, влияют на распределение ионов в решетке. Смит и Уэйн [15] подчеркнули важность учета непрямых обменных взаимодействий через ионы кислорода в одной плоскости. В ферритах также встречаются дефекты, вызванные тепловым движением ионов и отклонениями от стехиометрии. Расчеты Йосиды [16] показывают, что спин-орбитальное взаимодействие, а не парное взаимодействие, является основным механизмом, ответственным за кристаллическую анизотропию. Шпинели с ионами Co^{2+} в октаэдрических позициях обычно изучаются из-за вклада ионов Co^{2+} в анизотропию. Выбор систем для исследования полей ионизирующего излучения определяется величиной НМД, вызываемой ионами. Крупичка [17] рассмотрел прямые обменные взаимодействия между соседними ионами Co^{2+} , где предпочтительное направление определяется ориентацией локальной тригональной оси. В работе Гассем М. Альзуби [4] успешно синтезированы наночастицы из совместно легированного медного феррита,

определение размеров с помощью гидротермального метода. При сравнении с чистым Cu феррит, добавление Co увеличивало постоянную решетки и уменьшало плотность. Отметил, что коэрцитивная сила и остаточная намагниченность увеличивались с уменьшением температуры.

Результаты и обсуждения

Численные расчеты проводились при различных температурах в диапазоне от 273 К до 333 К, предполагая, что экспериментальные образцы в [1] были облучены при комнатной температуре. Облучение осуществлялось источником Co_{75} с энергией 1,25 МэВ и интенсивностью дозы 420 рад/с. Расчеты проводились для образца объемом 1 см³.

Одним из важных параметров в расчетах является энергия связи, под которой понимается энергия, необходимая для связывания ионов определенного типа в октаэдрической и тетраэдрической подрешетках. К сожалению, экспериментальных результатов для этих энергий связи нет. Поэтому для расчетов в качестве энергий связи мы использовали сумму энергий миграции и стабилизации. Энергия миграции (E_m) была принята равной 1,05 эВ, а энергия стабилизации получена из [17].

Численные эксперименты были проведены с использованием различных энергий связи, включая 1,676 эВ; 1,656 эВ; 1,695 эВ; 1,134 эВ; 1,368 эВ и 1,828 эВ.

С кристаллографической точки зрения считается нормальным, когда ионы одного типа располагаются в кристаллографически эквивалентных позициях. При этом на элементарную ячейку приходится 8 ионов X , расположенных в позициях A , и 16 ионов Y в позициях B . Существуют также смешанные структуры, являющиеся переходными между нормальной и инвертированной шпинельной структурой.

Переход между нормальной и обращенной структурами шпинели можно узнать по формуле [8].

$$\underbrace{(x_{\delta}y_{1-\delta})}_A \underbrace{(x_{1-\delta}y_{1+\delta})}_B O_4 \quad (1)$$

В этой формуле δ обозначает долю ионов X в позициях A . Для структуры нормального типа $\delta = 1$, а для структурного обращенного типа $\delta = 0$.

Кристаллографические данные кубических шпинелей в составе $\text{Co}_{0.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

$$\begin{array}{ll} \delta = 0,0 & (\text{Co}_{0.0}\text{Cu}_{0.0}\text{Fe}_1)(\text{Co}_{0.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Fe}_1)\text{O}_4 \\ \delta = 0,2 & (\text{Co}_{0.175}\text{Cu}_{0.05}\text{Fe}_{0.8})(\text{Co}_{0.6}\text{Cu}_{0.2}\text{Fe}_{1.2})\text{O}_4 \\ \delta = 0,4 & (\text{Co}_{0.3}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_{0.6})(\text{Co}_{0.45}\text{Cu}_{0.15}\text{Fe}_{1.4})\text{O}_4 \end{array}$$

Численный расчет и графические результаты $\delta = 0$; $\delta = 0,2$; $\delta = 0,4$

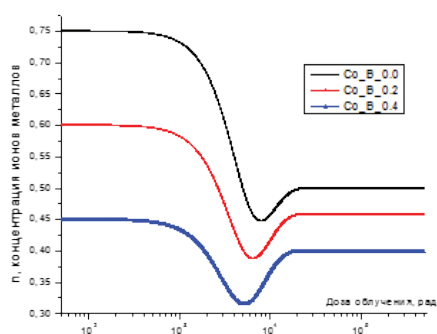


Рисунок 2 – Зависимость концентрации ионов Co B подрешетке от дозы облучения при температуре 273К

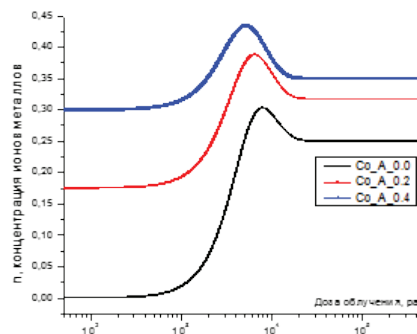


Рисунок 3 – Зависимость концентрации ионов Co A подрешетке от дозы облучения при температуре 273К

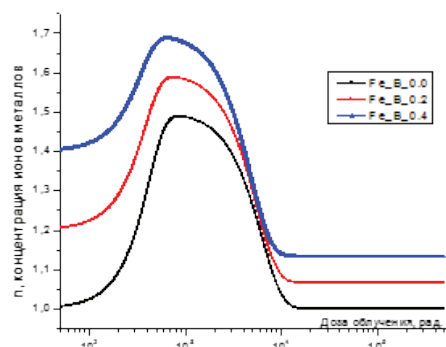


Рисунок 4 – Зависимость концентрации ионов Fe В подрешетке от дозы облучения при температуре 273К

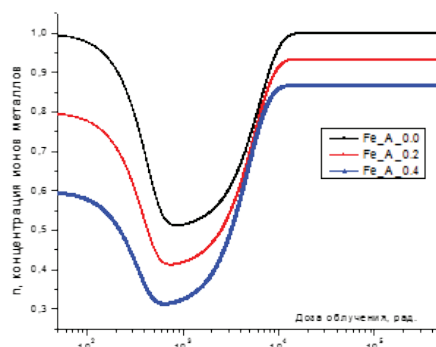


Рисунок 5 – Зависимость концентрации ионов Fe А подрешетке от дозы облучения при температуре 273К

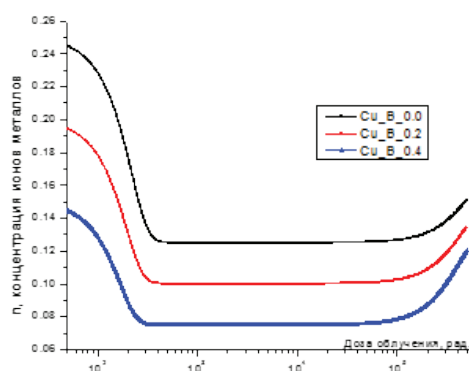


Рисунок 6 – Зависимость концентрации ионов Cu В подрешетке от дозы облучения при температуре 273К

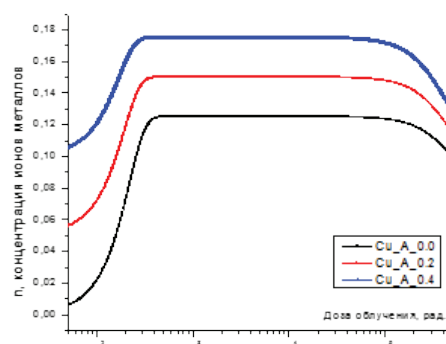


Рисунок 7 – Зависимость концентрации ионов Cu А подрешетке от дозы облучения при температуре 273К

На рисунках показана зависимость доли ионов на одну молекулу от температуры и дозы облучения.

Зависимость концентрации ионов Co в подрешетке от дозы облучения при температуре 273К может быть описана с помощью уравнения:

$$N(\text{Co})/N(\text{Co})_0 = \exp(-\alpha\phi), \quad (2)$$

где $N(\text{Co})$ – концентрация ионов Co после облучения, $N(\text{Co})_0$ – начальная концентрация ионов Co, α – коэффициент пропорциональности, зависящий от типа облучения, ϕ – доза облучения.

Эта зависимость имеет экспоненциальный характер, то есть концентрация ионов Co в подрешетке будет убывать с увеличением дозы облучения.

Экспериментальное определение зависимости может быть выполнено путем измерения начальной концентрации ионов Co в образце, а затем измерения концентрации после облучения при разных дозах. По полученным данным можно определить коэффициент пропорциональности α для данного типа облучения.

На рисунках 2–7 показаны зависимости концентрации ионов кобальта, железа, меди в А и В подрешетках феррита в зависимости от дозы и температуры облучения. Из этого рисунка видно, что концентрация кобальта с октаэдрической подрешеткой феррита с увеличением дозы облучения проходит через хорошо выраженный минимум, а затем переходит на «плато», т.е. δ четко коррелирует с зависимостью K_1 от дозы облучения, экспериментально установленной в работе [1–3, 11].

Закключение

Исследование показало, что гамма-облучение вызывает перераспределение ионов металлов внутри подрешеток феррита-шпинели $\text{Co}_{0,75}\text{Cu}_{0,20}\text{Fe}_2\text{O}_4$, что приводит к изменению их магнитных свойств. Эти результаты имеют значение для понимания того, как облучение влияет на свойства материалов, а также для разработки новых материалов с особыми характеристиками. Важно отметить, что перераспределение ионов металлов внутри подрешеток ферритной шпинели может оказывать существенное влияние на свойства и характеристики материала. Такая миграция ионов металлов между подрешетками может влиять на магнитные и коррозионные свойства материала, а также приводить к образованию радиационно-индуцированных фаз. Кроме того, наличие дефектов кристаллической решетки, вызванных облучением, может влиять на механические свойства материала.

Необходимы дальнейшие исследования для изучения влияния различных условий облучения и ионов металлов на перераспределение и образование дефектов в феррите-шпинели. Разработка инновационных методов анализа микроструктуры и свойств облученных материалов может дать ценную информацию об их поведении и помочь в создании радиационно стойких материалов. В целом изучение перераспределения ионов металлов в феррите шпинели под воздействием облучения является важнейшим направлением исследований, имеющим значение для различных областей техники.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Шамбулов Н.Б., Ерматов С.Е., Подкладнев В.М. Поведение первой константы магнитной кристаллографической анизотропии в монокристаллах ферритов системы Co-Cu-Zn, подвергнутых гамма-облучению от источника Co_{60} // Известия АН КазССР. Сер. физико-математическая. – Алматы, 1981. – № 4. – С. 67–70.
- 2 Шемяков Ф.Ф., Пашенко И.П., Литовченко Ф.С., Хоряков Ф.Ф. Радиационная стойкость магниторезистивного эффекта в марганец в цинковых ферритах : Труды 15-го международного совещания «Радиационная физика твердого тела». – М., 2005. – С. 311–313.
- 3 Шамбулов Н.Б., Искаков Б.М. Магнитные свойства монокристаллов ферритов системы Co-Cu-Zn, подвергнутых облучению // Радиационная физика твердого тела. – Севастополь, 2010.
- 4 Gasse M. Alzoubi The Effect of Co-Doping on the Structural and Magnetic Properties of Single-Domain Crystalline Copper Ferrite Nanoparticles. *Magnetochemistry* 2022, 8(12), 164. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry8120164>.
- 5 Jianping Ai, Yaping Shuai, Min Hu, Lihong Cheng, Siling Luo, Wenkui Li, Zhiqin Chen, Liling Hu, Zehua Zhou. Microstructural evolution and catalytic properties of novel high-entropy spinel ferrites MFe_2O_4 (M= Mg, Co, Ni, Cu, Zn). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.04.119>
- 6 Manju Kurian, Smitha Thankachan. Structural diversity and applications of spinel ferrite core - Shell Nanostructures - A review. *Open Ceramics*, vol. 8. December 2021, 100179. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2021.100179>
- 7 Goodtnoug J.B., Magnetism ed. Rado G.T., Suhl H., Acad. Pres, vol. III, New York – London, 1963.
- 8 Гераськин А.А. Синтез и свойства пленок $\text{Mg}(\text{Fe}_{0,8}\text{Ga}_{0,2})_2\text{O}_4$ - δ на подложках Si с термостабильными межфазными границами : Дис... – Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики, 2014.
- 9 Belekar R.M., Wani M.A., Athawale S.A., Kakde A.S. Minimum hysteresis loss and amplified magnetic properties of superparamagnetic Ni-Zn nano spinel ferrite // *Physics Open*, vol. 10, February 2022, 100099. <https://doi.org/10.1016/j.physo.2022.100099>
- 10 Syed Ismail Ahmad. Nano cobalt ferrites: Doping, Structural, Low-temperature, and room temperature magnetic and dielectric properties – A comprehensive review. *Journal of Magnetism and magnetic materials*, vol. 562, 15 November 2022, 169840. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169840>.
- 11 Шамбулов Н.Б., Тасболат Е.Б., Кусаинов А.С., Алибаева А.Г. Влияние гамма-облучения на перераспределение ионов металлов А- и В-подрешетках в $\text{Co}_{0,6}\text{Cu}_{0,2}\text{Zn}_{0,2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррита-шпинели. <http://www.vestnik.nauka.kz/wp-content/uploads/2017/12/2>.

- 12 Исаков Б.М., Шамбулов Н.Б. Зависимость концентрации неравновесных междоузельных атомов от электронного облучения меди с примесью золота : Труды 15-го международного совещания «Радиационная физика твердого тела». – М., 2005. – С. 197–201.
- 13 Исаков Б.М., Сулейменова Ж.Л., Шамбулов Н.Б. О концентрационных максимумах неравновесных точечных дефектов в облученной меди с примесью золота // Физика металлов и металловедение. – М., 2007. – С. 588–593.
- 14 Неель Л. Нобелевские лекции по физике. Магнетизм и локальные молекулярные поля. Успехи физических наук. – 1972. – Т. 107. – Вып.2.
- 15 Смит Я., Вейн Х. Ферриты: физические свойства и практические применения. – М.: Издательство иностранной литературы, 1962.
- 16 Иосида К. Функциональный анализ. Пер. с англ. – М.: Мир, 1967.
- 17 Крупичка С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов. – М., 1976. – Т. 1. – С. 103–104, 132–136.
- 18 Tatenov A.M., Shambulov N.B., Baitukayev U.B., Ospanova A.J., Shinykulova N.N. Interactive virtualisation in Java Script of electromagnetism when changing the dynamic, static parameters of ferromagnetics. Scopus Q1 PUBLISHER(S) University of Kerbala – KIJOMS, 2022.
- 19 Шиманский В.И. Основы физики твердого тела : Учеб.-метод. пособие / В.И. Шиманский, Е.П. Туромша, Н.Н. Кольчевский. – Минск : БГУ, 2021. – С. 12–21, 181–188.
- 20 Anil V., Raut. D.V. Kurmude. Effect of gamma irradiation on the structural and magnetic properties of Co–Zn spinel ferrite nanoparticles. Materials Research Bulletin. Vol. 63, March 2015, pp. 123–128 <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2014.11.051>.
- 21 Shameran Jamal Salih, Wali M. Mahmood. Review on magnetic spinel ferrite (MFe_2O_4) nanoparticles: From synthesis to application. Helion. Vol. 9, Issue 6, June 2023, e16601. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16601>

REFERENCES

- 1 Shambulov N.B., Ermatov S.E., Podkladnev V.M. (1981) Povedenie pervoj konstanty magnitnoj kristallograficheskoj anizotropii v monokristallah ferritov sistemy Co-Cu-Zn, podvergnutyh gamma-oblucheniju ot istochnika Co60. Izvestija AN KazSSR. Ser. fiziko-matematicheskaja, Almaty, no. 4, pp. 67–70.
- 2 Shemjakov F.F., Pashhenko I.P., Litovchenko F.S., Horjakov F.F. (2005) Radiacionnaja stojkost' magnitno-rezistivnogo jeffekta v marganec v cinkovyh ferritah. Trudy 15-go mezhdunarodnogo soveshhanija "Radiacionnaja fizika tverdogo tela", Moscow, pp. 311–313.
- 3 Shambulov N.B., Isakov B.M. (2010) Magnitnye svojstva monokristallov ferritov sistemy Co-Cu-Zn, podvergnutyh oblucheniju. Radiacionnaja fizika tverdogo tela. Sevastopol'.
- 4 Gasseem M. (2022) Alzoubi The Effect of Co-Doping on the Structural and Magnetic Properties of Single-Domain Crystalline Copper Ferrite Nanoparticles. Magnetochemistry, 8(12), 164. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry8120164>.
- 5 Jianping Ai, Yaping Shuai, Min Hu, Lihong Cheng, Siling Luo, Wenkui Li, Zhiqin Chen, Liling Hu, Zehua Zhou (2023) Microstructural evolution and catalytic properties of novel high-entropy spinel ferrites MFe_2O_4 (M= Mg, Co, Ni, Cu, Zn). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint>.
- 6 Manju Kurian, Smitha Thankachan. Structural diversity and applications of spinel ferrite core - Shell Nanostructures - A review. Open Ceramics, vol. 8. December 2021, 100179. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2021.100179>
- 7 Goodnoug J.B., Magnetism ed. Rado G.T., Suhl H. (1963) Acad. Pres, vol. III, New York – London.
- 8 Geras'kin A.A. Sintez i svojstva plenok $Mg(Fe_{0.8}Ga_{0.2})_2O_4-\delta$ na podlozhkah Si s termostabil'nymi mezhfaznymi granicami. Dis... – Moskovskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet radiotekhniki, jelektroniki i avtomatiki, 2014.
- 9 Belekar R.M., Wani M.A., Athawale S.A., Kakde A.S. Minimum hysteresis loss and amplified magnetic properties of superparamagnetic Ni–Zn nano spinel ferrite. Physics Open, vol. 10, February 2022, 100099. <https://doi.org/10.1016/j.physo.2022.100099>
- 10 Syed Ismail Ahmad (2022) Nano cobalt ferrites: Doping, Structural, Low-temperature, and room temperature magnetic and dielectric properties – A comprehensive review. Journal of Magnetism and magnetic materials, vol. 562, 15 November, 169840. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169840>.

- 11 Shambulov N.B., Tasbolat E.B., Kusainov A.S., Alibaeva A.G. Vliyanie gamma-oblucheniya na pereraspredelenie ionov metallov A- i V-podreshetkah v $\text{So}_0,6\text{Su}_0,2\text{Zn}_0,2\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrita-shpineli. <http://www.vestnik.nauka.kz/wp-content/uploads/2017/12/2>.
- 12 Iskakov B.M., Shambulov N.B. (2005) Zavisimost' koncentracii neravnovesnyh mezhdouzel'nyh atomov ot jelektronnoho oblucheniya medi s primes'ju zolota. Trudy 15-go mezhdunarodnogo soveshhanija Radiacionnaja fizika tverdogo tela, Moscow, pp. 197–201.
- 13 Iskakov B.M., Sulejmenova Zh.L., Shambulov N.B. (2007) O koncentracionnyh maksimumah neravnovesnyh tochechnykh defektov v obluchennoj medi s primes'ju zolota. Fizika metallov i metallovedenie, Moscow, pp. 588–593.
- 14 Neel' L. (1972) Nobelevskie lektsii po fizike. Magnetizm i lokal'nye molekuljarnye polja. Uspehi fizicheskikh nauk, vol.107, rel. 2.
- 15 Smit Ja., Vejn X. (1962) Ferrity: fizicheskie svoystva i prakticheskie primenenija, Moscow, Izdatel'stvo inostrannoj literatury.
- 16 Iosida K. (1967) Funktsional'nyj analiz, Moscow.
- 17 Krupichka S. (1976) Fizika ferritov i rodstvennykh im magnitnykh okislov, Moscow, vol. 1, pp. 103–104, 132–136.
- 18 Tatenov A.M., Shambulov N.B., Baitukayev U.B., Ospanova A.J., Shinykulova N.N. (2022) Interactive virtualisation in JavaScript of electromagnetism when changing the dynamic, static parameters of ferromagnetics. Scopus Q1 PUBLISHER(S)University of Kerbala – KIJOMS.
- 19 Shimanskij V.I. (2021) Osnovy fiziki tverdogo tela, Minsk, BGU, pp. 12–21, 181–188.
- 20 Anil V., Raut. D.V. Kurmude (2015) Effect of gamma irradiation on the structural and magnetic properties of Co–Zn spinel ferrite nanoparticles. Materials Research Bulletin, vol. 63, March, pp. 123–128. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2014.11.051>.
- 21 Shameran Jamal Salih, Wali M. Mahmood (2023) Review on magnetic spinel ferrite (MFe_2O_4) nanoparticles: From synthesis to application. Helion, vol. 9, Issue 6, June. e16601. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16601>.

**^{1*}ШИНЫКУЛОВА Н.Н., ¹ШАМБУЛОВ Н.Б., ¹ТАТЕНОВ А.М., ²ЕРТУРК С.,
³ШИНЫКУЛОВА Г.Н., ³МӘЖИТ Ж., ⁴АШИКБАЕВА А.Б.**

¹Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, 050000, Алматы қ., Қазақстан

²Нийде Омер Халисдемир университеті, Түркия

³Алматы технологиялық университеті, 050061, Алматы қ., Қазақстан

⁴Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, 050000, Алматы қ., Қазақстан

ФЕРРИТ-ШПИНЕЛЬ МОНОКРИСТАЛДАРЫНА ГАММА-СӘУЛЕЛЕНУДІҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Андатпа

Сәулелену үрдісінен кейін феррит-шпинелінде металл иондарының қайта үлестірілу механизмдері мен ақаулардың пайда болуы күрделі, әрі бірқатар факторларға байланысты болады Сондықтан радиациялық сәулелену әсерінен осы материалдардың физикалық қасиеттерінің өзгерісін түсіну үшін компьютерлік модельдеу және эксперименттік зерттеулер жүргізу маңызды. Радиациялық сәулеленуге төтеп бере алатын жаңа материалдарды әзірлеу қатты дене физикасы, ядролық физика, ғарыштық зерттеулер және медицина, сонымен қатар басқа да салалар үшін үлкен маңызға ие. Бұл жұмыста гамма-сәулеленудің $\text{Co}_{0,75}\text{Cu}_{0,25}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррит монокристалдарына әсері зерттелді. Бұрын мессбауэр спектроскопиясын колдана отырып зерттеу жүргізілген, бұл феррит-шпинельдерінің астыңғы қабаттарындағы металл иондарының өзгеруін анықтауға мүмкіндік берді. Бұл өзгерістер материалдың магниттік кристаллографиялық анизотропиясына әсер етеді [1]. Ғылыми әдебиеттерден гамма-сәулеленудің материалдардың магниттік сезімталдығының өзгеруіне және магниттелу қисығының өзгеруіне әкелетінін көрсететін деректерді табуға болады [2, 3]. Физикалық қасиеттердің бұл өзгерістерін октаэдрлік және тетраэдрлік ішкі торлардағы металл иондарының қайта бөлінуімен түсіндіруге болады, өйткені ішкі торлардағы металл иондарының атомдық деңгейлері бөлінеді.

Тірек сөздер: феррит-шпинель, модельдеу, сәулелену, кристалдық тор.

^{1*}SHINIKULOVA N.N., ¹SHAMBULOV N.B., ¹TATENOV A.M., ²ERTURK S.,
³SHINIKULOVA G.N., ³MAZHIT J., ⁴ASHIKBAYEVA A.B.

¹Kazakh National Women's Pedagogical University, 050000, Almaty, Kazakhstan
²Nigde Omer Halisdemir University, Turkey.

³Almaty Technological University, 050061, Almaty, Kazakhstan

⁴Kazakh National University named after al-Farabi, 050000, Almaty, Kazakhstan.

STUDY OF THE INFLUENCE OF GAMMA IRRADIATION ON FERRITE-SPINEL MONOCRYSTALS

Abstract

The mechanisms of redistribution of metal ions and the formation of defects in ferrite spinel upon irradiation are complex and depend on a number of factors. Therefore, computer simulations and experimental studies are important for understanding the behavior of the physical properties of these materials under the influence of radiation. The development of new materials that can withstand radiation damage is of great importance for a range of applications, including solid state physics, nuclear physics, space research and medical applications. In this work, the effect of gamma irradiation on $\text{Co}_{0.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite single crystals has been investigated. An earlier study using Mössbauer spectroscopy was carried out to determine the changes in the metal ion content in the sublattices of ferrite spinels. These changes affect the magnetic crystallographic anisotropy of the material [1]. Data can be found in the scientific literature that indicate that gamma irradiation leads to changes in the magnetic susceptibility of materials and to changes in the magnetization curve [2,3]. These changes in physical properties can be explained by redistribution of metal ions in octahedral and tetrahedral sublattices, since metal ions in sublattices have splitting of atomic levels.

Key words: ferrite spinel, modeling, irradiation, crystal lattice

Информация об авторах

Шиныкулова Нургуль Нурбековна (автор для корреспонденции)

Магистр физики, преподаватель, Казахский национальный женский педагогический университет, ул. Гоголя, 114, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0002-4086-9785

E-mail: sh_nurgul82@mail.ru

Шамбулов Науан Байдильдаевич

Кандидат физико-математических наук, доцент, Казахский национальный женский педагогический университет, ул. Гоголя, 114, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0003-3391-7862

E-mail: nauansh@mail.ru

Татенов Адамбек Максutowич

Кандидат физико-математических наук, доцент, Казахский национальный женский педагогический университет, ул. Гоголя, 114, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0003-4767-5788

E-mail: tatenov.adambek@qyzpu.edu.kz

Ертурк Сефа

Prof. Dr. Nigde Omer Halisdemir University, Турция

ORCID ID: 0000-0003-4051-9096

E-mail: sefaerturk@gmail.com

Шиныкулова Гульнур Нурбековна

Магистр физики, лектор, Алматинский технологический университет, ул. Толе би, 100, 050061, г. Алматы

ORCID ID: 0000-0003-4719-9160

E-mail: gulnur.shynykulova@gmail.com

Ашикбаева Асель Болатовна

Доцент, кафедра физики плазмы, нанотехнологий и компьютерной физики,
физико-технический факультет, Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
ул. Аль-Фараби, 71, 050040, г. Алматы, Казахстан
ORCID ID: 0000-0003-0706-2688
E-mail: 02assel@gmail.com

Мәжит Жәмиля Батыққызы

Магистр физики, лектор, Алматинский технологический университет, ул. Төле би, 100,
050061, г. Алматы
ORCID ID: 0000-0002-4635-9241
E-mail: Mazhit-Zhamilya79@mail.ru

Авторлар туралы мәліметтер

Шиныкулова Нургуль Нурбековна (корреспонденция авторы)

Физика магистрі, оқытушы, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті,
Гоголь көш., 114, 050000, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0002-4086-9785
E-mail: sh_nurgul82@mail.ru

Шамбулов Науан Байдильдаевич

Физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент, Қазақ ұлттық қыздар
педагогикалық университеті, Гоголь көш., 114, 050000, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0003-3391-7862
E-mail: nauansh@mail.ru

Татенов Адамбек Максұтович

Физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент, Қазақ ұлттық қыздар
педагогикалық университеті, Гоголь көш., 114, 050000, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0003-4767-5788
E-mail: tatenov.adambek@qyzpu.edu.kz

Ертурк Сефа

Prof. Dr. Nigde Omer Halisdemir University, Түркия
ORCID ID: 0000-0003-4051-9096
E-mail: sefaerturk@gmail.com

Шиныкулова Гүльнур Нурбековна

Физика магистрі, лектор, Алматы технологиялық университеті, Төле би көш., 100,
050061, Алматы қ.
ORCID ID: 0000-0003-4719-9160
E-mail: gulnur.shynykulova@gmail.com

Ашикбаева Асель Болатовна

Доцент, Плазма физикасы, нанотехнология және компьютерлік физика кафедрасы,
Физика-техникалық факультет, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
әл-Фараби даң., 71, 050040, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0003-0706-2688
E-mail: 02assel@gmail.com

Мәжит Жәмиля Батыққызы

Физика магистрі, лектор, Алматы технологиялық университеті,
Төле би көш., 100, 050061, Алматы қ.
ORCID ID: 0000-0002-4635-9241
E-mail: Mazhit-Zhamilya79@mail.ru

Information about authors**Shynykulova Nurgul Nurbekovna** (corresponding author)

Master of Physics, teacher, Kazakh National Women's Pedagogical University, 114, Gogol St., Almaty, 050000, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-4086-9785

E-mail: sh_nurgul82@mail.ru

Shambulov Nauan Baidildaevich

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Kazakh National Women's Pedagogical University, 114, Gogol St., Almaty, 050000, Almaty, Kazakhstan.

ORCID ID: 0000-0003-3391-7862

E-mail: nauansh@mail.ru

Adambek Maksutovich Tatenov

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Kazakh National Women's Pedagogical University, 114, Gogol St., 050000, Almaty, Kazakhstan.

ORCID ID: 0000-0003-4767-5788

E-mail: tatenov.adambek@qyzpu.edu.kz

Erturk Sefa

Prof. Dr Nigde Omer Halisdemir University, Turkey

ORCID ID: 0000-0003-4051-9096

E-mail: sefaerturk@gmail.com

Shynykulova Gulnur Nurbekovna

Master of Physics, Lecturer, Almaty Technological University, 100, Tolebi str., Almaty, 050061, Almaty city

ORCID ID: 0000-0003-4719-9160

E-mail: gulnur.shynykulova@gmail.com

Ashikbayeva Asel Bolatovna

Associate Professor, Department of Plasma Physics, Nanotechnology and Computer Physics, Faculty of Physics and Technology, Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi St., Almaty, 050040, Almaty, Kazakhstan.

ORCID ID: 0000-0003-0706-2688

E-mail: 02assel@gmail.com

Mazhit Zhamila Batykyzyzy

Master of Physics, Lecturer, Almaty Technological University, 100, Tole bi str., Almaty, 050061, Almaty, Kazakhstan.

ORCID ID: 0000-0002-4635-9241

E-mail: Mazhit-Zhamilya79@mail.ru

UDC 537.311:322
IRSTI 29.19.16

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2023-20-4-109-117>

¹RAKHIMOVA A.ZH., ¹ZHIRKOV I.V., ¹NUSSUPOV K.KH.,
¹BEISENKHANOV N.B., *¹SULTANOV A.T.

¹Kazakh-British Technical University, 050000, Almaty, Kazakhstan

*E-mail: a.sultanov@kbtu.kz

EFFECT OF OXYGEN FLOW ON ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF ITO FILMS SYNTHESIZED BY MAGNETRON SPUTTERING METHOD

Abstract

The tin-doped indium oxide thin films were synthesized by DC magnetron sputtering on the surface of polished silicon samples and glass slides in a mixed argon-oxygen atmosphere. The other deposition parameters: operating pressure, magnetron power and substrate rotation speed were kept constant. Thickness and density of thin films were measured by X-ray Reflectometry. The effects of oxygen flow rate and substrate temperature on the optical and electrical properties were investigated. The electrical properties (resistivity, Hall mobility and charge concentration) of the thin films were measured by the Van der Pauw method using the Hall effect. The minimum value of resistivity 0.52×10^{-3} Ohm·cm, and maximum charge mobility $28 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ was achieved at an oxygen proportional gas mixture of 2.6% (0.71 sccm). The transmission spectra of the films were measured in the wavelength range from 300 to 1100 nm. The transmittance of all films exceeds 75% in the visible and near-infrared spectral ranges. It was found that increasing the oxygen flow rate and heating of the substrate up to optimal value 150°C led to an increase in the crystallinity of the films and, consequently, to an increase in the Hall mobility and the transmittance.

Key words: silicon solar cells, crystallization, magnetron sputtering, thin films, indium oxide.

Introduction

Solar energy has become a promising alternative to conventional energy sources due to its abundance and environmental friendliness. However, the widespread use of solar modules as energy sources is limited due to low efficiency and aging effect on efficiency. Scientists around the world are working to increase efficiency and decrease Levelized Cost of Energy. In recent years, record efficiency levels for silicon solar cells have been achieved thanks to Tunnel Oxide Passivated Contact and heterojunction structures. In both technologies, transparent conductive oxides play an important role, which at the same time act as anti-reflective coatings and conductors from the active area to the metal fingers.

Indium tin oxide (ITO) is a transparent conductive oxide with excellent electrical conductivity and optical properties that has attracted considerable attention in various industries including electronics [1], optoelectronics [2], and solar energy [3]. ITO's excellent electrical conductivity and low surface resistivity ($\sim 10^{-4}$ Ohm·cm) promotes efficient collection of electrical charges generated in the solar cell by light absorption. ITO films have high transparency in the visible spectrum ($>85\%$), which allows light to pass through them with minimal absorption and reflection. Despite its high transparency, ITO has optical absorption in various wavelength intervals, especially in the ultraviolet (UV) range. This absorption can lead to reduced transparency and affect the performance of ITO-based devices in certain applications. The refractive index of ITO varies within from 1.8 to 2.0 in the visible spectral range depending on the composition of the film and the method of deposition [1–3]. For example, it is well known that by increasing substrate temperature of ITO films [4, 5, 6], the structure of films can be changed and hence better optoelectronic properties can be obtained in comparison to those of thin films deposited onto unheated substrates. Essential role in the electrical and optical properties of ITO films play such parameters as deposition methods, Sn doping, oxygen partial pressure, crystallinity, substrate features. In our work, the impact of oxygen partial pressure on the electrical and optical properties of ITO thin films was studied. During the study of the influence of temperature on the structure, conductivity, transmittance, and stability of ITO films, it was found that at a substrate temperature of 150°C the films have the highest optical and electrical properties.

Materials and Methods

Thin ITO films were synthesized by DC-magnetron sputtering system using cylindrical target with composition 90 wt.% In_2O_3 and 10 wt.% SnO_2 . Polished n-type CZ monocrystalline silicon (100) and optical glass slides were used as a substrate. Glass substrates were cleaned in an $\text{HNO}_3\text{:H}_2\text{O}_2\text{:H}_2\text{O}$ solution. Surface of the silicon samples was cleaned by the standard Radio Corporation of America method [7]. ITO films were deposited in a MAGNA-TM200-1 installation. Before the sputtering, chamber was pumped down to the base pressure of $5 \cdot 10^{-4}$ Pa. Once the base pressure was achieved, deposition was carried out in an atmosphere of argon and oxygen.

Sputtering was carried out at different oxygen concentration from 1.6 to 3.2% in an argon atmosphere and at a pressure of 0.6 Pa by varying flow rate. Depositions were performed by a power of 250W, deposition time was 120 s. The film thicknesses were determined by X-ray reflectometry (XRR) method using a Complex Ray C6 setup. Hall Effect measurements of ITO thin films were performed using van der Pauw method and Keithley 2400 SourceMeter. The reflection and transmission parameters were measured on the Evolution 300 UV-Vis spectrophotometer in the wavelength range from 300 to 1100 nm.

Results

Figure 1 show the dependence of the electrical properties of ITO films, such as charge carriers' concentration, resistivity, and Hall mobility on the oxygen/argon gas-flow ratio. The oxygen flow in the sputtering process has an essential effect on the crystallinity of the ITO film structure [8]. With increasing oxygen flow, the crystal structure of ITO films are becoming more organized and grain boundaries more distinct. The improved crystal structure and hence reduced scattering at the grain boundaries provide high charge carriers mobility and lower resistivity values. In the substitution process of tin (Sn^{4+}) atoms instead of indium (In^{3+}) atoms, the dopants are activated. Acting as electron donors, the doped Sn^{4+} ions provide the release of free electrons, thereby increasing the conductivity of the films [9–11]. Nevertheless, tin in the amorphous state is activated inefficiently and free carriers are formed mainly due to vacancy-like oxygen defects [12, 13]. Consequently, increasing the oxygen flux up to 2.6% leads to an increase in the carrier concentration. However, as the oxygen (O_2) flux $> 2.6\%$ is further increased (Figure 1), there is a decrease in the carrier concentration because the number of oxygen vacancies decreases as the oxygen flow increases. At the same time, oxygen supersaturation of the films leads to deactivation of donors and accumulation of oxygen atoms at the grain boundaries [14], leading to a decrease in the mobility and concentration and therefore an increase in resistivity [15].

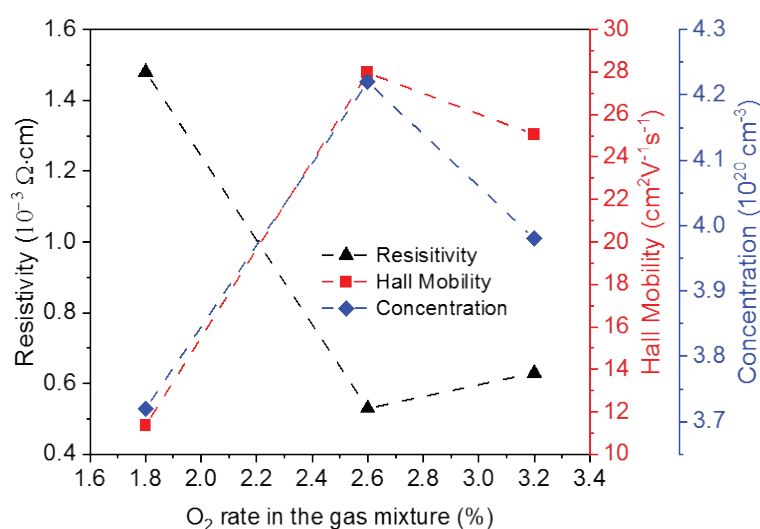


Figure 1 – Dependence of the resistivity, concentration, and Hall mobility of charge carriers of thin ITO films on the O_2/Ar gas-flow ratio

Figure 2 shows the dependence of the electrical properties of ITO films deposited at a magnetron power of 250 W, substrate temperatures of 20 and 150°C, oxygen flow of 0 and 2.6%. The minimum resistivity of $0.52 \times 10^{-3} \text{ Ohm} \times \text{cm}$ is achieved with an increase in oxygen flow up to 2.6%. This low resistance is due to the high values of mobility and concentration of charge carriers $28 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ and $4.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, respectively. As it is described above, the oxygen vacancies presence in the crystal lattice is a fundamental factor affecting the electrical conductivity of ITO films. Therefore, the increase of carrier mobility values were achieved when the substrate temperature was increased up to 150°C, which is due to the improvement of the crystal structure of ITO films [16]. By increasing the substrate temperature during the sputtering process, the resistivity of the films slightly increases, which is also described in [17].

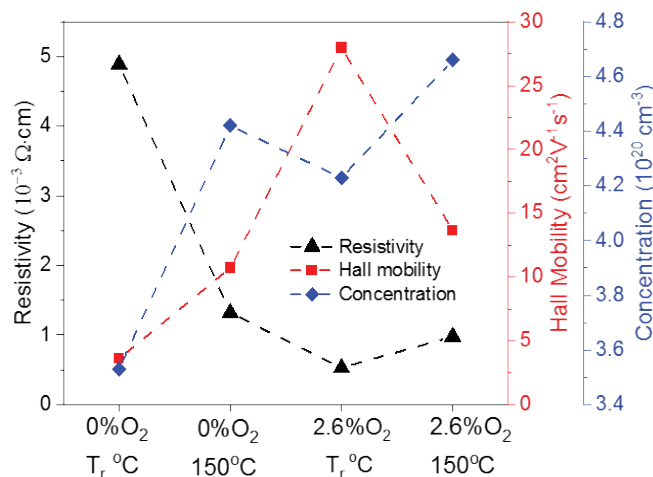


Figure 2 – Dependence of the resistivity, concentration, and Hall mobility of charge carriers of thin ITO films on the substrate temperature

Transmittance is an essential parameter for TCO films. Figure 3 shows the transmittance spectra of ITO thin films deposited at different parameters in wavelengths ranging from 300 to 1100 nm. The transmittance of all films exceeds 75% in the visible and near infrared ranges, and for films grown at O_2 partial concentration of 2,6–3,2% the transmittance in the wavelength range of 400-600 nm is additionally enhanced, being about 82–85% in the range 420-720 nm and more than 90% in near IR spectrum (1000-1100 nm). It can be concluded that the increasing oxygen flow during deposition has a beneficial effect on the optical properties of the films [18,19]. Transmittance results indicate a significant improvement in the visible region of the spectrum. This increase in transmittance changes with increasing oxygen flow rate [20, 21].

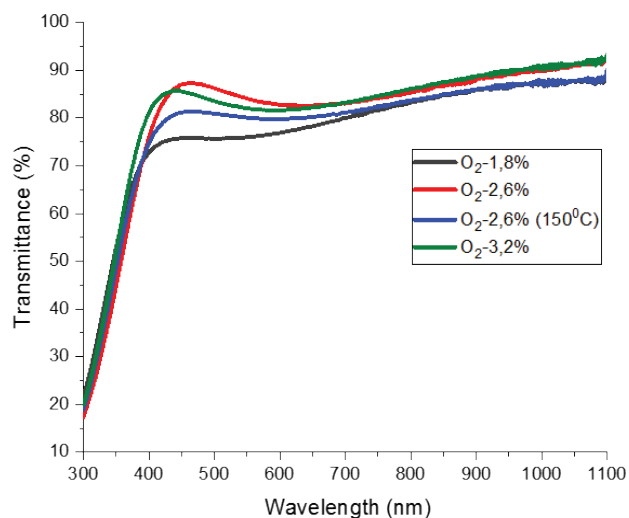


Figure 3 – Transmittance spectra of ITO films on the O_2 /Ar gas-flow ratio

In order to investigate the optical properties of ITO in more detail, optical constants were measured using SCOUT software. The obtained results of refractive indices and extinction coefficients are shown in Figure 4.

During the optimal oxygen flow (2.6%) in the sputtering process, we obtain ITO films with low extinction coefficient k (0.04–0.02) within the wavelength range of 450–800 nm (Fig.4), indicating less absorption, which leads to an increase in the transmission coefficient (Fig.3). For an oxygen flow of 2.6% the refractive index (n) has the highest values over the entire wavelength range, reaching maximum value of 3.1 at 300 nm. It can be observed that for films with oxygen consumptions of 2.6%, and 3.2% the refractive indices exceed the values for 1.8% over the entire wavelength. In the visible region 400–800 nm, the extinction coefficients for 1.8% have higher values in comparison with 2.6% and 3.2% approximately retain the natural dependence of the refractive index on oxygen supply. In this case, the optimal oxygen flow (2.6%) leads to the lowest value of the extinction coefficient – 0.023.

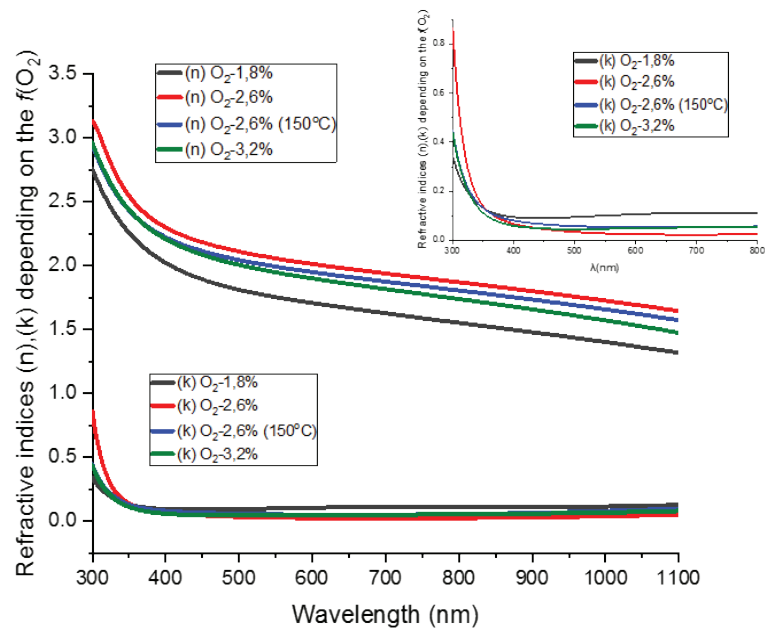


Figure 4 – (a) Refractive index (n) and Extinction coefficient (k) depending on the $f(\text{O}_2)$

Knowing the electrical resistivity and optical transmittance of ITO thin films, the quality index ϕ_{TC} proposed by Haacke [22] was calculated using Eq.(1) to compare the performance characteristics of the films.

$$\text{FoM} = T^{10} / R_s \quad \text{Eq.(1)}$$

Where,

FoM – Figure of Merit

T – Transmission

R_s – Sheet resistance

The obtained results are presented in Figure 5. The maximum FoM value was achieved with an oxygen flow of 2.6% and is 222.6×10^{-5} , which can be assessed as a good result in comparison with the previously obtained results. This was achieved by simultaneously increasing the transparency of the films and reducing the electrical resistivity (Figs. 2 and 3). The worst results are achieved with conventional sputtering of an ITO target without the use of oxygen and external heating (Figs. 2 and 5).

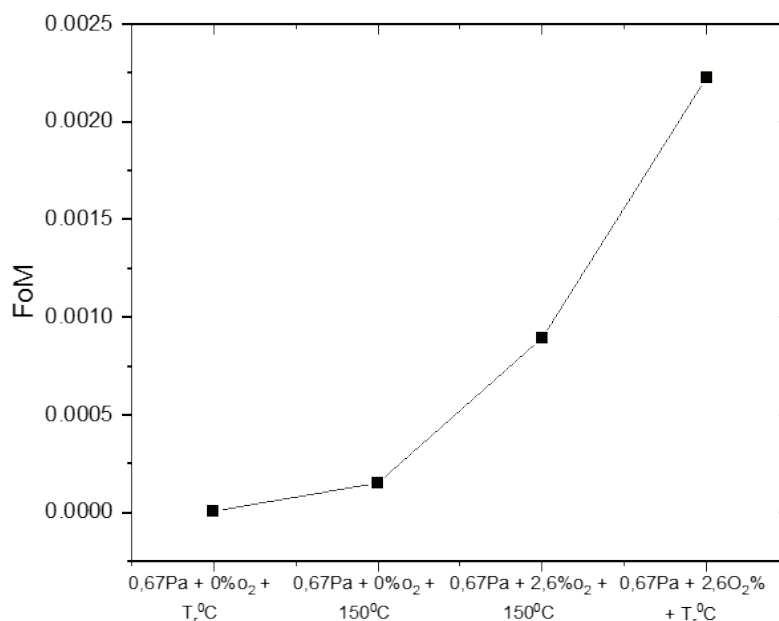


Figure 5 – Calculated Figure of merit of ITO layers as a function of deposition parameters

Conclusion

ITO films were deposited by DC reactive sputtering at a constant magnetron power of 250W. The effect of oxygen consumption during deposition on the optical and electrical properties of the films was studied. The change in electrical properties can be caused by an increase in the content of Sn⁴⁺ ions at the position of substitution instead of In³⁺ ions and, as a consequence, an increase in the number of oxygen vacancies with subsequent deactivation of donors in the process of increasing oxygen consumption. The minimum value of resistivity, $0.52 \times 10^{-4} \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$, was achieved at an oxygen flow rate of 2.6% and maximum charge mobility parameters equal to $28 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. The transmittance in the wavelength spectral range of 400-650 nm is additionally enhanced, being about 85% in the visible range and more than 90% near IR spectrum (1000-1100 nm) with a minimum extinction coefficient k (0.04-0.02) in the range of 450-1100 nm. The maximum value of FoM was achieved at an oxygen rate of 2.6% and is equal to 222.6×10^{-5} .

Acknowledgment

This research has been/was/is funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP14870185)

REFERENCES

- 1 V.S. Vaishnav S.G. Patel J.N. Panchal, Development of ITO thin film sensor for the detection of formaldehyde at room temperature, *Sensor Actuat B-Chem*, 2015, 206: 381–388. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.04.090>.
- 2 Salehi A. (1998) The effects of deposition rate and substrate temperature of ITO thin films on electrical and optical properties, *Thin Solid Films*, vol. 324, no. 1–2, pp. 214–218.
- 3 Gwamuri J., Vora A., Mayandi J., Güney D.Ö., Bergstrom P. L., Pearce J.M. (2016) A new method of preparing highly conductive ultra-thin indium tin oxide for plasmonic-enhanced thin film solar photovoltaic devices, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 149 250–257. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.01.028>.
- 4 Bo L., Shuying C. (2012) Properties of indium tin oxide films deposited by RF magnetron sputtering at various substrate temperatures, *Micro Nano Lett.* 7, pp. 835–837. <https://doi.org/10.1049/mnl.2012.0454>.

- 5 Xu J., Yang Z., Wang H., Xu H., Zhang X. (2014) Effect of growth temperature and coating cycles on structural, electrical, optical properties and stability of ITO films deposited by magnetron sputtering, *Materials Science in Semiconductor Processing*. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2014.01.007>.
- 6 Meng L., M.P. dos Santos. (1998) Properties of indium tin oxide films prepared by rf reactive magnetron sputtering at different substrate temperature, *Thin Solid Films*, 322, pp. 56–62. [https://doi.org/10.1016/s0040-6090\(97\)00939-5](https://doi.org/10.1016/s0040-6090(97)00939-5).
- 7 Nussupov K.K., Beisenkhanov N.B., Keinbay S., Sultanov A.T. (2022) Silicon carbide synthesized by RF magnetron sputtering in the composition of a double layer antireflection coating SiC/MgF₂, *Opt Mater (Amst)*, 128. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112370>.
- 8 Thilakan P., Minarini C., Loreti S., Terzini E. Investigations on the crystallization properties of RF magnetron sputtered indium tin oxide thin films, *Thin Solid Films*. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(01\)00820-3](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)00820-3).
- 9 Davis C.A. (1993) A simple model for the formation of compressive stress in thin films by ion bombardment, *Thin Solid Films*, vol. 226, no. 1, pp. 30–34. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(93\)90201-Y](https://doi.org/10.1016/0040-6090(93)90201-Y).
- 10 Kim Y., Park Y., Ansari S.G., Lee J., Soo B. Lee, H.S. Shin, Influence of oxygen admixture and sputtering pressure on the properties of ITO thin films deposited on PET substrate using RF reactive magnetron sputtering, *Surface and Coatings Technology* 173 (2003) 299–308, doi:10.1016/S0257-8972(03)00717-5.
- 11 Tien C., Lin H., Chang C. and Tang C. Effect of Oxygen Flow Rate on the Optical, Electrical, and Mechanical Properties of DC Sputtered ITO Thin Films, *Advances in Condensed Matter Physics*. <https://doi.org/10.1155/2018/2647282>.
- 12 Pain D.C., Yeom H.-Y., Yaglioglu B. (2005) Transparent conducting materials and technology, in: G.P. Crawford (Ed.), *Flexible Flat Panel Displays*, Wiley, West Sussex, pp. 79–98.
- 13 C. Guille'n, J. Herrero, Influence of oxygen in the deposition and annealing atmosphere on the characteristics of ITO thin films prepared by sputtering at room temperature (2005), <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2005.10.006>.
- 14 Arockiadoss T., Kovendhan M., Joseph D.P., Kumar A.S., Chun B., Shim K.S. (2018) DC magnetron sputtered aligned ITO nano-rods with the influence of varying oxygen pressure, *Appl. Surf. Sci.*, 449, pp. 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.129>.
- 15 Gonzalez GB, Mason TO, Quintana JP, Warschkow O., Ellis DE, Hwang JH. (2004) Defect structure studies of bulk and nano-indium-tin oxide, et al. *J Appl Phys*, 96:3912–20. <https://doi.org/10.1063/1.1783610>.
- 16 Wu C., Diao C. (2018) Effects of substrate temperature on the properties of the indium tin oxide thin films deposited by sputtering method, *MATEC Web of Conferences* 185, 00006. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818500006>.
- 17 Nisha M., Anusha S., Aldrin Antony, Manoj R. (2005) Effect of substrate temperature on the growth of ITO thin films, *Applied Surface Science* 252, 1430–1435. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.02.115>.
- 18 Gorjanc T.C., Leong D., Py C. and D. Roth. (2002) Room temperature deposition of ITO using R.F. Magnetron sputtering, *Thin Solid Films*, vol. 413, no. 1–2, pp. 181–185. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00425-X](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00425-X).
- 19 Bender M., Seelig W., Daube C., Frankenberger H., Ocker B., Stollenwerk J. (1998) Dependence of oxygen flow on optical and electrical properties of DC-magnetron sputtered ITO films, *Thin Solid Films* 326, 72–77. [https://doi.org/10.1016/s0040-6090\(98\)00520-3](https://doi.org/10.1016/s0040-6090(98)00520-3).
- 20 Gong W., Wang G., Gong Y., Zhao L. (2022) Investigation of In₂O₃:SnO₂ films with different doping ratio and application as transparent conducting electrode in silicon heterojunction solar cell, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111404>.
- 21 Chen A., Zhu K., Zhong H., Shaoc Q., Ged G. (2014) A new investigation of oxygen flow influence on ITO thin films by magnetron sputtering, *Solar Energy Materials & Solar Cells*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1311.5943>.
- 22 Haacke G., *J. Appl. Phys.*, 44 (1973), 4618.

**¹РАХИМОВА А.Ж., ¹ЖИРКОВ И.В., ¹НУСУПОВ К.Х.,
¹БЕЙСЕНХАНОВ Н.Б., ^{1*}СУЛТАНОВ А.Т.**

Қазақстан-Британ техникалық университеті, 050000, Алматы қ., Қазақстан
*E-mail: a.sultanov@kbtu.kz

ОТТЕГІ АҒЫНЫНЫҢ МАГНЕТРОНДЫ БҮРКУ АРҚЫЛЫ СИНТЕЗДЕЛГЕН ІТО ҚАБЫРШАҚТАРЫНЫҢ ЭЛЕКТРЛІК ЖӘНЕ ОПТИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІ

Аңдатпа

Қалайымен легирленген индий оксидінің жұқа қабықшалары аралас аргон-оттегі атмосферасында жылтыратылған кремний үлгілері мен заттық шынылардың бетіне тұрақты токта магнетронды шашырату арқылы синтезделді. Тұндырудың басқа параметрлері: жұмыс қысымы, магнетронның қуаты және субстраттың айналу жылдамдығы тұрақты болып қалды. Жұқа қабыршақтардың қалыңдығы мен тығыздығы рентгендік рефлектометрия әдісімен өлшенді. Оттегі ағынының жылдамдығы мен субстрат температурасының оптикалық және электрлік қасиеттерге әсері зерттелді. Жұқа қабыршақтардың электрлік қасиеттері (меншікті электр кедергісі, холл қозғалғыштығы және заряд концентрациясы) Холл эффектісін қолдана отырып, Ван дер Пау әдісімен өлшенді. Минималды кедергі мәні $0,52 \times 10^{-3}$ Ом·см және зарядтың максималды қозғалғыштығы оттегі шығыны 2,6% болғанда 28 см²В⁻¹с⁻¹ тең. Қабыршақтардың өткізу спектрлері 300-ден 1100 нм-ге дейінгі толқын ұзындықтарында өлшенді. Барлық қабыршақтардың өткізгіштігі көрінетін және жақын инфрақызыл диапазонда 75%-дан асады. Оттегі ағынының жылдамдығын арттыру мен субстратты 150°C дейін оңтайлы қыздыру қабыршақтардың кристалдылығының жоғарылауына, нәтижесінде холл қозғалғыштығы мен өткізгіштігінің жоғарылауына әкелетіні анықталды.

Тірек сөздер: кремний күн элементтері, кристалдану, магнетронды шашырату, жұқа қабықшалар, индий оксиді.

**¹РАХИМОВА А.Ж., ¹ЖИРКОВ И.В., ¹НУСУПОВ К.Х.,
¹БЕЙСЕНХАНОВ Н.Б., ^{1*}СУЛТАНОВ А.Т.**

¹Казахстанско-Британский технический университет, 050000, г. Алматы, Казахстан
*E-mail: a.sultanov@kbtu.kz

ВЛИЯНИЕ ПОТОКА КИСЛОРОДА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ІТО, СИНТЕЗИРОВАННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Аннотация

Тонкие пленки легированного оловом оксида индия были синтезированы методом магнетронного распыления на постоянном токе на поверхность полированных образцов кремния и предметных стекол в смешанной аргон-кислородной атмосфере. Остальные параметры осаждения: рабочее давление, мощность магнетрона и скорость вращения подложки оставались постоянными. Толщину и плотность тонких пленок измеряли методом рентгеновской рефлектометрии. Исследовано влияние скорости потока кислорода и температуры подложки на оптические и электрические свойства. Электрические свойства (удельное сопротивление, холловская подвижность и концентрация заряда) тонких пленок измерялись методом Ван дер Пау с использованием эффекта Холла. Минимальное значение удельного сопротивления $0,52 \times 10^{-3}$ Ом·см и максимальная подвижность заряда 28 см²В⁻¹с⁻¹ достигнуты при пропорциональной газовой смеси кислорода 2,6%. Спектры пропускания пленок измерялись в диапазоне длин волн от 300 до 1100 нм. Пропускание всех пленок превышает 75% в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Установлено, что увеличение скорости потока кислорода и нагрев подложки до оптимального значения 150°C приводят к увеличению кристалличности пленок и, как следствие, к увеличению холловской подвижности и коэффициента пропускания.

Ключевые слова: кремниевые солнечные элементы, кристаллизация, магнетронное распыление, тонкие пленки, оксид индия.

Information about authors**Rakhimova Aigerim Zhangeldykyzy**

Master's student, Laboratory of Alternative Energy and Nanotechnologies, Tole bi 59, Almaty, 050000, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-7735-4881

E-mail: aig_rakhimova@kbtu.kz

Zhirkov Ilya Vladimirovich

Student, Laboratory assistant, Laboratory of Alternative Energy and Nanotechnologies, Tole bi 59, Almaty, 050000, Kazakhstan

ORCID ID: 0009-0003-0785-0526

E-mail: teobaldo9723@gmail.com

Nussupov Kair Khamzaevich

Dr Phys.-Math. Sci., Chief Researcher, Laboratory of Alternative Energy and Nanotechnologies, Tole bi 59, Almaty, 050000, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0001-8200-7510

E-mail: rich-famouskair@mail.ru

Beisenkhanov Nurzhan Beisenkhanovich

Dr Phys.-Math. Sci Dean of SMSGT, KBTU, Laboratory of Alternative Energy and Nanotechnologies, Tole bi 59, Almaty, 050000, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-5908-5614

E-mail: beisen@mail.ru

Sultanov Assanali Talgatbekuly (corresponding author)

Ph.D. student, Head of the Laboratory of Alternative Energy and Nanotechnologies, KBTU, Laboratory of Alternative Energy and Nanotechnologies, Tole bi 59, Almaty, 050000, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0003-0074-431X

E-mail: asanalisultanovs@gmail.com

Авторлар туралы мәліметтер**Рахимова Айгерім Жангельдықызы**

Магистр, Баламалы энергетика және нанотехнологиялар зертханасы, ҚБТУ,

Төле би көш., 59, 050000, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0002-7735-4881

E-mail: aig_rakhimova@kbtu.kz

Жирков Илья Владимирович

Студент, БЭЖНЗ зертханашысы, Баламалы энергетика және нанотехнологиялар зертханасы, ҚБТУ, Төле би көш., 59, 050000, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0009-0003-0785-0526

E-mail: teobaldo9723@gmail.com

Нусупов Каир Хамзаевич

Ф.-м.ғ.д., бас ғылыми қызметкер, Баламалы энергетика және нанотехнологиялар зертханасы, ҚБТУ, Төле би көш., 59, 050000, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0001-8200-7510

E-mail: rich-famouskair@mail.ru

Бейсенханов Нуржан Бейсенханович

Ф.-м.ғ.д., МЖЖТМ деканы, Баламалы энергетика және нанотехнологиялар зертханасы, ҚБТУ, Төле би көш., 59, 050000, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0002-5908-5614

E-mail: beisen@mail.ru

Султанов Асанали Талгатбекулы (корреспонденция авторы)

PhD студент, Баламалы энергетика және нанотехнологиялар зертханасы,
КБТУ, Төле би көш., 59, 050000, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0003-0074-431X
E-mail: asanalisultanovs@gmail.com

Информация об авторах

Рахимова Айгерім Жангельдіқызы

Магистр, Лаборатория альтернативной энергетики и нанотехнологий,
КБТУ, ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан
ORCID ID: 0000-0002-7735-4881
E-mail: aig_rakhimova@kbtu.kz

Жирков Илья Владимирович

Студент, Лаборант ЛАЭиН, Лаборатория альтернативной энергетики и нанотехнологий,
КБТУ, ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан
ORCID ID: 0009-0003-0785-0526
E-mail: teobaldo9723@gmail.com

Нусупов Каир Хамзаевич

Д.ф.м.н., главный научный сотрудник, Лаборатория альтернативной энергетики
и нанотехнологий, КБТУ, ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан
ORCID ID: 0000-0001-8200-7510
E-mail: rich-famouskair@mail.ru

Бейсенханов Нуржан Бейсенханович

Д.ф.м.н., декан ШМиЗТ, Лаборатория альтернативной энергетики и нанотехнологий,
КБТУ, ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан
ORCID ID: 0000-0002-5908-5614
E-mail: beisen@mail.ru

Султанов Асанали Талгатбекулы (автор для корреспонденции)

Ph.D. студент, руководитель ЛАЭиН, Лаборатория альтернативной энергетики
и нанотехнологий, КБТУ, ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан
ORCID ID: 0000-0003-0074-431X
E-mail: asanalisultanovs@gmail.com

OIL AND GAS ENGINEERING, GEOLOGY
МҰНАЙ ГАЗ ИНЖЕНЕРИЯСЫ ЖӘНЕ ГЕОЛОГИЯ
НЕФТЕГАЗОВАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ГЕОЛОГИЯ

УДК 553.982.23.053
МРНТИ 38.53.17

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2023-20-4-118-126>

АЯГАНОВА А.И.

Казахстанско-Британский технический университет,
050000, г. Алматы, Казахстан
E-mail: a_ayaganova@kbtu.kz

**КЛАССИФИКАЦИЯ ДВУХФАЗНЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В СВЯЗИ С ИХ ПРОМЫШЛЕННОЙ РАЗВЕДКОЙ
НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МАНГЫШЛАКА**

Аннотация

Ни одна из существующих классификаций не дает возможности четко подразделить двухфазные залежи на различные виды от нефтяных с газовыми шапками до газовых с нефтяными оторочками. В классификации должны учитываться принципиальные отличия двухфазных залежей, влияющие на особенности разведки. Таким образом, целесообразнее все залежи, в которых поисковыми работами установлено наличие нефти и свободного газа, называть нефтегазовыми или газонефтяными. Значение этих терминов в данном случае следует признавать одинаковым. Лет 40 назад и по этому вопросу в статьях устраивались обсуждения: одни говорили, что главный в залежи флюид стоит в конце и если залежь названа газонефтяной, то преобладает в ней нефть, а другие утверждали, что в названии залежи, в которой преобладает нефть, она должна стоять впереди – нефтегазовая. В настоящей статье обсуждается, чем вызвано противоречие известных классификаций двухфазных углеводородных залежей. Рассмотрены варианты использования предложенных классификаций для обоснования и рационального проведения разведочных работ на месторождениях Тасбулат и Жетыбай. По результатам исследования предложена наиболее приемлемая классификация на стадии промышленной разведки как с точки зрения выбора местоположения и количества разведочных скважин, так и возлагаемых на них задач.

Ключевые слова: классификация, углеводороды, месторождение, объем, нефтяная залежь, газонефтяная залежь, газовая шапка, двухфазная залежь, промышленная разведка.

Введение

Классификацией двухфазных углеводородных залежей с учетом соотношения газовой и нефтяной частей применительно к задачам промышленной разведки в шестидесятых годах занимались многие геологи. В это время был резкий подъем разведочных работ, связанный в первую очередь с открытием таких нефтяных гигантов, как Мангышлак и Западная Сибирь. В этих нефтяных провинциях было обнаружено немало двухфазных залежей самого разнообразного строения. Требовался подсчет запасов, геометризация этих залежей и совершенствование методики разведки подобных залежей, а для этого их нужно было как-то систематизировать, классифицировать.

Важность этой классификации несомненна в связи с тем, что при одном и том же типе ловушки, с которой может быть связана двухфазная залежь, на стадии промышленной разведки решающую роль имеет характер соотношения газовой и нефтяной частей залежи.

Основные положения

В классификации А.Н. Мустафинова [1] среди двухфазных залежей по соотношению объемов, занятых нефтью и свободным газом, выделены газовые и газоконденсатные залежи с нефтяными оторочками, в которых значительно преобладает объем, занятый газом. Также выделяются нефтяные залежи с газовыми и газоконденсатными шапками, в которых значительно преобладает объем, занятый нефтью, и газонефтяные и нефтегазоконденсатные залежи, для которых не отмечаются резкие различия объемов, занятых нефтью и газом.

В таблице 1 представлена классификация, предложенная В.Г. Васильевым. В основу подразделения двухфазных залежей по данной классификации, в отличие от классификации Мустафинова, положено соотношение не объемов, занятых нефтью и газом, а геологических запасов нефти и свободного газа.

Таблица 1 – Классификация месторождений по фазовому состоянию углеводородов (по В.Г. Васильеву и Н.А. Еременко, 1966)

Типы месторождений по фазовому состоянию	Залежи, из которых состоят месторождения		
Газовые	Г (газовые) ГК (газоконденсатные)		
Нефтегазовые (суммарные запасы газа преобладают над запасами нефти)	НГ (нефтегазовые) Г ГН (газонефтяные) Н (нефтяные) ГК		
Газонефтяные (суммарные запасы нефти преобладают над запасами газа)	ГН Н НГ ГК Г		
Нефтяные	Н		
Газоконденсатные	ГК К Г		
Нефтегазоконденсатные	Г Н ГН	НГК ГКН ГК	НГ К

Принципы, положенные в основу классификаций Мустафинова и Васильева, будучи на первый взгляд аналогичными, по существу часто приводят к тому, что одни и те же залежи по этим классификациям попадают в противоположные группы [2]. Так, по классификации Васильева все двухфазные залежи, открытые в юре на месторождениях Мангышлака [8], должны быть отнесены к нефтяным залежам с газовыми и газоконденсатными шапками, так как запасы газа в них составляют от 0,02 до 0,57 от геологических запасов нефти, и только в залежи первого горизонта Тасбулата достигают 0,95. В то же время в шести из девятнадцати залежей объемы, занятые газом, превосходят объемы, заполненные нефтью, в 1,2–2,95 раза, и эти залежи по классификации Мустафинова должны быть отнесены к газовым или газоконденсатным с нефтяной оторочкой. Это противоречие вызвано тем, что соотношение объемов, занятых газом и нефтью, превосходит соотношение запасов газа и нефти на разведанных залежах в три-семь раз, причем это превосходство уменьшается с глубиной по мере нарастания пластового давления.

По этой же причине залежи с одинаковым строением, заполнением ловушки, коллекторскими свойствами и другими параметрами, характеризующими объемы, занятые нефтью и газом, будут иметь на различных глубинах разное соотношение между запасами нефти и газа, и по классификации Васильева будут относиться к различным видам. Так, в залежи первого продуктивного горизонта Тасбулатского месторождения, залегающей на глубине 1900 м при пластовом давлении 19,1 МПа, запасы газа составляют 1,8 млрд м³, геологические запасы нефти – 1,9 млн т, а их соотношение равно 0,95 [10]. Если эту залежь поднять на 500 м, то запасы газа в ней сократятся до 1,3 млрд м³, и при отношении запасов газа к нефти 0,68 залежь должна быть отнесена к нефтяной с газоконденсатной шапкой. Если эту же залежь опустить на 500 м до глубины 2400 м, то запасы газа в ней увеличатся до 2,3 млрд м³ и будут превышать запасы нефти в 1,2 раза, а залежь должна именоваться газоконденсатной с нефтяной оторочкой. Таким образом, отнесение двухфазных залежей к какой-либо группе по классификации Васильева не может служить основой для выбора методики промышленной разведки выявленной залежи.

Предложенное Мустафиновым разделение залежей по преобладанию объема, занятого газом или нефтью, также не дает принципиального различия между нефтяной залежью с газовой шапкой и газовой залежью с нефтяной оторочкой, необходимого для обоснования и рационального проведения разведочных работ. Соотношение объемов может быть обусловлено многими причинами, в частности замещением пластов-коллекторов непроницаемыми породами на отдельных участках структуры и по разрезу различными коллекторскими свойствами и другими. В результате нефтяная часть залежи с превосходящим объемом порового пространства может не иметь практического значения и залежь, именуемая как нефтяная с газовой шапкой, будет разрабатываться как газовая и, наоборот, залежь, в которой газовый объем превосходит объем нефтяной части, может разрабатываться как нефтяная [6, 7].

Так, залежь второго горизонта Жетыбайского месторождения, в которой объем, занятый газом, больше объема, заполненного нефтью, по классификации Мустафинова относится к газовой с нефтяной оторочкой. В то же время залежь разрабатывалась как нефтяная с газовой шапкой, и основные разведочные работы на ней направлялись на изучение нефтяной части, содержащей в три с половиной раза запасов больше, чем газовая. На Тасбулатском месторождении залежи первого и второго горизонтов с аналогичным строением и почти одинаковой высотой залежей должны разведываться исходя из одних и тех же принципов, а по классификации Мустафинова они относятся к разным группам. Это обусловлено различными толщинами коллекторов и их физическими свойствами, в результате чего в первой объем, занятый газом, в три раза больше объема, занятого нефтью, и залежь именуется газовой с нефтяной оторочкой, а во второй нефть занимает объем больший, чем газ, и залежь относится к нефтяной с газовой шапкой.

Кроме того, отнесение залежей к какой-либо группе согласно этим классификациям возможно только при завершении промышленной разведки месторождения. В итоге такие классификации должны определять принципиальную схему разработки залежи [5]. Однако обе практически не касаются промышленного значения отдельных частей двухфазных залежей.

В этом отношении представляет большой интерес классификация двухфазных залежей, предложенная В.П. Савченко и М.Я. Зыкиным [4]. Нефтяными залежами с газовыми шапками они называют залежи, у которых разработка газовой части совсем не производится или производится только в интересах разработки нефтяной части. Газовыми залежами с нефтяной оторочкой независимо от величины запасов газа и нефти и от соотношения объемов, занимаемых флюидами, называются те залежи, газовая часть которых разрабатывается как самостоятельный объект, а нефтяная оторочка разрабатывается попутно или вообще не разрабатывается. По этой классификации можно уверенно подразделить залежи при выборе рациональной системы разработки, но для обоснования варианта разведочных работ она, как и ранее рассмотренные классификации, не может быть использована.

Различие факторов, определяющих особенности разведки залежей, содержащих нефть и свободный газ, наиболее полно учитываются в классификации, предложенной В.Н. Самарцевым [3]. Он шел, казалось бы, от простого (если две фазы, то классифицировать нужно по их соотношению: одну по объемам, другую по запасам), но, как оказалось, это

не выявило принципиальных различий в строении залежей, влияющих на особенности их разведки. А Самарцев вышел за лежащие на поверхности признаки и в основу классификации положил условия заполнения ловушки флюидами. По этому принципу выделены три типа залежей: I тип – этаж газоносности больше толщины продуктивного горизонта; II тип – этаж газоносности меньше, а этаж нефтегазоносности больше толщины продуктивного горизонта; III тип – этаж нефтегазоносности меньше толщины продуктивного горизонта.

А дальше в залежах каждого типа по соотношению объемов нефти и свободного газа Самарцевым выделяются нефтяные залежи с газовой шапкой, нефтегазовые, газонефтяные и газовые залежи с нефтяной оторочкой. Такое подразделение двухфазных залежей приближается к классификации Васильева и сохраняет те же недостатки, не позволяющие рационально направлять промышленную разведку.

Видимо, при разделении двухфазных залежей на виды в пределах выделенных Самарцевым типов следует продолжить принятый принцип и производить в зависимости от соотношения высот нефтяной и газовой части и угла падения пород, что в плане выражается различным взаимным положением контуров нефтеносности и газоносности. Выделенные таким образом виды залежей будут иметь свои особенности расположения разведочных скважин по площади и возлагаемых на них задач.

Обзор литературы

Известно, что большинство существующих классификаций залежей нефти и газа основано на структурно-морфологическом принципе. Эти классификации имеют большое значение в решении поисковых задач. В меньшей мере разработана классификация залежей нефти и газа, учитывающая количественные соотношения газообразной и жидкой фаз углеводородов в пласте и имеющая важное значение при решении вопросов, прежде всего связанных с разработкой залежей.

В журнале «Геология нефти и газа» № 12, 1962, в статье А.Н. Мустафинова «Классификация залежей углеводородов по фазовому состоянию и соотношению объемов газообразной и жидкой фаз в пласте» описываются факторы, обуславливающие различие залежей углеводородов. Как считает А.Н. Мустафинов, в существующих классификациях недостаточно отражены газоконденсатные и нефтегазоконденсатные залежи, не полностью охарактеризован ряд особенностей контактовых соотношений газа и нефти с водой. При разработке рациональной классификации А.Н. Мустафинова определенное значение придается установлению единой терминологии, которая отвечает современному уровню научных знаний о залежах нефти и газа.

Для залежей двухфазной системы, газонефтяных и нефтегазоконденсатных, большое значение приобретает соотношение в них объемов газа и нефти. Такое соотношение характеризуется тем, что объем, занимаемый газом, значительно превосходит объем нефтяной залежи, так что в ряде случаев нефтяная залежь настолько мала, что не имеет промышленного значения. Такой вид системы носит название «газовая залежь с нефтяной оторочкой» или «газоконденсатная залежь с нефтяной оторочкой». В некоторых случаях нефтяная оторочка подстилает не всю залежь газа, а лишь часть ее. Ряд газовых залежей имеют нефтяные оторочки, сдвинутые к периферии структуры, где образуют иногда значительную свободную от газа нефтяную залежь. Наблюдается более сложный характер формирования залежи, когда одна часть залежи контактирует с пластовой водой, другая – с нефтью.

В некоторых случаях нефтяная оторочка бывает настолько мала, что при подготовке газовой залежи к разработке остается незамеченной, и залежь ошибочно считают чисто газовой или газоконденсатной.

Между тем наличие даже весьма малой нефтяной оторочки, подстилающей газовую залежь, является основанием считать ее газонефтяной или нефтегазоконденсатной, т.е. она относится к двухфазной системе. В этом случае процесс вытеснения газа, естественно, будет протекать по иному принципу и коэффициент газоотдачи будет другой. Поэтому установление нефтяной оторочки газовых залежей очень важно.

В книге «Геология нефти и газа» Еременко Н.А. приводится классификация И.О. Брода в виде схемы соотношения в залежах нефти, газа и воды (таблица).

Классификация залежей по соотношению подвижных веществ в природных резервуарах			
Группы (классы)	Водонапорные залежи	Залежи, подстилаемые водой	Безводные залежи
Чисто газовые залежи	Водонапорные газовые залежи	Подстилаемые водой газовые	Безводные газовые залежи
Нефтяные	Водонапорные нефтяные залежи с газовой шапкой	Подстилаемые водой нефтяные залежи с газовой шапкой	Безводные нефтяные залежи с газовой шапкой
Нефтяные залежи, богатые газом, растворенным в нефти	Водонапорные нефтяные залежи, богатые газом, растворенным в нефти	Подстилаемые водой нефтяные залежи, богатые газом, растворенным в нефти	Безводные нефтяные залежи, богатые газом, растворенным в нефти
Нефтяные залежи, мало насыщенные газом	Водонапорные нефтяные залежи, мало насыщенные газом	Подстилаемые водой нефтяные залежи, мало насыщенные газом	Безводные нефтяные залежи, мало насыщенные газом

Соотношение в залежи между нефтью, газом и водой, безусловно, является следствием генетических условий формирования залежей. Однако приведенная схема в этом отношении не отражает всех тех явлений, которые должны быть здесь учтены. В 1966 г. В.Г. Васильевым, Н.С. Ерофеевым, С.Р. Коробовым была предложена классификация по фазовому состоянию углеводородов, образующих залежи. По этой классификации авторы предлагают различать следующие типы залежей по фазовому состоянию: газовые, газоконденсатно-газовые, газоконденсатные, конденсатные, залежи переходного состояния, нефтяные, нефтегазовые, газонефтяные, нефтегазоконденсатные, газоконденсатнонефтяные.

Классификация двухфазных залежей, предложенная В.П. Савченко и М.Я. Зыкиным, опубликована в журнале «Геология нефти и газа» № 12, 1966. Авторы приводят определения нефтяными залежам с газовыми шапками и газовым залежам с нефтяной оторочкой. М.Я. Зыкин в своих статьях «О рациональной разведке газовых залежей с нефтяной оторочкой» и «Особенности разведки газонефтяных залежей нижнемелового комплекса на месторождениях севера Западной Сибири» рассматривает анализ опыта разведки месторождений и залежей с нефтяной оторочкой, основываясь на классификации разработанной В.П. Савченко и М.Я. Зыкиным.

Материалы и методы

Для залежей I типа, имеющих наиболее сложное строение и разнообразное взаимное положение флюидов по разрезу продуктивного горизонта, характерно наличие газовой зоны в пределах внутреннего контура газоносности. По наличию и соотношению других зон встречаются три вида залежей: залежи, имеющие газонефтяную, нефтяную и водонефтяную зоны; залежи, имеющие газонефтяную и водонефтяную зоны; залежи, в которых присутствуют газонефтяная, газонефтеводная и водонефтяная зоны (рисунок 1). В залежах II типа газовая зона отсутствует, они имеют газонефтяную зону, и среди них выделяются два вида залежей, в первом из которых присутствуют нефтяная и водонефтяная зоны, а во втором – газонефтеводная и водонефтяная.

Во всех залежах III типа присутствуют газонефтеводная и водонефтяная зоны.

Согласно классификации Самарцева, наличие нефтяной зоны в залежах I типа отмечается как в нефтяных залежах с газовой шапкой, так и в нефтегазовых залежах. Среди залежей II типа отсутствие нефтяной зоны и наличие газонефтеводной зоны характерно для нефтегазовых, газонефтяных и газовых залежей с нефтяными оторочками.

Все виды залежей III типа от газовых с нефтяными оторочками до нефтяных с газовыми шапками характеризуются присутствием одних и тех же зон.

Результаты и обсуждения. Следовательно, ни одна из существующих классификаций не дает возможности четко подразделить двухфазные залежи на различные виды от нефтяных с газовыми шапками до газовых с нефтяными оторочками с учетом при этом их принципиальных отличий, влияющих на особенности разведки [5].

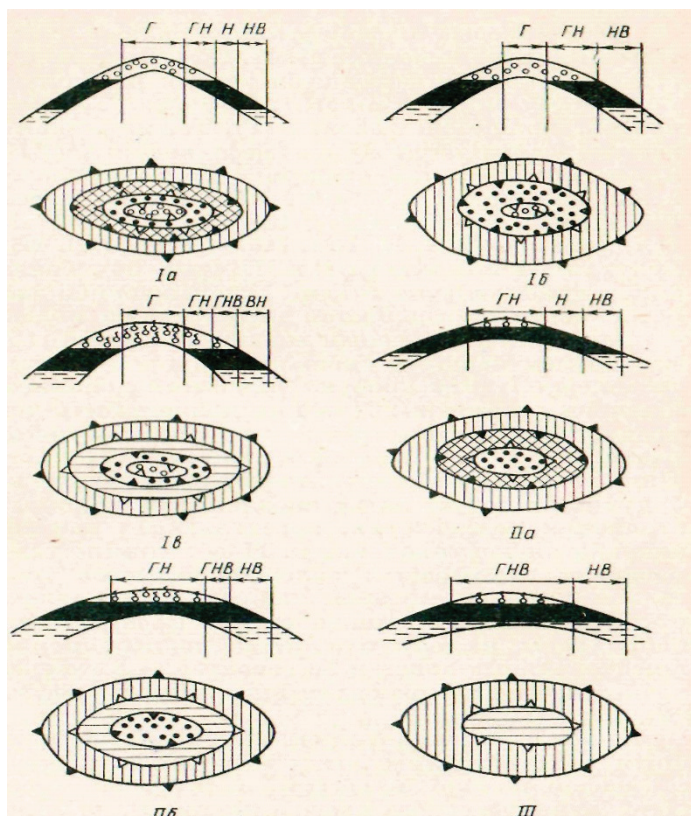


Рисунок 1 – Типы залежей нефти и газа
 [] – газ; [] – нефть; [] – вода;
 Зоны: Г – газовая; ГН – газонефтяная; ГНВ – газонефтеводная;
 Н – нефтяная; НВ – нефтеводная; ВН – водонефтяная

Таким образом, целесообразнее все залежи, в которых поисковыми работами установлено наличие нефти и свободного газа, именовать нефтегазовыми или газонефтяными. Значение этих терминов в данном случае следует признавать одинаковым. Среди геологов по этому вопросу в статьях устраивались обсуждения: одни говорили, что главный в залежи флюид стоит в конце и если залежь названа газонефтяной, то преобладает в ней нефть, а другие утверждали, что в названии залежи, в которой преобладает нефть, она должна стоять впереди – нефтегазовая [9].

Нефтегазовые (газонефтяные) залежи следует подразделять на три типа, предложенные Самарцевым, и в их объеме выделять залежи, характеризующиеся зонами различного сочетания флюидов по разрезу продуктивного горизонта. Таким зонами являются газовая (Г), газонефтяная (ГН), нефтяная (Н), газонефтеводная (ГНВ) и нефтеводная (НВ).

Обозначая залежи индексами, представляющими собой перечисление присутствующих в них зон, среди залежей I типа можно выделить залежи: Ia – Г, ГН, Н, НВ; Ib – Г, ГН, НВ; Ic – Г, ГН, ГНВ, НВ; среди залежей II типа – IIa – ГН, Н, НВ; IIb – ГН, ГНВ, НВ; все залежи III типа имеют индекс ГНВ, НВ.

Заключение

Если двухфазный характер насыщения залежей II и III типов может быть установлен первыми скважинами, пробуренными в своде ловушки, то залежи I типа требуют для этого дополнительного изучения на крыльях структуры. Для них должно быть достоверно установлено распространение внутреннего контура газоносности, определяющего размеры газовой зоны в залежи и ее промышленную ценность.

Для залежей I и II типов, имеющих нефтяную зону, основные работы будут направлены на установление ее ширины и характера распространения коллекторов, определяющих как запасы, так и условия разработки нефтяной части.

Необходимым условием промышленной разведки двухфазных залежей является опытная эксплуатация, задачи и объем которой также будут различными в зависимости от установленного вида залежи. В первую очередь эти работы будут направлены на определение безводного периода работы скважин в нефтеводных зонах и безгазового – в газонефтяных зонах и в конечном счете должны определить ценность нефтяной и газовой частей двухфазной залежи.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Мустафинов А.Н. Классификация залежей углеводородов по фазовому состоянию и соотношению объемов газообразной и жидкой фаз в пласте // Геология нефти и газа. – 1962. – № 12. – С. 47–50.
- 2 Еременко Н.А. Геология нефти и газа – М.: Недра, 1968. – С. 184–197.
- 3 Самарцев В.Н. К вопросу классификации залежей, содержащих нефть и свободный газ. / Тр. ВНИИ, вып. 33. – М.: Недра, 1968. – С. 10–14.
- 4 Савченко В.П., Зыкин М.Я. О методике разведки газовых залежей с нефтяной оторочкой // Геология нефти и газа. – 1966. – № 12. – С. 7–10.
- 5 Брусиловский А.И. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа. – М.: Грааль, 2002. – 575 с.
- 6 Pedersen K.S. Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids / Pedersen K.S., P.L. Christensen. – N.Y.: CRC Press, 2007. – 407 p.
- 7 Whitson C.H. Phase behavior/ C.H. Whitson, M.R. Brule. – Monograph volume, Texas: SPE Henry L. Doherty series, 2000. – 235 p.
- 8 Муллаев Б.Т., Саенко А.Е. Первоисток Мангышлакской нефти. Жетыбайская группа месторождений. – Актау: Strelbytskyu Multimedia Publishing, 2019. – С. 22–23.
- 9 Классификация залежей нефти и газа [Электронный ресурс]. URL: <https://oborudka.ru/handbook/51.html>
- 10 Коростышевский М.Н. Концепция геолого-промыслового изучения крупных нефтегазовых месторождений в процессе их разведки и разработки (на примере Южного Мангышлака): Дисс... д. г.-м. н. – Актау, 1997. – С. 9–15.

REFERENCES

- 1 Mustafinov A.N. (1962) Klassifikacija zalezhej uglevodorodov po fazovomu sostojaniju i sootnosheniju ob#emov gazoobraznoj i zhidkoj faz v plaste. Geologija nefiti i gaza, no 12, pp. 47–50.
- 2 Eremenko N.A. (1968). Geologija nefiti i gaza, pp. 184–197.
- 3 Samarcev V.N. (1968) K voprosu klassifikacii zalezhej, soderzhashhih nef't' i svobodnyj gaz. Tr. VNII, vol. 33, pp. 10–14.
- 4 Savchenko V.P., Zysin M.Ja. (1966) O metodike razvedki gazovyh zalezhej s nef'tjanoj otorochkoj. Geologija nefiti i gaza, no 12, pp. 7–10.
- 5 Brusilovskij A.I. (2002) Fazovye prevrashhenija pri razrabotke mestorozhdenij nefiti i gaza, 575 p.
- 6 Pedersen K.S. (2007) Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids, 407 p.
- 7 Whitson C.H. (2000) Phase behavior. Monograph vol., Texas: SPE Henry L. Doherty series, 235 p.
- 8 Mullaev B.T., Saenko A.E. (2019) Pervoistoki Mangyshlakskoj nefiti. Zhetybajskaja gruppа mestorozhdenij, pp. 22–23.
- 9 Klassifikacija zalezhej nefiti i gaza. URL: <https://oborudka.ru/handbook/51.html>
- 10 Korostyshevskij M.N. (1997) Konceptija geologo-promyslovogo izuchenija krupnyh neftegazovyh mestorozhdenij v processe ih razvedki i razrabotki (na primere Juzhnogo Mangyshlaka): Diss... d. g.-m. n., Aktau, pp. 9–15.

AYAGANOVA A.I.

Kazakh-British Technical University,
050000, Almaty, Kazakhstan
E-mail: a_ayaganova@kbtu.kz

CLASSIFICATION OF TWO-PHASE HYDROCARBON DEPOSITS IN CONNECTION WITH THEIR INDUSTRIAL EXPLORATION ON THE EXAMPLE OF MANGYSHLAK DEPOSITS

Abstract

None of the existing classifications makes it possible to clearly divide two-phase deposits into different types, from oil-gas caps to oil-oil-related gas deposits, taking into account their fundamental differences that affect the exploration features. Thus, it is preferable to name all deposits in which the presence of oil and free gas is established by prospecting works as oil and gas oil. The meaning of these terms should be considered the same. About 40 years ago there were discussions on this issue too: some said that the main fluid in the reservoir is at the end, and if the reservoir is called gas-oil, the oil predominates there, while others argued that in the name of the reservoir in which oil predominates, it should be in front - oil and gas. This article discusses why the known classifications of two-phase hydrocarbon deposits conflict. The article considers variants of use of the proposed classifications for substantiation and rational carrying out of exploration works on deposits Tasbulat and Zhetybai. According to the results of the study, the most acceptable classification at the stage of industrial exploration in terms of the choice of location and number of exploration wells, as well as the tasks assigned to them, has been proposed.

Key words: classification, hydrocarbons, deposit, volume, oil deposit, gas oil deposit, gas cap, two-phase deposit, industrial exploration

АЯҒАНОВА А.І.

Қазақстан-Британ техникалық университеті
050000, Алматы қ., Қазақстан
E-mail: a_ayaganova@kbtu.kz

МАҢҒЫШЛАҚ КЕН ОРЫНДАРЫНЫҢ МЫСАЛЫНДА ӨНЕРКӘСІПТІК БАРЛАУҒА БАЙЛАНЫСТЫ ЕКІ ФАЗАЛЫ КӨМІРСУТЕК КЕН ОРЫНДАРЫНЫҢ ЖІКТЕЛУІ

Аңдатпа

Екі фазалы кен орындарын барлау ерекшеліктеріне әсер ететін олардың түбегейлі айырмашылықтарын ескере отырып, газ қақпақтары бар мұнайдан мұнай жиектері бар газға дейінгі түрлерге нақты жіктеуге қолданыстағы жіктемелердің ешқайсысы мүмкіндік бермейді. Осылайша іздеу және барлау жұмыстары нәтижесінде мұнай мен газ анықталған барлық кен орындарын мұнай-газ немесе газ-мұнай деп атаған дұрыс. Бұл жағдайда осы терминдердің мағынасы бірдей деп танылғаны жөн. Осы мәселе 40 жыл бұрын мақалаларда кеңінен талқыланған болатын: кейбір пікір бойынша, егер шөгінді газ-мұнай деп аталса, онда мұнай басым болады, ал басқа көзқараста мұнай басым болатын шөгінділердің атауында мұнай-газ деп ол алда тұруы керек делінді. Бұл мақалада екі фазалы көмірсутек кен орындарының бізге белгілі классификацияларының не себепті қарама-қарсы болғандығы талқыланады. Тасболат және Жетібай кен орындарында барлау жұмыстарын тиімді жүргізу үшін ұсынылған классификациялардың пайдалану нұсқалары қаралды. Зерттеу нәтижелері бойынша барлау ұңғымаларының орналасқан жері мен санын, сондай-ақ оларға жүктелген міндеттерді таңдау тұрғысынан өнеркәсіптік барлау сатысында ең қолайлы жіктеу ұсынылды.

Тірек сөздер: жіктелуі, көмірсутектері, кен орны, көлемі, мұнай шоғыры, газ-мұнай шоғыры, газ қақпағы, екі фазалы кен орны, өнеркәсіптік барлау.

Информация об авторе

Аяганова Анар Изгалиевна

Магистрант, Казахстанско-Британский технический университет,
Школа геологии, ул. Төле би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан
ORCID ID: 0009-0009-9712-6737.
E-mail: a_ayaganova@kbtu.kz

Information about author

Ayaganova Anar Izgalikyzy

Master Student, Kazakh-British Technical University, School of Geology, Tole-bi 59,
Almaty, Kazakhstan
ORCID ID: 0009-0009-9712-6737.
E-mail: a_ayaganova@kbtu.kz.

Автор туралы мәлімет

Аяғанова Анар Изғалиқызы

Магистрант, Қазақстан-Британ техникалық университеті, Геология мектебі, Төле би, 59,
050000, Алматы, Қазақстан
ORCID ID: 0009-0009-9712-6737.
E-mail: a_ayaganova@kbtu.kz.

УДК 622.276
МРНТИ 52.47.19

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2023-20-4-127-136>

¹*БАСАРБАЙ А.Е., ¹ТУРГАЗИНОВ И.К.

¹Казахстанско-Британский технический университет,
050000, г. Алматы, Республика Казахстан
*E-mail: akbotabassarbay.pe@gmail.com

ВОВЛЕЧЕНИЕ В РАЗРАБОТКУ НЕДРЕНИРУЕМЫХ ЗАПАСОВ М. ЖЕТЫБАЙ

Аннотация

Вопрос оптимизации добычи нефти всегда был одним из актуальных. В статье рассматриваются технологические методы для вовлечения в разработку недренируемых запасов месторождения Жетыбай. Представлены технологии разработки месторождения, которые были применены в последние годы. Из всех представленных методов для повышения нефтеотдачи эффективным является гидравлический разрыв пласта (ГРП). Гидравлический разрыв пласта – один из известных и эффективных методов увеличения добычи нефти. Гидравлический разрыв пласта может использоваться как при первичной добыче нефти, так и для повышения эффективности уже работающих скважин. Этот метод широко применяется в нефтяной промышленности во многих странах. Первоначально данный метод применяли для более низкопроницаемых коллекторов для того, чтобы получить узкие, глубокопроникающие трещины. Позже начали применять для высокопроницаемых коллекторов. Для того чтобы добыча была более эффективной, в вовлечении в разработку слабодренируемых запасов рекомендуется изменить направления трещин ГРП, данный метод был применен на Повховском месторождении. На месторождении Повховское, чтобы изменить направление трещин ГРП, провели двухстадийный ГРП в трудноизвлекаемых пластах, и результат был положительным.

Ключевые слова: разработка месторождений, недренируемые запасы, изменение направления трещин.

Введение

Газонефтяное многопластовое месторождение по величине своих извлекаемых запасов нефти является одним из крупнейших месторождений Казахстана [1] и находится на позднем этапе разработки.

Неравномерная выработка запасов по площади и разрезу означает, что добыча не происходит равномерно во всем месторождении. Это может быть связано с неоднородностью геолого-физических характеристик, таких как проницаемость и пористость горных пород, или со сложной многопластовой структурой месторождения, которая требует специальных технологий и методов добычи.

Эти проблемы могут привести к неэффективной добыче и потере значительной части запасов. Для их решения необходимо провести более детальное геологическое исследование месторождения и использовать современные технологии и методы добычи, а также принять меры по оптимизации процесса добычи и контролю за ним.

Целью данного исследования является рекомендация способа разработки залежей, при которой можно увеличить добычу нефти из неохваченных областей. Выделить перспективный участок для вовлечения в разработку.

Задача данной работы – проанализировать результаты исследований научных трудов по данной тематике. Также выделить перспективного участка для проведения ГРП по материалам соседних скважин, геологических условий месторождения и текущих параметров скважины.

В данной работе определен перспективный участок для проведения ГРП. Также рекомендуется метод вовлечения в разработку трудноизвлекаемых запасов путем изменения направления трещины, который был применен на Повховском месторождении.

Разработка неохваченных запасов нефтяных месторождений имеет высокую актуальность по нижеперечисленным причинам:

1. Экономическая значимость: неохваченные области могут содержать значительные объемы нефти, которые могут быть добыты с использованием современных технологий и методов. Разработка таких областей позволяет увеличивать добычу и приносить дополнительные экономические выгоды.

2. Технологические достижения: разработка неохваченных запасов требует применения новых технологий и инноваций, что способствует развитию нефтегазовой промышленности. Это включает в себя разработку более эффективных методов бурения, добычи и интенсификации добычи, а также применение новых материалов и технологий.

Все эти факторы подтверждают актуальность разработки неохваченных запасов нефтяного месторождения и оправдывают проведение исследований с целью увеличения добычи из таких областей.

Материалы и методы

Для решения проблемы невысокой эффективности добычи нефти на месторождениях с геологической неоднородностью и находящихся на позднем этапе разработки можно применять следующие подходы [4]:

- ♦ применение новых технологий: использование современных методов и технологий добычи, таких как гидроразрыв пласта (гидрофракция), горизонтальное бурение и др., позволяет увеличить эффективность добычи и вовлечь в работу слабодренлируемые участки пласта;

- ♦ использование химических реагентов: применение специальных химических реагентов может улучшить фильтрационные свойства пласта, увеличивая его проницаемость и улучшая дренажную способность;

- ♦ улучшение системы управления добычей: разработка оптимальной системы управления добычей, включающей выбор оптимального режима работы скважин, оптимизацию интервалов забоя, регулирование дебита добываемых флюидов и др., может значительно повысить эффективность добычи на поздней стадии;

- ♦ использование интеллектуальных систем: применение интеллектуальных систем управления добычей, таких как системы искусственного интеллекта и машинного обучения, позволяет автоматизировать процесс принятия решений и оптимизировать работу месторождения;

- ♦ проведение геофизических исследований: проведение дополнительных геофизических исследований может помочь лучше понять геологическую структуру месторождения, выявить слабодренлируемые участки и разработать более эффективную стратегию добычи.

Применение этих подходов позволит увеличить эффективность добычи нефти, месторождений на позднем периоде разработки с геологической неоднородностью и вовлечь в активную работу ранее недренлируемые участки пласта. Основной целью разных методов в воздействии на призабойную зону является увеличение дебитов добывающих скважин, также приемистость нагнетательных скважин.

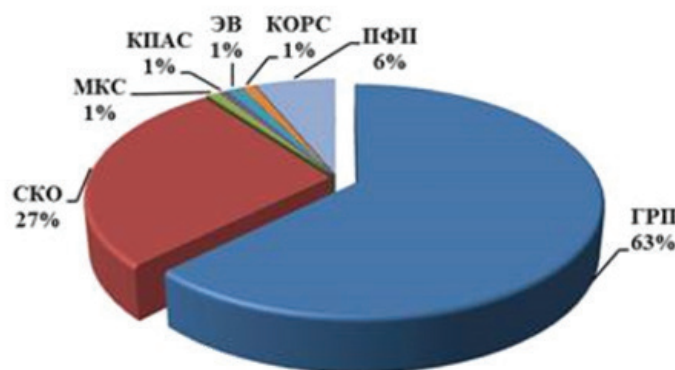


Рисунок 1 – Применяемые технологии на м. Жетыбай [2]

В данное время ГРП является частью мероприятий по увеличению добычи нефти и продолжению притока [12]. Данный метод влияет на текущие добычи нефти, также на последнюю нефтеотдачу [14]. ГРП обеспечивает восстановление гидродинамической связи между добывающими скважинами и продуктивным коллектором пласта, что, в свою очередь, способствует более полному извлечению нефтяных запасов [20].

Основные положения

Целью данного исследования является рекомендация способа разработки залежей, при которой можно увеличить добычу нефти из неохваченных областей.

За анализируемый период на месторождении определены вовлеченные запасы по 67 скважинам за счет ГРП, которые составили 454,8 тыс. тонн нефти.

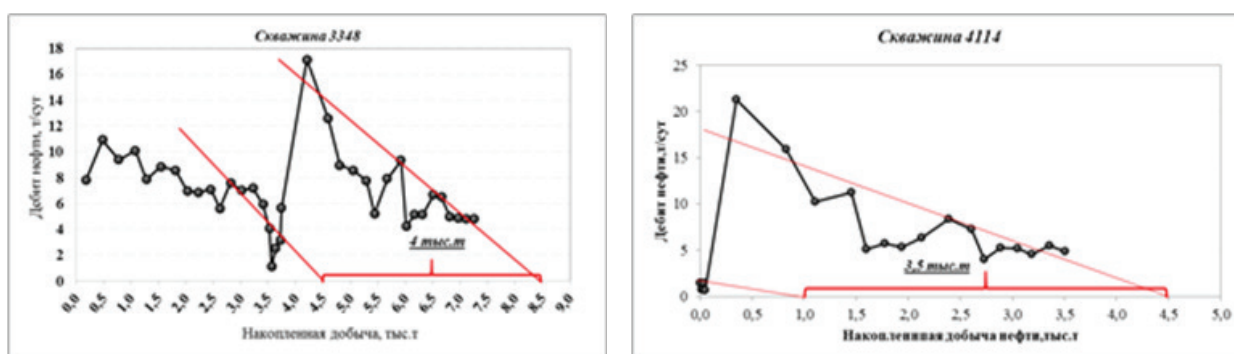


Рисунок 2 – Изменение вовлеченных запасов нефти до и после проведения ГРП в скважине 3348, 4114.

Как видно из представленных данных, вовлеченные запасы нефти за счет ГРП в скважинах 3348, 4114 составили 4 и 3,5 тыс. тонн.

Обзор литературы

Статья Ф.С. Салимова касается вопросов разработки нефтяных месторождений с трудно-извлекаемыми запасами нефти с использованием ГРП и изменения направления трещин. В статье представлены исследования в нефтяной промышленности с особым акцентом на опыте ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» на Повховском месторождении. В статье описан опыт проведения двухстадийного ГРП. Этот подход позволяет значительно увеличить добычу нефти, снизить обводненность и изменить направление трещин, что позволяет ускорить обработку ранее труднодоступных участков пласта. Проведенные исследования и практические результаты на Повховском месторождении свидетельствуют о перспективности таких подходов.

В статье Тлегинова Б.Б. представлены показатели детального исследования геологических условий осадконакопления на месторождении Жетыбай. В ходе исследования были выявлены значительные остаточные запасы нефти на горизонте Ю-10. В статье представлены исследования, направленные на локализацию этих неизвлеченных запасов и совершенствование системы разработки месторождений. Авторы представляют геолого-технические мероприятия, которые разработаны с целью увеличения возможности добычи нефти. Эти мероприятия включают в себя такие действия, как бурение скважин, проведение геофизических исследований, а также использование технологии гидравлического разрыва пласта (ГРП).

В публикации Д.Ю. Колупаева представлен анализ эффективности различных технологий, связанных с гидроразрывом пласта (ГРП), применяемых на Приобском месторождении. Она также учитывает современные тенденции развития этих технологий и их влияние на извлечение нефти из низкопроницаемых коллекторов [11].

Также в процессе исследования данной тематики были рассмотрены отчеты по гидравлическому разрыву пласта месторождения Жетыбай.

Результаты и обсуждение

Применение метода гидравлического разрыва пласта считается наиболее эффективным вариантом для разработки месторождения Жетыбай. Что такое ГРП? Гидравлический разрыв пласта включает в себя закачку жидкости под высоким давлением в подземный пласт с целью создания разрывов в пористой среде. Проппант – это гранулированный материал, который закачивается в трещину с помощью жидкостей во время гидроразрыва пласта. Проппанты могут быть различного типа и состава, включая природные пески, керамику, синтетические материалы и др. [7].

Неоднородность, проницаемость, глубина залегания пласта, пластовое давление – все эти особенности анализируются с целью принятия обоснованного решения о проведении гидравлического разрыва пласта в каждом конкретном случае [6]. Также немалую значимость имеет грамотный подбор скважин для гидроразрыва пласта. И нужно учитывать промысловые факторы, такие как состояние обсадной колонны и устьевого оборудования, качество цементации, наличие глинистых прослоек и т.д. [8].

Слабопроницаемые, сцементированные крепкие породы обладают достаточной прочностью и минимальной проницаемостью, что позволяет увеличить эффективность и продолжительность гидравлического разрыва. В таких породах нет разрушений и песчаных пробок, что способствует более эффективной работе скважин [9].

Эффективность гидравлического разрыва пласта в нефтедобыче выражается в увеличении дебита или приемистости скважин благодаря правильному образованию трещин в пласте. Чем больше трещин в пласте и чем большую раскрытость они имеют и обеспечивают распространение, тем больше дополнительных поровых пространств открывается для потока нефти или газа. Для подбора скважин – кандидатов на проведение гидроразрыва пласта необходимо учитывать текущие параметры работы скважин по результатам гидродинамических исследований скважин [3].

Таблица 1 – Пример анализа эффективности ГРП на месторождении Жетыбай

№ пп	№ скв.	Тоннаж	Горизонт	Параметры до ГРП		Параметры после ГРП	
				Qж	Qн	Qж	Qн
1	А*	5	А-1*	3,5	0,1	22	12,8
2	Б*	10	Б-1*	2,6	1,2	15,5	9,2
3	С*	15	С-1*	3,4	0,7	5	3,4
4	Д*	25	Д-1*	25,7	1,2	39,2	25,4
5	Е*	50	Е-1*	12,6	3,6	26,1	7,2

Проницаемость пласта на месторождении меняется в значительных пределах, от нижнего предела – 5 мД до 5050 мД. В низкопроницаемых пластах эффективным считается образование длинных трещин, широкие и короткие трещины более эффективны в высокопроницаемых пластах [4].

На скважинах, где выполнение гидравлического разрыва пласта связано с высоким риском получения обводненности, применяется малотоннажный ГРП для создания высокопроводимой короткой трещины в призабойной зоне пласта [3]. Пример изменения геометрии трещины путем снижения тоннажа с 25 т до 15 т после калибровки модели ГРП на скважине Х с целью избежания прорыва нижележащего водоносного пласта (рисунок 4, стр. 131).

Для вовлечения в разработку нужен индивидуальный подход для каждого участка, каждого месторождения. Можно проводить многостадийный ГРП, ППД путем обратной закачки пластовой воды, также бурение одностовольных и многостовольных ГС и т.д. [16]. Успешность технологий зависит от понимания структуры оставшихся нефтяных ресурсов [17].

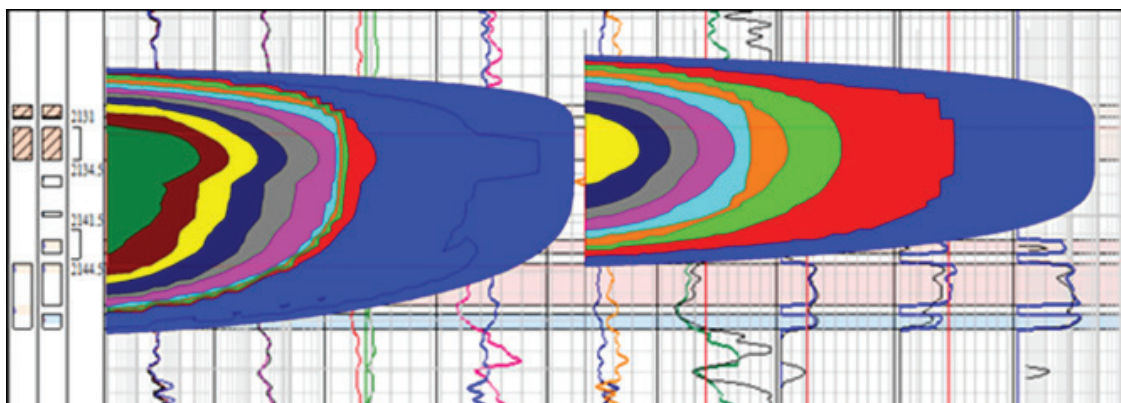


Рисунок 4 – Профиль трещины после снижения тоннажа [3]

Также в волежении в разработку одним из перспективных методов является бурение горизонтальных скважин с МГРП. Использование горизонтальных скважин с МГРП позволяет значительно увеличить площадь дренирования нефтяных запасов по сравнению с наклонными скважинами с гидроразрывом пласта. Опыт был применен на Приобском месторождении [15]. Исследование и практическая проверка различных технологических подходов с использованием ГС с МГРП позволяют планировать разработку нефтяных месторождений, которые ранее считались неэффективными с точки зрения экономического подхода. Бурение дополнительных скважин в краевых областях месторождения, включая горизонтальные скважины и ГРП, может повысить эффективность охвата новых зон, которые на текущий момент не вовлечены в процессы разработки.

На одном из месторождений Западной Сибири [18] также рассматривали разные варианты разработки. Но анализ эффективности показал, что бурение ГС более перспективное по сравнению с другими методами. Горизонтальное бурение активно используется на месторождениях с высокой степенью истощения нефтяных ресурсов [19].

Рекомендуется разрабатывать слабодренируемые участки с помощью изменения направления трещин ГРП. Данный подход разработки был применен на Повховском месторождении. Месторождение Повховское многопластовое, относится к Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции и находится на поздней стадии разработки. Для этого решили провести двухстадийный ГРП в трудноизвлекаемых пластах, то есть разделить закачку проппанта на две стадии. Данный подход позволил изменить напряжение возле скважины за счет разрыва породы. Разрыв породы при закачке проппанта второй стадии был немного в другом месте, и предполагалось изменение направления трещины. По результатам исследования после внедрения двухстадийного ГРП удалось изменить направление трещины, которое содействует вовлечению в разработку слабодренируемых зон пласта. Были получены положительные результаты. Опыт проведения двухстадийного ГРП с изменением направления трещины позволяет достигнуть участков с высокой остаточной нефтенасыщенностью и вовлечь в разработку трудноизвлекаемых недренируемых запасов нефти.

Развитие технологии МГРП продвигается во всех основных направлениях, включая проппантный ГРП в смешанных пластах и кислотно-проппантный ГРП в карбонатных коллекторах [10].

Создание и расширение трещин в породах на первом этапе ГРП увеличивает давление на изгиб части скважины, что может помочь начать образование трещин в других частях горизонтального ствола скважины [13].

При определении перспективных участков для гидравлического разрыва пласта нужно учитывать геологические условия района, свойства пласта, давление в скважине и другие параметры.

Месторождение Жетыбай в тектоническом отношении приурочено к Жетыбай-Узеньской тектонической ступени. Отложения батского яруса представлены переслаиванием песчаников, алевролитов и глин.

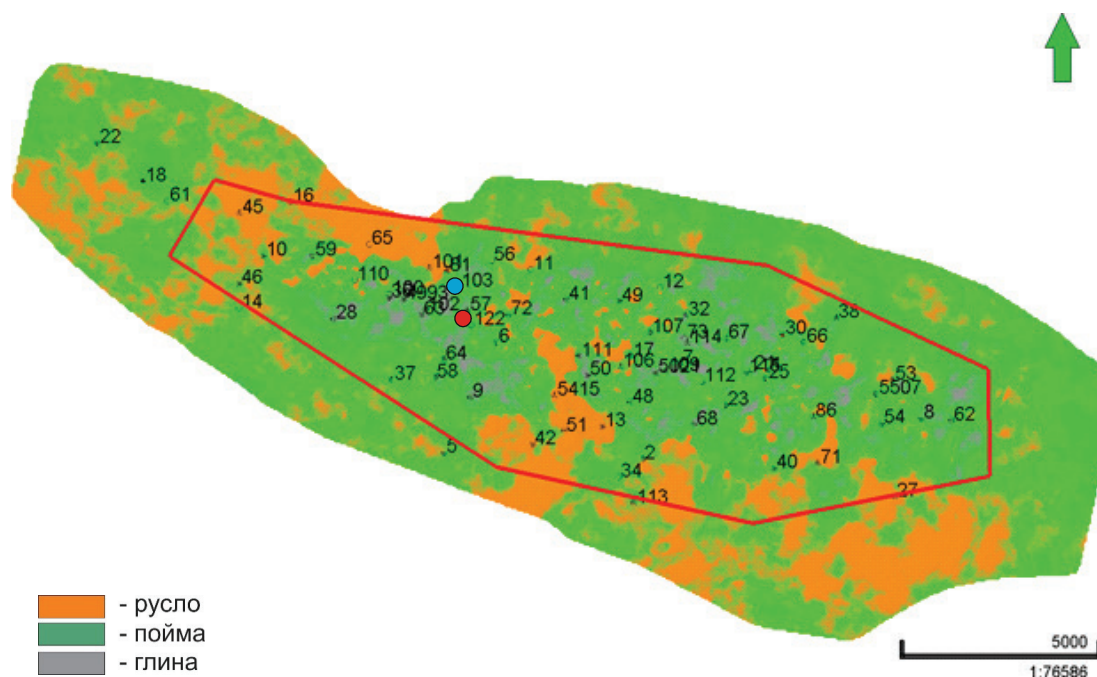


Рисунок 5 – Фациальная карта Z горизонта

В исследуемом горизонте с 2010 г. проведено 14 ГРП. Девять из них считаются эффективными. В скважине X-1 (район выделен синей отметкой на фациальной карте) провели ГРП и получили эффективные результаты.

$Q_n = 28,5$ т;

($Q_{ж}/Q_n/\%$) до: 7,1/4,9/32%;

($Q_{ж}/Q_n/\%$) после: 57,7/29,1/50%;

Прирост нефти: 24,3 т/сут.

Параметры скважины рекомендуемого района:

обводненность=67%;

дебит нефти=3,4 т/сут.;

дебит жидкости=5 т/сут.;

$R_{пл} = 208$ атм.;

$R_{заб.} = 116$ атм.

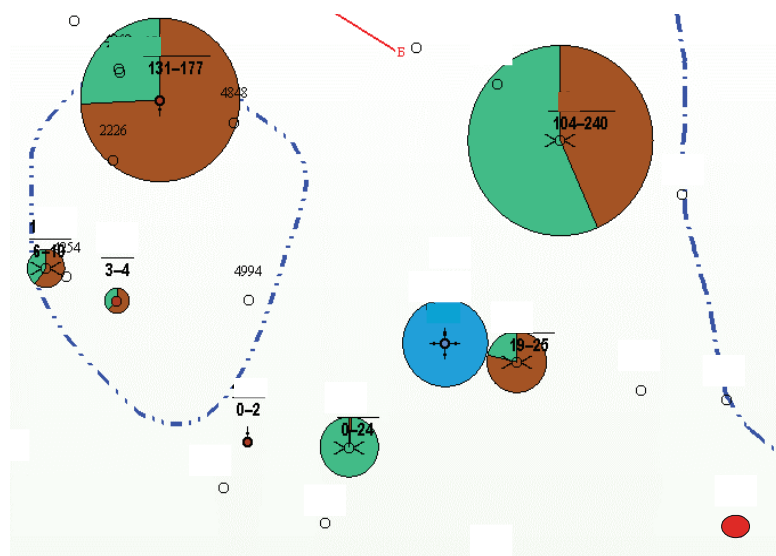


Рисунок 6 – Накопленные отборы соседних скважин X-2

Исходя из приведенных выше данных рекомендуется провести ГРП в скважине Х-2 (район выделен красной отметкой на фациальной карте и на карте накопленных отборов). После успешного проведения гидравлического разрыва пласта предполагается повышение дебита нефти данной скважины, что свидетельствует об эффективности этого технологического процесса в увеличении добычи углеводородов.

Закключение

Правильно выбранный район, грамотный подбор скважин для проведения ГРП являются важными факторами, которые влияют на успешность ГРП.

Изменение направления трещин может быть эффективным подходом при вовлечении в разработку слабодренлируемых запасов. При слабой проницаемости пласта нефть может иметь ограниченную возможность проникнуть в скважину. Создание трещин, которые будут направлены в сторону этих запасов, может увеличить контакт между скважиной и пластом, что приведет к увеличению добычи.

Применение ГРП является одним из эффективных вариантов для разработки месторождения Жетыбай. При разработке слабодренлируемых запасов предлагается применить вариант изменения направления трещин ГРП.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Тлегенов Б.Б. Вовлечение в разработку недренлируемых запасов нефти на месторождении Жетыбай // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. – 2020. – № 4(5). – 51 с.
- 2 Сатаева С.С. Анализ применения гидродинамических методов при проектировании разработки низкопроницаемых коллекторов на месторождении Жетыбай / С.С. Сатаева, А.С. Купешова, А.А. Шуюншалиев // Молодой ученый. – 2019. – № 52(290). – С. 63–67.
- 3 Косбармаков М.Б., Картбаев Д.И., Кубекбаев Е.И. и др. Инженерное сопровождение ГРП на скважинах месторождений АО «ММГ» г. Актау. Годовой отчет. – 2022.
- 4 Экономидес М.Дж. Современные методы оптимизации гидроразрыва пласта. / Хьюстонский университет. – Хьюстон.
- 5 Салимов Ф.С. Вовлечение в разработку слабодренлируемых, трудноизвлекаемых запасов нефти путем изменения направления трещин ГРП / Ф.С. Салимов // Экспозиция Нефть Газ. – 2017. – № 6(59).
- 6 Константинов С.В., Гусев В.И. Техника и технология проведения гидравлического разрыва пластов за рубежом // Нефтепромысловое дело. – М.: ВНИИОИГ. – 1985. – 61 с.
- 7 Economides M. Design Unified Fracture: Bridging the gap between theory and practice/ M. Economides, R. Oligney, P. Valkó. – 2002. – 128 s.
- 8 Желтов Ю.П. Гидравлический разрыв пласта. – М.: Гостехиздат, 1957. – 65 с.
- 9 Усачев П.М. Гидравлический разрыв пласта. – М: Недра, 1986. – 116 с.
- 10 Колягин А.Г., Каримов А.Ф., Хайдар А.М. Достижения «Зарубежнефти» в области МГРП в известняковых и смешанных коллекторах // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 12. – С. 110–113. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2022-12-110-113>.
- 11 Колупаев Д.У., Биккулов М.М., Солодов С.А., Янин К.Е. Массовое проведение гидроразрыва пласта – ключевая технология разработки южной части приобского Месторождения // PRНефть. – 2019. – № 1. – С. 39–45. <https://doi.org/10.24887/2587-7399-2019-1-39-45>.
- 12 Ахметова А.А., Пименов Е.Д., Горин А.Н., Хайдар А.М., Ямалов И.Р., Хасанов И.Ш. Оценка применимости данных мини ГРП для определения пластового давления и фильтруемости // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 7. – С. 90–94. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-7-90-94>.
- 13 Кузнецов М.А., Летко И.И., Ибрагимов К.Р., Мингазов А.Ф. Антонов М.С., Евсеев О.В., Воронина А.Н., Кадырова К.Р. Разработка алгоритма определения места зарождения трещины при многостадийном ГРП в горизонтальных скважинах с использованием технологии iFrac // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 4. – С. 49–53. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-4-49-53>.
- 14 Клевцов А.С., Грищенко Е.Н., Баленко П.С., Иванов А.Н., Лубнин А.А. Особенности планирования и проведения ГРП при разработке низкопроницаемых сильнорасчлененных коллекторов олигоцен-шельфовых месторождений Вьетнама // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 9. – С. 114–118. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-9-114-118>.

15 Листик А.Р., Попов Н. Г., Ситников А.Н., Асмандияров Р.Н., Шеремеев А. Ю., Зулкарниев Р.З., Колупаев Д.Ю., Чебыкин Н.В. Определение лучших технологических решений по повышению эффективности МГРП в горизонтальных скважинах Приобского месторождения // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 12. – С. 46–48. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-12-46-48>.

16 Ковальчук С.В., Полушина Е.В., Горенкова Е.А. Результаты изучения и примеры реализации разработки месторождений нефтяных оторочек в компании «Газпромнефть» // ПРОнефть. – 2019. – № 1. – С. 12–17. <https://doi.org/10.24887/2587-7399-2019-1-12-17>.

17 Костюченко С.В., Черемисин Н.А. Прямой расчет коэффициента охвата и локализация текущих извлекаемых запасов нефти в цифровых моделях // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 7. – С. 94–98. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-7-94-98>.

18 Долгих С.А., Кутлин Т.О., Мухаматдинов И.И. Анализ методов повышения нефтеотдачи пластов на примере одного из месторождений Западной Сибири // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 1. – С. 52–54. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-1-52-54>.

19 Гуськова И.А., Гарипова Л.И., Хаярова Д.Р., Галимов И.Ф., Ахметшина А.С. Исследование эффективности технологии нестационарного дренажа при эксплуатации горизонтальных скважин // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 7. – С. 26–29. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-7-26-29>.

20 Галимов И.Ф., Губайдуллин Ф.А., Вахин А.В., Исаев П.В. Анализ эффективности гидроразрыва терригенных коллекторов Южно-Ромашкинской площади Ромашкинского нефтяного месторождения на поздней стадии разработки // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 1. – С. 52–54. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-1-52-54>.

REFERENCES

1 Tlegenov B.B. (2020) Vovlechenie v razrabotku nedreniruemykh zasposv nefiti na mestorozhdenii Zhetybaj. Vestnik neftegazovoj otrasli Kazahstana, no. 4(5), 51 p.

2 Sataeva S.S. (2019) Analiz primeneniya gidrodinamicheskikh metodov pri proektirovanii razrabotki nizkopronicaemykh kollektorov na mestorozhdenii Zhetybaj. Molodoj uchenyj, no. 52(290), pp. 63–67.

3 Kosbarmakov M.B., Kartbaev D.I., Kubekbaev E.I. I dr. (2022) Inzhenernoe soprovozhdenie GRP na skvazhinah mestorozhdenij AO «MMG» g. Aktau. Godovoj otchet.

4 Jekonomides M.Dzh. Sovremennye metody optimizacii gidrorazryva plasta. H'justonskij universitet, H'juston.

5 Salimov F.S. (2017) Vovlechenie v razrabotku slabodreniruemykh, trudnoizvlekaemykh zasposv nefiti putem izmeneniya napravleniya treshhin GRP. Jekspozicija Neft' Gaz, no. 6 (59).

6 Konstantinov S.V., Gusev V.I. (1985) Tehnika i tehnologija provedeniya gidravlicheskogo razryva plastov za rubezhom. Neftepromyslovoe delo, 61 p.

7 Economides M. (2002) Design Unified Fracture: Bridging the gap between theory and practice, 128 p.

8 Zheltov Ju.P. (1957) Gidravlicheskij razryv plasta, 65 p.

9 Usachev P.M. (1986) Gidravlicheskij razryv plasta, 116 p.

10 Koljagin A.G., Karimov A.F., Hajdar A.M. (2022) Dostizheniya «Zarubezhnefti» v oblasti MGRP v izvestnjakovyh i smeshannyh kollektorah. Neftjanoe hozjajstvo, no. 12, pp. 110–113. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2022-12-110-113>.

11 Kolupaev D.U., Bikkulov M.M., Solodov S.A., Janin K.E. (2019) Massovoe provedenie gidrorazryva plasta – kljuhevaja tehnologija razrabotki juzhnoj chasti priobskogo Mestorozhdenija. PROneft', no.1. pp. 39–45. <https://doi.org/10.24887/2587-7399-2019-1-39-45>.

12 Ahmetova A.A., Pimenov E.D., Gorin A.N., Hajdar A.M., Jamalov I.R., Hasanov I.Sh. (2017) Ocenka primenimosti dannyh mini GRP dlja opredelenija plastovogo davlenija i fil'truemosti. Neftjanoe hozjajstvo, no. 7, pp. 90–94. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-7-90-94>.

13 Kuznecov M.A., Letko I.I., Ibragimov K.R., Mingazov A.F., Antonov M.S., Evseev O.V., Voronina A.N., Kadyrova K.R. (2020) Razrabotka algoritma opredelenija mesta zarozhdenija treshhiny pri mnogostadijnom GRP v gorizonta'nyh skvazhinah s ispol'zovaniem tehnologii iFrac. Neftjanoe hozjajstvo, no. 4, pp. 49–53. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-4-49-53>.

14 Klevcov A.S., Grishhenko E.N., Balenko P.S., Ivanov A.N., Lubnin A.A. (2020) Osobennosti planirovaniya i provedeniya GRP pri razrabotke nizkopronicaemykh sil'noraschlenennyh kollektorov oligocena shel'fovyyh mestorozhdenij V'etnama. Neftjanoe hozjajstvo, no. 9, pp. 114–118. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-9-114-118>.

15 Listik A.R., Popov N. G., Sitnikov A.N., Asmandijarov R.N., Sheremeev A. Ju., Zul'karniev R.Z., Kolupaev D.Ju., Chebykin N.V. (2017) Opredelenie luchshih tehnologicheskikh reshenij po povysheniju jeffektivnosti MGRP v gorizontal'nyh skvazhinah Priobskogo mestorozhdenija. Neftjanoe hozjajstvo, no.12, pp. 46–48. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-12-46-48>.

16 Koval'chuk S.V., Polushina E.V., Gorenkova E.A. (2019) Rezul'taty izuchenija i primery realizacii razrabotki mestorozhdenij neftjanyh otorochek v kompanii "Gazpromneft". PROneft', no. 1, pp. 12–17. <https://doi.org/10.24887/2587-7399-2019-1-12-17>.

17 Kostjuchenko S.V., Cheremisin N.A. (2019) Prjamoj raschet koeficienta ohvata i lokalizacija tekushhih izvlekaemyh zapasov nefti v cifrovyyh modeljah. Neftjanoe hozjajstvo, no. 7, pp. 94–98. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-7-94-98>.

18 Dolgih S.A., Kutlin T.O., Muhamatdinov I.I. (2018) Analiz metodov povyshenija nefteotdachi plastov na primere odnogo iz mestorozhdenij Zapadnoj Sibiri. Neftjanoe hozjajstvo, no. 1, pp. 52–54. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-1-52-54>.

19 Gus'kova I.A., Garipova L.I., Hajarova D.R., Galimov I.F., Ahmetshina A.S. (2020) Issledovanie jeffektivnosti tehnologii nestacionarnogo drenazha pri jekspluatacii gorizontal'nyh skvazhin. Neftjanoe hozjajstvo, no. 7, pp. 26–29. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-7-26-29>.

20 Galimov I.F., Gubajdullin F.A., Vahin A.V., Isaev P.V. (2018) Analiz jeffektivnosti gidrorazryva terrigennyh kollektorov Juzhno-Romashkinskoj ploshhadi Romashkinskogo neftjanogo mestorozhdenija na pozdnej stadii razrabotki, Neftjanoe hozjajstvo, no. 1, pp. 52–54. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-1-52-54>.

¹*БАСАРБАЙ А.Е., ¹ТУРГАЗИНОВ И.К.

¹Қазақстан-Британ техникалық университеті,
050000, Алматы қ., Қазақстан Республикасы

*E-mail: akbotabassarbay.pe@gmail.com

ЖЕТІБАЙ КЕН ОРНЫНЫҢ ИГЕРІЛМЕГЕН МҰНАЙ ҚОРЫН ИГЕРУГЕ БАҒЫТТАУ

Андатпа

Мұнай өндіруді оңтайландыру мәселесі әрқашанда өзекті мәселелердің бірі болып саналады. Мақалада Жетібай кен орнының игерілмеген қорларын игеруге бағыттаудың технологиялық әдістері қарастырылады. Соңғы жылдары кен орнын игеруде қолданылған технологиялар көрсетілген. Мұнай өндіруді арттырудың барлық әдістерінің ішінде қабатты гидравликалық жару тиімді болып табылады. Гидравликалық жару мұнай өндіруді арттырудың тиімді әдістерінің бірі болып саналады. Гидравликалық жаруды алғашқы мұнай өндіруде де, жұмыс істеп тұрған ұңғымалардың тиімділігін арттыру үшін де қолдануға болады. Бұл әдіс көптеген елдерде мұнай өнеркәсібінде кеңінен қолданылады. Бастапқыда бұл әдіс жіңішке әрі терең енетін жарықтар алу үшін төмен өткізгіш коллекторларға қолданылды. Кейінірек олар жоғары өткізгішті коллекторлар үшін де қолданыла бастады. Өндіру тиімдірек болуы үшін, нашар дренажды қорларды игеруге бағыттауда қабатты гидравликалық жару жарықтарының бағыттарын өзгерту ұсынылады. Бұл әдіс Повховское кен орнында қолданылды. Повховское кен орнында гидравликалық жару жарықтарының бағытын өзгерту үшін екі кезеңді гидравликалық жару алынуы қиын қабаттарда өткізілді және оң нәтиже берді.

Тірек сөздер: қабатты гидравликалық жару, кен орнын игеру, жарықтар бағытын өзгерту.

¹*BASSARBAY A.E., ¹TURGAZINOV I.K.

¹Kazakh-British Technical University, 050000, Almaty, Kazakhstan

*E-mail: akbotabassarbay.pe@gmail.com

INVOLVEMENT IN THE DEVELOPMENT OF UNDEREXPLOITED RESERVES OF THE ZHETYBAI OILFIELD

Abstract

The issue of optimizing oil production has always been one of the pressing issues. The article discusses technological methods for involving in the development of non-drained reserves of the Zhetybai oilfield. The technologies of field development that have been used in recent years are presented. Of all the methods to increase oil

recovery, hydraulic fracturing is the most effective. Hydraulic fracturing is considered one of the well-known and more effective methods in increasing oil production. Hydraulic fracturing can be used both in primary oil production and to improve the efficiency of existing wells. This method is widely used in the oil industry in many countries. Initially, this method was applied to lower permeable reservoirs in order to obtain narrow, deep-penetrating cracks. Later, they began to be used for highly permeable collectors. In order for production to be more efficient, it is recommended to change the directions of fracturing fractures in the development of poorly drained reserves, this method was applied in the Povkhovsky oilfield. At the Povkhovskoye fields, in order to change the direction of fracturing fractures, a two-stage fracturing was carried out in hard-to-recover formations, and the result was positive.

Key words: hydraulic fracturing, field development, non-drained reserves, change in the direction of cracks.

Информация об авторах

Басарбай Ақбота Есенғалиқызы (автор для корреспонденции)

Магистрант, Қазақстанско-Британский технический университет,

ул. Төле би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0009-0003-2887-1481

E-mail: akbotabassarbay.pe@gmail.com

Тургазинов Илияс Казбекұлы

PhD, ассистент-профессор Школы энергетики и нефтегазовой индустрии,

Қазақстанско-Британский технический университет, ул. Төле би, 59, 050000,

г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0003-3235-0307

E-mail: i.turgazinov@kbtu.kz

Авторлар туралы мәліметтер

Басарбай Ақбота Есенғалиқызы (корреспонденция авторы)

Магистрант, Қазақстан-Британ техникалық университеті,

Төле би көш., 59, 050000, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0009-0003-2887-1481

E-mail: akbotabassarbay.pe@gmail.com

Тургазинов Илияс Казбекұлы

PhD, Энергетика және мұнай-газ индустриясының ассистент-профессоры,

Қазақстан-Британ техникалық университеті,

Төле би көш., 59, 050000, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0000-0003-3235-0307

E-mail: i.turgazinov@kbtu.kz

Information on the authors

Bassarbay Akbota Esengalikyzy (corresponding author)

Master student, Kazakh British Technical University,

59, Tole bi str., 050000, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0009-0003-2887-1481

E-mail: akbotabassarbay.pe@gmail.com

Turgazinov Iliyas Kazbekuly

PhD, Assistant professor, School of oil and gas industry, Kazakh-British Technical University,

59, Tole bi str., 050000, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0003-3235-0307

E-mail: i.turgazinov@kbtu.kz

УДК 550.8.05
МРНТИ 39.19.15

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2023-20-4-137-143>

ЧНЫБАЕВА Д.М.

Казахстанско-Британский технический университет,
050000, г. Алматы, Казахстан
E-mail: d_chnybayeva@kbtu.kz

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПРОГНОЗ ЛИТОЛОГИИ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ В УСЛОВИЯХ СЛАБОЙ ИЗУЧЕННОСТИ СКВАЖИНАМИ

Аннотация

В последние десятилетия разведке нефти и газа уделяется особое внимание, и сейчас наблюдается стремительное ускорение темпов ее развития и появления новых, современных методов решения геологических проблем. Геофизическая разведка, особенно сейсморазведка, являясь единственным средством поиска нефтегазоносных структур, играет важную роль в обеспечении запасов нефти и газа. Сейсмические исследования дали уникальную информацию для изучения геологического строения и составления геодинамической модели на поверхности изучаемых объектов. На базе этих исследований открыто Кашаганское месторождение, месторождение Каламкас-море. Различные регионы казахстанского сектора Каспийского моря покрыты регулярной сетью профилей размером от 16х16 км до 4х4 км. Таким образом, помимо исторической изученности, данные работ к сегодняшнему дню привели к созданию объемной информационной базы сейсмических данных. Но при этом в связи с трудными морскими условиями и, соответственно, высокой стоимостью бурения скважинная информация достаточно скудная. Скудность скважинной информации приводит к большим ограничениям использования сейсмической информации. В рамках данной работы выполнено изучение упругих сейсмических свойств по доступной скважине и прогнозирование вещественного состава геологического разреза и типа флюидов, насыщающих породы на основе сейсмических данных, которые способствуют изучению литологии на месторождениях и залежах с трудными доступами к скважинным информации [1].

Ключевые слова: сейсмограммы, упругие свойства, волновое поле, скоростная модель, синхронная инверсия, скважина, акустический импеданс, AVO/AVA (amplitude versus offset/ angle), флюиды, литология.

Введение

Как известно, литология – это наука о составе, структуре, текстуре и происхождении осадочных пород. За границей она называется иначе – седиментология. Прикладная часть нефтегазовой литологии обслуживает нефтегазовую отрасль и изучает сведения о породах-коллекторах, месторождениях флюидоупоров, а также о природных резервуарах или ловушках для нефти с газом определенных классов. Практика прогнозирования литологии по данным сейсмических измерений широко распространена в геолого-разведочных работах, проводящихся на территории Казахстана.

Интерпретация прогноза литологии основывается на динамической инверсии, обеспечивающей оценку упругих характеристик изучаемой части геологического разреза по сейсмическим данным МОГТ. В основу изучения вероятностного прогноза литологии положена подборка упругих моделей анализируемого интервала геологического разреза [2].

Основная часть

Важную роль в обеспечении прироста запасов углеводородов играют геофизические методы, особенно сейсморазведка, являющаяся единственным средством обнаружения углеводородоносных структур. Однако в последние годы сейсмические исследования проводились на большей глубине для решения более сложных структурных проблем. Во многих геофизических компаниях при подготовке структур разведочного бурения используются горизонты отражения глубиной более 4–5 км, амплитуда которых зачастую не превышает первых десятков метров. Использование же вероятностных методов позволяет оптимизировать планирование и проек-

тирование сейсморазведочных работ, а также оценку их эффективности на этапе интерпретации сейсмических данных и, в частности, точность и надежность конструкций, построенных на основе этих данных.

Вероятностный прогноз литологии оценивает эффективность эксплуатации при решении геологических задач в процессе геолого-разведочных работ на газ и нефть [3]. Благодаря таким сейсмическим данным, как акустический импеданс и отношение V_p/V_s , мы можем извлечь достаточно информации, такой как литология пространства, пористость, проницаемость, флюидонасыщенность.

Одним из основных вопросов при сейсмометрофизическом прогнозировании литологии является изучение рокфизики, акустического импеданса и данных отношения продольной волны к поперечной (V_p/V_s). Полученные спектры и распределение физических параметров на графиках дает нам точную информацию, по которой строятся различные карты и далее выполняется подробный отчет применения прогноза на практике.

Обзор литературы

Вероятностный прогноз литологии широко используется при изучении интерпретации сейсмического материала как на этапе региональных геофизических работ, так и при изучении локальных разведочных объектов и вызывает интерес для будущего повышения экономической привлекательности геологоразведки.

Авторы Е.Г. Скорнякова, И.А. Титаренко (Нижне-Волжский научно-исследовательский институт геологии и геофизики) в своей научной статье «Технология ВЛП – возможности и ограничения» раскрывают подобную тему. В публикации описывается историческое начало метода и местность, где проводились первые пробные работы, с предоставлением наглядных иллюстраций, проблемы, которые могут возникнуть, и пути решения для построения качественной геологической информации.

В статье «Перспективы неструктурных ловушек как потенциал прироста ресурсной базы и дополнительной добычи углеводородов», авторами которой являются О.Б. Бегимбетов, Д.Т. Калиев, А.Б. Даулетов, основательно описывается изучение предшествующих процедур, которые служат основой для вероятностного прогноза литологии [4].

Проанализировав публикации этих авторов, можно сказать, что статьи близки по идеям. В их основе лежит описание тем по изучению синхронной инверсии, вероятностного прогноза литологии, анализа рокфизики, разведки и разработки неструктурных ловушек, и это говорит о том, что тема актуальная и современная. Работы наряду с доступными исходными материалами с производства стали основой для написания статьи.

Материалы и методы

1 Ограничения сейсмических данных

В первую очередь, следует отметить, что прогноз и анализ выполняются по сейсмическим данным, соответственно, следует принять во внимание ограничения сейсмических данных, то есть разрешенность.

2 Привязка сейсмических данных к скважинным

Под привязкой в данном случае понимается привязка скважинных данных и сейсмических данных до суммирования (угловые суммы и полная сумма). Для увязки скважинных и сейсмических данных были задействованы глубинно-временные зависимости, полученные на основе расчета синтетических сейсмограмм с использованием данных ВСП [5].

Использование синтетических сейсмограмм для стратиграфической привязки отражений основано на существовании закономерной связи между литологическим составом изучаемого разреза и характеристикой отражений. При прямой полярности исходных сейсмических данных отраженный основной импульс будет положительным при увеличении акустической жесткости нижележащего слоя относительно вышележащего, уменьшение акустической жесткости

вниз от границы слоев приводит к образованию отрицательной отраженной волны. Интенсивность этих отраженных сигналов является функцией разности акустических жесткостей (1.1).

$$Z = \text{скорость} * \text{плотность};$$

$$R = (Z' - Z'') / (Z' + Z'') \quad (1.1)$$

где Z' и Z'' – значение акустического импеданса в вышележащем и нижележащем слое.

R – коэффициент отражения на границе двух слоев.

3 Подготовка скоростной модели на основе сейсмических скоростей

Ввиду того, что планируется сопоставлять скважинные данные в глубинном масштабе с сейсмическими данными во временном масштабе, требуется построение скоростной модели.

Первый шаг предполагает увязку скважинных данных с сейсмическими данными для того, чтобы получить откалиброванные карты глубинно-временного преобразования. Второй шаг заключается в расчете погрешностей в существующем скоростном поле с учетом таких откалиброванных карт глубинно-временного преобразования. Третий шаг – построение 3D-модели этих погрешностей с использованием геостатистики. Заключительным шагом является применение полученного куба погрешностей скоростей к существующей модели для того, чтобы создать финальную масштабированную скоростную модель для глубинно-временного преобразования всего массива данных 3D.

4 Оценка технической осуществимости динамического анализа

Основополагающим принципом изучения AVO является предположение, что данные были правильно обработаны. Это означает, что корректно подавлен шум, распределение амплитуд сохранено, положение отражений во времени стабильно на изучаемом угловом интервале, амплитуды с удалениями согласуются с уравнениями Аки-Ричардса (или других аппроксимаций) и т.д.

5 Оценка других потенциально осложняющих анализ факторов

Другим осложняющим регистрируемую волновую картину фактором является фиксируемые палеоген-неогеновые врезы, влияние от которых распространяется на нижерасположенную часть волнового поля, также затрудняя однозначную корреляцию целевых сейсмических горизонтов, интерпретацию атрибутов, а также анализ скорости геологической среды в целевых интервалах [6].

6 Вероятностная оценка упругих свойств

Связующим звеном между каротажными данными и сейсмическими данными являются упругие свойства. Анализ упругих свойств, применяемый к данным сейсмических съемок, призван примирить различия этих шкал измерений и попытаться спрогнозировать наилучшее вероятное выражение литологии и распределения флюидов по сейсмическим данным. Соответственно, анализ упругих свойств поможет нам использовать информацию о сейсмических амплитудах (функция эластических свойств) для надежного прогноза различных коллекторских свойств.

7 Детерминистическая оценка упругих свойств

Для оценки сейсмического отклика также был применен и детерминистический подход, то есть в целевом интервале было выполнено флюидозамещение по Гассману с целью оценки различных сценариев насыщения. Полученные кривые после замещения были свернуты с импульсом, и возможная смена сейсмического отклика проанализирована.

8 Синхронная инверсия (AVO инверсия)

Исходными данными для сейсмической инверсии традиционно считаются сейсмические данные после миграции до суммирования во временной области, сигнал по каждой угловой сумме, а также исходная модель среды (тренд скорости и плотности из данных каротажа). В результате мы получаем отклик, который количественно описывает упругую породу в наблюдаемом поведении AVO, присутствующем в исходных сейсмических отраженных данных. Если говорить более точно, алгоритмы инверсии лучше работают с углом падения, чем с офсетом,

поэтому более точной аббревиатурой скорее будет AVA (Amplitude versus Angle – амплитуда по сравнению с углом) [7].

Последовательность процедур синхронной инверсии (относительной и абсолютной) нерегулярных импульсных всплесков по данным до суммирования состоит из следующих элементов:

- ♦ выделение импульса;
- ♦ построение низкоскоростной модели;
- ♦ геостатистическое глубинное преобразование;
- ♦ контроль качества сейсмической инверсии и производство;
- ♦ прогнозирование байесовской литологии/флюидов с использованием статистической модели зависимых от глубины физических свойств породы [8].

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты синхронной инверсии могут количественно интегрироваться с моделью статистических физических свойств пород, которые зависят от глубины и были определены путем анализа имеющейся скважинной каротажной информации, в результате чего получаются «куб вероятности – неопределенности» литологии и/или флюидов. Например, кросс-плоты V_p/V_s в сравнении с акустическим импедансом коррелируются с инвертированным Р-импедансом, S-импедансом и значениями плотности, полученными по результатам сейсмической инверсии по каждому дискретному значению трассы для того, чтобы получить куб данных, где амплитуды будут представлять 80% вероятность насыщенности газом. Также можно прогнозировать ряд прочих классов/фаций. Также есть возможность изучать байесовскую (статистическую) литологию и прогнозировать флюидонасыщение в рамках схемы инверсии (а не после ее завершения), однако при этом сильно возрастают вычислительные затраты.

Конечной целью количественной инверсии является прогнозирование литологии и флюидного содержания вдали от скважин. Данный процесс должен принимать во внимание все имеющиеся в наличии данные, а не только сейсмические или скважинные данные. Геологическое понимание региона позволит отобрать значимые сейсмические атрибуты и в результате получить соответствующие действительности продукты инверсии.

Полученные данные затем количественно сравниваются с эквивалентными инвертированными данными для выработки прогнозов. Затем генерируются отдельные массивы данных вероятной литологии и флюидосодержания. Массив данных с наиболее высокой вероятностью (или информация о литологии/классе флюидов) также может рассчитываться, как и куб вероятности «неизвестной литологии», которые отображают результаты инверсии, не согласующиеся с моделью физических свойств пород [9].

Заключение

Благодаря оценкам исследованным сейсмическим и данным ГИС на основе всех необходимых атрибутов мы сможем прогнозировать в условиях малоизученных скважин литологию. Прогнозирование выполняется для палеозойских, в том числе и подсолевых, отложений, для мезозойских и кайнозойских комплексов пород. Эксплуатация вероятностного прогноза литологии позволяет оценить эффективность ее использования при решении различного рода геологических задач в процессе геолого-разведочных работ на нефть и газ и рассматривать основные проблемы и ограничения ее использования в практике геологоразведки.

Представление результатов прогноза в виде вероятностных характеристик наличия того или иного литотипа в межскважинном пространстве – это одно из преимуществ метода байесовской статистики. Метод требовал использования пре-стек сейсмических данных и каротажных кривых скоростей поперечных волн, или искусственных кривых скоростей, которые понадобились для построения куба коэффициентов Пуассона, и определить эмпирические законы. На основе результатов акустического импеданса и прогноза литологии выполнен прогноз

пористости методами геостатистики в зонах отдельных литотипов или коллектора, где зависимость между акустическим импедансом и пористостью имеет линейный характер. Прогноз флюидонасыщения, литологии, AVO классификация. При благоприятных геологических условиях существует возможность оценки характера насыщения перспективного объекта, а также определения литологической составляющей геологического разреза с помощью методов AVO/AVA-анализа. В итоге, получив распределение литологии изучаемого объекта по площади на основе анализа формы сейсмического сигнала, появляется возможность выполнить районирование территории, что является актуальным и важным критерием для разработки морского месторождения.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Воцалевский Э.С., Булекбаев З.Е., Искужиев Б.А. и др. Справочник месторождения нефти и газа Казахстана. – Алматы, 1999.
- 2 Скорнякова Е.Г., Титаренко И.А., Мифтахов. Р.Л. Новый вероятностный алгоритм решения обратной динамической задачи сейсморазведки // Недра Поволжья и Прикаспия. – 1997. – 14 с.
- 3 Скорнякова Е.Г., Титаренко И.А. Сейсмометрофизическое тестирование геологического разреза // Недра Поволжья и Прикаспия. – 1997. – 14 с.
- 4 Дойен П.М. Характеристика сейсмического резервуара: перспектива моделирования Земли. – EAGE, 2007. – 255 с.
- 5 Глумов И.Ф. и др. Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря. – М. : Недра, 2004.
- 6 Даукеев С.Ж., Воцалевский Э.С., Парагульгов Х.Х. и др. Глубинное строение и минеральные ресурсы Казахстана // Нефть и газ. – Алматы, 2002. – Т. 3. – 248 с.
- 7 Марабаев Ж.Н., Жолтаев Г.Ж. и др. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности Северного и Среднего Каспия. – Астана, 2005.
- 8 Правила представления недропользователями отчетов о проведении операций по недропользованию. Министерство по инвестициям и развитию Республики Казахстан. – Астана. – № 396. – 2015. – 12 мая.
- 9 Hampson D.P., Russell B.H., Bankhead B. Simultaneous inversion of pre-stack seismic data // SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts. – 2005. – P. 1633–1637.

REFERENCES

- 1 Vocalevskij Je.S., Bulekbaev Z.E., Iskuzhiev B.A. i dr. (1999) Spravochnik mestorozhdenija nefti i gaza Kazahstana, Almaty.
- 2 Skornjakova E.G., Titarenko I.A., Miftahov. R.L. (1997) Novyj verojatnostnyj algoritm reshenija obratnoj dinamicheskoj zadachi sejsmorazvedki. Nedra Povolzh'ja i Prikaspija, 14 p.
- 3 Skornjakova E.G., Titarenko I.A. (1997) Sejsmopetrofizicheskoe testirovanie geologicheskogo razreza. Nedra Povolzh'ja i Prikaspija, 14 p.
- 4 Dojen P.M. (2007) Harakteristika sejsmicheskogo rezervuara: perspektiva modelirovanija Zemli. EAGE, 255 p.
- 5 Glumov I.F. i dr. (2004) Regional'naja geologija i neftegazonosnost' Kaspijskogo morja.
- 6 Daukeev S.Zh., Vocalevskij Je.S., Paragul'gov H.H. i dr. (2002) Glubinnoe stroenie i mineral'nye resursy Kazahstana. Neft' i gaz. Almaty, vol. 3, 248 p.
- 7 Marabaev Zh.N., Zholtaev G.Zh. i dr. (2005) Geologicheskoe stroenie i perspektivy neftegazonosnosti Severnogo i Srednego Kaspija, Astana.
- 8 Pravila predstavlenija nedropol'zovateljami otchetov o provedenii operacij po nedropol'zovaniju. Ministerstvo po investicijam i razvitiju Respubliki Kazahstan (2015), Astana, no. 396, 12 maja.
- 9 Hampson D.P., Russell B.H., Bankhead B. (2005) Simultaneous inversion of pre-stack seismic data. SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts, pp. 1633–1637.

ЧНЫБАЕВА Д.М.

Қазақстан-Британ техникалық университеті

050000, Алматы қ., Қазақстан

E-mail: d_chnybayeva@kbtu.kz

**ҰҢҒЫМАЛАРДЫҢ АЗ ЗЕРТТЕЛУІ ЖАҒДАЙЫНДАҒЫ СЕЙСМИКАЛЫҚ
ДЕРЕКТЕР БОЙЫНША ЛИТОЛОГИЯНЫҢ ЫҚТИМАЛДЫҚ БОЛЖАМЫ****Аңдатпа**

Соңғы онжылдықта мұнай мен газды барлауға ерекше назар аударылды, қазір оның даму қарқыны мен геологиялық мәселелерді шешудің жаңа заманауи әдістерінің пайда болуы тез қарқынмен жүруде. Мұнай-газ құрылымдарын іздеудің жалғыз құралы ретінде геофизикалық барлау, әсіресе сейсмикалық барлау мұнай мен газ қорын қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады. Сейсмикалық зерттеулер геологиялық құрылымды зерттеу және зерттелетін объектілердің бетінде геодинамикалық модель құру үшін бірегей ақпарат берді. Осы зерттеулер негізінде Қашаған кен орны, Қаламқас теңіз кен орны ашылды. Каспий теңізінің қазақстандық секторының әртүрлі өңірлері көлемі 16x16 км-ден 4x4 км-ге дейінгі профильдердің тұрақты желісімен қамтылған. Осылайша тарихи зерделеуден басқа, бұл жұмыстар бүгінгі күнге дейін сейсмикалық деректердің көлемді ақпараттық базасын құруға әкелді. Бірақ сонымен бірге қиын теңіз жағдайларына және тиісінше бұрғылаудың жоғары құнына байланысты ұңғыма туралы ақпарат өте аз. Ұңғымалық ақпараттың тапшылығы сейсмикалық ақпаратты пайдалануда үлкен шектеулерге әкеледі. Осы жұмыс шеңберінде қолжетімді ұңғыма бойынша серпімді сейсмикалық қасиеттерді зерделеу және ұңғымалық ақпаратқа қол жетімділігі қиын кен орындарында литологияны зерттеуге ықпал ететін сейсмикалық деректер негізінде жыныстарды қанықтыратын геологиялық киманың және флюидтердің түрінің заттық құрамын болжау орындалды.

Тірек сөздер: сейсмограммалар, серпімді қасиеттер, толқын өрісі, жылдамдық моделі, синхронды инверсия, ұңғыма, акустикалық кедергі, AVO/AVA (amplitude versus offset / angle), сұйықтықтар, литология.

CHNYBAYEVA D.M.

Kazakh-British Technical University,

050000, Almaty, Kazakhstan

E-mail: d_chnybayeva@kbtu.kz

**PROBABILISTIC LITHOLOGY TARGETING BASED ON SEISMIC DATA,
AT UNDEREXPLORED AREAS BY WELLS****Abstract**

In recent decades, special attention has been paid to oil and gas exploration, and now there is a rapid acceleration in the pace of its development and the emergence of new modern methods for solving geological problems. Geophysical exploration, especially seismic exploration, being the only means of searching for oil and gas bearing structures, plays an important role in ensuring oil and gas reserves. Seismic studies have provided unique information for studying the geological structure and compiling a geodynamic model on the surface of the studied objects. On the basis of these studies, the Kashagan field and the Kalamkas-Sea field were discovered. Various regions of the Kazakhstan sector of the Caspian Sea are covered by a regular network of profiles ranging in size from 16x16 km to 4x4 km. Thus, in addition to historical knowledge, these works to date have led to the creation of a voluminous information database of seismic data. But at the same time, due to difficult sea conditions and, accordingly, the high cost of drilling, well information is quite scarce. The scarcity of borehole information leads to great restrictions on the use of seismic information. Within the framework of this work, the elastic seismic properties of an accessible well were studied and the material composition of the geological section and the type of fluids saturating rocks based on seismic data were predicted, which contribute to the study of lithology in deposits and deposits with difficult access to borehole information.

Key words: seismograms, elastic properties, wave field, velocity model, synchronous inversion, borehole, acoustic impedance, AVO/AVA (amplitude versus offset/angle), fluids, lithology.

Информация об авторе

Чныбаева Дидар Максұтканқызы

Магистрант, Қазақстанско-Британский технический университет, Школа геологии,
ул. Төле би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0009-0001-3377-5799

E-mail: d_chnybayeva@kbtu.kz

Автор туралы мәлімет

Чныбаева Дидар Максұтканқызы

Магистрант, Қазақстан-Британ техникалық университеті, Геология мектебі,
Төле би көш., 59, 050000, Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0009-0001-3377-5799

E-mail: d_chnybayeva@kbtu.kz

Information about author

Chnybayeva Didar Maksutkankyzy

Master Student, Kazakh-British Technical University, School of Geology,
Tole-bi 59, 050000, Almaty, Kazakhstan

Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0009-0001-3377-5799

E-mail: d_chnybayeva@kbtu.kz

ECONOMY AND BUSINESS
ЭКОНОМИКА ЖӘНЕ БИЗНЕС
ЭКОНОМИКА И БИЗНЕС

UDC 005:336
IRSTI 06.39.41<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2023-20-4-144-156>**¹*DUISENBIYEV A., ¹SEITKAZIEVA A., ²ALI CEM KUZU**¹Kazakh-British Technical University, 050000, Almaty, Kazakhstan²Marine Training Academy «Lerus», Istanbul, Turkiye

*E-mail: a.duisenbiev@kbtu.kz

DIGITALIZATION OF CERTIFICATION PROCESSES
AS A FACTOR IN IMPROVING MANAGEMENT EFFICIENCY
IN THE MARITIME INDUSTRY**Abstract**

This article discusses the implementation of digitalization as a factor in improving management efficiency in the maritime industry, with a special focus on the certification process. The study includes a literature review, analysis of studies and reports by foreign scholars, as well as expert interviews and surveys of professionals. There are many studies on the implementation of digitalization in different areas of the world economy. Western European countries in general pay serious attention to the problems of digitalization, in the maritime industry the leaders in studying and solving the problems of digitalization are Denmark and Singapore. However, for the maritime industry of Kazakhstan, due to its “youth”, the study of the problems of digitalization and its impact on improving the efficiency of management decisions and reducing costs in production has the character of scientific novelty. As the maritime industry evolves, digitalization offers new opportunities to improve management practices and outcomes. One area where digitalization can have a significant impact is in the certification process. Overall, the article highlights the potential of digitalization to improve management practices and outcomes in the maritime industry. Real-life case studies from overseas companies are provided to illustrate how these technologies can be used to improve results and remain competitive in the maritime industry. The ideas and recommendations presented in this study can help shipping companies to optimize certification processes and improve operational efficiency. The article concludes by emphasizing the importance of staying abreast of the latest digital developments and incorporating these tools into the decision-making process.

Key words: management effectiveness, innovation, digitalization, transformation, maritime industry.**Introduction**

The pace of globalization is increasing in all areas of the world economy, according to UNCTAD (2019) maritime transport provides transportation for up to 80% of world trade [1]. Maritime transportation is considered the most cost-effective in terms of cost-volume-speed ratio and for this reason still retains its strategic importance. However, maritime operations are complex as merchant ships transport cargo between different jurisdictions, involve multiple parties, a huge volume of transportation documents, require compliance with international maritime legislation and insurance terms. To increase efficiency and reduce costs, the maritime industry needs to introduce new

technologies. The main innovation trends today are undoubtedly Artificial Intelligence (AI), Maritime Autonomous Ships (MAS) and digitalization. The aim of this study focuses on the question: how the digitalization of certification processes can improve the efficiency of maritime transport management.

Technological progress over the previous hundred years has radically changed the maritime industry, especially a big step was made in the field of digital technologies - most modern ships are equipped with electronic chart and information display systems (ECDIS), radio detection and ranging systems (RADAR-SARP), automated identification systems (AIS) global positioning system (GPS), shipboard personal computers (PCs) and other electronic devices [2]. However, despite the significant development of digital technologies in recent decades, the methods of working in certification remain unchanged. Historically, the maritime industry has developed a system of verification and certification that involves authorized organizations issuing paper certificates with official seals and stamps. This part of the process is problematic: paper documents are susceptible to damage, loss and forgery, the volume of paperwork is so large that it is environmentally damaging (more than 65 billion sheets of paper are used every day in various areas of the world, a significant proportion of them on board merchant ships [3]). Due to the international and cross-border nature of maritime business, trade and transaction procedures can be complex and time-consuming. A significant number of documents must be generated during operations, including, inter alia, cargo insurance documents, purchase orders, shipping and loading orders, bills of lading, commercial invoices and personal documents of the ship's crew. The storage, transaction and management of these documents require human resources and can even delay ship's departure, causing unforeseen demurrage (demurrage is a charge for countersteam time) at ports. The application of digital technologies has the potential to significantly reduce such paper-based workflows and ensure that most documents are shared, transacted, and stored efficiently and securely [4]. Digital technologies can be used to always track cargo and vessels online. Due to the international and cross-border nature of maritime logistics, the procedure of trade and transportation is complex and time-consuming. The use of digital technologies has the potential to significantly reduce this paper-based workflow and enable efficient and secure sharing, transaction, and storage of most documents. International terminal operators, shipping company management, freight forwarders and shippers could create an efficient system based on blockchain technology by establishing a common control system for maritime operations. This technology can provide fast, transparent access to all necessary information with security and reliability in mind. Considering the benefits that digitalization, including blockchain technology, can bring to the maritime industry, it is necessary to consider, and analyze the factors that facilitate their implementation, as well as the obstacles in this process. The purpose of this paper is to analyze the key challenges of the digitalization of certification processes in the maritime industry and to empirically investigate the critical success factors of digitalization. As a scientific novelty of this article the authors put forward the substantiation of recommendations for solving the problems of implementation of digitalization of certification processes in the maritime industry of Kazakhstan, based on empirical results of qualitative research and based on the adaptation of foreign experience in this area.

Main provisions. Literature review

There is an extensive body of research in the scientific literature in the field of digitalization of the economy. One of the founders of the concept of digital economy is the Japanese futurologist Yoneji Masuda. According to his views, the transformation of society is the result of innovations... which in the past have always been linked to physical productivity... The current innovations in the field of social technology, however, are not related to the productivity of material goods, but to information productivity, and for this reason we can expect fundamental changes in human values, in thinking trends, in the political and economic structure of society ... [5]. C.J.Arrow in his work made an important conclusion that with the expansion of the digital economy the key point becomes the fact that probability distributions on economic variables depend on signals on other seemingly unimportant variables; in addition, this information is differently accessible to different individuals and requires resources to obtain and transmit [6]. American businessman Bill Gates writes in his book "The Road to the Future": The communications revolution is just beginning. It will stretch over

several decades and will be driven by new “applications” – new tools that meet needs that are now hard to even imagine. Over the next few years, governments, companies and individuals will have to make some big decisions. These decisions will determine both the construction of the information superhighway itself and, ultimately, its benefits. It is very important that a wide range of people, not just those involved in the debate about the future of computer technology, participate in the debate [7]. The economist Fritz Machlup [8] contributed to the foundations of the economy of wide access to knowledge, which further developed into the concept of digital economy.

It is also necessary to note the significant contribution to the development of the concept of digitalization of the economy M. Porat [9], V. Mosco [10], D. Lyon [11], T. Stonier [12], M. Castells [13]. Along with the relatively broad coverage of digitalization in the scientific literature, these studies covered mainly general economic issues. The problems of digitalization in the maritime industry, unfortunately, have not yet received proper coverage.

The authors set the aim of the study to investigate how the implementation of digitalization of certification can improve the management efficiency of the maritime industry, reduce costs, conduct an analysis of the key challenges of digitalization of certification processes in the maritime industry and an empirical study of the critical success factors of digitalization implementation.

The topic of this study has a high degree of relevance due to the importance of the maritime industry in supporting globalization and world trade [1] and improving management practices and outcomes in this industry can have a significant impact on the world economy. Secondly, the certification process is one of the most important aspects of maritime industry management as it ensures that ships comply with international safety and environmental standards. Historically, the process has been paper-based, time-consuming and error-prone. Digitizing this process allows for greater efficiency, reduced costs, and improved safety. Finally, digitalization is a key trend in many industries, and the maritime industry cannot afford to be left behind. By adopting digital technologies and incorporating these tools into their operations, companies in the maritime industry can stay competitive and ensure their long-term success. The maritime industry is a complex and highly regulated sector of the economy, requiring strict adherence to international safety and environmental standards set by the conventions of the International Maritime Organization (IMO). The certification process is one of the most important aspects of maritime transportation management, as it ensures that ships' crews meet these standards and that they operate safely. The STCW Convention 1978 was the first document to establish basic requirements for the training, certification and watchkeeping of seafarers at the international level. Previously, standards for the training, certification and watchkeeping of officers were set by individual governments, usually without regard to the practices of other countries. As a result, standards and procedures varied widely from country to country, even though shipping is the most international of all industries [14]. The Convention sets minimum standards for the training, certification and watchkeeping of seafarers that countries are required to meet or exceed. A merchant marine officer always carries with him many certificates and documents that are proof of the seafarer's qualifications and training. These certificates must be handed over to the Master on entry into service and ready for inspection by the authorities.

Listed below are some of the certificates that seafarers should always carry with them, but are not limited to them/

Table 1 – List of deck officer certificates

№	Certificate
1	Certificate of Competence (COC)
2	Basic Safety Training
3	Crisis Management and Human Behavior
4	Medical Certificate of Fitness
5	Radio Detection and Ranging (RADAR) at operational level
6	RADAR at management level
7	Electronic Chart and Display Information System (ECDIS)

Continuation of table 1

8	Advanced firefighting training
9	Lifeboat and rescue boat
10	Oil Tanker course (basic level)
11	Oil Tanker Course (advanced level)
12	Bridge Resource Management (BRM) Course
13	Global Maritime Safety System (GMDSS)
14	Passenger safety
15	Cargo Security and Hull Integrity
16	Fast lifeboat handling
17	Life raft and lifeboat management (other than fast lifeboats)
18	Engine Room Resource Management (ERM)
19	Medical Training / First Aid Course
20	Designated Safety Duties (DSD)
21	High Voltage Equipment Course
22	Basic LPG tanker training
23	Advanced training in cargo operations on LPG tankers
24	Ship Security Officer (SSO)
25	Safety Awareness Course

Without presenting the above-mentioned certificates (in paper form) the officer's stay on board the vessel is not allowed, every inspection of the vessel when entering the port starts with checking the certification of the vessel's crew and the absence of official documents may entail negative consequences. It is obvious that in various life conditions (flights, change of residence, etc.) paper form of certificates may be damaged or lost. The International Maritime Organization in view of this fact in Regulation 5 of the International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (STCW) 1978 (Verification of Certificates of Competence and Endorsements) requires Maritime Administration (hereinafter referred to as MA) of countries to take the following steps (IMO, 2011):

1. Establish electronic databases to verify the authenticity and validity of certificates of competence and endorsements.
2. To respond promptly to requests from other administrations for verification, validity, and authenticity of safety certificates.

Thus, at the international level, the need to create a digital database at the level of Maritime Administrations of states is confirmed. Work in this direction is carried out by each country separately and at different speeds, to limit ourselves only to the creation of a digital database of certification would be only half of the solution of the problem. There is a need to transition to electronic certificates linked to cloud-based databases that would be available at anytime and anywhere in the world. One of the first steps in this direction is made by the Danish Maritime Administration [15].

At the first stage only, Danish citizens will have access to the service, but in the future coverage of foreign seafarers will be realized for all vessels flying the Danish flag. Analyzing the results of the Danish Maritime Administration's experience has shown that digital technologies and solutions increase the competitiveness and efficiency of the maritime industry. However, a complex and extensive infrastructure is required to ensure optimal performance, sustainable operation, and remote management:

- ◆ Information Technology Systems Integration.
- ◆ Data management and cybersecurity system.
- ◆ Automated remote monitoring and control.
- ◆ Resilient satellite communications.

- ♦ Mobile applications and connectivity.
- ♦ Cloud resources, data sharing and analysis.
- ♦ Unified database standard (protocol) [16].

There are requirements for vessel crew members according to the Law of the Republic of Kazakhstan “On Merchant Shipping” [17]:

- ♦ Persons having COC, confirmations of COC, certificates of training of maritime transport specialists, medical reports are allowed to occupy positions of vessel crew members.
- ♦ COC, confirmations of professional diplomas, preferential permits are issued by the seaport Maritime Administration.
- ♦ Certificates of training of specialists of maritime transport are issued by educational organizations engaged in training (retraining) and advanced training of specialists of maritime transport, maritime training, and simulator centers [17].

Kazakhstan Maritime Academy of Kazakh-British Technical University, as an internationally accredited educational institution, issues certificates to graduates of the Academy. The university keeps strict records of issued certificates, but this does not mean that failure in the work of this system is impossible. The optimal mode of operation of the certification system would be the digitalization of the entire system into a single database. Educational institutions as an integral part of the country’s economy should follow the decisions of the country’s government, implement digitalization processes by optimizing paperwork, applying international standards [18].

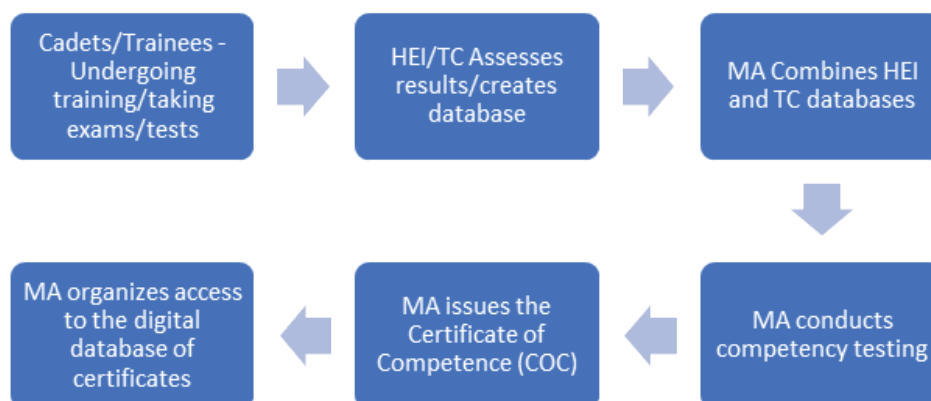


Figure 1 – Structure of the digital certification system

The authors propose to make a proposal to create a digital certification system. All work and responsibility for issuance, authentication of certificates, and electronic access to them would be included in the responsibilities of the Maritime Administration of Kazakhstan (MA RK) as a structural unit of the Ministry of Industrialization and Innovative Development of the RK (MIDI RK).

The creation of such a structure would reduce certification delays, make the whole process transparent and facilitate access to documents for companies, seafarers, and port services. The authors see the technological part of the task, the software of the process, as already tested in the system of the Electronic Government of the RK (e-gov), which has already proved itself as a reliable resource in the aspect of ensuring the security of digital signatures, two-component methods of identity verification and other technologies. Considering the best practices of the Danish Maritime Administration and e-gov, we can confidently state that there is an actual need and technological solution of this problem.

Materials and methods of research

In this study, the authors applied both qualitative and quantitative methods. In order to investigate the opinion of specialists, two target groups of maritime industry professionals were selected as interviewees: for quantitative analysis, a focus group of graduates of the Kazakhstan Maritime

Academy 2016–2020 who directly work in the maritime industry was used; for expert interviews, working contacts of authors in the maritime industry from the Kingdom of the Netherlands, Republic of Turkey, the Sultanate of Oman, and Kazakhstan were used. The small number in the sample is compensated for by the quality of the interviewees, all of whom are deeply involved in the maritime industry, well-informed about the issues, and have some professional experience. The interviews were conducted using modern methods of communication: for qualitative interviewing we used the methodology of expert assessments outlined in “The Course of Lectures on General Sociology” at Moscow State University [19] and Lissie Hoover’s article [20]. E-mail addresses of the interviewed specialists were used for remote interviews and WhatsApp messenger were used for the quantitative survey.

One participant was interviewed by phone, as he was in Aktau, Kazakhstan, and three participants were interviewed in person (they were colleagues from KMA).

The preamble of the survey stated the purpose of the survey to be conducted, the scope of the subject matter and confidentiality. The expert interview and focus group surveys were conducted between August 21 and August 26, 2023.

Profile of interviewees: the interviewees were professionals who have experience in the maritime industry in various positions with experience ranging from 4 to 30 years, including experience in education. Among them 3 people headed educational structures in the Maritime Academy and Maritime Training Center, one is the CEO of a company in the field of human resources management in the global maritime industry, and 3 have teaching experience in the Maritime Academy.

All interviewed maritime industry professionals were asked the following questions:

1. What is your experience in the maritime industry and what is your current position? The answer to this question provides the authors with an understanding of the respondent’s professional involvement in maritime industry issues.

2. How do you feel about the digitalization of the certification process in the maritime industry? The results of answers to this question will determine the degree of feasibility of introducing digitalization of the certification process in the maritime industry of Kazakhstan

3. Do you think it is necessary to implement the achievements of the digital revolution in the maritime industry? The statement of this question is caused by the need to determine the current trends in the development of the maritime industry of our country.

4. How can the digitalization of diplomas and certificates help the captain, shipowner, port authorities to verify the authenticity of the credentials? The answers to this question will allow to determine the ways of solving the problems of implementation of digitalization of certification processes at different levels of management hierarchy of the maritime industry of Kazakhstan.

5. What problems do you see in the implementation of digitalization of the process of issuing diplomas and certificates for seafarers? The justification of the necessity to raise this issue is due to the fact that it will allow to identify the existing problems in the process of digitalization of certification of maritime professionals.

6. What potential threats do you see in the digitalization of seafarers’ diplomas and certificates? (cybersecurity? privacy?). The answers to this question will provide the authors with different perspectives from the maritime industry on the existing risks of implementing the digitalization of certification processes.

Thus, the interview questions were selected by the authors in order to find out the level of professional involvement in the maritime industry, their attitude to the issue of digitalization of certification processes and identification of “bottlenecks” of this process, which may not be obvious, but are important. Working directly in the maritime industry, the informants encounter the practical aspects of the certification process, see the administrative, regulatory and educational problems from the inside. Along with the obvious positive impact of digitalization, the questions were structured to identify potential threats to the stable operation of the industry.

When developing the interview methodology, the authors were based on the works of domestic and foreign authors [19, 20].

Interview results

All interviewees support the need for digitalization of the certification process in the maritime industry. They point out such advantages of implementing digitalization as:

- ♦ reduction of time and accessibility of certification.
- ♦ in the conditions of technological sophistication and globalization, solving issues online.
- ♦ digitalization of the certification process is a significant step in the development of the industry, contributing to the efficiency, transparency and safety of processes related to the issuance and confirmation of seafarers' qualifications.

♦ The use of modern digital technologies allows to reduce the time spent on verification and authenticity of certificates, as well as minimize the risks of forgery and fraud.

Answering the question "How can digitalization of diplomas and certificates help the master, shipowner and port authorities to verify the authenticity of documents?", the following was noted:

♦ the administrative burden is reduced substantially, and all industry shareholders will get rid of "paperwork";

♦ with the creation of a digital portfolio and document authentication services, it will be fast and reliable. Digitalization will simplify the life of the honest ordinary seafarer, as well as the senior staff of ships and the management of maritime companies. If, by entering some data of a person, it will be possible to see more and more active and accredited certificates of the employee, which can significantly speed up the process of hiring seafarers and further monitoring of their compliance with the minimum requirements. If online certification is connected to this, a significant amount of time and money can be saved.

♦ digitalization of seafarers' COC and certificates facilitates the verification of authenticity and relevance of the certificates, speeds up the processes of registration and verification of personnel qualifications, minimizes the risks of receiving false data. This helps to improve maritime safety, reduce bureaucratic costs and improve interaction between different parties in the industry.

♦ all certificates and diplomas will be stored in a database, eliminating the need for paper copies, reducing the risk of damaging, or losing the same documents, which will take longer later. The verification process will take much less time, saving ships time in port. It is possible to merge databases with other maritime authorities. It may be possible to receive notifications when certificates are about to expire. It may even be possible to renew certificates while on the ship (remotely).

At the same time, it is noted that:

♦ although the IMO is working on this, things are slow. It is unbelievable that seafarers still have to take all their certificates and diplomas with them when they sail around the world.

♦ the security and data privacy aspects of such projects need to be carefully considered.

♦ digital certification and similar applications should certainly be under the control of governments and authorized bodies. In fact, if the infrastructure of a digital certification system is well prepared, it cannot be avoided that it will be more secure and easily monitored than paper-based certificates.

Interviewees pay attention to the fact that all certifications and similar updates should certainly be supported by highly accessible and practical technological support. In this regard, the introduction of the advances of the digital revolution into the maritime industry is supported by all interviewees since:

♦ the maritime industry needs to be acutely aware of and keep pace with developments in digital technology.

♦ digitalization is inevitable in our era, and it must be implemented in the maritime industry;

♦ digitalization is a natural process, inevitable due to the development of technology and many training centers and educational institutions are already successfully applying it in one way or another.

♦ The use of digital technologies helps optimize operations at sea and on land, improves decision-making, reduces human error risks and enhances interaction between different industry players. E-certification, digital platforms for data exchange, automated control and monitoring systems contribute to more efficient and safer offshore operations.

♦ contributes to increased efficiency, productivity, safety; real data (weather, emissions, routes, vessel condition); compliance with international regulations; and of course, improved logistics.

Among the main challenges of implementing digitalization of the diploma and certificate process for seafarers, interviewees highlighted:

♦ in some countries there are still no conditions to verify the relevant certificates and qualifications of seafarers and there is evidence of the sale of diplomas and certificates of maritime professionals, which reduces the credibility of seafarers' documents. Fake agencies may appear, which will fraudulently extort money for false certification.

♦ poor service development (includes insufficient server capacity, unfinished or inconvenient web pages, inadequate updating of information on the website);

♦ vulnerability to outside interference, as many educational institutions will have access to the service, and of course the vulnerability of the system to hacker attacks.

In their responses to the questions, interviewees also made suggestions to address these challenges of digitalizing the certification process:

♦ the reliability and technological infrastructure of the respective institution of each country is important; first of all, it is necessary to provide a reliable and secure digital infrastructure to prevent unauthorized access to data and the issuance of forged credentials.

♦ if standardization according to the STCW convention is achieved, there will be no problem; in addition, compliance with new standards and regulations must be ensured, and staff must be supported and trained to use the new technologies effectively.

♦ large amounts of funding are likely to be required.

Interviewees highlight potential threats in the digitalization of seafarers' diplomas and certificates related to cybersecurity and privacy, namely:

♦ high likelihood of personal accounts being hacked, documents being forged, confidential information being "leaked";

♦ a possible "cyber-attack" could create problems in the future.

♦ technical failures in the system, which may increase inspection time, thereby increasing vessel arrival time.

♦ non-compliance with international standards.

Preventing such threats requires strict adherence to security measures, including data encryption, multi-level authentication and regular audits of the system for vulnerabilities. In this regard, the main task of countries' ministries of maritime affairs is to bring the standards, especially the training of the country's seafarers, up to international standards and to pay the utmost attention to obtaining and continuously monitoring certification and qualifications. At the head of these standards is a system based on trust. This will help the seafarers of the countries concerned to participate in important international companies and to take a respected place in the industry.

Twenty-four KMA graduates working in the maritime industry participated in the quantitative survey. The survey used the methodology described in the article "Qualitative vs. Quantitative Research Differences, Examples & Methods" by Raimo Strefkerk [21]. Through the messenger WhatsApp, all of them were asked closed-ended questions with multiple choice answers:

1. Your position in the industry
2. Your length of service?
3. How do you feel about the digitalization process in the maritime industry?
4. Have you been personally involved in the digitalization process?
5. How can the digitalization of seafarers' certificates affect the company's operations?
6. Can digitalization improve document security?
7. Can digitalization improve the cyber security of a maritime company?
8. Can digitalization of certificates improve the efficiency of Port Services, inspections?
9. Will the introduction of digitalization of certificates reduce paper workflow?
10. What problems hinder the implementation of digitalization?

Here are the results of the surveys.

1. All respondents have up to 3 years of work experience.

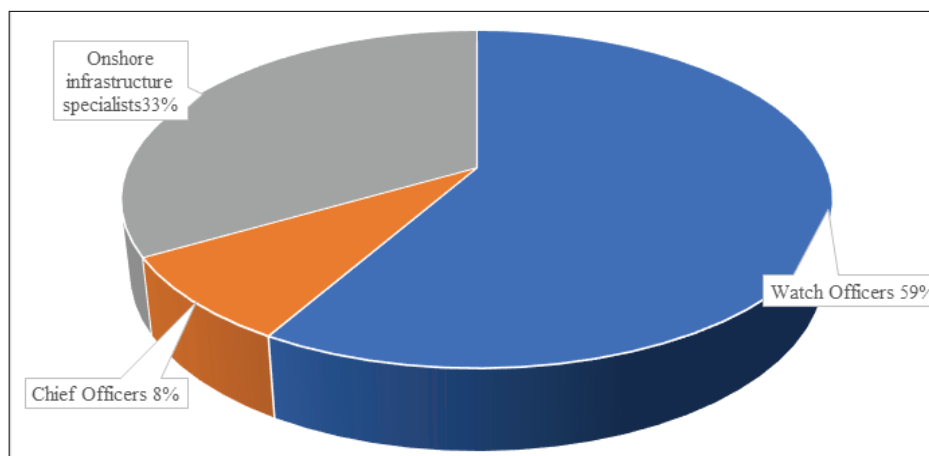


Figure 1 –The qualitative profile of respondents

2. The results of the surveys show that all respondents have a positive attitude towards the need to implement digitalization processes in the maritime industry. A more detailed analysis of the survey results showed that:

- ◆ Despite the existing risks of implementing digitalization of certification processes related to cybersecurity and privacy, 100% of respondents believe that digitalization of certificates will increase the efficiency of port services and inspections; 100% of respondents believe that implementation of digitalization of certificates will reduce paperwork.

- ◆ 91.7% of respondents believe that digitalization will help to improve document security.

- ◆ 52.6% of respondents believe that digitalization of seafarers' certificates will "reduce the workload of the crew"; 47.4% believe that digitalization will "increase the efficiency of the company";

Regarding the positive impact of digitalization on maritime company cybersecurity, 58.3% of respondents answered in the affirmative, 33.4% "have no idea" and 8.3% answered "no".

Thus, even though maritime industry professionals generally support the need to implement digitalization processes, there are views that indicate a lack of awareness of the effectiveness of digitalization. This conclusion is supported by the fact that almost all respondents (95.8%) were not personally involved in the digitalization process.

3. One of the objectives of the survey was to identify the challenges of digitalization in the maritime industry. The survey showed that 38.5% of the respondents mentioned "low level of computer literacy in the industry", 34.6% – "high cost of digital technologies", 26.9% – "technological problems with implementation" as the main problem hindering the implementation of digitalization. Consequently, it can be concluded that the success of the implementation of digitalization in the maritime industry will largely depend on how active the activities in the field of professional development of specialists in this industry to address the problems of digitalization will be.

Results and Discussions

The results of the study were discussed at the meeting of the Kazakhstan Maritime Academy of KBTU on August 22, 2023. Having analyzed the information from both qualitative interviews and quantitative surveys, which were conducted using modern means of communication the authors made the following conclusions:

The majority of interviewees noted such positive aspects as increased transparency and openness of the certification process; online availability of all documents; no need to keep paper forms of documents with you; the process of ship inspection in ports will be accelerated and simplified, will have the character of a simple digital verification.

The process of digitalization today is an urgent requirement of the time, Kazakhstan is already taking an active part: Kazakhstan ranked 28th in the level of e-government development among 193 countries in the UN monitoring, against 29th place in 2020. The country's E-Government Development Index (EGDI) amounted to 0.86 points. This is the highest index among the CIS and Central Asia

countries, in addition, Kazakhstan significantly overtakes such developed countries as Ireland, Canada, Italy, Belgium, Czech Republic and others [22].

The industry faces the important task of changing some of the provisions of the STCW Convention and beyond, organizing training for all staff in digital literacy, and systematic digital skills development.

Digital technologies introduced in the certification process should be standardized, duplicated, securely protected, and systematically updated. In this way, data security problems, the risk of cyber-attacks, unauthorized access and database hacking can be avoided.

Some maritime companies have additional designated officer on their vessels, so-called Clerk, who are only responsible for documenting the crew. This solution absolutely does not meet the financial interests of the companies, does not increase the efficiency and reliability of work with documents, and is completely contrary to modern trends in the industry.

Challenges to implementing digitalization include the need for changes to IMO documents with international validation; cybersecurity is a complex task requiring significant effort; energy resources and continuous operation are required to support computer systems on board ships; the high cost of software is also an obstacle for emerging economies; training institutions and training centers should have a stable connection with the flag Maritime Administration and their databases as a backup system [23].

Conclusion

Thus, based on the analysis of the results of empirical research in the maritime industry of Kazakhstan and a review of foreign experience in the field of digitalization of certification processes in the maritime industry, the authors came to the following conclusions and recommendations that have the character of scientific novelty:

Digitalization of the certification process has wide support in the professional environment, as it can have a positive impact on the maritime industry, increase the availability of documents for the command staff of ships, port administration, the process of registration of documents will become more transparent;

For the maritime industry of Kazakhstan there is an opportunity to learn from the experience of advanced countries in the field of digitalization of the certification process in the maritime industry, such as Denmark and Singapore. The experience gained in Kazakhstan in digitalization of public services, documentation and control allows to implement this project at the level of the Maritime Administration of Ports of the Republic of Kazakhstan;

However, it should be taken into account that the maritime industry has its own peculiarities, which consist in the international nature of maritime transportation, international composition of ship crews, the need to operate in several jurisdictions in one voyage. Standards and regulations in the maritime industry are set by consensus by decisions of the International Maritime Organization.

The most important factor for the success of digitalization is to ensure the reliability of the operation and protection of the electronic document management system at all parts of the process: in the university, in the Maritime Port Authority, in port administrations and on merchant ships;

To reap the benefits of digitalization, the maritime industry is advised to adopt good practices such as investing in reliable and secure digital platforms, providing adequate training and support to stakeholders, and regularly assessing and updating digital systems to ensure they meet industry standards and requirements.

The authors believe that the findings from the data obtained can be considered as relevant as the participants in the interviews and surveys were maritime professionals from the Sultanate of Oman, the Netherlands, Turkey and Kazakhstan who have real experience in the maritime industry and maritime education.

However, it is important to recognize the limitations of the study. To fully understand the potential challenges and risks associated with the digitalization of certification processes in the maritime industry, further research and practical projects in the real sector involving IT, human resource management and financial management professionals are needed. In addition, security and privacy aspects need to be considered when implementing digital solutions. The topic of digitalization in the maritime industry is waiting for researchers and the authors hope that this paper will be a good start for further research.

REFERENCES

- 1 https://unctad.org/system/files/official-document/cimem7d17_ru.pdf.
- 2 Vovchenko N.V. Role of electronic information systems in development of navigation media. Scientific works of Dalrybvtuz, vol. 35, ISSN 2222-4661.
- 3 https://en.wikipedia.org/wiki/Environmental_effects_of_paper.
- 4 Moving From Paper Based Processes To A Digital Workflow. DocTech.
- 5 Masuda Yo. (1983) Information society as a post-industrial society. Moscow, AST, 452 p.
- 6 Arrow K. (1984) Information and Economic Behavior. The Economics of Information, Cambridge, Mass., Belknap Press, .
- 7 Gates Bill. (1996) The Road to the Future. Moscow, 312 p., ISBN 5-7502-0019-1.
- 8 Machlup F. (1962) The Production and Distribution of Knowledge in The United States. Princeton, Princeton Univ. Press, , 416 p.
- 9 Porat M. (1977) The Information Economy: Definition and Measurement. Washington, DC: United States Dep. of Commerce, , 250 p.
- 10 Mosco V. (1982) Pushbutton Fantasies: Critical Perspectives on Videotex and Information Technology. Norwood, NJ: Ablex, , 240 p.
- 11 David Lyon. (1988) The Information Society: Issues and Illusions. Cambridge, United Kingdom: Polity Press, 196~, ISBN: o-7456-0260-6.
- 12 Stonier T. (1990) Information and the Internal Structure of the Universe: An Exploration into Information Physics. Springer, Verlag, 166 p.
- 13 Castells M. (1991) The informational city: information technology, economic restructuring, and the urbanregional process. Oxford, UK, Basil Blackwell, 402 p.
- 14 International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (STCW) (imo.org).
- 15 <https://smartmaritimenetwork.com/2021/10/26/-danish-maritime-authority-launches-digital-seafarer-certificates/>.
- 16 <https://safety4sea.com/danish-maritime-authority-launches-digital-certificates/>.
- 17 “On Merchant Shipping” Law of the Republic of Kazakhstan dated January 17, 2002, no. 284.
- 18 “On Approval of the State Program “Digital Kazakhstan” Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan dated December 12, 2017, no. 827. <http://www.akorda.kz/upload/media>.
- 19 Course of lectures on general sociology. Textbook, MSU, Moscow, 2010, 238 p.
- 20 Hoover, Lissie. (2021). 5 Qualitative Research Designs and Research Methods,
- 21 Qualitative vs. Quantitative Research: Differences, Examples & Methods (scribbr.com).
- 22 <https://inbusiness.kz/ru/news/kazakhstan-zanyal-28-e-mesto-v-mire-po-razvitiyu-elektronnoy-pravitelstva>.
- 23 <https://safety4sea.com/cm-imo-digitalization-paves-the-way-for-smarter-and-greener-shipping/>.

¹*ДУЙСЕНБИЕВ А., ¹СЕЙТКАЗИЕВА А., ²АЛИ ЖЕМ КУЗУ

¹Қазақстан-Британ техникалық университеті, 050000, Алматы қ., Қазақстан

²«Лерус» теңізді оқыту академиясы, Ыстанбұл қ., Түркия

*E-mail: a.duisenbiev@kbtu.kz

ТЕҢІЗ ӨНЕРКӘСІБІНДЕГІ БАСҚАРУ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ФАКТОРЫ РЕТІНДЕ СЕРТИФИКАТТАУ ПРОЦЕСТЕРІН ЦИФРЛАНДЫРУ

Андатпа

Бұл мақаланың тақырыбы – сертификаттау процесіне баса назар аударып, теңіз индустриясында басқару тиімділігін арттыру факторы ретінде цифрландыруды енгізу. Зерттеу әдістемесі шетелдік ғалымдардың зерттеулері мен баяндамаларына, шетелдік әдебиеттерге шолу мен мамандардың сараптамалық сұхбаттарынан, сауалнамаларынан тұрады. Зерттеудің ғылыми жаңалығы цифрландыруды енгізу мәселелерін және оның Қазақстанның теңіз өнеркәсібінде басқару шешімдерінің тиімділігін арттыруға және өндірістік шығындарды азайтуға әсерін зерттеуде жатыр. Экономиканың әртүрлі салаларында цифрландыруды енгізу бойынша көптеген зерттеулер жүргізілуде. Алайда бұл мәселені Қазақстандағы теңіз өнеркәсібінің контексті-

не қатысты зерттеуде айтарлықтай олқылық бар. Теңіз саласы дамыған сайын цифрландыру басқару әдістерін жетілдіруге және нәтижелерді жақсартуға жаңа мүмкіндіктер ашады. Цифрландырудың айтарлықтай әсері тиімі мүмкін салалардың бірі – сертификаттау процесі. Жалпы, мақала теңіз өнеркәсібіндегі басқару әдістерін жетілдіру және нәтижелерді жақсартудағы цифрландырудың әлеуетін айқындайды. Шетелдік компаниялардың тәжірибесіндегі бұл технологияларды пайдалану арқылы қалай нәтижелерді жақсартып, теңіз өнеркәсібіндегі бәсекеге қабілеттілікті сақтап қалуды көрсететін мысалдар ұсынылған. Ұсынылған идеялар мен ұсыныстар жүк тасымалдаушы компанияларға сертификаттау процестерін оңтайландыруға және тиімділікті арттыруға көмектеседі. Мақала соңғы цифрлық әзірлемелерден хабардар болу мен бұл құралдарды шешім қабылдау процесіне енгізу маңызды деп қорытындыланады.

Тірек сөздер: басқару тиімділігі, инновациялар, цифрландыру, теңіз индустриясы.

^{1*}ДУЙСЕНБИЕВ А., ¹СЕЙТКАЗИЕВА А., ²АЛИ ЖЕМ КУЗУ

¹Казахстанско-Британский технический университет, 050000, г. Алматы, Казахстан

²Академия морского обучения «Лерус», Стамбул, Турция

*E-mail: a.duisenbiev@kbtu.kz

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СЕРТИФИКАЦИИ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ В МОРСКОЙ ОТРАСЛИ

Аннотация

Предметом рассмотрения данной статьи является процесс внедрения цифровизации как фактор повышения эффективности управления в морской отрасли с акцентом на процесс сертификации. Методология исследования включает обзор литературы, исследований и отчетов зарубежных ученых, а также экспертные интервью и опросы профессионалов. Научная новизна исследования заключается в изучении проблем внедрения цифровизации и ее влияния на повышение эффективности управленческих решений и снижение затрат на производстве в морской отрасли Казахстана. В различных сферах экономики имеется множество исследований по внедрению цифровизации, однако существует значительный пробел в изучении этого вопроса в отношении контекста морской отрасли Казахстана. По мере развития морской отрасли цифровизация открывает новые возможности для совершенствования методов управления и улучшения результатов. Одной из областей, где цифровизация способна оказать существенное влияние, является процесс сертификации. В целом статья подчеркивает потенциал цифровизации для совершенствования методов управления и улучшения результатов в морской отрасли. Приводятся реальные примеры из практики зарубежных компаний, иллюстрирующие, как эти технологии могут быть использованы для улучшения результатов и сохранения конкурентоспособности в морской отрасли. Представленные идеи и рекомендации помогут судоходным компаниям оптимизировать процессы сертификации и повысить эффективность работы. В заключение статьи подчеркивается, что важно оставаться в курсе последних цифровых разработок и внедрять эти инструменты в процесс принятия решений.

Ключевые слова: эффективность управления, инновации, цифровизация, трансформация, морская индустрия.

Information about authors

Duisenbiyev Askar (corresponding author)

Captain 1st Rank (ret.), Senior Nautical Lecturer at Kazakh-British-Technical University, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0009-0005-9591-9400

E-mail: a.duisenbiev@kbtu.kz

Seitkaziyeva Aruzhan

Doctor of Economics, Professor, Business School of Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-0641-1498

E-mail: a.seitkaziyeva@kbtu.kz

Ali Cem Kuzu

Assoc. Professor, PhD, General Manager of the Marine Training Academy «Lerus»,
Istanbul, Turkiye
ORCID ID 0000-0001-5594-9158
E-mail: alicem@lerus-online.com

Авторлар туралы мәліметтер**Дуйсенбиев Аскар** (корреспонденция авторы)

Отставкадағы 1 дәрежегі Капитан, Қазақстан теңіз академиясының аға оқытушысы,
Қазақстан-Британ техникалық университеті,
Төле би көш., 59, 050000, Алматы қ., Қазақстан.
ORCID ID: 0009-0005-9591-9400
E-mail: a.duisenbiev@kbtu.kz

Сейтказиева Аружан

Экономика ғылымдарының докторы, профессор, Бизнес-мектеп,
Қазақстан-Британ техникалық университеті,
Төле би көш., 59, 050000, Алматы қ., Қазақстан.
ORCID ID: 0000-0002-0641-1498
E-mail: a.seitkazyieva@kbtu.kz

Али Жем Кузу

Доцент, профессор, PhD, «Лерус» теңізді оқыту академиясы, бас менеджері,
Ыстанбұл қ., Түркия
ORCID ID 0000-0001-5594-9158
E-mail: alicem@lerus-online.com

Информация об авторах**Дуйсенбиев Аскар** (автор для корреспонденции)

Капитан 1-го ранга в отставке, старший преподаватель мореплавания,
Казахстанско-Британский технический университет,
ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан.
ORCID ID: 0009-0005-9591-9400
E-mail: a.duisenbiev@kbtu.kz

Сейтказиева Аружан

Доктор экономических наук, профессор, Бизнес-школа,
Казахстанско-Британский технический университет,
ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан.
ORCID ID: 0000-0002-0641-1498
E-mail: a.seitkazyieva@kbtu.kz

Али Жем Кузу

Ассоциированный профессор, PhD, генеральный менеджер Академии морского обучения
«Лерус», г. Стамбул, Турция
ORCID ID 0000-0001-5594-9158
E-mail: alicem@lerus-online.com

UDC 338.24
IRSTI 82.33.17

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2023-20-4-157-169>

ARASLANOVA O.S.

Head of Export Transportation Department,
«Rhenus Intermodal Systems»
LLP 050000, Almaty, Kazakhstan
E-mail: olichka37@mail.ru

RISK MANAGEMENT STRATEGY AND METHODOLOGY OF THEIR ANALYSIS IN LOGISTICS OF KAZAKHSTAN

Abstract

The purpose of this article is to highlight an important topic for the developing logistics complex of Kazakhstan. The study of risk management strategies and their implications is a fundamental tool in choosing the shortest and most efficient way to develop the economy of Kazakhstan. The author proposes his personal view on the problems of risk management in Kazakhstan and possible solutions. The article is intended to supplement the existing body of knowledge in this scientific segment, thus highlighting the importance of the studied topic. The logistics industry of Kazakhstan is on the threshold of exploring various modern methods of management and business processes. The development of strategies of anti-crisis measures will prevent stagnation in the development of the industry. In parallel, the author compares the studied material with real logistics processes and events in Kazakhstan. Conducting work on mistakes is the first step in self-development. The article seeks to identify, classify risks, outline strategies to minimize the likelihood of their occurrence and, if they do occur, minimize the consequences. The conclusions of the study include recognition of the fact of imperfection in some cases of anti-crisis policy of Kazakhstan, which led to the adoption of ill-considered decisions that lead to undesirable long-term consequences. The author also considers priority, in the author's opinion, ways to develop the logistics industry in Kazakhstan.

Key words: transport logistics, risk management, risk management strategies, SWOT analysis, data analytics, vehicles, control.

Introduction

Global transport logistics is a specialized area of logistics that deals with the management and coordination of the movement of goods and resources through the world's transport networks and supply chains. It involves planning, organizing and controlling all stages of the movement of goods from the initial point of production to the final consumer at the global level. Being subject to the changes taking place in the world, global transportation logistics, its efficiency and security of supply involve various types of risks.

The logistics industry in Kazakhstan is significantly influenced by a variety of external and internal factors. As an importer, Kazakhstan is highly dependent on a well-built supply chain for both import and transit. This article discusses the impact of risks on the logistics industry of the country, as well as risk management aimed at predicting and eliminating the consequences.

This topic was chosen by the author due to his daily observation of the peculiarities and unpredictability of the logistics industry. The article describes examples of events with serious economic consequences not only for the industry, but also for the state economy. The COVID-19 pandemic, the 2020 transport rail collapse between China and Kazakhstan, Russia's invasion of Ukraine and other geopolitical upheavals have had a negative impact on Kazakhstan's transportation industry. A review of events, decisions made, and their consequences can help develop better ways to minimize harm in the future.

Main points

The main objective of this study is to improve the understanding and develop effective risk management strategies in the global transportation logistics. The article focuses on identifying

weaknesses in risk management and security systems. The relevance of the study is to develop specific risk management strategies and techniques that will help companies to reduce risks and provide safer and more secure logistics operations.

Literature review

Within the framework of the research we prepared materials based on our own experience, materials from leading information resources Emerald, ResearchGate, Scopus, as well as a number of articles from Kazakhstan publications. The main groups of risks and methods of interaction with them were identified.

Some of the major risks in global transportation logistics are:

- ♦ Supply chain risks: problems with suppliers, any interruptions in production processes or raw material shortages can cause supply disruptions.

- ♦ Operation risks: include delays, cargo loss, and vehicle problems such as accidents or malfunctions.

Demand risks: demand uncertainties, competition in the market, market changes:

- ♦ Catastrophic risks: natural disasters such as hurricanes, floods and snowfalls can create problems in global transportation logistics, especially if they affect key routes and ports.

- ♦ Financial risks: changes in currency exchange rates can affect the cost of transportation and goods, affecting companies' budgets and profits.

- ♦ Information risks: data breaches, hacker attacks and other cyber threats can jeopardize shipment and customer information, which can have serious consequences.

- ♦ Bureaucratic risks: difficulties in customs formalities and customs documentation requirements can cause delays and additional costs.

These risks are an indicator that, for the smooth operation of transportation logistics, it is crucial to consider the potential threats and uncertainties that can affect deliveries and operations.

In addition to identifying the type of risk, it is necessary to know how to manage them. These timely actions serve to fully or partially level the consequences of risks. The author considers the main tools of risk management to be the following:

1. Risk identification.
2. Risk assessment
3. Development of mitigation plans.
4. Control and audit.
4. Insurance and financial strategies
5. Suppliers and contracts
6. Staff education and training

1. Risk identification

Risk identification is a set of activities that detect, describe and catalog all potential risks to assets and processes that could have negatively impact business outcomes in terms of performance, quality, damage, loss or reputation. It acts as input for actual risk analysis of the relevant risks to an organization. Risk identification is the first step in the risk management process. It involves identification of risk type and/or risk event. Risk identification is a critical process to have a fruitful risk management plan [1]. It allows the enterprise to prepare for potentially dangerous events and minimize their consequences before they occur. It involves not only identifying possible risks, but also documenting and communicating them to concerned parties.

The following steps can be attributed to the risk identification process:

1. Analysis of documentation

Analyzing project files, plans and other information is a common way to identify risks. It involves examining project documentation for accuracy, completeness and consistency. Inconsistencies identified may indicate the presence of risks - for example, an error in the delivery schedule that could affect the timing of new stock arriving at the warehouse.

2. SWOT analysis

SWOT analysis analyzes the project's strengths, weaknesses, opportunities and threats. Understanding weaknesses allows you to identify potential risks and plan accordingly. An example would be if your primary supplier is located in a geographic area with unstable weather conditions: hurricane seasons, snowstorms or flooding threats. Taking this information into account may prompt you not to place large orders with this supplier or to look at suppliers in other regions [2, 3].

3. Risk register

A risk register is a document containing current and potential risks, their possible causes, and protective measures. Such register should be replenished, increasing the area of knowledge on known risks for their timely prevention.

4. Decision Tree

A decision tree is a diagram used for making decisions. It considers several possible future events and analyzes them at a single point in time, which helps to explore the different alternatives that a decision may lead to. Each branch of the decision tree represents a possible solution or event and the leaves represent possible outcomes. A decision tree allows you to visualize the relationship between different events and consider possible advantages and disadvantages before making a decision.

Trade and logistics relations of the Republic of Kazakhstan with the Russian Federation are presented as an example of risk identification. Events concerning Russia's invasion of Ukraine in 2022 have jeopardized the global logistics web, especially trade relations with Kazakhstan. As its closest trading partner, Kazakhstan is under intense scrutiny due to the release of a number of sanctions packages aimed at trade isolation of Russia. This situation on the one hand is favorable for Kazakhstan businessmen, who have an opportunity to weaken imports from Russia, buy goods directly from suppliers and intensify trade with neighbors, including Russia. On the other hand, uncontrolled trade may attract the risk of being subject to secondary sanctions from the West. At this stage, once the potential risk has been identified, the risk assessment stage is underway [4].

2. Risk assessment

Risk assessment is associated with the probability of occurrence of an event and the significance of the consequences [1].

Risk assessment methods can include risk matrix. A risk matrix is a multidimensional method used by organizations to assess risks in supply chain, products, projects and other areas. It is used to obtain more accurate estimates of the probability of success or failure and to identify activities that require increased control [5].

The risk assessment matrix shows the probability of events and their potential consequences. For example, probability refers to the level of probability that a person will be injured when exposed to a hazard, and consequence refers to the severity of the injury.

Risk matrix example

		LIKELIHOOD			
		Extremely likely	Likely	Unlikely	Very unlikely
IMPACT	Fatal	High	High	High	Medium
	Major injuries	High	High	Medium	Medium
	Minor injuries	High	Medium	Medium	Low
	Negligible injuries	Medium	Medium	Low	Low

Figure 1 – Risk assessment matrix

Quantitative and qualitative assessments

Risk assessment can be quantitative or qualitative. In a quantitative risk assessment, the professional uses numerical values to determine the probability of an event occurring and its consequences. The resulting numerical values can be used for further calculations.

Qualitative risk assessments do not involve numerical probabilities and loss projections. The purpose of a qualitative approach is simply to place the risks that pose the greatest risk into ranking positions.

Whereas qualitative risk analysis is based on human judgment of risk, quantitative risk analysis is based on specific data.

Returning to our example, there comes the risk assessment stage. The risk of being affected by secondary sanctions implies trade and financial costs. These may include a ban on working with suppliers of goods and services; blocking of foreign assets of legal entities or individuals subject to secondary sanctions; a ban on currency transfers; a ban on individuals subject to sanctions from entering the EU, the UK and the US. In addition, individuals who are residents of Kazakhstan may face criminal prosecution if the offense (and violation of sanctions is a crime) is directly or indirectly related to the jurisdiction of the United States and intent is proven. In contrast to the consequences listed above, one can counterbalance the increased profits that will accrue to a Kazakhstani entrepreneur who takes advantage of the situation [6]. At this stage, it is necessary to determine which leaf from the decision tree to choose: to move towards profit and possible violation of the law, or towards a safer way, but with the probable loss of a trading partner.

3. Development of mitigation plans

Creating mitigation plans is the development of actions to mitigate risks, including contingency plans, alternative suppliers and routes, and stockpiles of goods in case of delivery delays. The importance of this process in global transportation logistics cannot be overemphasized, as mitigation plans help reduce losses in the event of adverse events, and quick response and effective risk management can prevent large financial losses. By analyzing the situation and pre-planning a certain course of action in case of a crisis situation, a company can ensure business continuity in a crisis [7]. To maximize the effectiveness of mitigation plans, it is important to develop a step-by-step plan of action that leads you step by step to successfully overcome the crisis. Let's take a look at the key steps in developing mitigation plans for risk management in global transportation logistics:

The mitigation strategies developed are gradually implemented and regularly monitored. It is considered to ensure that the plans are up to date and effective.

An example of a mitigation strategy in a transportation and logistics company might involve the risk of delivery problems due to natural disasters such as hurricanes or earthquakes. Let's call this strategy "Diversifying routes and warehousing to minimize the impact of natural disasters." The goal of the strategy is to provide assurance of continuity of supply and reduce potential losses due to disasters. The steps to implement the strategy will consist of 8 points (Figure 2, p. 161).

Steps for strategy implementation:

1. Risk identification. Assess the risk of natural disasters affecting the company's routes and storage facilities. This includes analyzing historical disaster data in the regions where the company operates.

2. Route diversification. Developing several alternative routes to deliver goods. These routes may be physically separated and pass through different geographic areas to reduce the risk of all routes being blocked at the same time.

3. Development of alternative storage facilities. Locating warehousing facilities in different regions. This allows inventory to be moved and orders from other warehouses to be processed in case one of them becomes unavailable due to a disaster.

4. Monitoring and Response Systems. Installation of natural disaster monitoring and warning systems. This allows the company to get quick information about possible threats and take precautionary measures.

5. Training of employees. Training company personnel, including drivers and warehouse workers, on safety and what to do in the event of a disaster.

6. Critical resource redundancy. Establishing reserve stocks of fuel, food, and other critical resources necessary for continuity of operations during a crisis.

7. Business plans for crisis situations. Developing detailed business plans for natural disasters. These plans include evacuation, recovery, and communications procedures.

8. Regular updates and verification. Periodically updating the mitigation strategy and testing it for effectiveness in the context of changing risks and conditions.

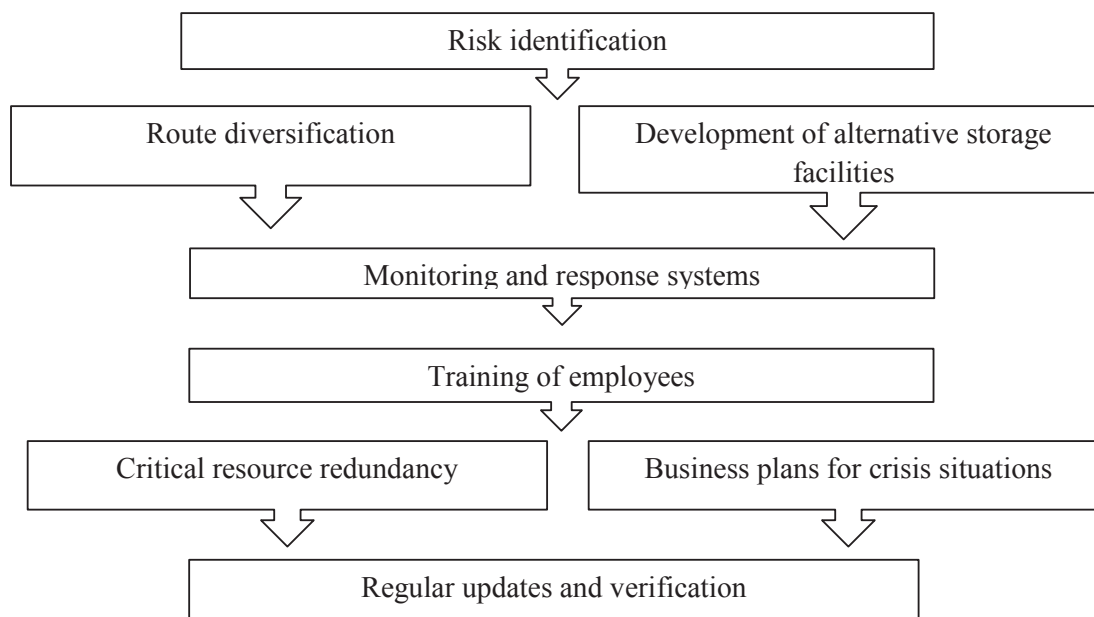


Figure 2 – Steps to implement the strategy

A company with a risk mitigation plan has a number of benefits, such as minimizing supply disruptions during natural disasters, reducing losses and increasing business resilience, enhancing the company's reputation as a reliable partner, and improving the safety of employees and property [8]. It is important to remember that each company has its own unique risks and mitigation strategies should be tailored to the specific conditions and needs of the organization.

Developing risk mitigation plans in global transportation logistics is essential for business success. It allows companies not only to survive in conditions of instability, but also to develop, build long-term relationships with customers and strengthen their position in the market [9].

Let consider ways to minimize the risks in the concluding stage of our example.

To avoid the risk of secondary sanctions at the moment, all Kazakhstan trading and transportation companies are advised not only not to violate sanctions, but also to exercise due diligence when working with their clients in order not to be involved in the supply of dual-use goods to the Russian Federation and the Republic of Belarus:

- ♦ verify the founders of their partners, and if a RoK resident company has Russian Federation citizens among its founders, trade in sanctioned goods, especially dual-use goods, with such companies may be considered a sanctions violation.
- ♦ Request documents confirming that sanctioned goods, especially dual-use goods, will not enter the territory of the Russian Federation (end-user certificate).
- ♦ Pay attention to whose technology is used, because if computer chips are purchased in China but manufactured using American technology, this is also a violation of sanctions;
- ♦ pay attention to a sudden shift in the interests of partners in terms of procurement and delivery (they have always traded in furniture and suddenly started shipping drones) – in such cases, it is also recommended to refuse to cooperate;
- ♦ avoid working with companies that use non-standard payment schemes (via third countries).

These measures are also well suited for the next point describing control and audit strategies, as well as the selection of suppliers based on information gathering and situation assessment.

4. Control and audit

Compared to risk assessment and mitigation, risk monitoring has received less attention in the literature [10]. An effective risk monitoring system, especially in terms of product quality, labor safety risks, inventory control, etc., is essential to track and assess risks in the supply chain [11]. Such a system could be the Internet of Things. The Internet of Things (IoT) is a globally structured network used to connect objects equipped with technology capable of transmitting information [12]. This technology can be used to monitor risks and control them in real time if needed. Data flow analysis using modern technologies and transportation management systems is an important component of risk management and operations optimization [13]. For example, installation of GPS trackers and sensors on vehicles helps in tracking and monitoring their location, condition, collects data on speed, fuel consumption, temperature and other parameters affecting transportation services. It is an important practice in today's world used in various fields such as logistics, security and fleet management. There are several steps to follow when installing such trackers: choose a location; consider how it will be powered; install according to the manufacturer's instructions; configure the GPS tracker; connect it to a monitoring platform or application; set up an alert system; train your staff on the correct use of the tracker; perform regular maintenance; and ensure that the installation and use of GPS trackers complies with the country's laws and does not violate private rights. The second step in analyzing data flows can be using information logistics systems, creating a Data Control Center. A data management center is a centralized infrastructure and system that allows data to be collected, processed, analyzed, and managed in order to make more informed decisions. Using such a center can significantly improve an organization's ability to make data-driven decisions and improve economic performance [14]. It is a powerful tool for analyzing and optimizing business processes. With improved data monitoring and analysis, organizations can manage their resources such as vehicles, equipment, and personnel more efficiently. This reduces costs and optimizes resource utilization. The third step in analyzing data flows is highlighted by data analytics [15]. Such analytics is based on demand forecasting, route optimization and resource allocation. Modern organizations, whether they are logistics companies or delivery service providers, are faced with the need to effectively manage demand, routes, and resources. Efficiency in these areas becomes crucial for success and competitiveness. This is the reason why demand forecasting is a key element of inventory, production and delivery planning. Route optimization is also essential for logistics companies, delivery companies, and even passenger transportation. Resource allocation involves the efficient management of an organization's personnel, transportation, and other assets.

Regular audits and inspections of suppliers are important to ensure that manufacturing processes and products meet established standards. This process helps companies to assess whether suppliers are meeting expectations and whether it is worthwhile to make decisions about long-term cooperation with them. An example of supplier performance evaluation (Table 1):

Table 1 – Stages of supplier performance evaluation

Establishment of evaluation criteria	Define the criteria and metrics against which supplier performance will be evaluated. Criteria may include product quality, on-time delivery, price stability, customer service and other aspects important to your business.
Data collection	Collect supplier performance data based on defined criteria. This data may include audit results, customer feedback, delayed delivery statistics, and other metrics.
Performance evaluation	Evaluate each vendor's performance based on the data collected. This may include calculating scores or grades for each criterion.
Supplier Comparison	Compare the performance of different suppliers against each other on the metrics you are interested in. This will help you identify the best and worst suppliers.
Monitoring and regular evaluations	Continue to monitor vendor performance over time. Regular evaluations will help ensure stability and improvement in service quality.
Decision-making	Based on the results of the evaluation, make decisions to continue working with suppliers, revise them or terminate the cooperation.
System of rewards and incentives	Develop a system of rewards and incentives for top suppliers, which can be an additional incentive to improve and maintain high performance.

Thus, by continuously monitoring and managing supplier performance, it is possible to confidently build long-term, reliable partnerships and ensure a high standard of quality in logistics operations. Speaking about control and audit in risk management, it is worth noting that they help to ensure transparency, efficiency and safety of logistics operations, as well as minimize financial and operational risks, which is especially important in global transport logistics, where many variables can affect business success [16].

5. Insurance and financial strategies

Logistics process is accompanied by various risks such as cargo loss, damage, delivery delays and other unforeseen events. To minimize risks, it is worth starting with cargo insurance. This type of insurance covers loss or damage to cargo during transportation. Cargo insurance can be a policy for a specific shipment or an annual policy that covers all of a company's shipments and prevents financial loss. The next important object of insurance is the vehicle. This type of insurance covers the company's vehicles against damage, theft or other losses. It helps to ensure that the vehicles are in a reliable condition and prevents financial loss in case of an accident. Some companies may also insure themselves against financial losses due to delays in delivery of goods. In addition, companies can also employ various financial strategies to manage risks in transportation logistics. This can include the use of financial derivatives to protect against fluctuations in currency exchange rates or fuel prices, as well as the development of financial plans for crisis situations. A really powerful step can be the creation of financial reserves that can be used in case of unforeseen events.

Let's look at an illustrative example of cargo insurance. Suppose you have a company that manufactures electronic devices and you ship goods from your manufacturing plant in China to your central warehouse in the United States. Before shipping the goods, you decide to insure them because you don't want to risk losing expensive goods in transit. You contact an insurance company and take out a policy for this shipment of goods [17]. The policy specifies the terms of insurance, including the amount of coverage, the insurance premium (cost of insurance), the term of the policy, and the types of risks it covers. For example, the policy may cover loss of cargo in case of theft, fire, natural disasters, or damage to goods in transit. Your shipment is being delivered by sea from China to the United States. During transportation, a severe storm occurs and damages a container with your goods. When the shipment arrives in the U.S. and you inspect its condition, you discover that some of the goods are damaged and cannot be sold. You contact your insurance company and file a claim for damages. The insurance company assesses the loss, taking into account the terms of the policy, and pays you an amount sufficient to cover the loss, the damaged goods, and possible loss of profits. In this example, there is a clear algorithm for the development of events:

1. Choosing an insurance policy
2. Choosing insurance terms and conditions
3. Sending the cargo
4. Loss of cargo
5. Compensation of losses

The above situation clearly demonstrates how cargo insurance allowed the company to minimize financial risks associated with loss or damage to goods during international transportation. This helped to ensure financial security and maintain the profitability of the business even during unforeseen events. In general, insurance and financial strategies in transportation logistics help to reduce financial risks and provide more stable business management in the variable and unpredictable environment of global logistics [18]. These tools allow companies to protect their assets, customers and profitability.

6. Suppliers and contracts

Careful selection of suppliers and partners with strong reputations and reliable logistics systems plays a key role in risk management in global transportation logistics. Effective supplier management and appropriate contracting help to minimize various types of risks in this area [19]. One of the key aspects of risk management in transportation logistics is the selection of reliable suppliers. Companies with a good reputation, on-time delivery, and adherence to required quality standards can help reduce the risks associated with substandard goods, delays, and other problems. Finding a reliable supplier, research their reputation and history in the market can be done by studying reviews and testimonials

from other customers, as well as doing additional research through professional organizations or business ratings. Make sure the supplier meets the necessary certifications and quality standards, especially if this is critical to your industry or products. Evaluate the supplier's financial health to ensure that they are able to fulfill their obligations on a long-term basis. It will be helpful to request financial performance reports or evidence of creditworthiness. Investigate the supplier's ability to meet your needs in terms of volume, quality and delivery time. Pay attention to the availability of backup capacity to handle unforeseen events. It is important that the supplier is open to communication and collaboration. The easier you can communicate and resolve problems, the more reliable it will be [20].

Entering into long-term contracts with reliable suppliers can ensure a more stable supply and predictability in the cost of goods. They may also include terms that establish the supplier's liability in the event of risks, such as delays in delivery or damage to goods. Some companies have special agreements with suppliers that establish risk management procedures. For example, such agreements may provide for joint participation in insurance program or resource plans to minimize financial risks. Third-party logistics providers are often used to transport goods across borders and continents. Contracts with such providers may impose conditions related to guaranteed delivery times, liability for lost or damaged shipments, and certain penalties if conditions are violated. If suppliers use contractors or frontline vendors, it is important to monitor their activities and obligations to prevent unforeseen risks. By regularly tracking and evaluating supplier performance, risks and problems can be identified early and corrective action can be taken.

7. Staff education and training

Training employees in emergency response and risk management is a critical part of an effective risk management program in global transport logistics. It is best to start by developing a training plan [21]. You should identify what risks and emergencies may occur in your logistics operations and what skills and knowledge employees need to manage them. It is important to understand which employees have key roles in risk management and emergency response. This could be logistics managers, security officers and those responsible for cargo insurance. The training plan may include courses, webinars, seminars or internal trainings. Employees should know how to respond to various emergency situations such as traffic accidents, natural disasters, strikes and others [22]. Along with the training, detailed action plans should be developed for each employee in an emergency situation. The plans should include the steps of responsible persons and communication strategies. In addition, it is important to ensure that employees have access to necessary information and resources, including emergency contacts, insurance companies, and other important contacts.

Emergency drills and exercises can be conducted for greater immersion. They allow you to test your staff's preparedness to deal with real or simulated emergencies and identify areas for improvement.

According to the assessment of the Kazakhstan expert group, the problem of personnel training in general is one of the most serious risks in the near future. There is an acute shortage of qualified personnel in the country. Almost 90% of experts believe that the problem of lack of qualified specialists will not be solved in 10-15 years and will remain a key constraint to the development of TLC. The consequences of this risk are the weak pace of development of the region, which is significantly behind the level of world leaders. Accordingly, a strategy to minimize this risk is required, which consists in the redesign of training programs that meet modern requirements, a significant increase in the share of public investment in the development of the industry, revision of bureaucratic schemes for the interaction of international partners..

Materials and methods

The necessity of this study appeared when observing and participating in the personnel development of large companies, exchanging opinions with the heads of companies in various sectors of activity. Subsequent study of information from public data sources, as well as private research, confirmed the extent of the human resource deficit. The method of constant observation and content analysis of documents were used in the research process. When preparing this article, an array of information was formed based on the author's personal experience in personnel management, the experience of managers of some of the leading transportation companies in the Republic of Kazakhstan, as well as

on relevant information from scientific sources and data from state information resources. Regularities in the similarity of opinions among experts about risk management and forecasts of its development were identified. The systematization of the collected material contributed to the identification of the main problems of the current risk policy [23]. The described research methods were chosen as the most appropriate. Logistics is developing rapidly, requiring market players to react to its changes in a timely manner. Top managers of transportation companies are the most important source of information about the current situation. From the obtained conclusions a strategy of actions is built to overcome the problem areas.

Results and discussion

The logistics industry is closely related to planning. The links in the chain of logistics processes, is a set of factors, each of which reacts to the slightest changes in the environment. Some events are subject to planning, some are not, as it is impossible to foresee everything. However, the more processed risks there are in the organization's portfolio, the less unexpected events can interrupt logistics processes and harm their participants. The future of logistics in Kazakhstan depends on competent planning of the general concept of the industry development, taking into account previous experience, current situation, adequate assessment of available resources. It is pointless to count on a comprehensive large-scale technological leap, as Kazakhstan needs to overcome many heterogeneous obstacles and solve a wide range of problems. Nevertheless, innovations are necessary, in many respects they contribute to overcoming these same difficulties, but at the same time they dictate a completely new paradigm of the market of transportation and logistics services, both internal and external. Therefore, the process of technical renewal should be approached with caution, carefully weighing the risks and thinking through the prospects. We should not undertake extremely risky pompous projects based on image prerequisites, but analyze their profitability in detail, not plunge into the total introduction of advanced technologies, but, based on pedantic assessments of their capabilities and adaptability to our realities, organize their consistent dosed integration in accordance with objective needs.

As practice has shown, in some cases Kazakhstan was not ready to make the right decisions in non-standard situations. An example is the transportation collapse that took place in 2020 on the border of Kazakhstan with China. This event was caused by the ban of the company Kazakhstan Temir Zholy on the use of foreign rolling stock. The purpose of this decision was explained as an attempt to support the Kazakhstan railroad sector, as foreign owners of rolling stock are dumping, beating the prices of Kazakhstan owners with a difference of more than 30%. And since Kazakhstan's own resources were insufficient to organize a huge amount of transportation from China for its own imports, China stopped allocating rolling stock for imports to Kazakhstan due to severe time delays on the part of Kazakhstan. In this example, the consequences of the chosen path were incorrectly considered. On the one hand, the aim was to protect the Kazakhstan service provider. The downside is a critical reduction in imports, which affects Kazakhstan manufacturing and entrepreneurship. The severe reduction in the already small number of rolling stock has provoked even more speculative uncontrolled price increases on the ground. The consequences have an impact every day, as a very large volume of imports pass through the China-Kazakhstan border and into Uzbekistan via Kazakh territory. The use of platforms is to pay for the use of the railroad, China and Uzbekistan now make a way to bypass Kazakhstan. This fact is a major negative consequence of ill-conceived risks. From this example we can conclude and revise the current views on the functioning of the logistics industry in Kazakhstan.

From a risk analysis perspective, this situation can be viewed in the following manner. As of the last quarter of 2023, Kazakhstan's railroad transportation authorities have attempted three times to ban the importation of foreign wagons and flatcars. The first stage of risk analysis is to identify the risk itself. In other words, a number of possible consequences are identified. In this case, a complex decision is made to prohibit KTZ from importing and using foreign wagons and platforms. For complex decisions, SWOT analysis comes to the rescue by identifying all sides of the controversial issues. The strength of the decision to ban the import and use of foreign cars and platforms is the strengthening of KTZ's position. Elimination of competition in the form of cheaper services of foreign carriers in the local

rail transportation market will lead to higher prices for rolling stock services for importers. This will result in higher profits for KTZh and an opportunity to regulate other aspects of the market. From this assessment we have the following results. Strengths: increased profits and elimination of competition. Opportunities: opportunity to regulate further pricing policy, support the Kazakhstan railroad sector, as foreign owners of rolling stock are dumping, beating the prices of Kazakhstan owners with a difference of more than 30%. The weaknesses of this decision include the inability of the Kazakhstan transportation industry to absorb the huge volume of goods. Accordingly, Weaknesses: Kazakhstan's own resources were insufficient to organize a huge amount of transportation from China for its own imports. Based on the weaknesses of the current situation, we can deduce potential threats: complete shutdown of China's imports and transit through Kazakhstan due to its inability to master the flow of goods, leading to long-term idling of platforms with cargo at the borders; shutdown of Kazakhstan importers with a complete freezing of contributed assets, lack of funds for staff maintenance, layoffs; disruption of the pace of production dependent on imports of foreign raw materials; disruption of supplies of food and household goods; strategic failure of the Kazakhstan's importing industry; disruptions in the transportation of goods from China for its own imports.

The subsequent stage of assessing the likelihood and severity of risk consequences, judging by several failed attempts by KTZh to introduce bans, either had no effect or the likelihood and consequences of the risk satisfied the expectations of Kazakhstan's railroad transportation management. On the other hand, the subsequent repeal of bans suggests that the overall results were either short-term positive or overly severe. The repetition of risky decisions time after time suggests a weak assessment of the consequences of risk, or its neglect in favor of short-term positive results. Both examples have negative consequences in general on the economy and development of the transportation industry of Kazakhstan and cause a lot of negative reactions from importers, exporters and manufacturers.

The stage of creating a risk mitigation plan took place, although it had a partial effect. Several Russian companies, with which, apparently, there were certain agreements, did not fall under the ban. However, this caused dissatisfaction of the other transport operators at the level of the State Duma of the Russian Federation. Russian operators believe that this measure clearly demonstrates KTZh's interference in the financial and economic activities of domestic companies engaged in cargo transportation, and emphasizes the anti-competitive nature of the convention. Thus, the entire Republic of Kazakhstan, and not its individual stations and shippers, falls within the scope of the convention. Meanwhile, the introduction of prohibitions of this kind along the entire perimeter of the state border belongs to the sphere of national policy and is not the jurisdiction of the economic entity – KTZh.

This situation clearly shows the impact of the decisions made on the future situation, especially when it comes to the state level. On the one hand, Kazakhstan acted in favor of national interests, strengthening the position of national companies. However, the price to be paid for this determines risk management as an integral part of business processes at all levels. The decisions made do not always clearly reflect the goals pursued, there are also hidden motives, but the consequences are reflected in the rest of the market participants. It follows that no one is immune from risk, but it is necessary to provide resources to overcome it. KTZh would have no problem accepting Chinese cargoes if it had sufficient resources to master it. After all, before this ban, there was a certain shortage of transportation even taking into account foreign rolling stock. To avoid such incidents in the future, it is necessary to develop the influence and practical application of risk management with decentralized management, so that decision-making is taken collectively, taking into account all possible consequences. At this stage, control measures and auditing are involved, investigating past decisions and systematizing them, as well as preventing them in the future. Revision of financial strategies to reduce the cost of rolling stock services for domestic participants will eliminate the predominance of foreign rolling stock even without their ban. A developed network of suppliers will eliminate the monopoly of some participants, give an impulse for the development of service quality and price reduction.

The main investments should be directed towards improving transport and logistics infrastructure, automation, digitalization and robotization, as well as human resources and improving the quality of services provided. Investments in automation, robotization and digitalization should result in a technological breakthrough in the organization and regulation of transport flows, warehousing and storage of cargo, transport and logistics infrastructure, as well as in workflow and supply chain

management. A key opportunity for businesses involved in transportation and logistics will be technological re-equipment, which will significantly increase their market potential and the volume of services provided, with a parallel reduction in costs.

Competent risk management and planning tools allow us to hope for the successful development of the transportation and logistics industry, provided we eliminate current problems and prevent future risks. It is especially important to introduce new technologies quickly and smoothly and to take into account all possible socio-economic and political factors. The cross-border nature of TLC makes it necessary to take into account a multitude of unforeseen situations that may arise as a result of decisions taken by other states and changes in the global geopolitical environment [24].

Conclusion

Overall, the article emphasizes that a strategy focused on risk identification is a fundamental element of successful global transportation logistics management. Without a deep and accurate understanding of the risk environment, a business can be vulnerable to unforeseen events, while proactive risk management helps to ensure stability, reliability and competitiveness in the industry. Effectively managing these risks is the key to successful global transportation logistics, and companies are constantly looking for better ways to deal with unexpected events. Practice shows that there is still much to learn – in some cases, theory is often at odds with practice. Risks shape the development of transportation logistics by reducing the likelihood of erroneous decisions that lead to undesirable consequences. Sorting out erroneous actions and their consequences is an effective method for developing processes to ensure that mistakes are not repeated. Over time, an impressive database of risks will be assembled that is easy to learn for both new and experienced practitioners. Dissemination of the science of crisis management will lead to an overall improvement in logisticians' awareness and bring Kazakhstan to a new level of preparedness to confront external and internal unwanted influences of all kinds.

REFERENCES

- 1 Emet GÜREL (2017) SWOT analysis: a theoretical review. Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi. The Journal of International Social Research, pp. 995–996.
- 2 Alan Sarsby. (2012) A Useful Guide to SWOT Analysis. Nottingham, p. 10.
- 3 Team FME. Strategy Skills SWOT Analysis, p. 19.
- 4 Tang O. & Musa N. (2011) Identifying risk issues and research advancements in supply chain risk management. International Journal of Production Economics, pp. 25–34.
- 5 Ritchie B. & Brindley C. (2007) Supply chain risk management and performance: A guiding framework for future development. International Journal of Operations & Production Management, 27(3), pp. 303–322.
- 6 Raj Kamal (2017) Internet of Things OF THINGS. Chennai, p. 28.
- 7 Wagner S.M. & Bode C. (2008) AN EMPIRICAL EXAMINATION OF SUPPLY CHAIN PERFORMANCE ALONG SEVERAL DIMENSIONS OF RISK. Journal of business logistics, 1(29), pp. 307–325.
- 8 Stadler H. & Kilger C. (2008) Supply Chain Management and Advanced Planning. s.l.:Springer.
- 9 Dama-DMBOK: Data Management Body of Knowledge: 2nd Edition. NEW JERSEY, 2017, pp. 21, 248.
- 10 Evropejskaja ekonomicheskaja komissija Organizacii Obedinennyh Nacij. Upravlenie riskami v sistemah normativnogo regulirovanija. N'ju-Jork i Zheneva, 2014, pp. 19–21.
- 11 Nikanorov P.A. (2019) Upravlenie riskami v menedzhmente kachestva. Sankt-Peterburg, p. 161.
- 12 Fawcett S. & Cooper B. (1998) Measurement and Customer Success. Industrial Marketing Management, pp. 341–357.
- 13 Pimenov N.A. (2016) Upravlenie finansovymi riskami v sisteme ekonomicheskoy bezopasnosti. Moskva, p. 54.
- 14 Petrova A.V., Vohmjanina A.V. (2020) Upravlenie cepjami postavok. Ekaterinburg, p. 71–72.
- 15 Tarei P.K., Thakkar J.J. & Nag B. (2020) Benchmarking the relationship between supply chain risk mitigation strategies and practices: an integrated approach. Benchmarking: An International Journal, 27(5), pp. 1683–1715.

- 16 Faisal M.N., Banwet D. & Shankar R. (2007) Information risks management in supply chains: an assessment and mitigation framework. *Journal of Enterprise Information Management*, 20(6), pp. 677–699.
- 17 Vjatkin V.N., Gamza V.A., Maevskij F.V. (2018) Risk-Menedzhment. Moscow, p. 226.
- 18 Manuj I. & Mentzer J.T. (2008) Global supply chain risk management. *Journal of business logistics*, 29(1), pp. 133–155.
- 19 Kartvelishvili V.M., Sviridova O.A. Risk-Menedzhment, metody ocenki riska, pp. 43–45.
- 20 Spencer Pickett K.H. (2013) Auditing the risk management process, p. 141–144.
- 21 Lambert D. & Stock J. (2001) Strategic Logistic Management. In: New York: McGraw-Hill, pp. 476–514.
- 22 Heckmann I., Comes T. & Nickel S. (2015) A critical review on supply chain risk – Definition, measure and modeling. Omega publishing, pp. 119–132.
- 23 Tomlin B. (2006) On the Value of Mitigation and Contingency Strategies for Managing Supply Chain Disruption Risks. *MANAGEMENT SCIENCE*, 52(5), pp. 639–657.
- 24 Trkman P. & McCormack K. (2009) Supply chain risk in turbulent environments – A conceptual model for managing supply chain network risk. *International Journal of Production Economics*, vol. 119, p. 247–258.

АРАСЛАНОВА О.С.

«Rhenus Intermodal Systems»

ЖШС экспорттық тасымалдау бөлімінің бастығы,

050000, Алматы қ., Қазақстан

E-mail: olichka37@mail.ru

**ҚАЗАҚСТАННЫҢ КӨЛІК ЛОГИСТИКАСЫНДА ТӘУЕКЕЛДЕРДІ
БАСҚАРУ СТРАТЕГИЯСЫ МЕН ОЛАРДЫ ТАЛДАУ ӘДІСТЕМЕСІ**

Андатпа

Бұл мақаланы жазудың мақсаты Қазақстанның дамып келе жатқан логистикалық кешені үшін маңызды тақырыпты жариялау. Тәуекелдерді басқару стратегиясын және олардың салдарын зерттеу Қазақстан экономикасын дамытудың ең қысқа және тиімді жолын таңдауда негіз қалаушы құрал. Автор Қазақстандағы тәуекелдерді басқару мәселелеріне және оларды шешуге қатысты өзінің жеке көзқарасын ұсынады. Мақала зерттелетін тақырыптың маңыздылығын көрсете отырып, осы ғылыми сегменттегі бар білім көлемін толықтыруға арналады. Қазақстанның логистикалық саласы басқарудың көптеген заманауи әдістері мен бизнес-процестерді зерттеу алдында тұр. Дағдарысқа қарсы шаралар стратегиясын әзірлеу саланың дамуындағы тоқыраудың алдын алады. Сонымен қатар автор зерттелген материалды Қазақстандағы нақты логистикалық процестермен және оқиғалармен салыстырады. Қателіктермен жұмыс жүргізу өзін-өзі дамытудағы алғашқы қадам. Мақала тәуекелдерді анықтауға, жіктеуге, олардың пайда болу ықтималдығын барынша азайту жөніндегі стратегияларды белгілеуге және салдары болған жағдайда оларды азайтуға тырысады. Зерттеу қорытындысында Қазақстанның дағдарысқа қарсы саясатының кейбір жағдайларда жетілмегендігі туралы факт мойындалды. Сондай-ақ автордың пікірінше, Қазақстанның логистикалық саласын дамытудың басым жолдары қарастырылуда.

Тірек сөздер: көлік логистикасы, тәуекелдерді басқару, тәуекелдерді басқару стратегиялары, SWOT талдауы, деректерді талдау, көлік құралдары, бақылау.

АРАСЛАНОВА О.С.

Руководитель отдела экспортных перевозок,

ТОО «Rhenus Intermodal Systems»,

050000, г. Алматы, Казахстан

E-mail: olichka37@mail.ru

**СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ И МЕТОДИКА
ИХ АНАЛИЗА В ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКЕ КАЗАХСТАНА**

Аннотация

Цель данной статьи – осветить важную тему для развивающегося логистического комплекса Казахстана. Изучение стратегий управления рисками и их последствий является основополагающим инструментом при

выборе кратчайшего и наиболее эффективного пути развития экономики Казахстана. Автор предлагает личный взгляд на проблемы управления рисками в Казахстане и возможные пути их решения. Статья призвана дополнить существующий массив знаний в данном научном сегменте, тем самым подчеркивая важность исследуемой темы. Логистическая отрасль Казахстана стоит на пороге освоения различных современных методов управления и бизнес-процессов. Разработка стратегий антикризисных мер позволит избежать стагнации в развитии отрасли. Параллельно автор сопоставляет изученный материал с реальными логистическими процессами и событиями в Казахстане. Проведение работы над ошибками – первый шаг в саморазвитии. Цель статьи – выявить, классифицировать риски, наметить стратегии минимизации вероятности их возникновения, а в случае их возникновения минимизировать последствия. Выводы исследования включают признание факта несовершенства в ряде случаев антикризисной политики Казахстана, что привело к принятию непродуманных решений, приводящих к нежелательным долгосрочным последствиям. Также рассматриваются приоритетные, по мнению автора, пути развития логистической отрасли в Казахстане.

Ключевые слова: транспортная логистика, управление рисками, стратегии управления рисками, SWOT-анализ, аналитика данных, транспортные средства, контроль.

Information about author

Araslanova Olga

Head of Export Transportation Department, «Rhenus Intermodal Systems» LLP,

Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0009-0003-4693-8256

E-mail: olichka37@mail.ru

Автор туралы мәлімет

Арасланова Ольга

«Rhenus Intermodal Systems» ЖШС экспорттық тасымалдау бөлімінің бастығы,

Алматы қ., Қазақстан

ORCID ID: 0009-0003-4693-8256

E-mail: olichka37@mail.ru

Информация об авторе

Арасланова Ольга

Руководитель отдела экспортных перевозок, ТОО «Rhenus Intermodal Systems»,

г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0009-0003-4693-8256

E-mail: olichka37@mail.ru

**REQUIREMENTS TO THE DESIGN
OF ARTICLES PUBLISHED IN THE JOURNAL KBTU BULLETIN**

Previously **unpublished material by the author (s)** corresponding to the profile of the journal in Russian, Kazakh or English is accepted for publication. The article is provided in electronic format (in formats .doc, .docx,) only by downloading it through the functionality of the journal's website (<https://vestnik.kbtu.edu.kz/jour/about>), which has detailed instructions for authors on the process of submitting articles, as well as on payment for publication.

Mandatory requirements for registration:

- ♦ The MRNTI index is placed in the upper-left corner. (Times New Roman 14 size)
- ♦ One single interval below the authors' surnames and initials in bold. Detailed names of organizations, cities, countries where the work was performed, e-mail of one of the authors. Specify footnotes to the place of work of the authors.
- ♦ Below, in one interval, the full title of the article is in bold.
- ♦ Below, a brief (150-250 words) abstract (abstract) at one interval. Abstract should outline the general orientation of the article and formulate its main results and be self-sufficient, it should not contain references to literary sources or to any sections and elements of the article to which it relates.
- ♦ Key words related to the submitted article.

The text of the article is typed in a straight font Times New Roman, size 14. The line spacing is single. All fields are 2 cm long.

The article should be divided into sections: Introduction, Materials and Methods, Main provisions, Literature review, Results and Discussion, Conclusion, Information on funding (if available).

At the end, a "List of References" is given. Literary references in the text are in square brackets [1]. The list of references is drawn up twice: according to the above GOST. The list should fully correspond to the main text of the article, contain all the works mentioned (and only mentioned) in it. Next, the same list of references should be presented in the generally accepted English transliteration (see the sample of the literature design below).

The article undergoes "blind" review, reviewers are appointed by the editorial board of the journal.

At the end of the article please indicate full name, return address, phone numbers, fax, e-mail address.

The author(s) are responsible for the content of the article. The opinion of the Scientific and Editorial Board does not always coincide with the opinion of the author (authors). The Editorial Board reserves the right to publish or reject articles.

The reference to our edition in reprinting is obligatory.

Our address: **59, Tole Bi St., Almaty, 050000, Kazakhstan-British Technical University.**

Website: <https://vestnik.kbtu.edu.kz/jour/pages/view/EditorialC> Editorial Board.

ЖУРНАЛЫНДА ЖАРИЯЛАНАТЫН МАҚАЛАЛАРДЫ РӘСІМДЕУГЕ ҚОЙЫЛАТЫН ТАЛАПТАР

Жариялау үшін **автормен (авторлармен) бұрын жарияланбаған**, журнал бейініне сәйкес келетін орыс, қазақ немесе ағылшын тілдеріндегі материалдар қабылданады. Мақала журнал сайтының (<https://vestnik.kbtu.edu.kz/jour/about>) функционалдығы арқылы жүктеу жолымен тек электронды форматта (.doc, .docx форматтарында) қабылданады, сайтта авторларға мақаланы жүктеу, ұсыну үрдісі туралы, сондай-ақ жарияланымға ақы төлеу туралы толық нұсқаулық бар.

Ресімдеу бойынша міндетті талаптар:

Жоғарғы сол жақ бұрышта FTAMI индексі жазылады. (Times New Roman 14 өлшем)

♦ Бір бірлік интервалдан кейін авторлардың тегі мен аты-жөні жартылай қалың қаріппен жазылады. Жұмыс орындалған ұйымдардың, қалалардың, елдердің толық атаулары, авторлардың бірінің e-mail поштасы көрсетіледі. Авторлардың жұмыс орнына сілтеме беріледі.

♦ Бір интервалдан кейін мақаланың толық атауы жартылай қалың қаріппен жазылады.

♦ Бір интервалдан кейін қысқаша (150–250 сөз) аңдатпа (abstract) ұсынылады. Аңдатпа мақаланың жалпы бағытын көрсетіп, оның негізгі нәтижелерін тұжырымдауы тиіс, аңдатпада әдеби дереккөздерге де, оған қатысты мақаланың кез-келген бөлімдері мен элементтеріне сілтеме жасауға болмайды.

♦ Ұсынылған мақалаға қатысты кілт сөздер (тірек сөздер) жазылады.

Мақала мәтіні 14 өлшемді Times New Roman шрифтiмен теріледі. Жолдар арасында бірлік интервал сақталады. Шеттер – барлық жағынан 2 см.

Мақала келесі бөлімдерді қамтуы тиіс: Кіріспе, Материалдар және әдістер, Негізгі ережелер, Әдебиетке шолу, Нәтижелер мен талқылау, Қорытынды, Қаржыландыру туралы ақпарат (болған жағдайда көрсетіледі).

Соңында «Әдебиеттер тізімі (References)» жазылады. Мәтіндегі әдеби сілтемелер төртбұрышты жақшада ұсынылады [1]. Әдебиеттер тізімі MEMCT-ке сәйкес екі рет рәсімделеді. Тізім мақаланың негізгі мәтініне толық сәйкес келіп, мақалада аталған (тек аталған) барлық жұмыстарды қамтуы керек. Әрі қарай, дәл осы сілтемелер жалпы қабылданған ағылшын транслитерациясында жазылады.

Мақала «жасырын» рецензиялаудан өтеді, рецензенттерді журналдың редакциялық алқасы тағайындайды.

Мақаланың соңында авторлардың толық аты-жөнін, кері байланыс мекенжайын, телефондар, факс және электрондық пошта мекенжайын (e-mail) жазуыңызды сұраймыз.

Мақаланың мазмұнына автор (авторлар) жауапты. Ғылыми-редакция алқасының пікірі әрдайым автордың (авторлардың) пікірімен сәйкес келе бермейді. Редакция алқасы мақалаларды жариялау немесе қабылдамау құқығын өзіне қалдырады.

Қайта басылым кезінде біздің жарияланымға сілтеме жасау керек.

Мекенжайымыз: **050000, Алматы қ., Төле би көш., 59, Қазақстан-Британ техникалық университеті.**

Сайт: <https://vestnik.kbtu.edu.kz/jour/pages/view/EditorialC> Редакция алқасы.

**ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ,
ПУБЛИКУЕМЫХ В ЖУРНАЛЕ ВЕСТНИК КБТУ**

Для публикации принимается **ранее неопубликованный автором (авторами) материал**, соответствующий профилю журнала, на русском, казахском или английском языках. Статья предоставляется в электронном формате (в форматах .doc, .docx,) только путем ее загрузки через функционал сайта журнала (<https://vestnik.kbtu.edu.kz/jour/about>), в котором имеется подробная инструкция для авторов о процессе подачи статей, а также об оплате публикации.

Обязательные требования по оформлению:

- ♦ В левом верхнем углу ставится индекс МРНТИ (Times New Roman 14 размер).
- ♦ Через один одинарный интервал ниже фамилии и инициалы авторов полужирным шрифтом. Развернутые названия организаций, городов, стран, где выполнена работа, e-mail одного из авторов. Указать сноски на место работы авторов.
- ♦ Ниже через один интервал полное название статьи полужирным шрифтом.
- ♦ Ниже через один интервал краткая (150–250 слов) аннотация (abstract). Аннотация должна обрисовывать общую направленность статьи, формулировать ее основные результаты и быть самодостаточной, в ней недопустимы ссылки ни на литературные источники, ни на какие-либо разделы и элементы статьи, к которой она относится.
- ♦ Ключевые слова (Key words), относящиеся к представляемой статье.

Текст статьи набирается прямым шрифтом Times New Roman, размер 14. Интервал между строками одинарный. Поля все по 2 см.

Статья должна быть разделена на разделы: Введение, Материалы и методы, Основные положения, Обзор литературы, Результаты и обсуждение, Заключение, Информация о финансировании (при наличии).

В конце дается «Список литературы (References)». Литературные ссылки в тексте в квадратных скобках [1]. Список литературы оформляется дважды: согласно ГОСТу. Список должен полностью соответствовать основному тексту статьи, содержать все упомянутые (и только упомянутые) в нем работы. Далее тот же список литературы представить в общепринятой английской транслитерации.

Статья проходит «слепое» рецензирование, рецензенты назначаются редколлегией журнала.

В конце статьи просим указать Ф.И.О. полностью, обратный адрес, телефоны, факс, адрес электронной почты (e-mail).

Ответственность за содержание статьи несет автор (авторы). Мнение Научно-редакционного совета не всегда совпадает с мнением автора (авторов). Редакционный совет оставляет за собой право публикации или отклонения статей.

Ссылка на наше издание при перепечатке обязательна.

Наш адрес: **050000, г. Алматы, ул. Толе Би, 59, Казахстанско-Британский технический университет.**

Сайт: <https://vestnik.kbtu.edu.kz/jour/pages/view/EditorialC> Редакционная коллегия.

ҚАЗАҚСТАН-БРИТАН ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ХАБАРШЫСЫ
HERALD
OF THE KAZAKH-BRITISH TECHNICAL UNIVERSITY
ВЕСТНИК
КАЗАХСТАНСКО-БРИТАНСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Ответственный за выпуск
Алагузов Рашид Жуманович

Редакторы
Кабылдаева Толганай Кайсаровна,
Скуратова Ирина Михайловна

Компьютерная верстка
Жадыранова Гульнур Даутбековна

Подписано в печать 15.12.2023 г.
Тираж 300 экз. Формат 60х84 1/16.
Бумага тип. Уч.-изд.л. 3,5 Заказ №195

Редакция журнала «Вестник КБТУ» не несет ответственность за содержание публикуемых статей. Содержания статей целиком принадлежат авторам, и размещаются в журнале исключительно под их ответственность.

Издание Казахстанско-Британского технического университета
Издательский центр КБТУ, Алматы, ул. Толе би, 59

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК
