

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 21, Issue 2
April–June 2024

**ҚАЗАҚСТАН-БРИТАН
ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ХАБАРШЫСЫ**

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

**ВЕСТНИК
КАЗАХСТАНСКО-БРИТАНСКОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Алматы
№ 2 (69) 2024 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, 2024

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.
- Uvalieva I.M.** - PhD, Professor at the Faculty of Computer Science, EKTU named after D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, 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, Assistant Professor, School of Materials Science and Green Technology 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;
Pyas Muhammad - PhD, профессор, «ҚБТУ» АҚ Ақпараттық технологиялар және инженерия мектебі, Алматы қ., Қазақстан.
Увалиева И.М. - PhD, компьютерлік ғылымдар факультетінің профессоры, Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ, Өскемен 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, Ассистент-профессор, «ҚБТУ» АҚ Материалтану және жасыл технологиялар мектебі, 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»

- Акжалова 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.
- Увалиева И.М.** - PhD, профессор факультета компьютерных наук, ВКТУ им. Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 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, Ассистент-профессор, Школа материаловедения и зеленых технологий 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

Amangeldy I.S., Bissembayev A.S. Enhancing operational efficiency in industry 4.0: a predictive maintenance approach.....	10
Daineko Ye., Ipalakova M., Tsoy D., Bolatov Zh. Use of immersive technology for Digital Healthcare Products Development.....	19
Samigulin T.I., Mlikova K.A., Tolengutov R.R., Butakova D.A., Nakhimov A.Z., Qasobov G.L. Development of a mobile robot platform for smart warehouse management system	28
Nam D., Pak A. Comparative analysis of U-Net, U-Net++, TransUNet and Swin-UNet for lung X-ray segmentation	42
Uvaliyeva I.M., Zhenyssov A.E., Shaikhanova A.K. Development of a document management system for an enterprise based on business process modeling.....	54
Uvaliyeva I., Rustamov S., Belginova S., Rakhmetullina Zh. Development of a web application for data analysis and visualization to ensure the safety of technological processes	65
Черикбаева Л.Ш., Мукажанов Н.К. Алибиева Ж.М. Адилжанова С.А., Тюленбердинова Г.А.Сақыпбекова М.Ж. Регулизация мен коассоциациялық матрицаны пайдалана отырып нашар бақыланатын регрессия есебін шешу.....	83
Amanov A. Invariant polynomials with applications to quantum computing.....	95

2 МАТЕМАТИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Кадирбаева Ж.М., Темешева С.М., Минглибаева Б.Б., Шаймерден Н.М. Импульсті жүктелген дифференциалдық теңдеулер үшін параметрлі шеттік есепті сандық шешу	106
Kazin A., Kadyrov Sh. Fractal geometry and level sets in continued fractions.....	116
Майер Ф.Ф., Тасанов М.Г., Утемисова А.А., Ысмағұл Р.С. Точные оценки регулярных функций и радиусы выпуклости и звездообразности некоторых классов звездообразных и почти звездообразных функций	127
Shalymova A.E., Issakhov A.A. Numerical modeling of oil and petroleum products distribution in case of an emergency spill on the water surface.....	139
Нигметова А., Исахов А. Математическое моделирование ветрового потока и переноса загрязняющих примесей с целью прогнозирования экологической обстановки на селитебных территориях	152
Турсубекова У.К., Алтынбек С.А. Кез келген ақырлы өріс алмастыруларын құру әдістері және олардың сызықтық сипаттамасы	170
Айнакеева Н.Ж. Динамика термоупругого стержня при нестационарных тепловых и силовых воздействиях	181
Manapova A. Beketayeva A. Makarov V. PRE-conditioning method for substantially subsonic flows	193

3 ФИЗИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Meirambekuly N., Bagdatuly B., Tolegen A., Kadyrkhan D., Rakhmetbayeva A., Askarbekov I., Geroyeva Zh., Serik A.</i>	
Computer modeling of antennas for small spacecrafts	207
<i>Жасасынов Е., Қуанышбеков Т., Сағдоллин Ж., Ақатан Қ., Түлегенова М., Төлепов Ж.</i>	
Белсендірілген көмірден хаммерс әдісі арқылы графен оксидін (го) алу және оны зерттеу	217
<i>Аймашева Ж., Исмаилов Д.В., Грищенко В.Ф., Stefano Bellucci, Партизан Г., Коштыбаев Т.Б.</i>	
Микро және нано микро материалдардың пиротехникада қолданылуы	229
<i>Жаңабай Н.Ж., Ибраимова Ұ.Б., Сулейменов У.С., Буганова С.Н., Утелбаева А.Б.</i>	
Газодинамические процессы, происходящие при разрушении газопроводов, и методы их анализа	238
<i>Оразбаев С.А., Джунусбеков Е.Ж., Евлов А.А., Курмашева А.К.</i>	
Новый гибридный светодиодный драйвер	255
<i>Amirbekova G.S., Tolepov ZH.K., Guseinov N., Tulegenova M.A. Orynбай B.G., Koshtybayev T., Otarbay ZH.</i>	
Control of the sizes of lead sulfide (PbS) nanoparticles by plasma treatment method	266
<i>Калкызова Ж.К., Балгимбаева У.А., Серикканов А.С., Абдуллин Х.А.</i>	
Синтез гидрокси-карбонатов цинка, кобальта и меди для создания электрохимического неферментативного сенсора глюкозы	273
<i>Идинов М.Т., Козловский А.Л., Касымов А.Б., Градобоев А.В.</i>	
Изучение устойчивости Cu(Co,Ni)Bi ₂ O ₄ пленок к коррозии при воздействии с агрессивными средами	281

4 МҰНАЙ ГАЗ ИНЖЕНЕРИЯСЫ ЖӘНЕ ГЕОЛОГИЯ НЕФТЕГАЗОВАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ГЕОЛОГИЯ

<i>Кожгаулов С.О., Сальников В.Г., Байдаулетова Г.К.</i>	
Сравнительный анализ загрязнения атмосферы регионов Западного Казахстана	295
<i>Аманжолова Р., Аденова Д., Аманжолов К., Мурат Д., Дүйсебек Б., Сагин Ж., Сарсекова Д., Орунбаев С., Алиев М.</i>	
Изучение гидрогеологии Кыргызстана – Казахстана для внедрения водородно-водного рынка	307
<i>Junyi Zhang, Hongbin Yang, Yufei Zheng, Bin Zhang, Bo Zhang, Xiang Li, Huazheng Wang</i>	
Research progress on the effect of nanoparticles on foam stability	324

5 ЭКОНОМИКА ЖӘНЕ БИЗНЕС ЭКОНОМИКА И БИЗНЕС

<i>Abdykhalymov K., Bolatova M., Omarbekova G., Pak S., Bekbaeva A.E., Keser E.,</i>	
The significance of implementing effective human resource management	334
<i>Saulen A.N., Yesmurzaeva A.,</i>	
The influence of macroeconomic factors on the total annual volume of investments in PPP projects	345
<i>Hamdy Mohamed Abdelrady Mohamed</i>	
Success factors of projects in global companies	353
<i>Hamdy Mohamed Abdelrady Mohamed</i>	
The role of environmental accounting in achieving sustainable development: evidence from Kazakhstan	364

CONTENTS

1 COMPUTER SCIENCE

Amangeldy I.S., Bissembayev A.S. Enhancing operational efficiency in industry 4.0: a predictive maintenance approach.....	10
Daineko Ye., Ipalakova M., Tsoy D., Bolatov Zh. Use of immersive technology for Digital Healthcare Products Development.....	19
Samigulin T.I., Mlikova K.A., Tolengutov R.R., Butakova D.A., Nakhimov A.Z., Qasobov G.L. Development of a mobile robot platform for smart warehouse management system	28
Nam D., Pak A. Comparative analysis of U-Net, U-Net++, TransUNet and Swin-UNET for lung X-ray segmentation	42
Uvaliyeva I.M., Zhenyssov A.E., Shaikhanova A.K. Development of a document management system for an enterprise based on business process modeling.....	54
Uvaliyeva I., Rustamov S., Belginova S., Rakhmetullina Zh. Development of a web application for data analysis and visualization to ensure the safety of technological processes	65
Cherikbayeva L.Ch., Mukazhanov N.K., Alibiyeva Zhibek, Adilzhanova S.A., Tyulepberdinova G.A. Solution to the problem weakly controlled regression using coassociation matrix and regularization	83
Amanov A. Invariant polynomials with applications to quantum computing.....	95

2 MATHEMATICAL SCIENCES

Kadimbayeva Zh.M., Temesheva S.M., Minglibayeva B.B., Shaimerden N.M. Numerical solution of a boundary value problem with a parameter for impulsive loaded differential equations	106
Kazin A., Kadyrov Sh. Fractal geometry and level sets in continued fractions.....	116
Maiyer F.F., Tastanov M.G., Utemissova A.A., Ysmagul R.S. Exact estimates of regular functions and radii of convexity and starlikeness of some classes of starlike and close-to-starlike functions	127
Shalymova A.E., Issakhov A.A. Numerical modeling of oil and petroleum products distribution in case of an emergency spill on the water surface.....	139
Nygmetova A., Issakhov A.A. Mathematical modeling of the wind flow and the transfer of pollutants in order to predict the environmental situation in residential areas.....	152
Turusbekova U.K., Altynbek S.A. Methods for constructing permutations of an arbitrary finite field and their linear characteristics.....	170
Ainakeyeva N.Zh. Dynamics of a thermoelastic rod under unsteady thermal and force influences	181
Manapova A. Beketayeva A. Makarov V. PRE-conditioning method for substantially subsonic flows	193

3 PHYSICAL SCIENCES

<i>Meirambekuly N., Bagdatuly B., Tolegen A., Kadyrkhan D., Rakhmetbayeva A., Askarbekov I., Geroyeva Zh., Serik A.</i> Computer modeling of antennas for small spacecrafts	207
<i>Zhasasynov E., Kuanyshbekov T., Sagdollin Zh., Akatan K., Tulegenova M., Zhandos T.</i> Production of graphene oxide (go) from activated carbon by the hammers method and its study	217
<i>Aimasheva Zh., Ismailov D.V., Grishenko V.F., Stefano Bellucci, Partizan G., Koshtibayev T.B.</i> <i>Micro- and nanomaterials in pyrotechnics</i>	229
<i>Zhangabay N.Zh., Ibraimova U.B., Suleimenov U.S., Buganova S.H., Utelbayeva A.B.</i> Gas-dynamic processes occurring during the destruction of gas pipelines and methods of their analysis	238
<i>Orazbayev S.A., Dzhanusbekov E.ZH., Evloev A.A., Kurmasheva A.A.</i> A new hybrid led driver	255
<i>Amirbekova G.S., Tolepov ZH.K., Guseinov N., Tulegenova M.A. Orynbai B.G., Koshtybayev T., Otarbay ZH.</i> Control of the sizes of lead sulfide (PbS) nanoparticles by plasma treatment method	266
<i>Kalkozova Zh.K., Balgimbayeva U.A., Serikkanov A.S., Abdullin Kh.A.,</i> Synthesis of zinc, cobalt and copper hydroxy-carbonates for creation of electrochemical non-enzymatic glucose sensor	273
<i>Idinov M.T., Kozlovskiy A.L., Kasymov A.B., Gradoboev A.V.</i> Study of the corrosion resistance of Cu(Co,Ni)Bi ₂ O ₄ films when exposed to aggressive environments	281

4 OIL AND GAS ENGINEERING, GEOLOGY

<i>Kozhagulov S.O., Salnikov V.G., Baidauletova G.K.</i> Comparative analysis of atmosphere pollution in Western Kazakhstan regions	295
<i>Amanzholova R., Adenova D., Amanzholov K., Murat D., Dujsebek B., Sagin Zh. Sarsekova D., Orunbaev S., Aliev M.</i> Hydrogeology of Kyrgyzstan-Kazakhstan exploration for hydrogen-water market development	307
<i>Junyi Zhang, Hongbin Yang, Yufei Zheng, Bin Zhang, Bo Zhang, Xiang Li, Huazheng Wang</i> Research progress on the effect of nanoparticles on foam stability	324

5 ECONOMY AND BUSINESS

<i>Abdykhalykov K., Bolatova M., Omarbekova G., Pak S.</i> The significance of implementing effective human resource management	334
<i>Bekbaeva A.E., Keser E.</i> The influence of macroeconomic factors on the total annual volume of investments in PPP projects	345
<i>Saulen A.N., Yesmurzayeva A.</i> Success factors of projects in global companies	353
<i>Hamdy Mohamed Abdelrady Mohamed</i> The role of environmental accounting in achieving sustainable development: evidence from Kazakhstan	364

COMPUTER SCIENCE
КОМПЬЮТЕРЛІК ҒЫЛЫМДАР
КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ

UDC 004.896
IRSTI 28.19.23

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-10-18>

^{1*}**Amangeldy I.S.,**

Master's student, ORCID ID: 0009-0009-9182-2299, e-mail: il_amangeldy@kbtu.kz

¹**Bissembayev A.S.,**

Professor, ORCID ID: 0009-0001-3283-9826, e-mail: a.bisembaev@kbtu.kz

¹Kazakh-British Technical University, 050000, Almaty, Kazakhstan

**ENHANCING OPERATIONAL EFFICIENCY IN INDUSTRY 4.0:
A PREDICTIVE MAINTENANCE APPROACH****Abstract**

Advancements of Industry 4.0 has revolutionized manufacturing operations, among them predictive maintenance (PdM) acts as one of the most demanding approaches. It effectively optimizes maintenance schedules and ensures efficient and uninterrupted work. Article provides a comprehensive literature review, offering insights into theoretical foundations, historical developments, and practical applications of predictive maintenance. The methodology section explains the research approach in detail, focusing on the development of a MATLAB-based code to generate the predictive model in accordance with the remaining useful life of the machine. Exploration into the application of PdM is made through the establishment of Bayesian Inference model informed by Pearson correlation analysis. This study underscores the possibilities of predictive analytics in enhancing operational accuracy and effectivity across various industries. As the demand for reliable manufacturing processes continues to grow, the findings of this research offer insights into the development of advanced PdM strategies and achievement of operational excellence in terms of smart manufacturing.

Key words: predictive maintenance (PdM), remaining useful life (RUL), industry 4.0, reliability.

Introduction

Over the past few years, our world in terms of technology has significantly changed, with the great contribution from the Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0). It introduces a completely new approach to manufacturing operations, that is mainly based on the massive introduction of information technology, large-scale automation, and emergence of artificial intelligence. Many studies show that the concept of Industry 4.0 is directed to reduce expenditures, effectively manage resources, and increase the production time and quality [1].

The high level of competitiveness encourages companies to develop effective enterprise strategies, shift from traditional manufacturing methods into smart manufacturing. Smart factory is defined as a factory, where each equipment is linked over the Internet to exchange data with each other, thus providing full representation of operations and achieving safe, faster, and efficient control [2]. One of the key branches in the context of this approach, is predictive maintenance. This is becoming an inevitable tendency for many companies, as it provides a reliable solution for the management of equipment's "health status" [3]. Predictive maintenance models are mostly used as tools for early detection of anomalies. Thorough analysis of relevant data from critical equipment, detection of correlations between sensors, usage of historical data and visual analysis can provide a clear schedule and reduce unnecessary maintenance costs [4].

Companies from a wide variety of economic sectors and industries – be it oil and gas, metallurgy, food and beverage production, etc. – are actively seeking to modernize their production facilities with the introduction of digital technologies. They are particularly interested in the use of predictive analytics to anticipate future failures and optimize work processes, as the tendency shows that the traditional methods apply only after a failure occurred [5]. Current situation in Kazakhstan, especially recent news, show that country's facilities do not have any specific maintenance strategy. In example, the situation in thermal power plant in Ekibastuz. The high level of equipment wears and no clear maintenance, repair, and overhaul strategy, have led to a large-scale accident, which left most of the city without heat supply at air temperature down to minus 30 degrees [6]. This example is a great proof that the plants need to be modernized and digitalized.

Overall, the topic of predictive maintenance is not new. The bibliometric analysis of the Scopus database shows that there have been published research works from the 1980s. Figure 1 indicates that the analysis has yielded a comprehensive collection of 20 187 scholarly documents, with the growing trend. This means that with each year, interest towards this field of study has become more popular. Analysis of documents by subject area shows that a quarter of articles contributed to the field of engineering, while medicine and computer science occupy about 15% each.

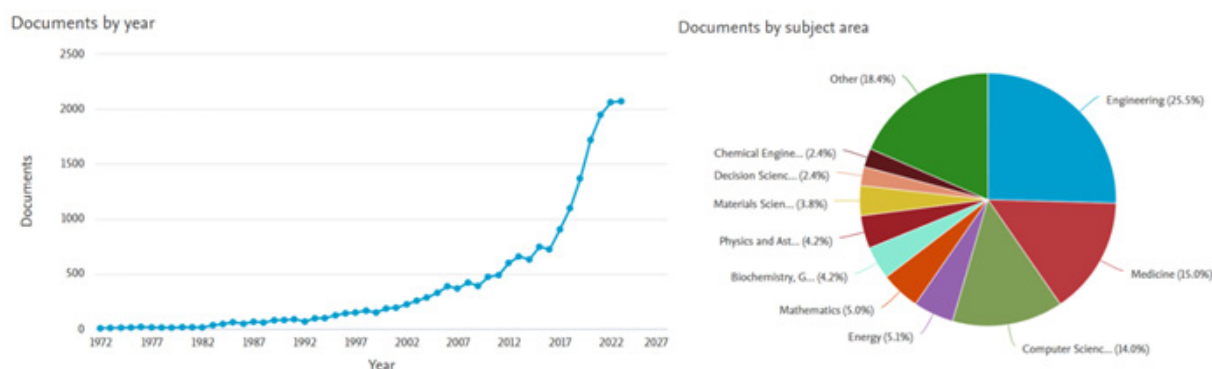


Figure 1 – Bibliometric Analysis

Literature Review

To uncover foundational theories and pivotal studies on the topic of predictive maintenance, exploration of the vast landscape of scholarly research is made in the section of literature review.

In the article [7], authors provide a systematic review on PdM application within Industry 4.0 across different manufacturing sectors. The main object of the study is to categorize maintenance by solutions and identify impact on operational efficiency. Researchers were able to determine that the data-driven applications are most common, which was proven through increasing interest in recent years in sectors, such as machinery, equipment manufacturing etc. Zhang et al. conducted a survey on the methods of predictive maintenance, which are model-based, knowledge-based, and data-driven

prognosis [2]. Various factors, such as technological readiness, practical implementation, prove that the data-driven method is the most efficient as well as, the most widespread method in terms of PdM. This approach is based on analysis of historical and real-time data from sensors to further identify the patterns that show potential failures [8].

Article [9] showcases general overview of predictive maintenance. Authors explained in detail the life cycle of the solution implementation. Figure 2 demonstrates that the process initially starts with data collection (gathering necessary information), data pre-processing (determining relevant data), and model training for further establishment.

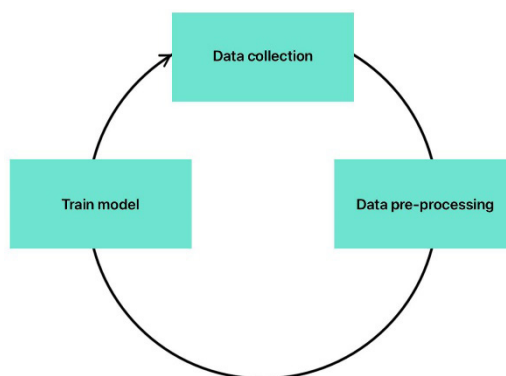


Figure 2 – Lifecycle

The main purpose of PdM is to reduce expenses by minimizing the time of repair, and by avoiding unnecessary maintenance works [10]. In terms of this perspective, Lie et al. outlines that prediction recognizes the failure with focus on identifying the leading cause of the fault to avoid similar problems in the future [11]. Analysis of healthy and unhealthy states of machines is helpful for fault prognosis for prediction of remaining useful life (RUL) [12]. RUL is an index for estimating the time left before an equipment reaches the end of its service [13].

In the work of “Challenges and Opportunities of Condition-based Predictive Maintenance: A Review”, authors outline that PdM makes the balance between costs of maintenance and performance [14]. Maintenance is scheduled in accordance with the measures such as efficiency, productivity and remaining useful life (RUL). Zuo et al. established that the physical composition of machines and its failure patterns are closely linked, thus serving as a basis for preventing unexpected issues [15].

There have been many case studies regarding the application of predictive maintenance. One of the examples is the Rolls-Royce company, known for their production of aircraft engines. Implementation of forecasting techniques through the usage of digital platforms, helped company in preventing delays by controlling maintenance requirements [16]. Another great example is Hyundai Motors, the world’s largest manufacturer. The company mainly uses artificial intelligence (AI) to determine vehicle failure based on the sensor detection system, which analyzes vibrations and therefore identifies engine abnormality [17]. The system has been proven to be effective, as the experiment results showcase that the accuracy rate from experts was nearly 9%, while the accuracy of the AI was approximately 10 times bigger [18].

Overall, research papers related to the current topic demonstrates that the trend for predictive analytics is positive and many manufacturing companies show interest in implementing this kind of technologies on their plants.

Methodology

The implementation process of PdM model on a real plant may take up to 6 months in terms of duration, due to internal processes, such as data preparation, pre-modeling, model training, project

execution, service, and maintenance. For much newer plants this may take much longer, because it is necessary to have a historical database with equipment's operation properties. The general project implementation process is shown on the figure below.

Table 1 – Roadmap of the project

№	Stage
1	Data Acquisition Plant documents (P&IDs) Historical database backup Alarm list Maintenance logs, reports
2	Database Preparation Data integrity check Data clean-up Correlation matrix calculation
3	Pre-modeling Equipment definition Healthy periods & validation periods identification
4	Data Modeling & Training Modeling based on identified training periods Model validation
5	Results presentation Data analysis document Identify potential quick wins and actionable insights
6	Project Execution
7	Service & Maintenance

First, the process of establishing predictive maintenance model starts with the data acquisition, where the plant documents, historical database, alarm list etc., are gathered. During this stage data undergoes thorough check, where corrupted data is removed, and dimensionality of the dataset is reduced. The quality of the data directly affects the performance of the model; therefore, it is highly important to keep only relevant information [19].

In the next stages, exploratory analysis is made on the dataset. The relevant sensors are selected based on the correlation, which describes the time-related dependency between sensors [20]. The sensor's mode of operation shows a different behavioral pattern. Modes are divided into 3 categories: 1) period before a long shutdown, 2) period after long shutdown and 2) sensor failure. The figure 5 indicates how the long shutdown is represented.

The crucial factor in the application of PdM is determining correct metrics. As John Schultz, certified maintenance, and reliability professional, said the following: "... to improve something it is necessary to measure it, and to prove the productiveness of the program, clear and compelling data needs to be used" [21]. Based on the analysis of the data, the most important equipment will be chosen. Model will be built considering the historical data. The main algorithm used for the model training is Bayesian Inference, which allows improving model with each addition of newer data [22]. The maintenance algorithms will be implemented as soon as the model is trained and validated after thorough check.

Considering that obtaining real world datasets can be challenging, due to companies' privacy regulations and other reasons, a synthetic dataset is chosen for this research paper. This dataset is designed to emulate real predictive maintenance scenarios that may be encountered in the industry. The dataset contains 10, 000 data points with 14 features, such as temperature, torque, failure type etc.

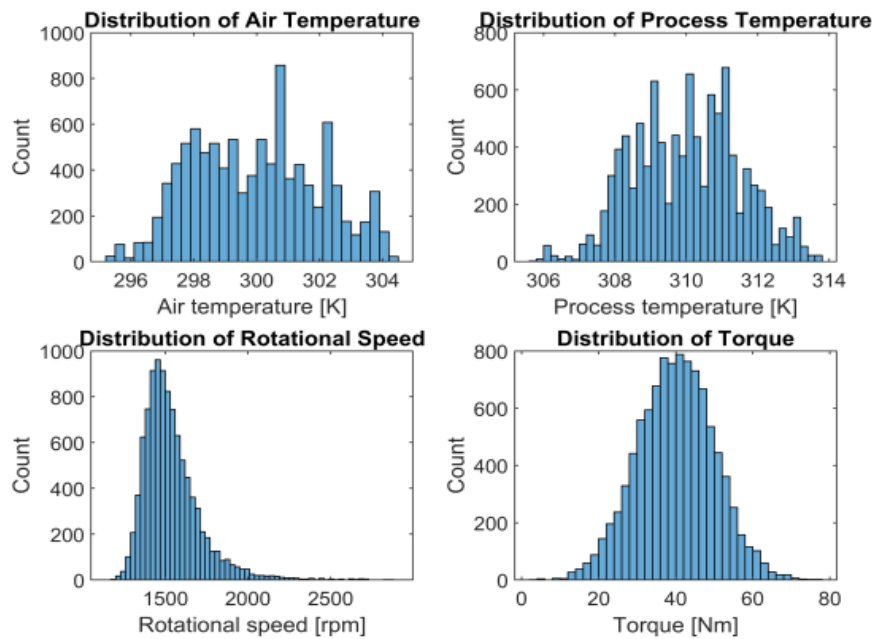


Figure 4 – Dataset visualization

Figure 4 outputs the distribution of key metrics in the dataset. Regarding the air temperature, distribution is normally distributed with a slight skew to the left, which means that there are more observations on the lower end of the temperature range. In comparison, process temperature is more spread out with multiple peaks. The rotational speed has a peak in approximately 1500 rpm, with common operational speed range with variations likely due to operational demands or machine settings. Torque displays a normal distribution, peak is at 40 Nm, with data clustering around the center of the range.

Results and Discussion

In this research, the main programming platform for creating the predictive model is MATLAB, which is widely used by engineers and scientists. As it was mentioned in the methodology section, dataset is prepared and loaded into software in a CSV (Comma-Separated Values) format.

After dataset preprocessing, the Pearson correlation matrix is created, where each correlation coefficient represents the certain relationship: 1 – displays the perfect positive linear relationship, -1 – displays the perfect negative linear relationship, while 0 – showcases no linear relationship [23]. The output of the matrix is demonstrated in the table below.

Table 2 – Pearson Correlation matrix

	Air temp	Process temp	Rotation speed	Torque	Tool wear	Target
Air temp	1.0000	0.8761	0.0227	-0.0138	0.0139	0.0826
Process temp	0.8761	1.0000	0.0193	-0.0141	0.0135	0.0359
Rotational speed	0.0227	0.0193	1.0000	-0.8750	0.0002	-0.0442
Torque	-0.0138	-0.0141	-0.8750	1.0000	-0.0031	0.1913
Tool wear	0.0139	0.0135	0.0002	-0.0031	1.0000	0.1054
Target	0.0826	0.0359	-0.0442	0.1913	0.1054	1.0000

According to the table 1, air and process temperature have a correlation coefficient of 0.8761, which is a strong and positive correlation. Conversely, rotational speed and torque have a correlation coefficient of -0.8750, this shows that as rotational speed increases, torque decreases. As the tool wear increases, equipment tends to have a failure, which is logical. In terms of ‘Target’, in the dataset it is a binary variable that indicates whether maintenance is needed or not. Target has positive correlation with air temperature and torque, with torque being the most relevant predictor for the target among all the other variables in the dataset.

```
X = table2array(data(:, {'AirTemperature_K_', 'ProcessTemperature_K_', 'RotationalSpeed_rpm_', ...  
    'Torque_Nm_', 'ToolWear_min_'}));  
Y = data.Target;  
cv = cvpartition(size(X,1), 'HoldOut', 0.3);  
idx = cv.test;  
XTrain = X(~idx,:);  
YTrain = Y(~idx,:);  
XTest = X(idx,:);  
YTest = Y(idx,:);  
BayesModel = fitcnb(XTrain, YTrain, 'DistributionNames', 'kernel');  
YPred = predict(BayesModel, XTest);
```

Figure 5 – Bayesian Inference Model

Furthermore, the Bayesian inference model is implemented, code part of the model is shown in the figure below. Firstly, the dataset was divided into two groups, where 70% of the data is used for training the model, while remaining 30% would be used for testing the performance of the model. Next, data training is accompanied by the Naïve Bayes classifier, which is considered as a probabilistic classifier that can generate accurate results [24].

```
accuracy = sum(YTest == YPred) / length(YTest);  
fprintf('Model Accuracy: %.2f%%\n', accuracy * 100);
```

Model Accuracy: 96.83%

Figure 6 – Model Evaluation

To evaluate the model, accuracy is calculated. It shows that it is equal to 96.83%, which means that the effectiveness of the model is high. Using predictive maintenance, it was possible to detect sudden anomalies as well as slow changes of the process in systems of multiple highly correlated sensors. Moreover, generation of early warnings for problems which finally lead to unplanned plant shutdowns.

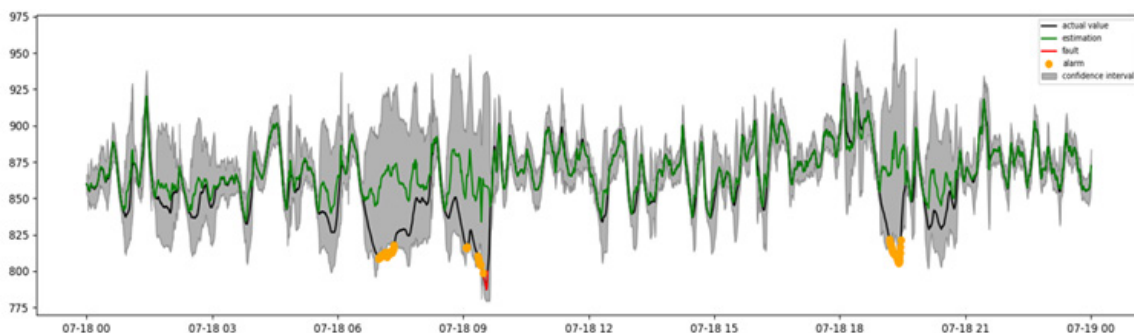


Figure 7 – Prediction visualization

Figure 7 shows the records of the equipment, there are actual values, estimated values, fault, alarm and confidence interval. Enlarged version of is displayed in the figure 8. These figures are used to make a better visualization of the predictive maintenance model.

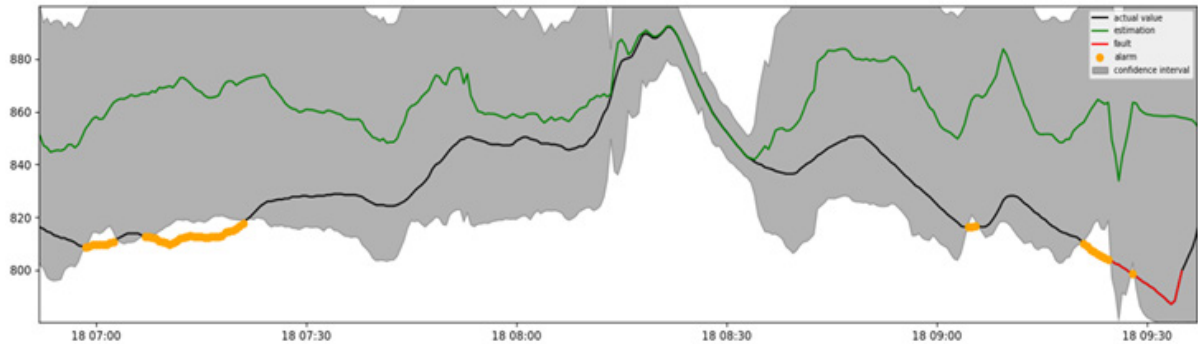


Figure 8 – Enlarged version

The predictive maintenance model generates alarm around 2.5 hours earlier than failure itself occurs. The yellow lines show the first ever alarm happens at 7:00 and at 9:04, with the failure occurring at 9:22. Thus, the figure suggests that the predictive maintenance method works accurately.

Conclusion

Predictive maintenance is an approach that involves usage of data from intellectual sensors and identification of patterns that indicate potential equipment failures. Application of PdM methodologies for equipment failure prediction has proven to be a valuable and effective approach in enhancing the reliability and performance of industrial assets.

Through a systematic analysis of failure modes, their consequences, and the implementation of predictive maintenance strategies, this study aimed to improve the overall equipment reliability and reduce unplanned downtime. As industries embrace advanced technologies and data-driven approaches, the role of PdM in equipment failure prediction becomes increasingly pivotal for achieving sustained operational excellence.

Although many studies performed a successful job in the implementation of software, there are still certain areas that needs more improvements. Manufacturing processes are becoming unpredictable with a high degree of variability and uncertainty. Industrial plants require trouble-free operation with minimum downtime. Thus, it is highly necessary for making further developments in this field of study.

In terms of this research, there are limitations regarding the dataset and model training. For further studies it would be better to establish a predictive maintenance model on a real-life dataset from the working plant. Additionally, connect the predictive maintenance model or realize the prognostic diagnosis with the high-level SCADA systems, as they are directly connected to the equipment and monitored in their own databases.

Overall, this research paper acts as a foundation for making predictions on maintenance, repair and overhaul works on much bigger plants. Tendency demonstrates that the interest towards this is high and will be more in-demand in near future.

REFERENCES

- 1 Alenizi F.A., Abbasi S., Mohammed A.H. and Rahmani A.M. (2023). Computers & Industrial Engineering, vol. 185, p. 109662. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109662>.

- 2 Okeme P.A., Skakun A.D. and Muzalevskii A.R. (2021) Transformation of factory to smart factory, Institute of Electrical and Electronics Engineering In., pp. 1499–1503.
- 3 Zhang W., Yang D. and Wang H. (2019) IEEE Systems Journal, no. 13, pp. 2213–2227. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2905565>.
- 4 Raza A. and Ulansky V. (2017) Procedia CIRP, vol. 59, pp. 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.09.032>.
- 5 Elkateb S., Métwalli A., Shendy A. and Abu-Elanien A. (2024) Alexandria Engineering Journal, vol. 88, pp. 298–309. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.12.065>.
- 6 Fahrutdinov A. (2022). Ekibastuz was left without heat due to an accident at a thermal power plant. Kursiv Media Kazakhstan.
- 7 Mallioris P., Aivazidou E. and Bechtsis D. (2024) CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, vol. 50, pp. 80–103. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.02.003>.
- 8 Gerum P.C., Altay A. and Baykal-Gürsoy M. (2019) Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 107, pp. 137–154. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.07.020>.
- 9 Hurtado J., Salvati D., Semola R., Bosio M. and Lomonaco V. (2023) Intelligent Systems with Applications, vol. 19, p. 200251. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2023.200251>.
- 10 Zonta T., da Costa C.A., Righi R.R., de Lima M.J., da Trindade E.S. and Li G.P. (2020) Computers & Industrial Engineering, vol. 150, p. 106889. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106889>.
- 11 Cossu A., Graffieti G., Pellegrini L., Maltoni D., Bacciu D., Carta A. and Lomonaco V. (2022) Frontiers in Artificial Intelligence, vol. 5. <https://doi.org/10.3389/frai.2022.829842>.
- 12 Lee S. M., Lee D. and Kim Y.S. (2019) The quality management ecosystem for predictive maintenance in the industry 4.0 era. International Journal of Quality Innovation, vol. 5, p. 4.
- 13 Liu J., Hou B., Lu M. and Wang D. (2024) Box-cox transformation based state-space modeling as a unified prognostic framework for degradation linearization and RUL prediction enhancement. Reliability Engineering Safety System, vol. 244, p. 109952.
- 14 Sakib N. and Wuest T. (2018) Challenges and opportunities of condition-based predictive maintenance: a review. Procedia CIRP, vol. 78, pp. 267–272.
- 15 Peng Y., Dong M. and Zuo M.J. (2010) The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 50, pp. 297–313. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2482-0>.
- 16 Spodniak M., Hovanec M. and Korba P. (2024) A novel method for the natural frequency estimation of the jet engine turbine blades based on its dimensions. Heliyon, vol. 10.
- 17 Lee W.J., Wu H., Yun H., Kim H., Jun M. and Sutherland J. (2019) Predictive maintenance of machine tool systems using artificial intelligence techniques applied to machine condition data. Procedia CIRP, vol. 80, pp. 506–511.
- 18 Raj P. (2021) Industrial use cases at the cusp of the IoT and blockchain paradigms, pp. 355–385.
- 19 Huang L., Chen Y., Chen S. and Jiang H. (2012) Application of rcm analysis based predictive maintenance in nuclear power plants. 2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, Chengdu, China, 15-18 June 2012. <https://doi.org/10.1109/ICQR2MSE.2012.6246396>.
- 20 Feng Y., Sun L., Mo Z., Du M., Zhu C., Yang W. and Xu X. (2024) An evaluation of predictive correlations for the terminal rising velocity of a single bubble in quiescent clean liquid. International Journal of Multiphase Flow, vol. 173, p. 104736.
- 21 Shultz J. (2018) Measuring predictive maintenance program success. Reliable Plant.
- 22 Nguyen T.N. and Vilim R. B. (2023) Direct bayesian inference for fault severity assessment in digital-twin-based fault diagnosis. Annals of Nuclear Energy, vol. 194, p. 109932.
- 23 Pawan and Dhiman R. (2023) Electroencephalogram channel selection based on pearson correlation coefficient for motor imagery-brain-computer interface. Measurement: Sensors, vol. 25, p. 100616.
- 24 Fernandes M., Canito A., Bolon-Canedo V., Conceicao L., Praca I. and Marreiros G. (2019) Data analysis and feature selection for predictive maintenance: a case-study in the metallurgical industry. International Journal of Information Management, vol. 46, pp. 252–262.

^{1*}**АМАНГЕЛЬДЫ И.С.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0009-9182-2299, e-mail: il_amangeldy@kbtu.kz

¹**БИСЕМБАЕВ А.С.,**

профессор, ORCID ID: 0009-0001-3283-9826, e-mail: a.bisembaev@kbtu.kz

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

ИНДУСТРИЯ 4.0 ОПЕРАЦИЯЛЫҚ ТИІМДІЛІГІН ЖАҚСARTY: ПРЕДИКТИВТІ ҚЫЗМЕТ КӨРСЕТУ ТӘСІЛІ

Аңдатпа

Индустрия 4.0 жетістіктері предиктивті қызмет көрсету тәсілдерін қамтыған өндірістік операцияларда төңкеріс жасады. Бұл әдіс техникалық қызмет көрсету кестелерін тиімді оптимизациялау және үздіксіз жұмыс істеуін қамтамасыз ету арқылы маңызды тәсілдердің бірі. Зерттеу жұмысында алдын ала техникалық қызмет көрсетудің теориялық негіздері, тарихи оқиғалары және практикалық қолданылуы туралы кешенді әдебиет шолу ұсынылған. Әдістемелік бөлімде жабдықтың қалған қызмет ету мерзіміне сәйкес предиктивті модель жасау үшін MATLAB негізіндегі кодты әзірлеуге назар аударыла отырып, зерттеу тәсілі мұқият түсіндіріледі. Алдын ала техникалық қызмет көрсетуді қолдану зерттеуі Пирсон корреляциялық талдауына негізделген Байес шығармашылығы моделін құру арқылы жүргізіледі. Бұл зерттеу операциялық дәлдік пен тиімділікті әртүрлі салаларда арттыруда болжамдық аналитиканың мүмкіндіктерін атап өтеді. Сенімді өндірістік процестерге сұраныс өсе түскен сайын, бұл зерттеудің нәтижелері техникалық қызмет көрсетудің озық стратегияларын дамыту және интеллектуалды өндірістің тұрғысынан операциялық шеберлікке жету туралы түсінік береді.

Тірек сөздер: предиктивті қызмет көрсету, пайдалы қызмет мерзімі, индустрия 4.0, сенімділік.

^{1*}**АМАНГЕЛЬДЫ И.С.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0009-9182-2299, e-mail: il_amangeldy@kbtu.kz

¹**БИСЕМБАЕВ А.С.,**

профессор, ORCID ID: 0009-0001-3283-9826, e-mail: a.bisembaev@kbtu.kz

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

УЛУЧШЕНИЕ ОПЕРАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В ИНДУСТРИИ 4.0: ПОДХОД ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Аннотация

Достижения индустрии 4.0 произвели революцию в производственных операциях, среди которых присутствует метод предиктивного обслуживания. Данный метод выступает одним из наиболее требовательных подходов за счет эффективной оптимизации графиков технического обслуживания и обеспечения продуктивной и бесперебойной работы. В статье представлен всесторонний обзор литературы, дающий представление о теоретических основах, исторических событиях и практическом применении прогнозного обслуживания. В разделе методологии подробно объясняется подход к исследованию, уделяется особое внимание разработке кода на основе MATLAB для создания прогнозной модели в соответствии с оставшимся сроком службы оборудования. Исследование применения предиктивного обслуживания проводится путем создания модели Байесовского вывода, основанной на корреляционном анализе Пирсона. Это исследование подчеркивает возможности прогнозной аналитики в повышении операционной точности и эффективности в различных отраслях. Поскольку спрос на надежные производственные процессы продолжает расти, результаты этого исследования дают представление о разработке передовых стратегий предиктивного обслуживания и достижении операционного совершенства с точки зрения интеллектуального производства.

Ключевые слова: предиктивное обслуживание, срок полезного использования, индустрия 4.0, надежность.

UDC 004.9
IRSTI 50.41.25

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-19-27>

¹**Daineko Ye.,**

PhD, associate professor, ORCID ID: 0000-0001-6581-2622, e-mail: y.daineko@iitu.edu.kz

¹**Ipalakova M.,**

PhD, associate professor, ORCID ID: 0000-0002-8700-1852, e-mail: m.ipalakova@iitu.edu.kz

¹**Tsoy D.,**

Master of Engineering Science, ORCID ID: 0000-0003-0172-9760, e-mail: tsoy@iitu.edu.kz

¹**Bolatov Zh.,**

Master of Engineering Science, ORCID ID: 0000-0002-1945-8156,
e-mail: zh.bolatov@iitu.edu.kz

¹International Information Technology University, 050040, Almaty, Kazakhstan

USE OF IMMERSIVE TECHNOLOGY FOR DIGITAL HEALTHCARE PRODUCTS DEVELOPMENT

Abstract

Active use of immersive technologies in medicine. The development of IT leads to the emergence of new digital products that are actively used in medicine. Further development leads to the transfer of some medical services to the metaverse – the concept of Metahospital is formed. This article provides a systematic review of research to determine the prevalence and current state of the use of immersive technologies for the development of digital health products. Studies from leading scientific databases were reviewed. The results show that research interest in the use of immersive technologies in medicine has increased significantly over the past ten years, peaking during the pandemic. Immersive technologies are the most common types of technologies used in medicine for training, practical training, telemedicine, and diagnostics. In addition, our own software product is described – a coronary artery stenting simulator using virtual reality technology. A description of the model and the results of a survey on the effectiveness of using immersive technologies among medical school students are provided.

Key words: Unity, eXtended reality, immersive technology.

Introduction

Safe teaching practices for medical students are important for both patients and students. This allows you to develop the necessary skills required when working with patients. Of course, depending on the profile of the physician, the set of skills may vary, but the most common ones are presented in Figure 1 (p. 20).

There are 9 general skills that are necessary for medical staff: communication, critical thinking, technical competence, meticulousness, teamwork, flexibility, empathy, ethical awareness, teamwork. Under perfect conditions all of these have to be developed equally however in real life only some of them are obtained during studying. The most general and common skill is communication. Medical workers need to communicate effectively with patients, their families, and other members of the healthcare team [1]. This includes active listening, empathy, and the ability to convey information clearly and compassionately. Nowadays is complicated to provide medical students with communication skills in a real environment due to many reasons including patient's reluctance to speak with students, privacy of personal information, improper studying program with no content on communication.

Another important skill is critical thinking [2]. Sharp critical thinking allows medical professionals to analyze information, make sound judgments, and solve problems effectively. This is vital for accurate diagnoses, treatment plans, and handling emergencies.

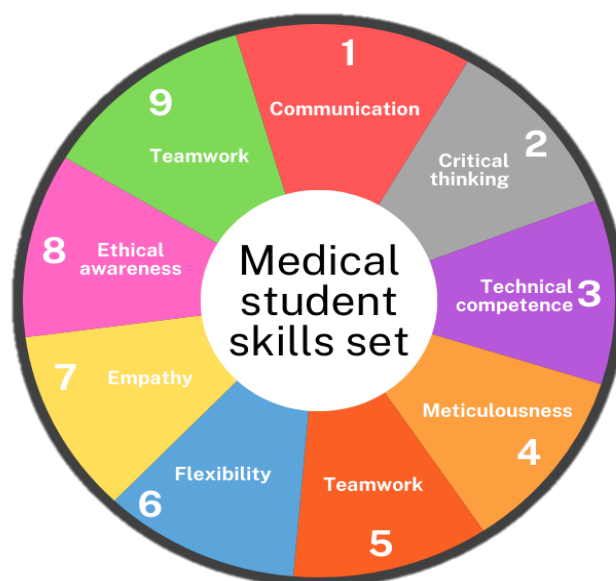


Figure 1 – Medical students' skills set

Also, each medical role requires specific technical expertise [3]. Doctors excel in diagnosis and treatment, while nurses expertly manage patient care, medication administration, and procedures.

Healthcare is a field where precision is paramount. Medical workers meticulously [4] pay attention to detail to ensure accuracy in recording information, administering medications, and following treatment protocols.

Working in team is crucial, as doctors usually work in collaboration with each other to make a diagnosis and treatment prescription as accurate as possible. Effective collaboration is key, requiring open communication, information sharing, and working together to achieve shared goals with saved individual responsibility [5].

The healthcare landscape is constantly evolving. Medical professionals need to be adaptable and flexible [6], adjusting to new protocols, technologies, and patient populations.

Ethical awareness is crucial [7]. Medical workers must uphold ethical principles and standards in interactions with patients and colleagues. This includes patient confidentiality, maintaining professional boundaries, and advocating for patient rights.

Illness and injury can be emotionally taxing. Medical workers demonstrate empathy and compassion, showing sensitivity to the physical and emotional needs of those they care for.

Multiple tasks and responsibilities often come with limited time. Effective time management allows medical professionals to prioritize tasks, stay organized, and deliver care efficiently. In common all of these skills are necessary for a medical professional.

Literature review

The Metahospital concept in the Metaverse represents an innovative view of medicine and healthcare based on the use of advanced digital technologies in treatment, patient communication and education. Metahospital integrates various digital technologies such as artificial intelligence, augmented reality, virtual reality, mixed reality, cloud computing, blockchain and 5G/6G wireless networks. The main aspects of such a metahospital include:

- ♦ Application of advanced technologies such as nanomedicine, quantum medicine, molecular reconstruction of cells and others.

♦ Telemedicine, providing immediate provision of services using immersive reality technologies and artificial intelligence.

- ♦ Digital doctors and artificial intelligence providing instant consultations and diagnostics.
- ♦ Use of artificial organs and tissues to solve the problem of organ deficiency.
- ♦ Genetic optimization to prevent hereditary diseases and improve physiology.
- ♦ Consideration of ethical issues related to confidentiality and potential negative consequences.

For example, research by Zeng and colleagues [8] considers various scenarios for the use of the metaverse in medicine, from surgical treatment to cancer rehabilitation. Cerasa et al [9] propose the use of the metaverse in the treatment of mental illness. The Gruson Group explores the possibilities of laboratory medicine in the Metaverse.

Successful integration of the metaverse and metamedicine laboratories requires additional training and education from scientific societies, educational institutions, and laboratory medicine professionals. Additionally, continued research and large-scale testing are necessary to fully understand the potential of these innovative approaches in medicine.

Despite the development of different versions of metaverses many young surgeons still often learn by observing the operations of more experienced colleagues or participating in them as observers and trainees. However, some countries and institutions are introducing digital simulations to provide additional practice opportunities for students.

The paper presented by Li [10] examines the promising application of virtual reality simulation in medicine. The approach described in the paper is based on creating an environment based on patient data, which facilitates real-life operations. The system interacts directly with clinical data and recreates a model of the heart, providing haptic feedback for realistic training.

Another interesting example presented by Mishvelov [11] also uses patient data to create mixed reality layers that facilitate surgical procedures. This application allows surgeons to work with MRI images of the patient's organs in real time, which significantly increases the efficiency of surgical interventions.

The prototype application developed by researchers [12] combines the reconstruction of organ models with the operation of surgical instruments, providing quick access to necessary information and increasing the efficiency of preoperative planning.

Additionally, a paper by Regrebusly [13] presents a simulation system for training in dual interventional cardiac catheterization, allowing students and junior surgeons to master complex procedures without risk to patients.

Many medical schools create their own simulators and use a wide range of platforms and applications such as Epocrates, Medscape, Touch Surgery, Orcanhealth and others [14–17]. These tools not only support training, but also provide healthcare professionals with access to relevant information and tools to improve the quality of care.

Conjunction of two ideas provides interaction of many people [18] within one digital space and improve the learning outcomes as this experience feels real and tangible.

Some of the works [19] demonstrate necessity of improved mechanisms for accessibility, infrastructure limitations, and maintaining student engagement. As them tend to make these virtual simulations a promising tool for the education.

Authors suggest more careful observation and integration of virtual reality and other modern tools as despite a great potential in telemedicine, but it is still crucial to avoid depersonalization and loss of connection with a real world [20].

Also, in case of medical education it is substantial to adopt technology and approach in a proper manner, including specific learning objectives and student needs [21].

In this work we propose the existing concept of metahospital at International information technology university, Almaty, Kazakhstan.

Main provisions

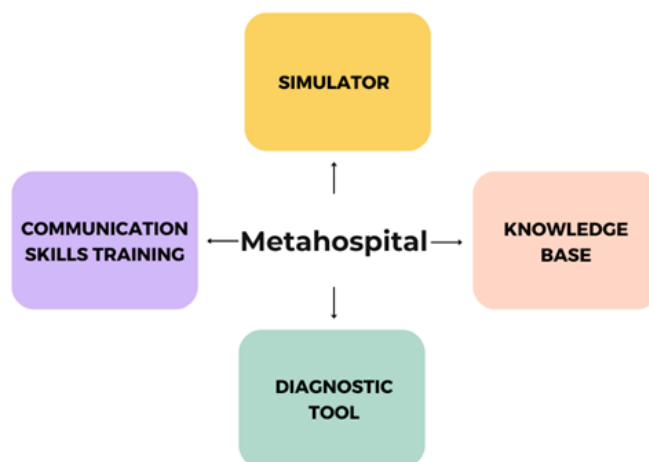


Figure 2 – Metahospital's structure

At IITU the Metahospital concept was created to unify several projects into one general idea. The previous experience of authors in virtual laboratory works development and rapid acceleration of the virtual reality and the sphere as whole nowadays has forced many researchers and creators to the definition of new ideas and meanings under metaverse scope. The proposed idea of metahospital consists of 4 parts as shown in figure 2. Each of them provides user with ability to progress certain skill. The concept has simulator module that is dedicated to the surgery simulations, knowledge base where user can study certain concepts or anatomic issues, then goes module for the communication skills training. It makes it possible to talk with virtual avatars that behave as different patients' type. And the last option is diagnostic tool for the cognitive decrease tracking and early diagnosis of the Alzheimer's disease using specially developed, and VR adopted tests.

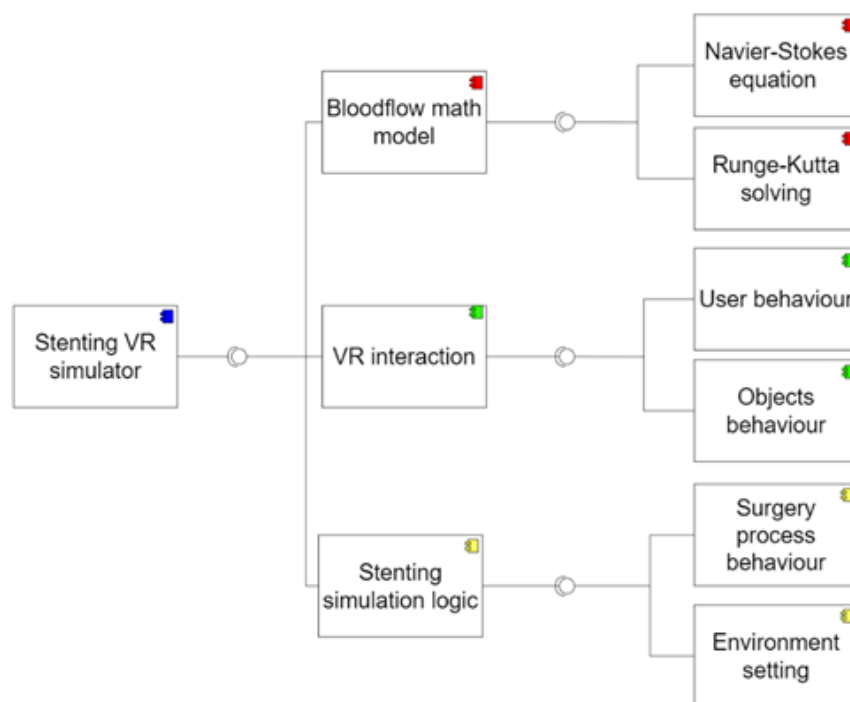
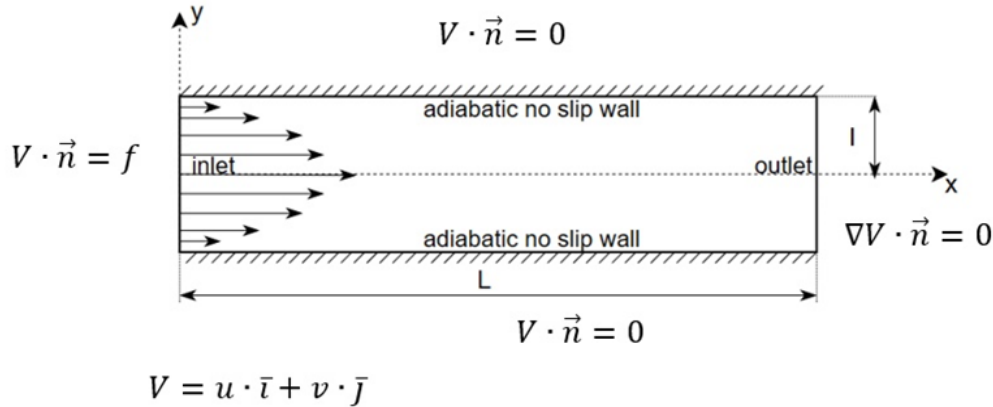


Figure 3 – Angioplasty and stenting simulator component diagram

The simulator contains 3 main components: blood flow model, VR interaction and the stenting simulator logic itself as shown in figure 3. The blood flow model for this case describes the motion of the blood at different velocities of fluid based on the geometry of specific artery. In math terms viscous flows are described using Navier-Stokes equations. The project observes specific case a constantly flowing, compressible fluid with some internal friction (viscous). It's accepted that the flow moves along x-axis, and during the motion meets some separation points using Runge-Kutta approach. The math model domain is described in figure 4. The blood flows from the inlet boundary through the artery and exits from the outlet. Artery's diameter at the inlet is around 6.3 mm, with the length equal to 10 mm.

Figure 4 – Math model domain for the blood flow



The domain of the model is set after the definition of governing equations (1)-(3).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Where u and v -velocity by X and Y axis, ρ -density, P – pressure and v -viscosity.

The VR interaction within the simulator is defined using Meta tools for Unity engine the more details on them are given in Methods and Tools section. However, the more specific communication of the user and environment is defined using scripts that were written by authors.

The stenting simulation is crucial module of the project. Basically, it has two areas for the definition. The first is the procedure of the stenting including the algorithms for the tissues, patient's behaviour, interaction between tools and the user as well as the environment which includes secondary objects as UI elements, audio sources etc.

Materials & methods

By now there is simulation of the stenting procedure and mathematic blood flow model. The implementation of the project in VR is done based on Unity game engine, using XR Meta packages that provide basic interaction within the VR scene. The choice is based on the availability of Meta

Quest 2 HMD at the university, while the picking of Unity is based on its cross-platform deployment feature and wide support among different VR devices producers. For the logic implementation C# programming language is used. The mathematical model was solved using Python.

Results and discussion

For now, the project goes through the stage of merging of all the elements of the metahospital concept. In the figure 5 there is a view on a user's scene where a person can conduct the operation. The scene consists of the user's avatar, the operation room and required tool set. Along with this equipment user's view is provided with screens of the patient's monitor and the coronarography screen where the user can see where his tools are situated in the patient's coronary system.



Figure 5 – The scene view of the simulator

The scene is also provided with an instruction guide in the bottom of the user's view to make the order of procedures to complete the surgery.

To study the demand for similar applications author's conducted survey among medical students at medical school at Shoqan university. The school is provided with different physical simulators that allow to obtain practical skills however along with that they do use VR for emergency block and some other specifications. Also, they have special communication application with different characters having specific anamnesis and diagnosis that should be defined by the student by the end of the interaction.

The survey has shown that even the people that are familiar with technology and have access to equipment and devices do not use it in a full range. However as shown in Figure 6 students evaluate use of VR in surgical studying (62.5%) as useful and find it most profitable for surgery practicing.

Which spheres of medicine you find the most appropriate for the use of Virtual Reality in studying and training

[Additional information](#)

- Surgery
- Therapy
- Reanimation
- Diagnosis
- Others



Figure 6 – Answer of the students on question “Which spheres of medicine you find the most appropriate for the use of Virtual Reality in studying and training?”

Though the use and development of VR application for medical studying provide students with “presence sense” it is also important to consider changing in an educational program. 50% of asked students answered that educational program should include special time slotted for the use of the simulator.

Conclusion

The use of immersive technologies in the development of digital healthcare products has the potential to significantly improve the quality of care and increase patient satisfaction.

Immersive technologies such as virtual reality complement traditional treatment methods by allowing clinicians and patients to interact with data and information in a more visual and understandable way. These innovations not only improve training for medical personnel, but also help patients better understand their conditions and treatments, which can lead to more effective health management and reduced risk of complications.

However, to successfully integrate immersive technologies into digital health products, it is necessary to continue research, develop standards, educational programs and regulation, and ensure that these innovations are accessible and safe for all users. Overall, the promise of immersive technology in digital health products promises significant advances in medicine and improved quality of life for patients.

Acknowledgement

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP14871641).

REFERENCES

- 1 Herur-Raman A. et al. (2021) Next-generation simulation – integrating extended reality technology into medical education, *Frontiers in Virtual Reality*, vol. 2, p. 693399. <https://doi.org/10.3389/frvir.2021.693399>.
- 2 Ho Y.R., Chen B.Y., Li C.M. (2023) Thinking more wisely: using the Socratic method to develop critical thinking skills amongst healthcare students, *BMC medical education*, vol. 23, no. 1, p.173. <https://doi.org/10.1186/s12909-023-03057-8>.
- 3 Suh I., McKinney T., Siu K.C. (2023) Current perspective of metaverse application in medical education, research and patient care, *Virtual Worlds*, vol. 2, no. 2, pp. 115–128. <https://doi.org/10.3390/virtualworlds2020009>.
- 4 Bakhadirova E.M. (2023) THE CRUCIAL ROLE OF LANGUAGE PROFICIENCY IN THE ADVANCED YEARS OF MEDICAL EDUCATION, *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, vol. 3, no. 5, pp. 402–404.
- 5 Bordonaro M. (2024) Too much of a good thing? Teamwork in medical education, *Medical Teacher*, pp. 1–2.
- 6 Nes A.A. G. et al. (2023) A technology-supported guidance model to increase the flexibility, quality, and efficiency of nursing education in clinical practice in Norway: development study of the TOPP-N application prototype, *JMIR Human Factors*, vol. 10, no.1, p. e44101. <https://doi.org/10.2196/44101>.
- 7 Liu Y. et al. (2020) Alignment of ethics curricula in medical education: a student perspective, *Teaching and learning in medicine*, vol. 32, no. 3, pp. 345–351. <https://doi.org/10.1080/10401334.2020.1732163>.
- 8 Zeng Y., Zeng L., Zhang C., Cheng A.S.K. (2022) The metaverse in cancer care: Applications and challenges, *Asia-Pacific Journal of Oncology Nursing*, no. 9, p. 100111. <https://doi.org/10.4103/2347-5625.315835>.
- 9 Cerasa A., Gaggioli A., Marino F., Riva G., Pioggia G. (2022) The promise of the metaverse in mental health: the new era of MEDverse, *Heliyon*, p. e11762. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11762>.
- 10 Li S., Cui J., Hao A., Zhang S., Zhao Q. (2021) Design and Evaluation of Personalized Percutaneous Coronary Intervention Surgery Simulation System, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 27, no. 11, pp. 4150–4160.
- 11 Mishvelov A.E. et al. (2021) Computer-assisted surgery: Virtual-and augmented-reality displays for navigation during planning and performing surgery on large joints, *Pharmacophore*, vol. 12, no. 2, p. 32.

- 12 Wu J.X. et al. (2016) Development of virtual-reality simulator system for minimally invasive surgery (MIS) using fractional-order vascular access. In 2016 SAI Computing Conference (SAI) IEEE, pp. 1257–1259.
- 13 Regrebsubla N. (2016) Determinants of Diffusion of Virtual Reality. GRIN Verlag.
- 14 Medscape. Medscape App. [Online] Available at: <https://www.medscape.com/> (Accessed: 5 January 2024).
- 15 Orca Health. [Online] Available at: <https://orcahealth.com/> (Accessed: 5 January 2024).
- 16 Epocrates. Point of care medical application. [[Online] Available at: <https://www.epocrates.com/> (Accessed: 8 February 2024).
- 17 Touch Surgery. Safe Surgical Care. [Online] Available at: <https://www.touchsurgery.com/> (Accessed: 6 March 2024).
- 18 Wu Q. et al. (2022) Virtual simulation in undergraduate medical education: a scoping review of recent practice, *Frontiers in Medicine*, no. 9, p. 855403.
- 19 Barteit S. et al. (2021) Augmented, mixed, and virtual reality-based head-mounted devices for medical education: systematic review, *JMIR serious games*, vol. 9, no. 3, p. e29080.
- 20 Ahuja A.S. et al. (2023) The digital metaverse: Applications in artificial intelligence, medical education, and integrative health, *Integrative Medicine Research*, vol. 12, no. 1, p. 100917.
- 21 Kassutto S.M., Baston C., Clancy C. (2021) Virtual, augmented, and alternate reality in medical education: socially distanced but fully immersed. *ATS scholar*, vol. 2, no. 4, pp. 651–664.

¹Дайнеко Е.,

PhD, қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0001-6581-2622,
e-mail: y.daineko@iitu.edu.kz

¹Ипалакова М.,

PhD, қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0002-8700-1852,
e-mail: m.ipalakova@iitu.edu.kz

¹Цой Д.,

техника ғылымдарының магистрі, ORCID ID: 0000-0003-0172-9760,
e-mail: tsoy@iitu.edu.kz

¹Болатов Ж.,

техника ғылымдарының магистрі, ORCID ID: 0000-0002-1945-8156,
e-mail: zh.bolatov@iitu.edu.kz

¹Халықаралық Ақпараттық Технологиялар Университеті, 050040, Алматы қ., Қазақстан

САНДЫҚ ДЕНСАУЛЫҚ ӨНІМДЕРІН ӘЗІРЛЕУ ҮШІН ИММЕРСИВТІ ТЕХНОЛОГИЯЛАРДЫ ПАЙДАЛАНУ

Аңдатпа

Медицинада иммерсивті технологияларды белсенді қолдану. АТ дамуы медицинада белсенді қолданылатын жаңа цифрлық өнімдердің пайда болуына әкеледі. Әрі қарай даму нәтижесінде кейбір медициналық қызметтерді метаәлемге көшіріліп, метаөмханға тұжырымдамасы қалыптасады. Бұл мақала денсаулыққа арналған цифрлық өнімдерді әзірлеу үшін иммерсивті технологияларды қолданудың таралуы мен ағымдағы жағдайын анықтау үшін зерттеулерге жүйелі шолу жасайды. Жетекші ғылыми деректер қорынан алынған зерттеулер сараланды. Нәтижелер соңғы он жылда медицинада иммерсивті технологияларды қолдануға ғылыми қызығушылықтың айтарлықтай артып, пандемия кезінде шарықтау шегіне жеткенін көрсетеді. Иммерсивті технологиялар медицинада оқыту, практикалық сабақтар, телемедицина және диагностика үшін қолданылатын технологиялардың ең көп тараған түрлері. Сонымен қатар мақалада біздің жеке бағдарламалық өніміміз сипатталған – виртуалды шындық технологиясын пайдаланатын коронарлық артерияны стенттеу симуляторы. Модельдің сипаттамасы және медициналық университет студенттері арасында иммерсивті технологияларды қолданудың тиімділігі туралы сауалнама нәтижелері ұсынылған.

Түйін сөздер: Unity, eXtended reality, иммерсивті технологиялар.

¹Дайнеко Е.,

ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0001-6581-2622,
e-mail: y.daineko@iitu.edu.kz

¹Ипалакова М.,

PhD, ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0002-8700-1852,
e-mail: m.ipalakova@iitu.edu.kz

¹Цой Д.,

магистр технических наук, ORCID ID: 0000-0003-0172-9760,
e-mail: tsoy@iitu.edu.kz

¹Болатов Ж.,

магистр технических наук, ORCID ID: 0000-0002-1945-8156,
e-mail: zh.bolatov@iitu.edu.kz

¹Международный университет информационных технологий, 050040, г. Алматы, Казахстан

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИММЕРСИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ПРОДУКТОВ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ

Аннотация

Активное использование иммерсивных технологий в медицине. Развитие ИТ приводит к появлению новых цифровых продуктов, которые активно используются в медицине. Дальнейшее развитие приводит к переносу некоторых медицинских услуг в метавселенную – формируется понятие метабольницы. В данной статье приведен систематический обзор исследований, который позволяет определить распространенность и современное состояние использования иммерсивных технологий для разработки цифровых медицинских продуктов. Были изучены исследования из ведущих научных баз данных. Результаты показывают, что исследовательский интерес к использованию иммерсивных технологий в медицине значительно возрос за последние десять лет, достигнув пика в период пандемии. Иммерсивные технологии являются наиболее распространенными видами технологий, используемыми в медицине для обучения, получения практических навыков, телемедицины и диагностики. Кроме того, описан собственный программный продукт – тренажер стентирования коронарных артерий с использованием технологии виртуальной реальности. Приведено описание модели, результаты проведенного опроса по эффективности использования иммерсивных технологий среди учащихся медицинского института.

Ключевые слова: Unity, eXtended reality, иммерсивные технологии.

UDC 004.896
IRSTI 28.23.27

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-28-41>

¹**Samigulin T.I.,**

PhD, Associate Professor, ORCID ID: 0000-0001-9963-6719, e-mail: t.samigulin@kbtu.kz

^{1*}**Mlikova K.A.,**

student, ORCID ID: 0009-0009-5931-7065, e-mail: missmlikovakristina@gmail.com

¹**Tolengutov R.R.,**

student, ORCID ID: 0009-0000-3210-7126, e-mail: mr.rasulcool@mail.ru

¹**Butakova D.A.,**

student, ORCID ID: 0009-0006-8151-4928, e-mail: diana.butakova.13@mail.ru

¹**Nakhimov A.Z.,**

student, ORCID ID: 0009-0009-0092-8208, e-mail: mega.nahimovs5@gmail.com

¹**Qasobov G.L.,**

student, ORCID ID: 0009-0006-0748-998X, e-mail: qasobovgholib@gmail.com

¹Kazakh-British Technical University, 050000, Almaty, Kazakhstan

DEVELOPMENT OF A MOBILE ROBOT PLATFORM FOR SMART WAREHOUSE MANAGEMENT SYSTEM

Abstract

This study examines the TurtleBot3 Waffle Pi mobile robot's integration into warehouse logistics, highlighting its role in enhancing operational efficiency and reducing costs. Central to the research is the development of a Python-based navigation algorithm that employs LIDAR for autonomous navigation, complemented by a novel positioning strategy. This allows the robot to accurately navigate within a predefined imaginary grid, optimizing workflow, minimizing errors, and cutting operational expenses. A custom-designed lifting mechanism, fabricated via 3D printing, is introduced to improve pallet handling, showcasing the synergy between mechanical innovation and robotics. The integration with Wiren Board 7 controllers facilitates seamless operation, further enhanced by connecting the robot to the Honeywell Experion PKS system through OPC UA technology. This connectivity underscores the robot's capability to integrate into existing industrial control frameworks, offering a scalable solution for modernizing warehouse operations. Focusing on Kazakhstan's logistics sector, the application of such technologies demonstrates significant potential to elevate operational efficiency and competitiveness on a national scale. The study emphasizes the critical role of robotics and advanced control systems in logistics, advocating for further technological advancements to support economic growth and sustainability.

Key words: mobile robot, smart warehouse, warehouse management system, TurtleBot3, navigation, robotization.

Introduction

In the dynamic landscape of the 21st century, where technological advancements and automation redefine boundaries, the emergence of Smart Warehouse Management Systems signifies a pivotal shift towards operational efficiency, convenience, and environmental sustainability. Central to this evolution is the integration of robotics and intelligent automation technologies, which are set to transform traditional logistics and warehouse management practices.

This article explores the advent of the Smart Warehouse, a sophisticated paradigm in warehouse management that marries robotics, artificial intelligence (AI), and Internet of Things (IoT) technologies. The aim is to enhance the efficiency, cost-effectiveness, and adaptability of warehouse operations to meet the demands of contemporary commerce. By deploying mobile robots equipped with state-of-the-art sensors and AI-driven algorithms, these systems evolve warehouses into agile,

self-optimizing entities capable of real-time adaptation to fluctuating demands and operational priorities. The impetus for this shift is the escalating pressures on the global logistics sector, driven by the exponential growth of e-commerce and heightened consumer expectations for rapid, accurate deliveries. Traditional warehousing approaches frequently fall short under these conditions, leading to operational bottlenecks, errors, and elevated costs. In response, the concept of Smart Warehouses with Mobile Robots emerges as a strategic solution to these challenges, offering a pathway to streamline operations, mitigate inefficiencies, and enhance delivery precision. Focusing on Kazakhstan, a nation poised strategically on the Eurasian trade corridors, the urgency for adopting technologically advanced logistics solutions is underscored. The country's expansive geography and pivotal economic position amplify the potential benefits of Smart Warehouse systems. Such innovations promise to refine goods distribution, lower transport expenses, improve inventory control, and catalyze economic advancement.

This research delves into the integration of the TurtleBot 3 Waffle Pi mobile robot within the Smart Warehouse ecosystem. Highlighting its Python-based navigation algorithm, custom-designed lifting mechanisms, and seamless connectivity to control systems via OPC UA technology, the article illustrates the robot's role in enhancing warehouse functionality. It positions the TurtleBot 3 Waffle Pi as a linchpin in the transition towards intelligent, automated warehousing solutions in Kazakhstan, with broader implications for global logistics practices.

Literature Review

The issue of warehouse management is becoming increasingly pressing by the day. Research conducted in China has revealed that the efficiency of the logistics industry is struggling to keep pace with rapid changes, leading to diminished goods turnover and adversely affecting the national economy. A promising solution to fully address this challenge lies in the realm of intelligent logistics. This approach aims to enhance the analytical capabilities of the logistics system, decision-making processes, and “intelligent execution through smart equipment”. Moreover, it seeks to elevate the level of intelligence and automation across the entire logistics system, offering a strategic pathway to overcome existing limitations and drive significant improvements in warehouse operations [1]. Similar conclusions were reached following an analysis of Warehouse Management Systems (WMS) within major distribution companies in Bosnia and Herzegovina [2] and the third-party logistics industry in Sri Lanka [3]. Furthermore, the application of IoT technologies in warehouses storing harvests in India has provided a solution to the issue of rapid crop deterioration, significantly enhancing the efficiency of agricultural operations [4–6]. Additionally, beyond localized monitoring systems, comprehensive complexes for warehouse management are being developed: automated systems for searching, storing, and retrieving that both receive and dispatch goods [7, 8]. Moreover, these comprehensive systems can be augmented through the integration of cloud service technologies [9, 10]. In addition to monitoring and search systems that utilize static robotic manipulators for moving items, the deployment of mobile devices is becoming more prevalent. These include intelligent hand carts [11], mobile platforms [12], and unmanned ground vehicles (UGVs) [13]. As a method for localization, RFID tags are employed [14]. This method has proven to be quite reliable; the robot is capable of localizing itself with an error margin of less than 10 cm and an orientation error of less than 0.4 radians in 80% of instances [15]. It is noteworthy to mention the MONITOR project, developed by a research group from the University of Pisa, which introduced an RFID robot designed for clothing inventory purposes [16]. To address localization challenges, this robot was equipped with moving antennas [17], and a function for 3D localization was developed [18]. This innovation represents a significant advancement in the field of warehouse automation, particularly in the context of managing apparel inventories.

However, the process of integrating IoT into industrial and logistics sectors is ongoing, leading to the emergence of new methods for device communication [19] and the development of solutions aimed at optimizing robot operations [20]. This continual evolution signifies a transformative phase

in which connectivity and smart technologies are fundamentally reshaping the operational landscapes of warehouses and supply chains.

Drawing from the facts outlined above, it can be concluded that the process of integrating new technologies into warehouses is highly complex, necessitating extensive research, calculations, and prototype testing. However, the outcome of this intricate process promises to address significant logistics challenges, leading to economic growth, particularly in the territory of the Republic of Kazakhstan.

Statement of the problem is to develop of a mobile robot equipped with a lifting mechanism for raising pallets within the framework of a smart warehouse system.

Main Provision

The TurtleBot3 Waffle Pi is integral to smart warehouse innovation, excelling in SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), Navigation, and Manipulation. It autonomously navigates warehouses using SLAM, accurately mapping its surroundings, and locating itself. As shown in Figure 1, a scalable structure of the TurtleBot3 Waffle Pi refers to the design and architecture of the robot that allows for easy expansion or customization to accommodate additional components, sensors, or accessories. This flexibility in the robot's structure enables users to adapt and modify it according to their specific needs and requirements. It often involves standardized interfaces, mounting points, and connectors to seamlessly integrate new hardware or extend the robot's capabilities while maintaining stability and performance.

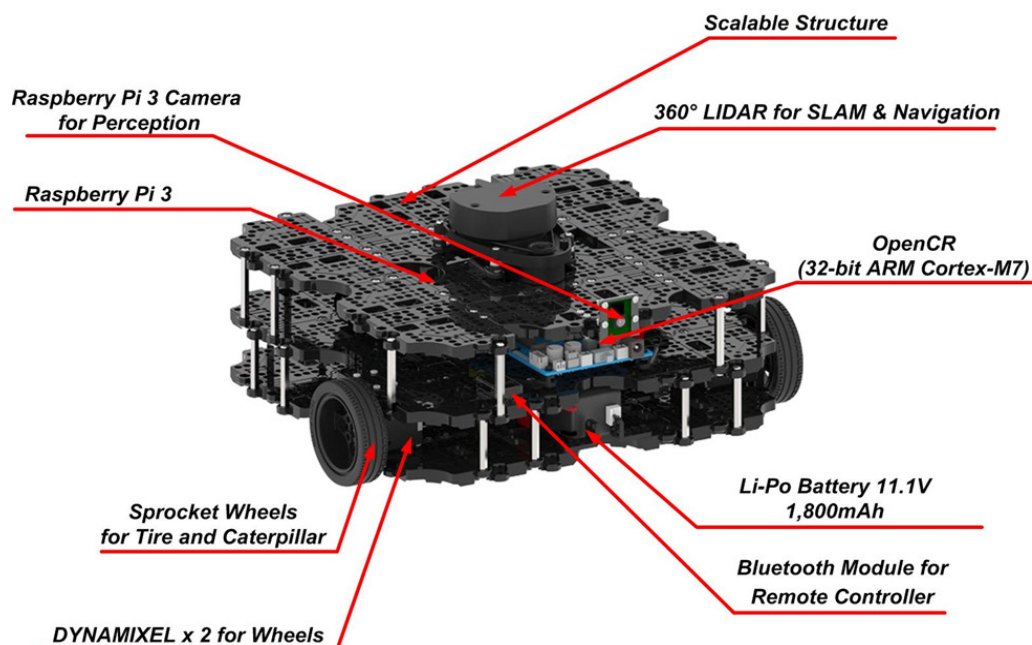


Figure 1 – TurtleBot3 Waffle Pi

It offers three power connectors: 3.3V/800mA, 5V/4A, and 12V/1A. The onboard lithium-polymer battery has a rating of 11.1V and 1800mAh, providing approximately 2 hours of continuous operation and 2 hours 30 minutes of charging time.

Robot kinematics and structural design

It is noted that the structure of this mobile robot is divided into several levels (layers), each comprising a distinct set of components and functions, as depicted in Figure 2 (p. 31).

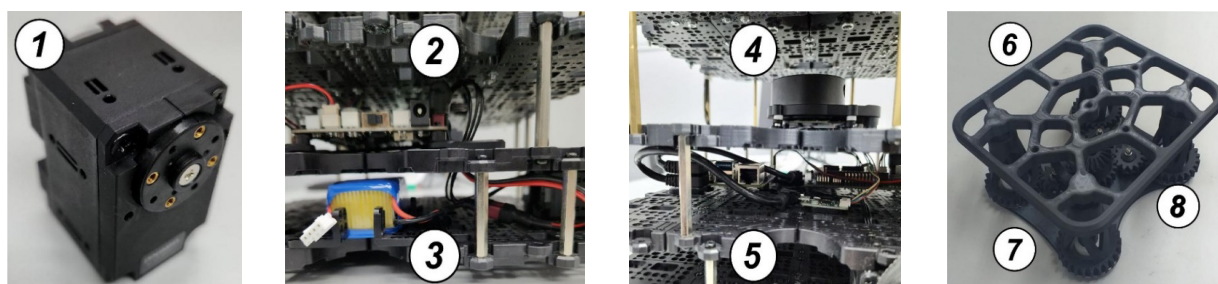


Figure 2 – Components of the robot: 1 – DYNAMIXEL XL430-W250;
2 – OpenCR 1.0; 3 – battery, 4 – LIDAR; 5 – Raspberry Pi 4;
6 – tabletop; 7 – baseplate; 8 – crank-handle mechanism

The first layer houses the DYNAMIXELs – highly capable servomotors from Robotis that support not only the robot's weight but also that of the pallet. This level also includes the attachment point for the battery. The second layer is home to the 'brains' of the robot – the OpenCR board, which manages motor control, and the Raspberry Pi 3, serving as the primary computational module. Positioned on the third layer is the LIDAR, essential for positioning and navigation, operating in tandem with a gyroscope on the OpenCR board. The final layer features the lifting platform, composed of three parts: the tabletop, baseplate, and crank-handle mechanism. The core function of this platform lies in the integration of a DYNAMIXEL with the crank-handle mechanism, enabling the automatic elevation and descent of the platform. The baseplate secures the platform to the robot, while the tabletop bears the weight of the pallet during transport.

Regarding the kinematics of the robot's movement, it is illustrated in Figure 3. Here, point O_r identifies the robot's center of motion, enabling free movement along the X and Y axes, coupled with the capacity for a full 360-degree rotation around O_r , indicated by the angular velocity ω .

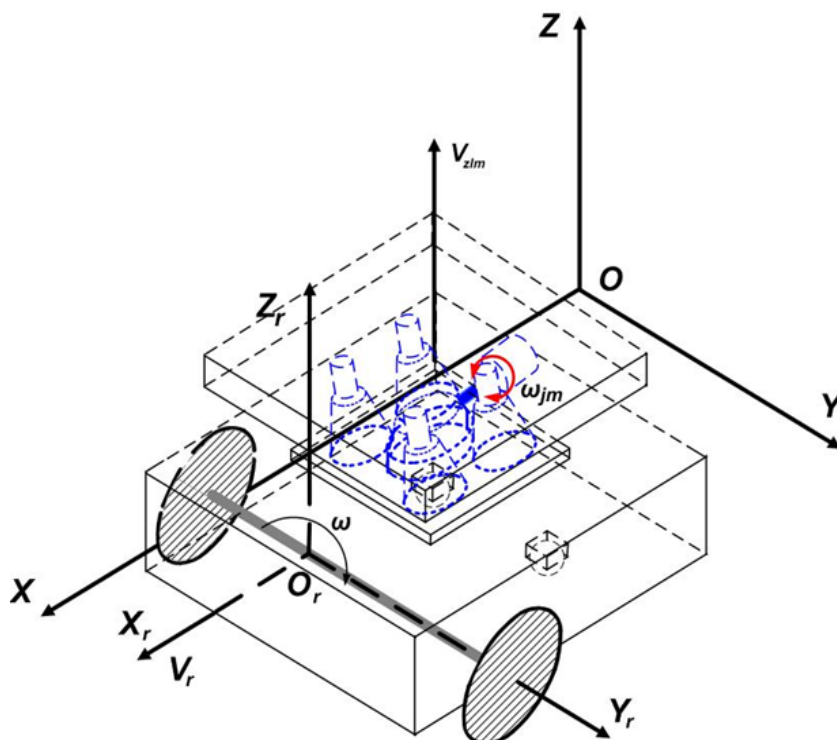


Figure 3 – Kinematic model of the robot

The overall motion of the robot is encapsulated by the vector V_r , which integrates its translational and rotational movements. The lifting mechanism operates with a dedicated motion vector V_{zlm} along the Z axis, while the motor responsible for this lifting mechanism exhibits an angular velocity ω_{jm} , ensuring coordinated vertical movements essential for the robot's interaction with objects within its operational environment.

Materials and Methods

For the analysis of system behaviors, long-term data collection is crucial. This method provides a thorough understanding of how the system operates. The DYNAMIXEL Wizard 2.0, a dedicated software for monitoring motor performance in real-time, was utilized in this study. The software proved vital for documenting detailed motor performance, which is essential for analyzing the system's dynamics. The connections within the system are depicted in Figure 4.

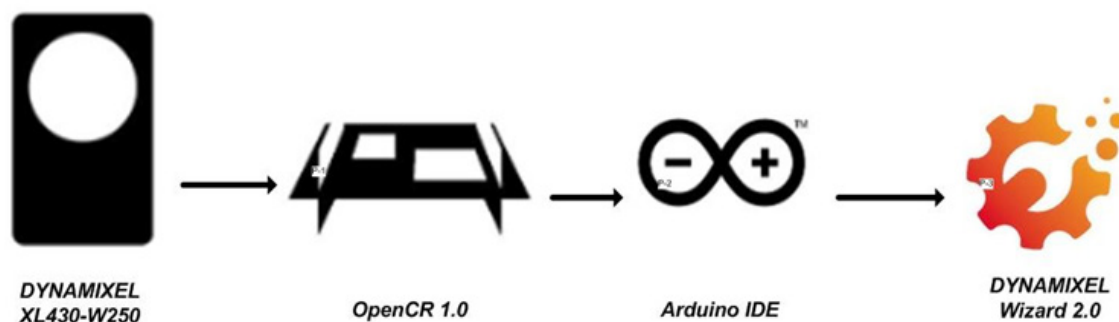


Figure 4 – DYNAMIXEL Wizard 2.0 connection

Data regarding the motor's variations were efficiently collected within minutes using this approach. Subsequently, the challenge arose in processing this information effectively. The data retrieved from the DYNAMIXEL servo was exported into a comma-separated values (*.csv) file, as shown in Table 1. This raw dataset contained superfluous details, presenting a potential for inaccuracies in subsequent model identification phases. To address this, a tailored Python script was crafted to streamline the data, filtering out irrelevant information and preparing it for precise analysis.

Table 1 – Data before filtering

Time, ms	Realtime Tick	Present Velocity, rev/min	Present Input Voltage, V	Present PWM, %
4029	32663	263	120	885
4049	32683	263	120	885
4069	32703	260	120	655
...	...	...	...	...

The application of the Python script for post-processing substantially enhanced the clarity of the data, enabling the refinement and retrieval of any missing elements. The results of this refined data processing are depicted in Table 2 (p. 33), demonstrating the efficacy of the script in preparing the dataset for more accurate and reliable model identification.

The analysis of the dataset revealed essential details about time, PWM (Pulse Width Modulation), and velocity, crucial for assessing the servo's operation. To examine the engine data within MATLAB, a specific script was created. This script imports engine parameter values from the database to MATLAB, turning them into variables ready for analysis. It also adjusts axis scaling to make data visuals clearer and more precise. Running this script generates a file that reflects the current database session. Importantly, this file lists potential system transfer functions, each distinguished by its poles

and zeros configuration, offering different models for identifying the system's behavior. Table 3 in the study outlines the features of these transfer functions. This table is key to understanding each option and guides the next step of comparing them.

Table 2 – Data after filtering

Time, ms	Present Velocity, rev/min	Present PWM, %
4029	263	885
4049	263	885
4069	260	655
...	...	...

Table 3 – List of possible transfer functions

Name of a transfer function	Equation	Number of poles	Number of zeros
TF1	$\frac{0.0593}{1 - 0.808z^{-1}}$	1	0
TF2	$\frac{0.02524}{1 - 1.53z^{-1} + 0.6153z^{-2}}$	2	0
TF3	$\frac{0.01488}{1 - 2.185z^{-1} + 1.714z^{-2} - 0.4792z^{-3}}$	3	0
TF4	$\frac{0.01014}{1 - 2.766z^{-1} + 3.144z^{-2} - 1.724z^{-3} + 0.3801z^{-4}}$	4	0
TF5	$\frac{0.07405z^{-1}}{1 - 0.7552z^{-1}}$	1	1
TF6	$\frac{0.0397z^{-1}}{1 - 1.366z^{-1} + 0.5006z^{-2}}$	2	1
TF7	$\frac{0.02874z^{-1}}{1 - 1.848z^{-1} + 1.27z^{-2} - 0.3246z^{-3}}$	3	1
TF8	$\frac{0.02396z^{-1}}{1 - 2.196z^{-1} + 2.075z^{-2} - 0.9994z^{-3} + 0.2034z^{-4}}$	4	1
TF9	$\frac{-0.004356z^{-1} + 0.1034z^{-2}}{1 - 0.6655z^{-1}}$	1	2
TF10	$\frac{0.01064z^{-1} + 0.05601z^{-2}}{1 - 1.085z^{-1} + 0.3122z^{-2}}$	2	2
TF11	$\frac{0.01355z^{-1} + 0.4422z^{-2}}{1 - 1.292z^{-1} + 0.5904z^{-2} - 0.1023z^{-3}}$	3	2
TF12	$\frac{0.0139z^{-1} + 0.04148z^{-2}}{1 - 1.373z^{-1} + 0.744z^{-2} - 0.2137z^{-3} + 0.03076z^{-4}}$	4	2

TF13	$\frac{0.01415z^{-1} + 0.04579z^{-2} + 0.05361z^{-3}}{1 - 0.6149z^{-1}}$	1	3
TF14	$\frac{0.01412z^{-1} + 0.04626z^{-2} + 0.0204z^{-3}}{1 - 0.9535z^{-1} + 0.2281z^{-2}}$	2	3
TF15	$\frac{0.01412z^{-1} + 0.04581z^{-2} + 0.01826z^{-3}}{1 - 0.9931z^{-1} + 0.2716z^{-2} - 0.0128z^{-3}}$	3	3
TF16	$\frac{0.01412z^{-1} + 0.04761z^{-2} + 0.02358z^{-3}}{1 - 0.8654z^{-1} + 0.1006z^{-2} + 0.07088z^{-3} - 0.01616z^{-4}}$	4	3

This comparison looks at how well the real data matches up with the models in Table 3, crucial for choosing the transfer function that best captures the system's dynamics. However, transfer functions with more than three degrees are not considered to keep the analysis simple. This approach avoids the complexity and potential inaccuracies of more complicated models. Thus, the focus is on simpler models that accurately reflect the data and are straightforward to work with, ensuring the chosen transfer function is both accurate and practical for understanding the system's behavior.

Results and Discussion

In the analysis, model TF11 was identified as the most effective transfer function:

$$TF_{11} = \frac{0.01355z^{-1} + 0.4422z^{-2}}{1 - 1.292z^{-1} + 0.5904z^{-2} - 0.1023z^{-3}}$$

This model stands out because it requires fewer processing resources and closely aligns with actual data, achieving a 96.47% match as shown in Figure 5.

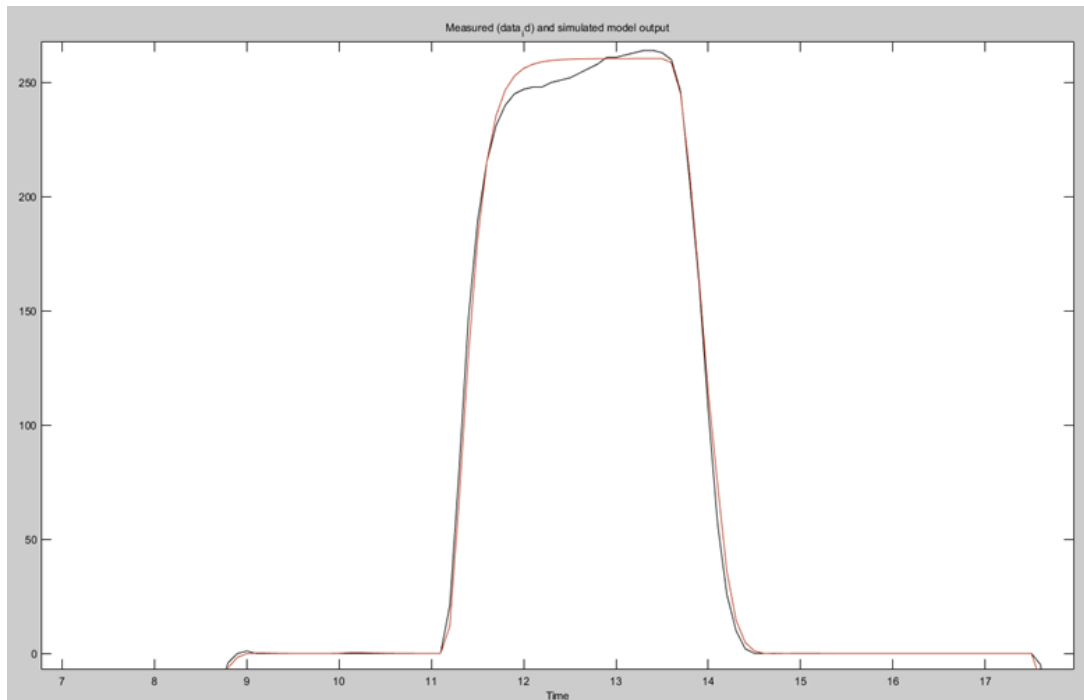


Figure 5 – Measured data and simulated model output

This high degree of similarity underscores TF11's precision and effectiveness in modeling the system's behavior. The data acquired from the system identification process facilitate the assessment of accuracy and stability in the motor system of the robotic manipulator. The discovered transfer function enables a deeper understanding of the dynamic behavior of these systems. It provides a mathematical model that captures how input signals, such as motor commands, are transformed into outputs, like robotic movements. This model is crucial for predicting the system's response under various conditions and for designing control strategies that enhance the robot's performance in terms of precision and reliability.

Program realization

To orchestrate the robot's spatial navigation and localization, an algorithm was methodically devised. The operational logic of this algorithm is encapsulated in a block diagram depicted in Figure 6. This diagrammatic representation delineates the procedural logic that the robot adheres to, initiating with the activation of the robot and subsequent verification of all modular components for operational integrity. Post initialization, the robot employs LIDAR sensors in conjunction with Dynamixel actuators to triangulate its position within the environmental context. Selecting a predetermined navigational map, the robot establishes its trajectory by defining origin and destination coordinates.

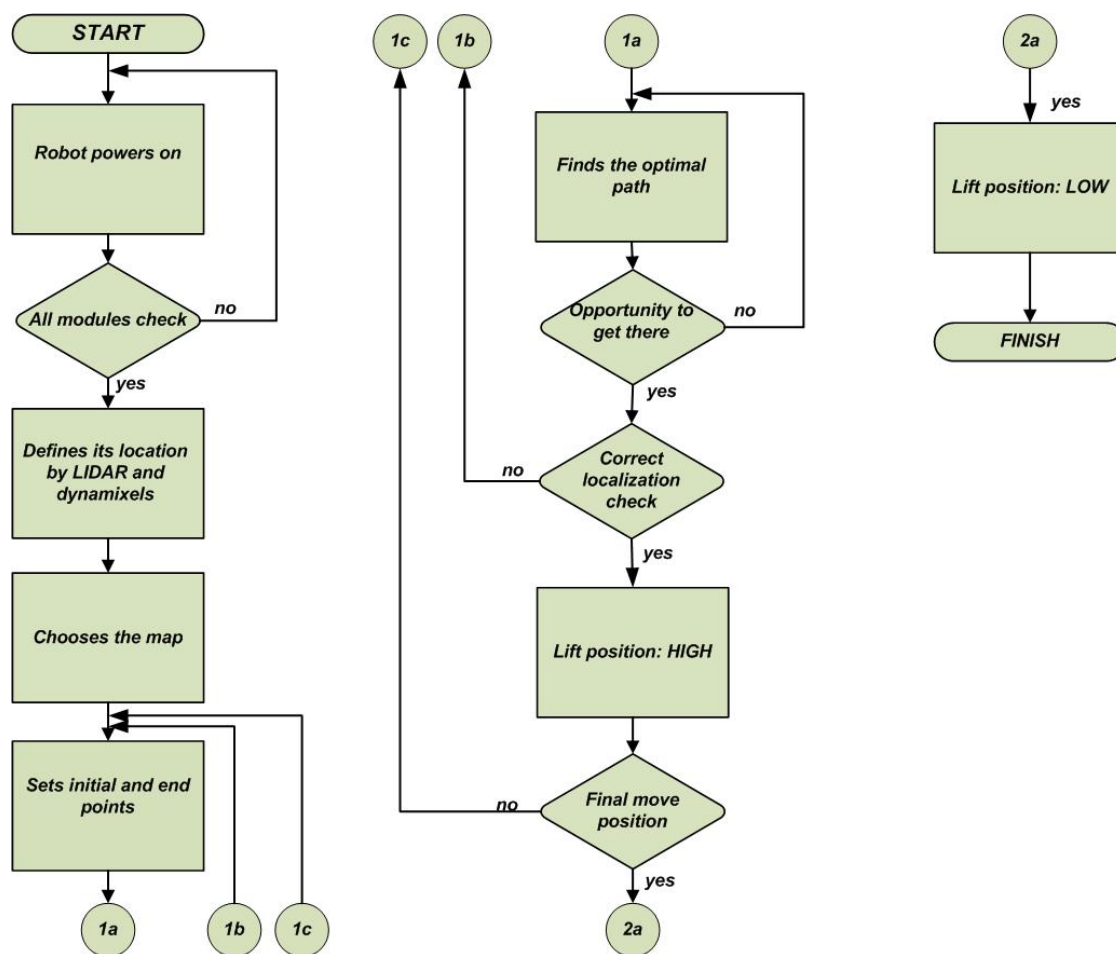


Figure 6 – Process block diagram

The algorithm then engages in optimal path determination, scrutinizing the feasibility of the intended route. Should any discrepancies in localization accuracy arise, the system is designed to recalibrate before proceeding. A pivotal element of the robot's task sequence involves the positional adjustment of the lifting mechanism, which must be accurately aligned to either a designated "HIGH" or "LOW" state to facilitate the continuation of the operation. This sequence concludes with the robot attaining its final programmed position, at which point the task is deemed complete, thereby illustrating the algorithm's efficacy in guiding the autonomous system through its intended operational parameters.

The operational principle of the robot's rotation within the Python script involves a series of programmed commands that direct the robot to adjust its orientation and navigate to a specified location within its operational environment. The script initiates with the robot determining its current position and orientation through sensor input. It then calculates the necessary rotation to align itself with a target direction, based on coordinates that correspond to a grid or cell-based layout of the operational area.

After calculating the desired angle of rotation, the robot executes a rotation maneuver, adjusting its orientation until the target angle is achieved. This precise control of rotation is essential for the robot to face the correct direction before commencing movement towards its goal, as shown in Figure 7.

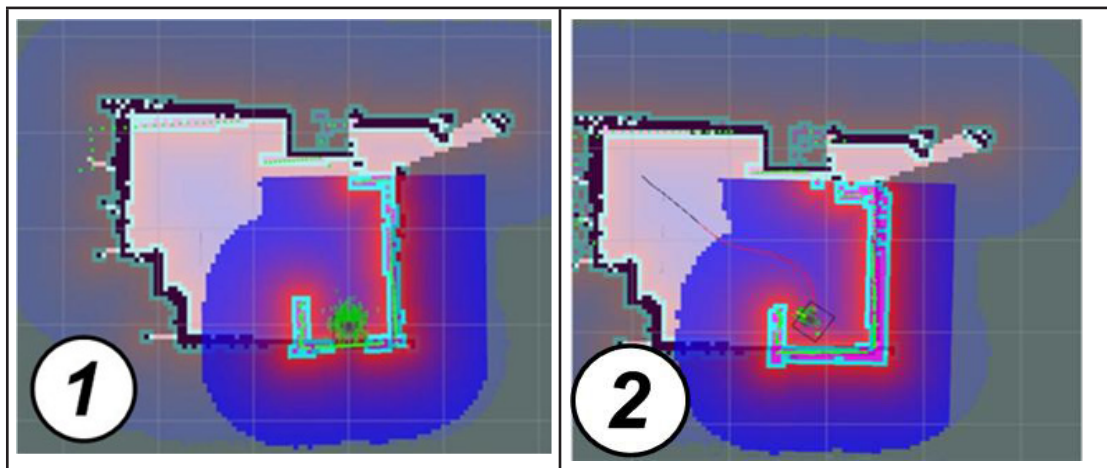


Figure 7 – Stages of robot movement: 1 – scanning the area with LIDAR;
2 – building the shortest route

Once oriented correctly, the robot proceeds to navigate towards the target location. It uses a pathfinding algorithm to identify the most efficient route, considering the robot's current position and the desired endpoint. The robot's movement is characterized by smooth translation along this path, demonstrating the algorithm's ability to guide the robot through its environment accurately.

Regarding the code for actuating the lift platform, the operational dynamics are somewhat distinct. This program embodies a methodology for actuating a robotic lifting mechanism through a sequence of discrete operational commands. Within the context of a robotic operating system, the script initiates a publishing node to emit control signals at a predetermined frequency, corresponding to the actuation and cessation of the lifting platform's movement. The operational logic is structured around the emission of a control value, indicative of the lift's activation, followed by a cessation command, which signals the termination of the action. This cyclical command sequence is paramount for achieving precise control over the lifting mechanism's operational state, facilitating its engagement and disengagement in a controlled manner.

In the development of navigation algorithms for robotics, a fundamental approach involves partitioning the floor space into discrete segments, commonly referred to as “cells” or “squares”. This method facilitates a clearer understanding of the robot’s current sector since both the “initial” and “final” positions of the robot are defined in terms of these cells through which it moves. This structure has also been implemented in the Human-Machine Interface (HMI) variant for robots, realized in the HMIWebDisplay software by Honeywell, illustrated in Figure 8.

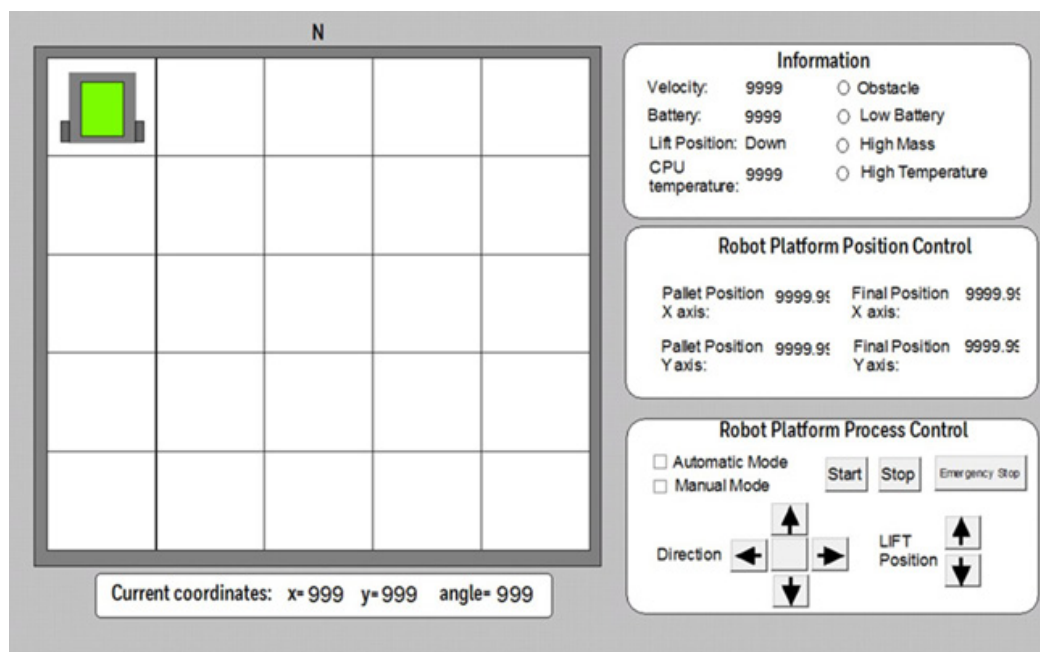


Figure 8 – HMI-display realization

However, as previously mentioned, establishing an efficient smart warehouse system requires the creation of a network of interconnected components. This is the rationale behind the development of a capability to connect the TurtleBot3 Waffle Pi to the Wiren Board 7, a programmable automation controller (PAC).

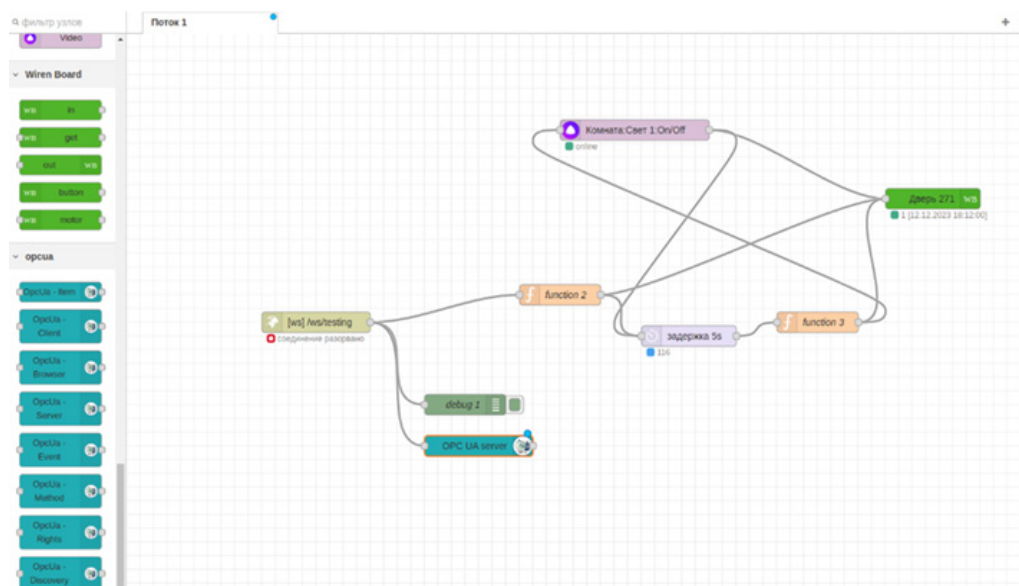


Figure 9 – Output values from Wiren board to OPC UA Server

The Figure 9 delineates an instance of a Node-RED interface, which is employed as a visual tool for integrating distinct hardware and software entities. The integration of a TurtleBot3 Waffle Pi with a Wiren Board 7 is facilitated through the implementation of the OPC UA protocol, a staple in industrial automation for its robust and secure data exchange capabilities. Within this framework, the Node-RED flow is constituted by a series of nodes indicative of the OPC UA communication standards. These nodes establish a bidirectional data stream, enabling the TurtleBot3 Waffle Pi to transmit its operational data to the Wiren Board 7, and vice versa. The flow is further augmented by function nodes which serve as the logical intermediaries, processing the incoming data and orchestrating the subsequent control commands. Moreover, the debug nodes punctuating the flow are indicative of a monitoring mechanism to scrutinize the message payloads, which are crucial for validation and troubleshooting throughout the development phase. This architecture epitomizes a modular approach, ensuring that the TurtleBot3 Waffle Pi can be seamlessly integrated into the automated warehouse ecosystem, thereby enhancing the efficiency and responsiveness of the system. The OPC UA protocol ensures that the communication is not only seamless but also adheres to industry standards for security and reliability.

Conclusion

In conclusion, the development and integration of the TurtleBot3 Waffle Pi into a Smart Warehouse system, as delineated in this study, represents a commendable initial stride towards redefining warehouse automation. Although the scope of this research is an initial foray and not an exhaustive exploration into the vast potential of smart warehousing, the outcomes are promising.

The advancements presented here – the adaptation of the TurtleBot3 Waffle Pi with an innovative lifting mechanism, the pioneering cell-based navigation algorithm, and the strategic networking with the Wiren Board 7 via OPC UA – form a foundational platform for further development. The integration of the Honeywell HMIWebDisplay stands as a testament to the potential for sophisticated, user-centric control interfaces in operational settings. This initial phase has yielded positive results, demonstrating the feasibility and benefits of such integrative approaches. While acknowledging that this is merely the beginning of a larger journey towards comprehensive Smart Warehouse systems, the research paves the way for subsequent in-depth studies and the refinement of technologies.

Moving forward, it will be imperative to build upon these initial findings, to explore scalability, to enhance system robustness, and to address any emergent challenges. The journey towards fully autonomous, highly efficient Smart Warehouses is complex and requires incremental advancements. This study serves as a stepping stone in that ongoing process, offering insights and a proof of concept that will, undoubtedly, inform and inspire future innovations within Kazakhstan and the broader global context of warehouse logistics.

REFERENCES

- 1 Weiwei Z. & Ying C. (2020) Intelligent Technology Related to Warehousing and Distribution in Intelligent Logistics. 2020 International Conference on Wireless Communications and Smart Grid (ICWCSG), pp. 175–177. <https://doi.org/10.1109/ICWCSG50807.2020.00046>.
- 2 Žunić E., Delalić S., Hodžić K., Beširević A. & Hindija H. (2018) Smart Warehouse Management System Concept with Implementation. 14th Symposium on Neural Networks and Applications (NEUREL), pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/NEUREL.2018.8587004>.
- 3 Kodithuwakku P.I.E., Wijayanayake A.N. & Kavirathna C.A. (2022) Impact of Warehouse Management Factors on Performance Improvement of 3rd Party Logistics Industry. 2022 International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE), no. 5, pp. 276–281. <https://doi.org/10.1109/SCSE56529.2022.9905116>.

- 4 Jose J., Samhitha B.K., Maheswari M., Selvi M. & Mana S.C. (2021) IoT based Smart Warehouse and Crop Monitoring System. 2021 5th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), pp. 473–476. <https://doi.org/10.1109/ICOEI51242.2021.9453029>.
- 5 Ranjith V., Sriravinaa E.N., Subashree S. & Raguvaran K. (2023) Development of IoT Enabled Vegetable Stockpile Warehouse Monitoring System to Support Farmers. 2023 International Conference on Sustainable Computing and Smart Systems (ICSCSS), pp. 1006–1013. <https://doi.org/10.1109/ICSCSS57650.2023.10169370>.
- 6 Osupile K., Yahya A. & Samikannu R. (2022) A Review on Agriculture Monitoring Systems using Internet of Things (IoT). 2022 International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing (ICAAIC), pp. 1565–1572. <https://doi.org/10.1109/ICAAIC53929.2022.9792979>.
- 7 Bukhamseen A., Alabdullah M., Bin Gaufan K. & Mysorewala M. (2023) A Warehouse Storage and Retrieval System Using IoT and Autonomous Vehicle. 2023 9th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA), pp. 346–350. <https://doi.org/10.1109/ICARA56516.2023.10125658>.
- 8 Özbaran C., Dilibal S. & Sungur G. (2020) Mechatronic System Design of a Smart Mobile Warehouse Robot for Automated Storage/Retrieval Systems. 2020 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU), pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ASYU50717.2020.9259882>.
- 9 Shiva Shankar R., Devareddi R., Mahesh G. & MNSSVKR Gupta V. (2022) Develop a Smart Data Warehouse for Auto Spare Parts Autonomous Dispensing and Rack Restoration by Using IoT with DDS Protocol. Singapore: Springer Nature Singapore. Computer Networks, Big Data and IoT: Proceedings of ICCBI 2021, pp. 879–895.
- 10 Lee Y., Kim J., Lee H. & Moon K. (2017) IoT-based data transmitting system using a UWB and RFID system in smart warehouse. 2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), pp. 545–547. <https://doi.org/10.1109/ICUFN.2017.7993846>.
- 11 Silapunt R., Panpanyatep W. & Boonsothonsatit G. (2022) Design and Development of the Smart Object for the IoT-enabled Smart Warehouse. 2022 International Electrical Engineering Congress (iEECON), pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/iEECON53204.2022.9741566>.
- 12 Bernardini F., Motroni A., Nepa P., Buffi A. & Tellini B. (2020) SAR-based Localization of UHF-RFID Tags in Smart Warehouses. 2020 5th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), pp. 1–6. <https://doi.org/10.23919/SpliTech49282.2020.9243755>.
- 13 Øvsthus Ø., Robsrud D.N., Muggerud L., Amendola J., Cenkeramaddi L. R., Tyapin I. & Jha A. (2023) Mobile Robotic Manipulator Based Autonomous Warehouse Operations. 2023 11th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA), pp. 278–283. <https://doi.org/10.1109/ICCMA59762.2023.10374743>.
- 14 Motroni A. & Buffi A. (2023) RFID Robots and Vehicles for Item Inventory and Localization. 2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 1–5. <https://doi.org/10.23919/EuCAP57121.2023.10133127>.
- 15 Shamsfakhr F., Macii D., Fontanelli D., Motroni A., Nepa P., Palopoli L. & Buffi A. (2022) RFID-based robot localisation: an unconstrained optimisation problem by exploiting RSSI. 2022 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/I2MTC48687.2022.9806604>.
- 16 Bernardini F., Motroni A., Nepa P., Tripicchio P., Buffi A. & Del Col L. (2021) The MONITOR Project: RFID-based Robots enabling real-time inventory and localization in warehouses and retail areas. 2021 6th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), pp. 1–6. <https://doi.org/10.23919/SpliTech52315.2021.9566352>.
- 17 Cecchi G., Alice Buffi A.M., Nepa P., D’Avella S., Tripicchio P., Unetti M., Col L.D. & Salvatore A. (2023) The MONITOR Robot with UHF-RFID Rotating Antennas enhancing Indoor Tag Localization. 2023 8th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), pp. 1–6. <https://doi.org/10.23919/SpliTech58164.2023.10193453>.
- 18 Bernardini F., Motroni A., Buffi A., Nepa P., Tripicchio P., D’Avella S., Col L.D. & Salvatore A. (2022) Retail Robots with UHF-RFID Moving Antennas enabling 3D Localization. 2022 IEEE 12th International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA), pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/RFID-TA54958.2022.9924120>.

19 Sanchez O.T., Raposo D., Rodrigues A., Boavida F., Marculescu R., Chen K. & Sá Silva J. (2023) An IoT-Based Approach to the Integrated Management of Machinery in the Construction Industry. IEEE Access, 11, pp. 6331–6350. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3236254>.

20 Li Z., Li W. & Jiang L. (2015) Research on the task assignment problem of warehouse robots in the smart warehouse. 12th International Symposium on Operations Research and its Applications in Engineering, Technology and Management (ISORA 2015), pp. 1–5. <https://doi.org/10.1049/cp.2015.0605>.

¹Самигулин Т.И.,

PhD, қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0001-9963-6719,

e-mail: t.samigulin@kbtu.kz

^{1*}Мликова К.А.,

студент, ORCID ID: 0009-0009-5931-7065, e-mail: missmlikovakristina@gmail.com

¹Толенгутов Р.Р.,

студент, ORCID ID: 0009-0000-3210-7126, e-mail: mr.rasulcool@mail.ru

¹Бутакова Д.А.,

студент, ORCID ID: 0009-0006-8151-4928, e-mail: diana.butakova.13@mail.ru

¹Нахимов Ә.Ж.,

студент, ORCID ID: 0009-0006-0748-998X, e-mail: qasobovgholib@gmail.com

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

ҚОЙМАЛАРДЫ БАСҚАРУДЫҢ АҚЫЛДЫ ЖҮЙЕСІНЕ АРНАЛҒАН МОБИЛЬДІ РОБОТ ПЛАТФОРМАСЫН ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа

Бұл зерттеу TurtleBot3 Waffle Pi мобильді роботының қойма логистикасына интеграциясын зерттейді және оның операциялық тиімділікті арттырудағы, шығындарды азайтудағы рөлін көрсетеді. Зерттеудің негізгі бағыты – жаңа позициялау стратегиясымен толықтырылған автономды навигация үшін LIDAR пайдаланатын Python негізіндегі навигациялық алгоритмді әзірлеу. Бұл роботқа жұмыс процесін оңтайландыру, кателерді азайту және операциялық шығындарды азайту арқылы алдын ала елестетілген торында дәл шарлауға мүмкіндік береді. Механикалық инновациялар мен робототехника арасындағы синергияны көрсете отырып, паллеттерді өңдеуді жақсарту үшін 3D басып шығару арқылы арнайы әзірленген көтеру механизмі енгізілген. Honeywell Experion PKS жүйесіне OPC UA технологиясы арқылы Wired Board 7 контроллерлермен бірігіп, роботтың үздіксіз жұмыс істеуін қамтамасыз етеді. Бұл қосылу роботтың қолданыстағы өндірістік бақылау жүйелеріне интеграциялану қабілетін көрсетіп, қоймалардағы операцияларды модернизациялаудың ауқымды шешімін ұсынады. Қазақстандық логистика секторына баса назар аудара отырып, мұндай технологияларды қолдану операциялық тиімділік пен бәсекеге қабілеттілікті ұлттық ауқымда арттырудың айтарлықтай әлеуетін көрсетеді. Зерттеу робототехника мен озық басқару жүйелерінің логистикадағы маңызды рөлін атап көрсетеді, сонымен бірге экономикалық өсу мен тұрақтылықты қолдау үшін одан әрі технологиялық жетістіктерді қолдайды.

Тірек сөздер: мобильді робот, ақылды қойма, қойманы басқару жүйесі, TurtleBot3, навигация, роботтандыру.

¹Самигулин Т.И.,

PhD, ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0001-9963-6719,
e-mail: t.samigulin@kbtu.kz

^{1*}Мликова К.А.,

студент, ORCID ID: 0009-0009-5931-7065, e-mail: missmlikovakristina@gmail.com

¹Толенгутов Р.Р.,

студент, ORCID ID: 0009-0000-3210-7126, e-mail: mr.rasulcool@mail.ru

¹Бутакова Д.А.,

студент, ORCID ID: 0009-0006-8151-4928, e-mail: diana.butakova.13@mail.ru

¹Нахимов Ә.Ж.,

студент, ORCID ID: 0009-0006-0748-998X, e-mail: qasobovgholib@gmail.com

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

РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ УМНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СКЛАДОМ

Аннотация

Данное исследование рассматривает интеграцию мобильного робота TurtleBot3 Waffle Pi в логистику складских операций, подчеркивая его роль в повышении операционной эффективности и снижении затрат. В центре внимания исследования находится разработка навигационного алгоритма на языке Python, использующего LIDAR для автономной навигации, дополненного новаторской стратегией позиционирования. Это позволяет роботу точно перемещаться в пределах заранее определенной воображаемой сетки, оптимизируя рабочий процесс, минимизируя ошибки и сокращая операционные расходы. Введено в эксплуатацию специально разработанное подъемное устройство, изготовленное с помощью 3D-печати, чтобы улучшить обращение с паллетами, что демонстрирует синергию механических инноваций и робототехники. Интеграция с контроллерами Wiren Board 7 обеспечивает бесперебойную работу, которая дополнительно усиливается подключением робота к системе Honeywell Experion PKS через технологию OPC UA. Это подключение подчеркивает способность робота интегрироваться в существующие промышленные контрольные системы, предлагая масштабируемое решение для модернизации операций на складах. Сосредоточив внимание на логистическом секторе Казахстана, применение таких технологий демонстрирует значительный потенциал для повышения операционной эффективности и конкурентоспособности на национальном уровне. Исследование подчеркивает критическую роль робототехники и продвинутых систем управления в логистике, выступая за дальнейшее технологическое развитие для поддержки экономического роста и устойчивости.

Ключевые слова: мобильный робот, умный склад, система управления складом, TurtleBot3, навигация, роботизация.

UDC 004.8
IRSTI 28.23.15

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-42-53>

¹***Nam D.,**

Master of Tech. Sciences, PhD Student, ORCID ID: 0000-0002-9356-3114, e-mail: d.nam@kbtu.kz

¹**Pak A.,**

Candidate of Tech. Sciences, Professor, ORCID ID: 0000-0002-8685-9355, e-mail: a.pak@kbtu.kz

¹Kazakh-British Technical University, 050000, Almaty, Kazakhstan

COMPARATIVE ANALYSIS OF U-NET, U-NET++, TRANSUNET AND SWIN-UNET FOR LUNG X-RAY SEGMENTATION

Abstract

Medical image segmentation is a widely used task in medical image processing. It allows us to receive the location and size of the required instance. Several critical factors should be considered. First, the model should provide an accurate prediction of the mask. Second, the model should not require a lot of computational resources. Finally, the distribution between the false positive and false negative predictions should be considered. We provide the comparative analysis between four deep learning models, base U-Net and its extension U-Net++, TranUNet, and Swin-UNet for lung X-ray segmentation based on trainable parameters, DICE, IoU, Hausdorff Distance, Precision and Recall. CNN models with the smallest number of parameters show the highest DICE and IoU scores than their descendants on the limited-size dataset. Based on the experiment results provided in the article U-Net has maximum DICE, IoU, and precision. It makes the model the most appropriate for medical image segmentation. SwinU-Net is the model with minimum Hausdorff Distance. U-Net++ has the maximum Recall.

Key words: CNN, segmentation, transformers, medical image processing

Introduction

Medical image segmentation is the process of automatic extraction of masks from the images containing the area of relevant parts. The mask could contain the damaged part of the organ or the organ by itself. An analysis of the mask allows to get information about the current state of the organ. In opposition to classification and detection image segmentation allows to understand the class, location, and size of the relevant image at the same time.

However, medical image processing is a complicated and expensive process because it requires a deficit of data for training. According to the authors of the original U-Net architecture [1], it was proposed specifically for medical image segmentation and could be trained on a limited-size dataset. U-Net was applied for various medical image segmentation subtasks [2–4] and shows good performance. This was a motivation to use its key features, such as mirror encoder and decoder application, and skip-connections were used in different other architectures. U-Net architecture could be combined with residual [5], recurrent [6], or dense [7] blocks forming a new convolutional neural network. U-Net architecture also could be adopted for transformer-based architecture [8, 9, 10].

Although the application of additional components increases segmentation quality, the number of trainable parameters increases as well. The idea of automated medical image segmentation is to reduce the burden on the medical sector through pre-medical diagnostics and patient management. There are several criteria for methods used for the segmentation process. It should not only provide the exact area of the required instance but also work fast without requiring large computing power. So in the current comparative analysis, we take into account the number of trainable parameters of each observed model because, for deep learning models, this is a key characteristic responsible for the speed and required resources for the training process.

Another important component in the process of evaluating neural networks for medical image segmentation is the distribution between false positive and false negative predictions. Image segmentation could be described as a pixel-wise classification, when each pixel belongs to some class, for example, a cancer or non-cancer area.

We compared U-Net with three U-Net-based algorithms: U-Net++ [11], TransUNet [8], and Swin-UNet [10] among the number of trainable parameters and segmentation quality. We used DICE, IoU, and Hausdorff Distance to evaluate the distance and similarity between the ground true and predicted image. Also, we calculated precision and recall for predicted and ground true masks to evaluate the distribution between false positive and false negative predictions. Based on our experiments Base U-Net with the smallest number of parameters shows the highest DICE and IoU scores than its descendants on the limited size dataset. However, it lost in Hausdorff Distance, Precision, and Recall to its descendants.

Background

Medical images are an extensive source of information about the human body, its current state, and possible illness. Together with the disease history and related visual data, the doctor could draw up a complete picture of the disease and appropriate treatment. There are a lot of different formats of medical image data that are appropriate depending on the case: computed tomography images, X-rays, biopsy images, electrocardiograms, and others. In the current article, we stopped on X-ray images because this format has some benefits among others, and it is the widely spread type of equipment to collect medical image data.

X-rays are one of the cheapest ways to collect data about the human body. It is widely available in various medical centers, including small rural ones which are usually not equipped with more expensive types of equipment like CT scanners or MRI machines. Also taking X-ray images are quick and non-invasive, requiring minimal preparation. X-rays provide valuable insights into the internal structures of the body, making them versatile for a range of diagnostic purposes. They are commonly used to examine bones, detect fractures, identify abnormalities in the chest, and assist in various other diagnostic evaluations. Also, X-ray involves a relatively low radiation dose. The X-ray was created in the 19th century and still is the most popular way of screening.

The use of X-ray images allows for gathering information about various organs in the human body. In this article, we focus on X-ray images of the lungs, as this organ is particularly susceptible to various diseases. Currently, lung cancer stands as the most lethal type of cancer in Kazakhstan and worldwide. Lung cancer can be classified into two main types: non-small cell lung cancer and small-cell lung cancer. The most spread and the least dangerous type of non-small cell lung cancer is adenocarcinoma. It grows more slowly than other types and is often treatable due to early detection. Usually, it could be found in the outer part of the lung. Another type of non-small cell lung cancer is squamous cell carcinoma. Typically found in the central part of the lung. Squamous cell carcinoma is often linked to smoking. The last subtype of non-small cell lung cancer is large cell carcinoma. This type of cancer is characterized by rapid growth and non-predicted location in every part of the lung. The second type of cancer is Small cell lung cancer. It is generally the more aggressive type of lung cancer with a higher potential for rapid spread compared. This type of cancer has higher mortality and a more negative prognosis of treatment because of several factors. First is the rapid growth. It faster spreads inside the lung and to other human organs. It leads to the second issue the second issue with this type of cancer. It gives early metastasis that spreads to distant organs, particularly the brain. This can complicate treatment and affect the overall prognosis. Last but not least, the difficulties in treating this type of cancer are twofold. On one hand, frequent late detection of small cell lung cancer often makes surgical intervention impossible. As the cancerous area attains a considerable size, it becomes impractical to remove it surgically without affecting other organs and important blood

vessels. On the other hand, the traditional method of cancer treatment, chemotherapy, often yields positive results at the beginning of treatment, but there is a high risk of recurrence. This prevents the ability to control the cancer in the long term and maintain a stable outcome.

There are a lot of factors that cause lung cancer. Some of them are possible to control, such as smoking, and harmful production. However, the main part of them is difficult to control, like passive smoking, radon gas exposure, age over sixty five, and genetic factors.

Another widely spread type of lung disease is tuberculosis. Tuberculosis is widely spread in Kazakhstan. Tuberculosis is a contagious bacterial infection caused by *Mycobacterium tuberculosis*. This airborne disease primarily affects the lungs but can also target other organs, leading to a range of symptoms and complications. Tuberculosis remains a global health concern, with a significant impact on morbidity and mortality.

Tuberculosis is a highly contagious type of illness. Tuberculosis can be transmitted when an infected person coughs or sneezes, releasing microscopic droplets containing the bacteria into the air. The primary modes of tuberculosis transmission include inhaling air containing tiny particles of the microbes and contact with the infection through the skin or mucous membranes. Additionally, transmission from mother to child during pregnancy or childbirth is also possible. Due to the necessity of contact with an infected person, tuberculosis is often transmitted in prisons and other places of confinement. This is because many individuals are housed in poorly ventilated environments.

Tuberculosis could be in two forms: latent in active. In active form, there are common symptoms of tuberculosis including persistent cough, chest pain, weight loss, fatigue, night sweats, and fever. A latent form of tuberculosis occurs when the bacteria are present in the body but not causing symptoms. However, a patient with a latent form of tuberculosis also is dangerous because of the risk of spread. TB is treatable with a combination of antibiotics, usually taken for several months. Adherence to the full course of treatment is crucial to prevent the development of drug-resistant strains.

One more lung disease that was the reason of the pandemic and create in 2019 is Covid 19. It was caused by a novel coronavirus SARS-CoV-2 and afflicted economic, public health, and geopolitical situations over the world. COVID-19 primarily spreads through respiratory droplets when an infected person coughs, sneezes, or talks. Common symptoms include fever, cough, and shortness of breath, but the virus can also cause a range of respiratory, gastrointestinal, and neurological issues. Certain individuals, particularly the elderly and those with underlying health conditions, are at a higher risk of severe complications. Despite the mortality rate of Covid 19 significantly decreasing and the initiation of vaccination, various new strains of the virus have begun to emerge with differing symptomatology, transmission rates, and mortality.

Although the 2019 pandemic dealt a significant blow to humanity, it undoubtedly exposed healthcare challenges linked to a shortage of qualified medical personnel. Overall, the medical field faces a significant challenge with timely disease diagnosis and subsequent patient management due to a shortage of healthcare professionals and necessary equipment. In this context, the use of automated tools in preclinical medical diagnostics has the potential to significantly improve the quality of services provided and the overall survival rates of patients with various illnesses. Hand segmentation of the disease or organ is an expensive and long process. Moreover, due to the significant burden on healthcare professionals and the fact that images are not pre-ranked based on the severity of the patient's condition, individuals with more severe forms of illness may not receive timely treatment. It is also worth noting that the use of automated tools cannot fully replace a doctor since there is a significant challenge in predicting false-positive results. In the context of pulmonary diseases, a false-positive prediction may lead to a lung puncture, which is an invasive procedure.

We have focused on segmenting the region of the lung itself, as this step allows for the initial assessment of the organ's condition. It involves defining boundaries and size, as well as the potential identification of entities with radiological characteristics deviating from the standard values of the lung area.

Main provision

We provide a comparative analysis of base U-Net with three U-Net-based algorithms: U-Net++, TransUNet, and Swin-UNet. The main contribution of the article could be described as follows:

- ♦ The authors of Swin-UNet provide the comparison of TransUNet and Swin-UNet for the aorta, gallbladder, spleen, left kidney, right kidney, liver, pancreas, spleen, and stomach. We checked the algorithms for the task of lung segmentation.

- ♦ The comparison of TransUNet and Swin-UNet was provided in the original article Swin-UNet based on DICE and Hausdorff Distance. We complete the comparative analysis by adding IoU. Also, for medical processing tasks, it is critical to consider the distribution between false positive and false negative predictions. In the lung segmentation task, we took pixels belonging to the lung as positive, and all other areas of the image as negative. We also calculated precision and recall characterizing the distribution between segmentation errors.

- ♦ The comparison of TransUNet and Swin-UNet in the original article was done with the use of hardware with different computation power. For the current research, we used the same equipment for training all four models.

- ♦ We provide a comparison between two convolutional (U-Net, U-Net++) and two transformer-based (TransUNet, Swin-UNet) models to check which type of model shows better results for medical image segmentation on the dataset with a limited size. Also, we used a backbone model with a smaller number of trainable parameters for TransUNet to bring the number of trainable parameters of transformers and convolutional neural networks closer to each other.

Materials and methods

Image segmentation models

We compared four deep-learning algorithms for the lung segmentation task: U-Net, U-Net++, TransUNet, Swin-UNet. U-Net++ is an extension of the U-Net architecture for semantic segmentation, incorporating skip connections and deep supervision to enhance the ability of the model to capture hierarchical features in medical image analysis. TransUNet is the combination of a transformer encoder and a convolutional decoder. Swin-UNet is a fully transformer-based model. In contrast to convolutional-based models, transformer-based architectures utilize an attention mechanism. This mechanism can be conceptualized as a sequence of linear layers incorporating key, query, and value components. By doing so, the attention mechanism adeptly highlights relevant features within the original input sequence, allowing transformers to capture intricate dependencies and patterns across the entire sequence for various tasks. The combination of the attention mechanism in the encoder and convolutional decoder in TransUNet is the reason for additional calculation inside skip connections because the convolutional part operates with matrixes while the transformer part works with sequences. This architectural singularity and the number of layers are the reasons why Transnet used the biggest number of parameters among all observed models.

TransUNet and Swin-UNet models were compared by the authors of Swin-UNet architecture on the Synapse multi-organ computer tomography dataset [12] and ACDC dataset [13]. The synapse dataset consists of computed tomography images of the aorta, gallbladder, kidney, liver, pancreas, spleen, and stomach and corresponding masks. ACDC dataset contains MRI images with labeled ventricles and myocardium.

Data

For the current comparative analysis, we used X-ray images of the lung, because the results of the original article do not provide information about the quality of segmentation based on X-rays, and the lung was not used in the original articles as well. We used an open-source dataset of chest X-rays with corresponding lung masks [14, 15]. We used 704 images from the dataset, which were randomly split into train and test sets. So the train set contains 563 images and the test set consists

of 141 images. All X-ray images were provided in PNG format. An example of an image from the dataset and corresponding mask is provided in Figure 1.



Figure 1 – X-ray image (left) and corresponding binary lung mask (right)

We used 704 images from the dataset, which were randomly split into train and test sets. We used the same distribution between the train and test for honest comparison. The train set contains 563 images, and the test set consists of 141 images. We used the image with the size 224*224 because this image size was applied in SwinU-Net architecture. So, we applied the same for all of the others for honest comparison.

The dataset also has additional annotations that include information about age, gender, sex, and diagnosis. We used only a part of the dataset. So, the distribution between genders is 442 to 262 for males and females correspondingly. The age distribution could be described as it is shown in Table 1. As it is shown in Table 1 the main part of the dataset is the X-ray images of young adults with age from 19 to 35.

Table 1 – Age distribution

Age span	Number of examples
0–12	27
13–18	14
19–35	321
36–60	278
60+	64

The dataset includes a variety of pulmonary conditions diagnosed through chest X-rays. There are descriptions of the most popular cases that appeared in the dataset. Also, the dataset includes some other cases like Smear positive, active TB, LUL apex; Bilateral secondary PTB, left encapsulated intrathoracic fluid; Left PTB, left pleural thickening, and others which appeared in the dataset no more than five times.

Normal (358 cases) indicate that there are no apparent signs of pulmonary abnormalities. These images serve as a baseline for comparison with cases exhibiting pathology.

Bilateral PTB (48 cases) signifies the presence of pulmonary tuberculosis affecting both lungs. This condition necessitates careful monitoring and treatment due to the bilateral involvement, as tuberculosis can significantly impact respiratory function.

Right PTB (42 cases) indicates the presence of pulmonary tuberculosis specifically affecting the right lung. The focus on the right lung allows for targeted diagnosis and treatment planning.

PTB in the Right Upper Field (26 cases) specifies tuberculosis localized to the upper region of the right lung. This precise characterization assists in identifying the affected area for accurate diagnosis and treatment.

Left PTB (18 cases) highlights cases where pulmonary tuberculosis is isolated to the left lung. Like right-sided cases, specific localization aids in tailored medical intervention.

These classifications play a crucial role in medical diagnostics, guiding healthcare professionals in identifying and addressing pulmonary pathologies through the analysis of chest X-ray images. Understanding the nature and location of abnormalities is vital for effective treatment strategies and patient care.

Loss function

For training all of the selected models we used the same hyper-parameters and loss function. We applied DICE Loss for the training process because it is widely used for image segmentation. Dice loss is a metric used in image segmentation tasks that quantifies the difference between predicted and ground truth masks. We used dice loss with square values for the predicted mask to increase the distance between the incorrect prediction and the ground true mask (Equation 1).

$$\text{DICE Loss} = 1 - \text{DICE} = 1 - \frac{2 * |X^2 \cap Y^2|}{|X^2| + |Y^2|} \quad (1)$$

Model evaluation

As medical image segmentation is used as a premedical step of image diagnostics, the quality of segmentation is critical. However, the similarity between the real and predicted mask is not only one important characteristic. To evaluate the similarity and distance between ground true and predicted mask we used DICE (Equation 2), IoU (Equation 3) and Hausdorff Distance (Equation 4).

$$\text{DICE} = \frac{2 * |X \cap Y|}{|X| + |Y|} \quad (2)$$

$$\text{IoU} = \frac{|X \cap Y|}{|X \cup Y|} \quad (3)$$

$$\text{HD} = \max \left(\max_{a \in A} \min_{b \in B} d(a, b), \max_{b \in B} \min_{a \in A} d(a, b) \right) \quad (4)$$

It is important to have an opportunity to use the model on different hardware with different computation resources. For deep learning models, the number of trainable parameters is the characteristic responsible for the speed and required hardware for training, because it has a direct relation with the number of layers of the model.

Image segmentation task could be described as pixel-wise classification. The distribution between false positive and false negative predictions is also important for medical image processing tasks. We used precision (Equation 5) and recall (Equation 6) to evaluate if the model better classified positive or negative examples. Although precision and recall both characterize the quality of classification, one of them could be significantly higher than the other. Precision is more important if the number of false positive predictions has more crucial consequences than false negative. Otherwise, when false negative predictions are more critical, it is better to increase recall.

$$\text{Precision} = \frac{\text{True Positives}}{\text{True Positives} + \text{False Positives}} \quad (5)$$

$$\text{Recall} = \frac{\text{True Positives}}{\text{True Positives} + \text{False Negatives}} \quad (6)$$

Hardware

All experiments were done on the same hardware: NVIDIA A100 80GB GPU with CUDA version 11.7, paired with an AMD EPYC 7663 56-Core Processor for CPU tasks., RAM 1,5 Ti. Computational resources have been temporarily provided by the Institute of Information and Computational Technologies (IICT).

Results and discussion

We calculated the number of parameters for all the models. The cheapest model we used was Base U-Net. We used five metrics for the evaluation of segmentation. DICE, IoU, Precision, and Recall should be maximized, and Hausdorff Distance should be minimized for better segmentation results. We used a constant number of epochs for training. The results with input size 224*224 are provided in Table 2.

Table 2 – Comparative results for U-Net, U-Net++, Swin-UNet, TransUNet with the input size 224 * 224

Model	N param	DICE	IoU	HD	Prec	Rec
Base U-Net	3.25E+07	0.9546	0.9147	16.73	0.9643	0.9474
Swin-UNet	4.14E+07	0.9543	0.9141	13.6969	0.9623	0.9487
U-Net++	4.89E+07	0.9537	0.9128	23.05	0.9476	0.9618
TransUNet	9.23E+07	0.9442	0.8965	14.3628	0.9580	0.9340

As we can see in Table 1, DICE and IoU decreased when the number of trainable parameters increased. It could be caused by the limited size of the data. The model with the minimum Hausdorff Distance is SwinU-Net, which means that it provides maximum similarity in the form of a predicted mask. U-Net also has maximum Precision, this makes U-Net a preferred model in situations where it is important to minimize the number of false positive predictions. Usually, the problem is false positive predictions from the point of view of the patient and the doctor. The model with the highest Recall is U-Net++, which means that it makes fewer false negative predictions.

Literature review

The U-Net architecture was originally constructed for the main challenges of computer vision: it could be trained on the set with limited size, considering the fact the relevant part of the image could be significantly smaller, like borders between cells on a biopsy image, than all other parts, and does not require big computational resources because its architecture distinctive features. Base U-Net consists of main parts: mirror encoder-decoder, skip connection layers, and bottleneck. U-Net shows high performance for medical [16, 17, 18] and non-medical image segmentation [19]. The high performance of U-Net has been a motivation for its extension for various U-Net-based algorithms [8, 9, 10, 11, 20]. U-Net architecture could be combined with residual [5], recurrent [6], or dense [7] blocks forming a new convolutional neural network. U-Net also could be adopted for 3D image segmentation [21, 22] which is also a widely used format of visual representation of the human body.

The author of article [23] provides a comprehensive theoretical review of more than eight U-Net-based and original U-Net models. The authors provided a list of their applications for different human organs and illnesses segmentation based on the information given in other articles.

The article [24] provides a comparative analysis of 2D U-Net and 3D U-Net for brain tissue segmentation. The authors used the Open Access Series of Imaging Studies (OASIS) [25] for training and testing. The article [26] provides a comparative analysis of U-Net-based algorithms for liver segmentation. 3D U-Net was better in both cases. The article [27] provides a comparison of 2D and

3D U-Net for pulmonary nodule segmentation based on the LIDS-IDRI Dataset [28]. Two Level U-Net shows the best scores for image segmentation than 2D and 3D U-Net.

U-Net architecture could be extended not only as a part of the new convolutional neural network but also as a new transformer architecture. The first application of transformer-based architectures in computer vision was described in the article [29]. The authors described an application of a visual transformer for the image classification task. The architecture was extended for the image segmentation task. Examples of combination U-Net with transformers are TransUNet and SwinUNet. TransUNet and SwinUNet were compared for caries segmentation in the article [30]. The article [31] proposed new transformer-based architecture which was tested with TranUNet and SwinU-Net for ACDC Dataset. In both cases, TransUNet showed a higher DICE score, which is the opposite result provided by the authors of the original SwinU-Net article.

Although transformer-based architectures are powerful tools for image processing, they require much more computation resources than convolutional neural networks. Sometimes their application is not worth the resources spent. The article [33] provides an adaptation of U-Net called LargeKernelU-Net (LKU-Net) which shows higher DICE on OASIS dataset than TransMorph [34].

Although U-Net-based algorithms show stable and high performance for the segmentation of instances with different types, they are not the only type of architecture, used in medical image processing. Example Mask R-CNN [35] originally described for non-medical object detection, also could be adopted for medical image segmentation task [36, 37] by itself. The article [38] provides a comparison between U-Net, Mask RCNN, and their ensembled for nuclear segmentation.

Conclusion

Medical image processing could be applied as a pre-medical diagnostic to increase the quality of patient management. Image segmentation is one of the computer vision tasks, that is suitable for medical image diagnostics because it allows to find not only the class of required instance, but the location, size, and form as well. However, there are a lot of changes and limitations for computer vision medicine. The first one is the computational and data resources. The second is the quality of segmentation because the model must find the accurate size and form of the required instance. Finally, the distribution between false positive and false negative predictions influences the choice of the model. The limitation of medical image processing was the motivation for the creation of U-Net architecture for medical image segmentation. U-Net shows high performance on various medical image tasks and was extended by combination with other architectures. We compared U-Net with three of its extensions TranUNet, Swin-UNet and UNet++. Based on our results Base U-Net still shows comparative results with its descendants with a bigger number of trainable parameters.

Future work

In the current article, we provide a comparative analysis of four deep learning models: U-Net, U-Net++, TransUNet and SwinUNet for lung segmentation tasks. We trained all models on similar circumstances and compared results with each other. We used open-source data for comparison. All of the images were provided in PNG format. We used the dataset with a small number of images. So, this research has some limitations, which could be extended in future work.

First, the images that we used are provided in PNG format. One pixel in PNG could be described as an integer value from 0 to 255. However, the usual format of X-ray images is an application of DICOM format. Dicom format is also used for computed tomography images. This format could contain much more value of each pixel which allows to separate instances of different types by the grey value on the image by itself. So the X-ray image in Dicom contains much more radionic features than the PNG image that we used.

Another limitation of the experiment that we provide is the size of the dataset. Although it was one of the purposes of the research to check the behavior of selected models on small-size datasets,

this data could not be enough for training transformer-based models. So to extend current research the dataset with a bigger size could be used.

The distribution between the lung area and another part of the X-ray also should be considered. In case we describe the segmentation of the lung on X-ray as pixel-ways classification, the distribution between the lung and other instances is quite balanced because the area of the lung is big. However, we used metrics like DICE and IoU which are partly sensitive to the size of the set. It should be mentioned that for disease segmentation, we usually work with examples where the relevant region is significantly smaller than other parts of the body. So, the behavior of the model could not be predicted before real tests were done for another problem domain. Also, these experiments could be done several types for different types of disease because all of them have different radiological features.

We also use image size 224*224 while the size of the original X-ray image could be different depending on the equipment used for taking the data. So some images were compressed or extended to have similar sizes. Moreover, the Dicom format contains some additional information like the scale of the image, which was lost because of the use of PNG. However, this information could be deleted because in medicine all the information should be anonymized as it is possible. However, for private usage, the quality of segmentation and image processing additional information about disease history, age, sex, and smoking could increase the quality of the model work.

Another possible way to extend current research is not in comparison of the models but in increasing segmentation quality. We do not apply any types of data augmentation to increase the quality of segmentation for honest comparison. Also, we had a goal to compare models on the small-size dataset, so we do not increase the size of the training set in any possible way. So an application of affine transformation could make the segmentation of the models better.

The dataset also was annotated for classification purposes. For current experiments, we used only a part of the data with X-ray images and corresponding lung masks. However, the original dataset also provides information that was contained from two data sources: Shenzhen and Montgomery. The dataset also contains information about gender, age, pathology existing, diagnosis, and disease. There are nine possible types of pathology in the dataset: tuberculosis, pleurisy, atelectasis, pleural thickening, pneumothorax, pneumonia, fibrosis, granuloma (or cavitary), and infiltrate. The main part of the X-ray images does not contain any types of pathologies. Also, some X-ray images do not have labeled pathology and are indicated as an unknown class. Currently, the open-source data is labeled for lung segmentation only, however it could be extended by additional labeling for mentioned diseases. However, the fact that medical labeling is expensive and long process should be taken into account as well.

Also, we used only U-Net-based architectures for comparison reasons. However, as it is mentioned in the Literature review, there are a lot of other ways for medical image segmentation. Currently, we cannot effectively evaluate the reason why the neural network decides on any type of image-processing task. However the X-ray images, especially in Dicom format, could be segmented by non-neural network methods. So the lung could be segmented based on morphological features of the X-ray image. Subsequently, the research could be extended by the comparison of deep learning methods with classical computer vision approaches.

Information about funding

This work was supported by the Ministry of Education and Sciences of the Republic of Kazakhstan under the following grant #AP14871214. The funders had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

REFERENCES

- 1 Ronneberger O., Fischer P. and Brox T. (2015) U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation, in Proc. Int. Conf. Med. Image Comput. Comput.-Assist. Intervent., pp. 234–241.
- 2 Shaziya H., Shyamala K. and Zaheer R. (2018) Automatic Lung Segmentation on Thoracic CT Scans Using U-Net Convolutional Network, 2018 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP), Chennai, India, pp. 0643–0647. <https://doi.org/10.1109/ICCSP.2018.8524484>.
- 3 Robin M., John J. and Ravikumar A. (2021) Breast Tumor Segmentation using U-NET, 2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC), Erode, India, pp. 1164–1167. <https://doi.org/10.1109/ICCMC51019.2021.9418447>.
- 4 Frid-Adar M., Ben-Cohen A., Amer R. and Greenspan H. (2018) Improving the segmentation of anatomical structures in chest radiographs using U-Net with an ImageNet pre-trained encoder, in Image Analysis for Moving Organ, Breast, and Thoracic Images. Cham, Switzerland: Springer, pp. 159–168.
- 5 He K., Zhang X., Ren S. and Sun J. (2016) Deep Residual Learning for Image Recognition, 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, pp. 770–778. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>.
- 6 Liang, Ming, and Xiaolin Hu (2015) Recurrent convolutional neural network for object recognition. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition.
- 7 Huang G., Liu Z., Van Der Maaten L. and Weinberger K.Q. (2017) Densely Connected Convolutional Networks, 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Honolulu, HI, USA, pp. 2261–2269. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.243>.
- 8 Chen J., Lu Y., Yu Q., Luo X., Adeli E., Wang Y. ... and Zhou Y. (2021) Transunet: Transformers make strong encoders for medical image segmentation. arXiv preprint arXiv:2102.04306.
- 9 Pan S., Liu X., Xie N. and Chong Y. (2023) EG-TransUNet: a transformer-based U-Net with enhanced and guided models for biomedical image segmentation. BMC bioinformatics, 24(1), 85.
- 10 Cao H., Wang Y., Chen J., Jiang D., Zhang X., Tian Q. and Wang M. (2023, February). Swin-unet: Unetlike pure transformer for medical image segmentation. In Computer Vision–ECCV 2022 Workshops: Tel Aviv, Israel, October 23–27, 2022, Proceedings, Part III, pp. 205–218, Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25066-8_9.
- 11 Zhou Z., Rahman Siddiquee M.M., Tajbakhsh N. and Liang J. (2018) Unet++: A nested u-net architecture for medical image segmentation. In Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support: 4th International Workshop, DLMIA 2018, and 8th International Workshop, ML-CDS 2018, Held in Conjunction with MICCAI 2018, Granada, Spain, September 20, 2018, Proceedings 4, pp. 3–11, Springer International Publishing.
- 12 Multi-Atlas Labeling Beyond the Cranial Vault – Workshop and Challenge. Synapse multi-organ computer tomography dataset. [Data set]. Synapse.org. <https://repo-prod.prod.sagebase.org/repo/v1/doi/locate?id=syn319380&type=ENTITY>. <https://doi.org/10.7303/SYN3193805>
- 13 Bernard O., Lalande A., Zotti C. et al. (2018) Deep Learning Techniques for Automatic MRI Cardiac Multi-Structures Segmentation and Diagnosis: Is the Problem Solved? IEEE Trans Med Imaging, vol.37, no.11, pp. 2514–2525. <https://doi.org/10.1109/TMI.2018.2837502>.
- 14 Jaeger S., Karargyris A., Candemir S. et al. (2014) Automatic tuberculosis screening using chest radiographs. IEEE Trans Med Imaging, vol.33, no. 2, pp. 233–245. <https://doi.org/10.1109/TMI.2013.2284099>. PMID: 24108713
- 15 Candemir S., Jaeger S., Palaniappan K., Musco JP, Singh RK, Xue Z., Karargyris A., Antani S., Thoma G. and McDonald CJ. (2014) Lung segmentation in chest radiographs using anatomical atlases with nonrigid registration. IEEE Trans Med Imaging, vol. 33, no. 2, pp. 577–590. <https://doi.org/10.1109/TMI.2013.2290491>. PMID: 24239990
- 16 Dong H., Yang G., Liu F., Mo Y. and Guo Y. (2017) Automatic brain tumor detection and segmentation using U-Net based fully convolutional networks. In Medical Image Understanding and Analysis: 21st Annual Conference, MIUA 2017, Edinburgh, UK, July 11–13, Proceedings 21, pp. 506–517, Springer International Publishing.
- 17 Roja Ramani D. and Siva Ranjani S. (2019) U-Net based segmentation and multiple feature extraction of dermoscopic images for efficient diagnosis of melanoma. In Computer Aided Intervention and Diagnostics in Clinical and Medical Images, pp. 81–101, Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04061-1_9.

- 18 Song L.I., Geoffrey K.F. and Kaijian H.E. (2020) Bottleneck feature supervised U-Net for pixel-wise liver and tumor segmentation. *Expert Systems with Applications*, no. 145, p. 113131. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.113131>.
- 19 Abderrahim N. Y. Q., Abderrahim S. and Rida A. (2020) Road Segmentation using U-Net architecture, 2020 IEEE International conference of Moroccan Geomatics (Morgeo), Casablanca, Morocco, pp. 1–4, <https://doi.org/10.1109/Morgeo49228.2020.9121887>.
- 20 Zhuang, J. (2018) LadderNet: Multi-path networks based on U-Net for medical image segmentation. *arXiv preprint arXiv:1810.07810*.
- 21 Çiçek Ö., Abdulkadir A., Lienkamp S.S., Brox T. & Ronneberger O. (2016) 3D U-Net: learning dense volumetric segmentation from sparse annotation. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2016: 19th International Conference, Athens, Greece, October 17–21, Proceedings, Part II* 19, pp. 424–432. Springer International Publishing.
- 22 Chen W., Liu B., Peng S., Sun J. & Qiao X. (2019) S3D-UNet: Separable 3D U-Net for Brain Tumor Segmentation. *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 358–368. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11726-9_32.
- 23 Siddique N., Paheding S., Elkin C.P. and Devabhaktuni V. (2021) U-Net and Its Variants for Medical Image Segmentation: A Review of Theory and Applications, in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 82031–82057. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3086020>.
- 24 Woo B. and Lee M. (2021) Comparison of tissue segmentation performance between 2D U-Net and 3D U-Net on brain MR Images, 2021 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC), Jeju, Korea (South), pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICEIC51217.2021.9369797>.
- 25 Marcus D.S., Wang T.H., Parker J., Csernansky J.G., Morris J.G. and Buckner R.L. (2007) Open Access Series of Imaging Studies (OASIS): Crosssectional MRI data in young, middle aged, nondemented, and demented older adults, *J. Cogn. Neurosci.*, vol. 19, pp. 1498–1507.
- 26 Meine H., Chlebus G., Ghafoorian M., Endo I. and Schenk A. (2018) Comparison of u-net-based convolutional neural networks for liver segmentation in ct. *arXiv preprint arXiv:1810.04017*.
- 27 Song G., Nie Y., Zhang J. and Chen G. (2020) Research on the fusion method of 2D and 3D UNet in pulmonary nodules segmentation task, 2020 International Conference on Computer Science and Management Technology (ICCSMT), Shanghai, China, pp. 44–47. <https://doi.org/10.1109/ICCSMT51754.2020.00016>.
- 28 Armato S.G. 3rd, McLennan G., Bidaut L. et al. (2011) The Lung Image Database Consortium (LIDC) and Image Database Resource Initiative (IDRI): A completed reference database of lung nodules on CT scans. *Medical Physics*, no.38, pp. 915–931. <https://doi.org/10.1118/1.3528204>
- 29 Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A., Weissenborn D., Zhai X., Unterthiner T. ... and Houlsby N. (2020) An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. *arXiv preprint arXiv:2010.11929*.
- 30 Ying S., Wang B., Zhu H., Liu W. and Huang, F. (2022) Caries segmentation on tooth X-ray images with a deep network, *Journal of Dentistry*, no. 119, p. 104076. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2022.104076>.
- 31 Wang H., Xie S., Lin L., Iwamoto Y., Han X.H., Chen Y. W. and Tong R. (2022, May). Mixed transformer u-net for medical image segmentation. In *ICASSP 2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 2390–2394 IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICASSP43922.2022.9746172>.
- 32 Jia X., Bartlett J., Zhang T., Lu W., Qiu Z. and Duan J. (2022, September) U-net vs transformer: Is u-net outdated in medical image registration? In *International Workshop on Machine Learning in Medical Imaging*, pp. 151–160. Cham: Springer Nature Switzerland.
- 33 Chen J., Frey E.C., He Y., Segars W.P., Li Y. & Du Y. (2022) Transmorph: Transformer for unsupervised medical image registration. *Medical image analysis*, no. 82, p. 102615. <https://doi.org/10.1016/j.media.2022.102615>.
- 34 He K., Gkioxari G., Dollár P. and Girshick R. (2017) Mask r-cnn. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, pp. 2961–2969.
- 35 Liu M., Dong J., Dong X., Yu H. and Qi L. (2018, September). Segmentation of lung nodule in CT images based on mask R-CNN. In *2018 9th International Conference on Awareness Science and Technology (iCAST)*, pp. 1–6, IEEE.
- 36 Zhang Y., Chan S., Park V.Y., Chang, K.T., Mehta S., Kim M. J. ... and Su M. Y. (2022). Automatic detection and segmentation of breast cancer on MRI using mask R-CNN trained on non-fat-sat images and tested on fat-sat images. *Academic Radiology*, 29, pp. 135–144.
- 37 Vuola A.O., Akram S.U. and Kannala J. (2019) Mask-RCNN and U-Net Ensembled for Nuclei Segmentation, 2019 IEEE 16th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI 2019), Venice, Italy, pp. 208–212. <https://doi.org/10.1109/ISBI.2019.8759574>.

^{1*}Нам Д.,

техника магистрі, PhD студенті, ORCID ID: 0000-0002-9356-3114,
e-mail: d.nam@kbtu.kz

¹Пак А.,

т.ғ.к., ORCID ID: 0000-0002-8685-9355, e-mail: a.pak@kbtu.kz

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

ӨКПЕНІҢ РЕНТГЕНДІК КЕСКІНДЕРІН СЕГМЕНТТЕУ МӘСЕЛЕСІНДЕ U-NET, U-NET++, TRANSUNET ЖӘНЕ SWIN-UNET МОДЕЛЬДЕРІН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Аңдатпа

Медициналық кескіндерді сегменттеу медициналық кескіндерді өңдеуде кеңінен қолданылатын мәселе. Медицинада сегменттеуді қолдану қажетті нысанның орналасуы мен мөлшерін анықтауға мүмкіндік береді. Модельді таңдауда бірнеше маңызды фактор ескерілді. Біріншіден, модель масканы дәл болжауды қамтамасыз етуі керек. Екіншіден, модель есептеу ресурстарының үлкен көлемін қажет етпеуі керек. Ақырында, жалған оң және жалған теріс болжамдар арасындағы бөліністі ескеру қажет. Біз DICE, IoU, дәлдік пен толықтық, Хаусдорф қашықтығы сияқты параметрлер негізінде өкпенің рентген кескіндерін сегменттеу үшін қолданылатын терең оқытудың төрт моделіне салыстырмалы талдау жасаймыз, олар: негізгі U-Net және оның U-Net ++ кеңейтімі, TranUNet және Swin-UNet. Ең аз параметрлі CNN модельдері деректер жинағы шектелген көп параметрлі модельдермен салыстырғанда DICE және IoU ең жоғары көрсеткішті көрсетеді. Мақалада ұсынылған эксперимент нәтижелеріне сәйкес U-Net максималды DICE, IoU мен дәлдікке ие. Ал бұл оны медициналық кескінді сегменттеуде пайдаланылатын ең қолайлы модельге айналдырады. SwinU-Net – Хаусдорф қашықтығы ең аз модель. U-Net++ максималды толық модель.

Тірек сөздер: CNN, сегменттеу, трансформерлер, медициналық кескінді өңдеу.

^{1*}Нам Д.,

магистр техн. наук, PhD студент, ORCID ID: 0000-0002-9356-3114, e-mail: d.nam@kbtu.kz

¹Пак А.,

канд. техн. наук, профессор, ORCID ID: 0000-0002-8685-9355, e-mail: a.pak@kbtu.kz

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

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ U-NET, U-NET++, TRANSUNET AND SWIN-UNET В ЗАДАЧЕ СЕГМЕНТАЦИИ РЕНТГЕН-СНИМКОВ ЛЕГКОГО

Аннотация

Сегментация медицинских изображений является широко используемой задачей в обработке медицинских изображений. Использование сегментации в медицине позволяет получить местоположение и размер необходимой сущности. Существует несколько важных факторов при выборе модели. Во-первых, модель должна обеспечивать точное предсказание маски. Во-вторых, модель не должна требовать большого объема вычислительных ресурсов. Наконец, следует учесть распределение между ложноположительными и ложноотрицательными предсказаниями. Мы предоставляем сравнительный анализ четырех моделей глубокого обучения: базовой U-Net и ее расширений U-Net++, TranUNet и Swin-UNet для сегментации легких по рентгеновским снимкам на основе обучаемых параметров, DICE, IoU, расстояния Хаусдорфа, точности и полноты. Модели CNN с наименьшим количеством параметров показывают самые высокие показатели DICE и IoU по сравнению с моделями с большим количеством параметров на ограниченном по размеру наборе данных. Согласно результатам эксперимента, представленным в статье, U-Net имеет максимальные DICE, IoU и точность. Это делает модель наиболее подходящей для сегментации медицинских изображений. SwinU-Net – модель с минимальным расстоянием Хаусдорфа. U-Net++ имеет максимальную полноту.

Ключевые слова: CNN, сегментация, трансформеры, обработка медицинских изображений.

UDC 004.91
IRSTI 20.15.13

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-54-64>

^{1*}**Uvaliyeva I.M.,**

PhD, ORCID-ID: 0000-0002-2117-5390, e-mail: indirauvalieva@gmail.com

¹**Zhenyssov A.E.,**

Bachelor student, ORCID-ID: 0009-0006-6441-7747, e-mail: zhenyssov@mail.ru

²**Shaikhanova A.K.,**

PhD, ORCID-ID: 0000-0001-6006-4813, e-mail: aigul.shaikhanova@gmail.com

¹D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 070004, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

²L.N. Gumilyov Eurasian National University, 010000, Astana, Kazakhstan

DEVELOPMENT OF A DOCUMENT MANAGEMENT SYSTEM FOR AN ENTERPRISE BASED ON BUSINESS PROCESS MODELING

Abstract

This article will discuss the functionality of the electronic document management system. The interface, main functions and purpose of the application will be described here to guide the user. The electronic document management service was designed based on an analysis of existing solutions on the Kazakhstan market. When developing the application, we took into account standard functions present in most other services, as well as those that are missing there or implemented separately. This article consolidates the entire result of work on the project and helps to look at the final version of the application from the point of view of the end user. Having described each stage of working with the program, the author can also glean for himself some nuances and details that he had previously missed. The results of this project will provide an electronic document management system for enterprises seeking to improve their operational efficiency through the implementation of a modern electronic document management system based on business process modeling.

Key words: user, document, operation, document route, electronic digital signature, crypto library, digital signature key certificate.

Introduction

In today's dynamic business environment, effective document management and business process optimization are becoming key factors for enterprise success. In this context, the development of an electronic document management system based on business process modeling represents a practical and strategic solution to improve operational efficiency and increase the competitiveness of a company. Based on the analysis of existing document and business process management systems, through identifying their advantages and disadvantages, a system was created that allows us to fill the gaps of its predecessors.

The main emphasis is on developing electronic document management functionality that can improve the efficiency of business processes, reduce time costs and minimize the likelihood of errors. The results of the study provide practical recommendations for the implementation of an electronic document management system based on business process modeling to increase the competitiveness of an enterprise in the modern business environment.

With the development of the concept of "Electronic government", as well as the digitalization of many areas in modern Kazakhstan, there is a demand in society for maintaining electronic documentation. The sphere of document flow requires compliance with civil norms and laws, which is why it is necessary to analyze some important sources.

Before development began, an introduction was made to the basic terms of cryptography and encryption. In [1], the term “electronic digital signature” was first mentioned, which is why the article is significant from a historical point of view as one of the stages in the development of the entire field. [2] introduces the reader to the working mechanisms of one of the most common encryption algorithms – RSA.

Another layer of documents is regulations. It contains a large number of documents that regulate various aspects of electronic document management. [3] provides general concepts and definitions for most terms when working with electronic documentation. This act [4] presents rules for verifying electronic documents. In addition to the above documents, it is also worth paying attention to other regulations [5–6]. Some references to electronic documentation may also be found in these sources.

Some materials can be highlighted in foreign sources. [7] provides insight into the CMS standard, which is a universal method for storing electronic documents. Documentation for working with the XAdES and CAdES formats is described in [8] and [9]. These formats define standards when working with documents such as XML and PDF ([10]), respectively.

As part of the development of an electronic document management system, a study and analysis of aspects of data security when interacting with the service was carried out. For this purpose, a number of materials have been studied (some of them [11], [12]). Particular attention is paid to identifying and assessing potential security threats, developing appropriate measures to protect information, as well as introducing technical and organizational mechanisms aimed at ensuring the confidentiality, integrity and availability of data during system operation.

All of these materials provide an understanding of the scope of electronic document management in Kazakhstan, and also allow us to determine standard development standards.

Main provisions

As part of the master’s thesis, a project for an electronic document management system was created. This project was implemented as a web application. The project is based on the goal of providing clients with functions that are not available in other similar systems. Therefore, an analysis of existing offers on the market was carried out in order to identify similar functions. In addition, the mechanism of working with electronic documents in the Republic of Kazakhstan was studied for a deeper understanding of certain difficulties.

Before starting work, the basics of web programming were studied in order to create the first version of the project. The development is based on the PHP programming language, supported by HTML, CSS and JavaScript. During the work, it also became necessary to add special frameworks and third-party free libraries in order to fully implement the functionality.

In addition, during the development, a database management system based on PostgreSQL and the NUC RK developer kit were used to work with electronic digital signatures.

The web application interface was an important part of the development. The interface of modern applications is important for the developer for several reasons:

- ♦ Interface defines the appearance, interaction, usability, behavior and overall experience of the application. A good interface can increase user satisfaction and loyalty and help achieve the application’s goals.
- ♦ The interface affects the performance and efficiency of an application because it determines how users perform their tasks using the application. A good interface should be intuitive, simple and fast to minimize errors and time wastage.
- ♦ The interface reflects the values and reputation of the developer as it is part of the brand and identity of the application. A good interface should meet the expectations and needs of users, as well as convey the emotions and mood of the application.

During development, it was decided to make a user-friendly interface. A user-friendly interface is an interface that is easy for the user to understand and use. It does not require much effort from

the user to figure out how to work with the application. This type of interface makes interaction with the application pleasant and efficient. It also contributes to increased satisfaction and loyalty among users who appreciate the design and usability of the application and improves the performance and efficiency of the application, which allows users to complete their tasks using the application quickly and without errors.

To create such an interface, the developer must take into account the needs of the users and also follow some principles and techniques of interface design. For example, the interface should be simple, intuitive, consistent, adaptive, interactive and aesthetic.

During development, many tests were carried out to identify errors. It is important to consider that electronic documents are an important area of life for companies. The purpose of testing is to identify errors that can disrupt the operation of the system, cause an error for the client, and also clearly notify the user of the presence of any errors.

At the moment, there are points within the service that can be improved and expanded in terms of functionality.

The service is intended for use by individuals and legal entities operating in the territory of the Republic of Kazakhstan.

Software and hardware requirements for the system:

1. To work with documents, user will need an electronic digital signature key.

2. Technical requirements for working with the program:

- ♦ at least 2 GB of RAM;
- ♦ free disk space of at least 10 GB;
- ♦ Internet connection (at least 128 Kbps, recommended speed – from 1 Mbps);
- ♦ open access on port 443 for correct interaction with URLs;
- ♦ browser: Internet Explorer 10+, Firefox 4+, Opera 10+, Google Chrome 4+, Safari 5+;
- ♦ operating system: Windows 7/8/10/11, Linux, OS X 10+;
- ♦ installed NCALayer application from NCA RK.

All tools and pictures used in the application were taken from publicly available free resources. In addition, most of the pictures are used only to demonstrate the operation of the application, and in the future they will be replaced using our own works.

Materials and Methods

The first thing that greets the user is the login page. A standard authentication mechanism for many websites is available here. The user can register if he has not used the service yet, or authorize an existing account. When developing this page, great attention was paid to data storage, because customer credential information is sensitive information and should be highly secure. User may not log in and work with limited functionality.

Then, the user is taken to the main page, where several functions are available to him. If the client is authorized, then three blocks are available to him: “My documents”, “Sign” and “Verify document” (Figure 1, p. 57).

In addition, when starting work, the user can select the mode: , under which individual or legal entity he/she will work. EDS keys for legal entities and individuals are different, so it is important to correctly indicate the client’s data. Specifying an individual allows representatives of small and medium-sized businesses to work with documents, and specifying a legal entity allows access to working with documents within the company. The registration process requires connecting NCALayer and entering the data of digital signature certificate. In this way, the user data will be saved in the system. In this case, the password and data of the key itself are not saved.

First of all, the client can sign any of his documents. To do this, he can go to the signature page and select the type of signed document (Figure 2, p. 57).

“Basic” and “Additional” signature methods are available here. The main ones include: signing a CMS document, signing an XML file and signing multiple documents. CMS signature allows user to sign a file of many popular formats, while saving data about the signature and the original document inside the CMS container itself. Files in PDF, WORD, EXCEL, etc. formats are suitable for this signature. The client needs to click the file selection button and specify the required file. A visual demonstration is available for PDF files (Figure 3, p. 58).

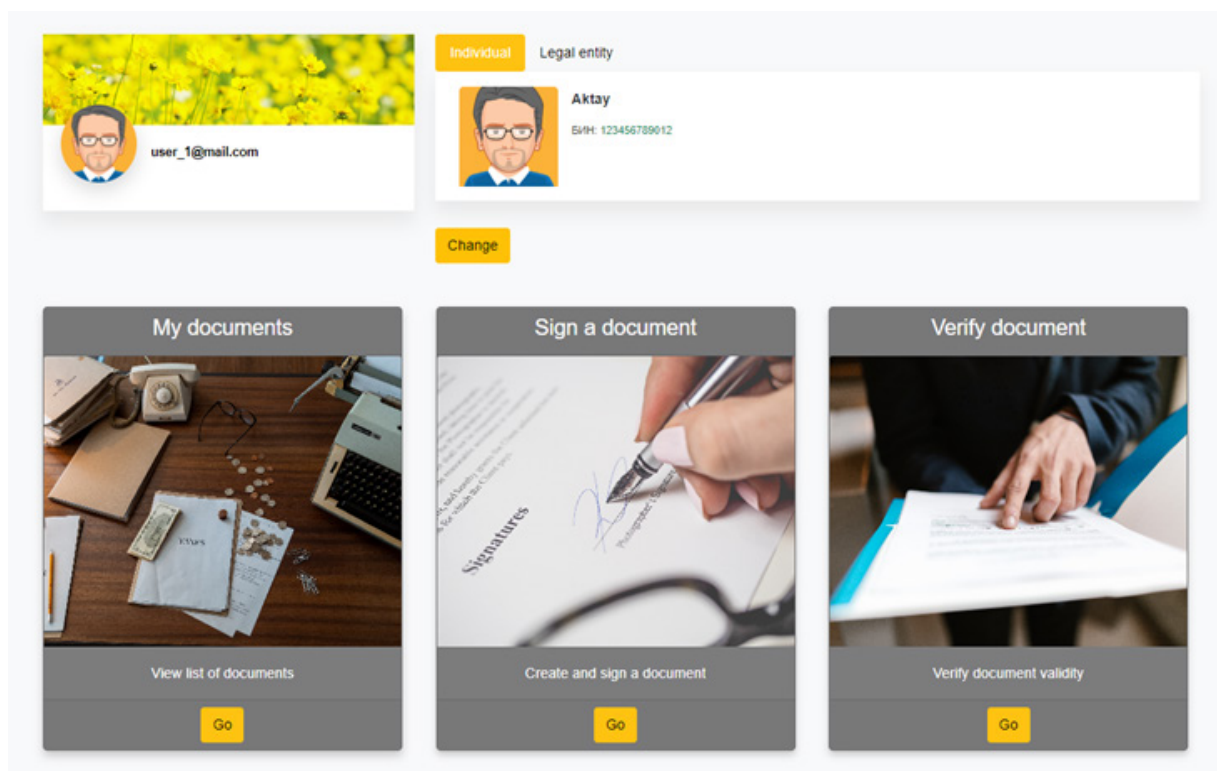


Figure 1 – Home page

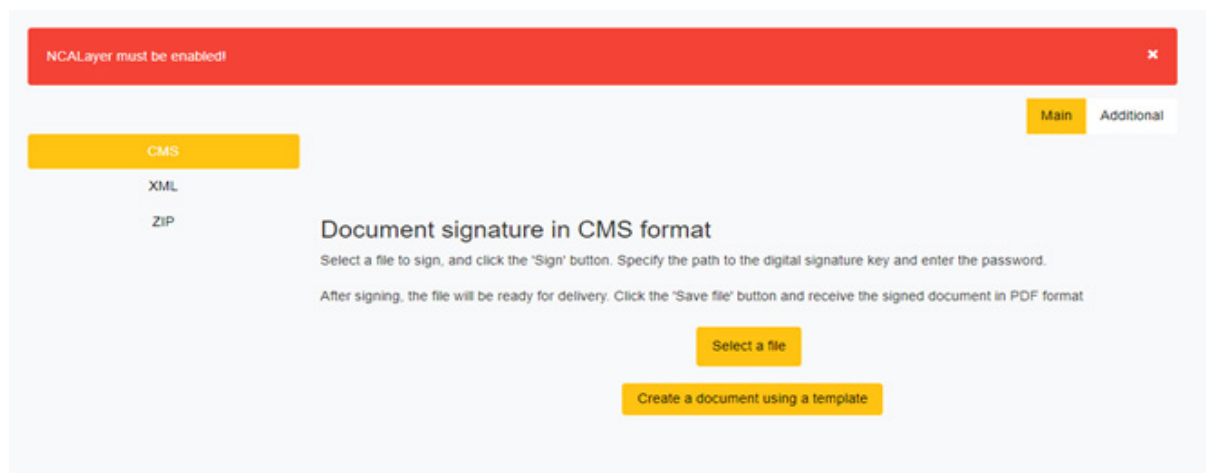


Figure 2 – “Sign document” page

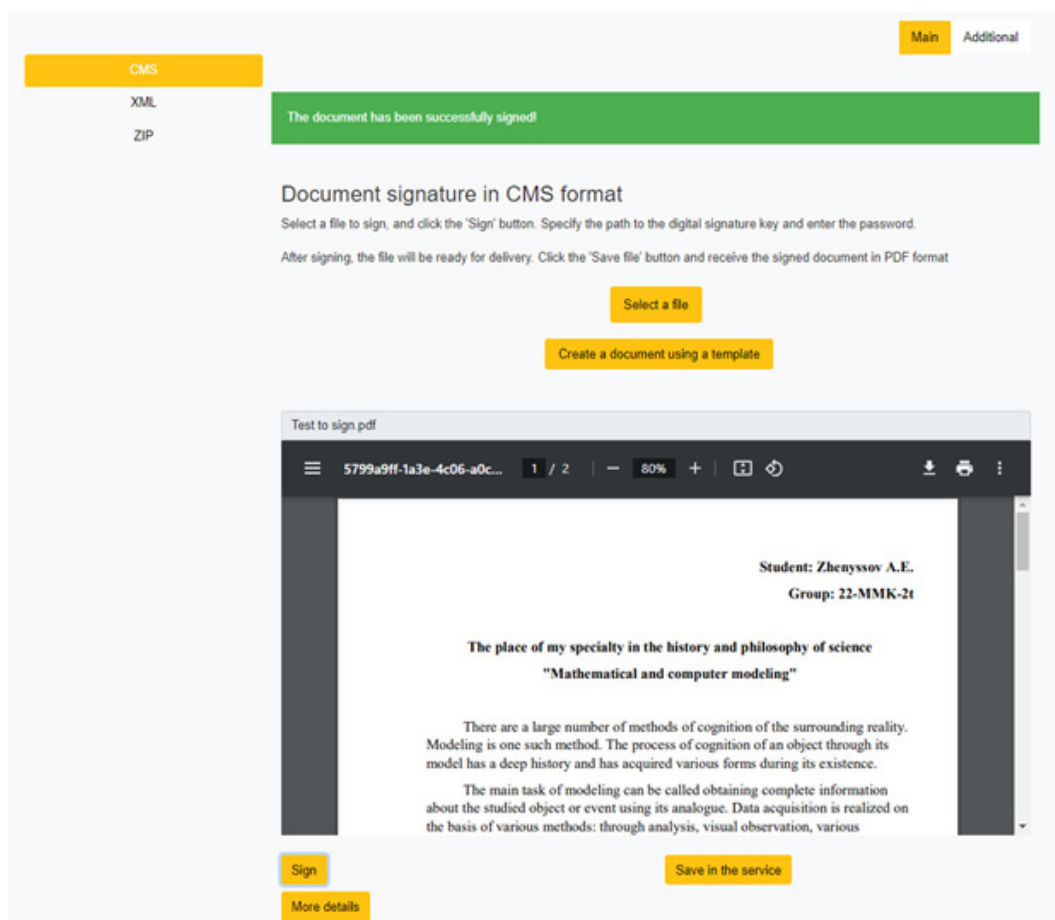


Figure 3 – Signing a PDF file

Next, after checking that the file matches, user can click the “Sign” button, enter the key data in the NCALayer window and receive a notification whether the file is signed or not. If the signing is successful, a “More details” button appears; when clicked, the user is taken to the document page. A similar algorithm works for other methods. It’s worth talking about additional signature methods. The document hash signature, byte array signature, and WS message signature are available here (Figure 4).

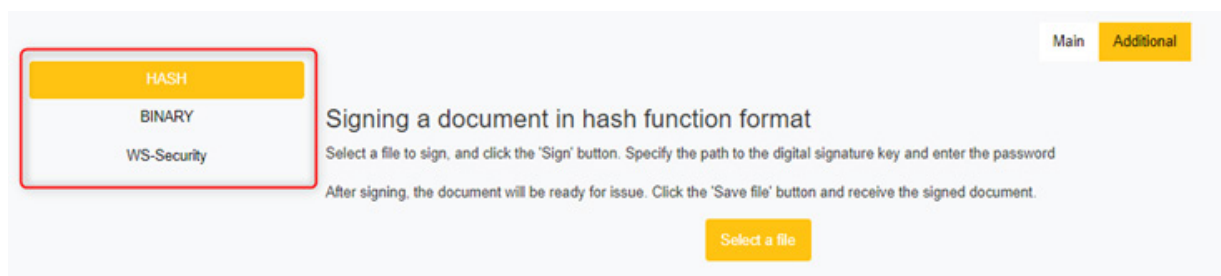


Figure 4 – Additional signature methods section

These types of files are not common, but can be used to interact with some government bodies (for example, the Taxpayer’s Account portal accepts tax reporting forms in the form of WS messages). The mechanism for working with these methods differs from the main ones, because NCALayer is missing signature data. Therefore, similar functionality was implemented based on the KalkanCrypt

crypto library, which is also included in the developer kit. It is also worth mentioning that to implement the signing algorithms for several documents, it was not the standard version of NCALayer that was used, but a modification from 1C-Rating, which allows user to check the correspondence of the BIN of clients and the keys with which they sign. In addition, the page offers the opportunity to upload your own document and save it in the database without signing, with the function of further signing. Also, the service has several types of standard documents that are generated automatically without the need to download. For example, the document “Application for Leave” can be generated using the service.

The next section of the service is checking signed documents (Figure 5). The functionality for checking the validity of documents of different formats is implemented here.

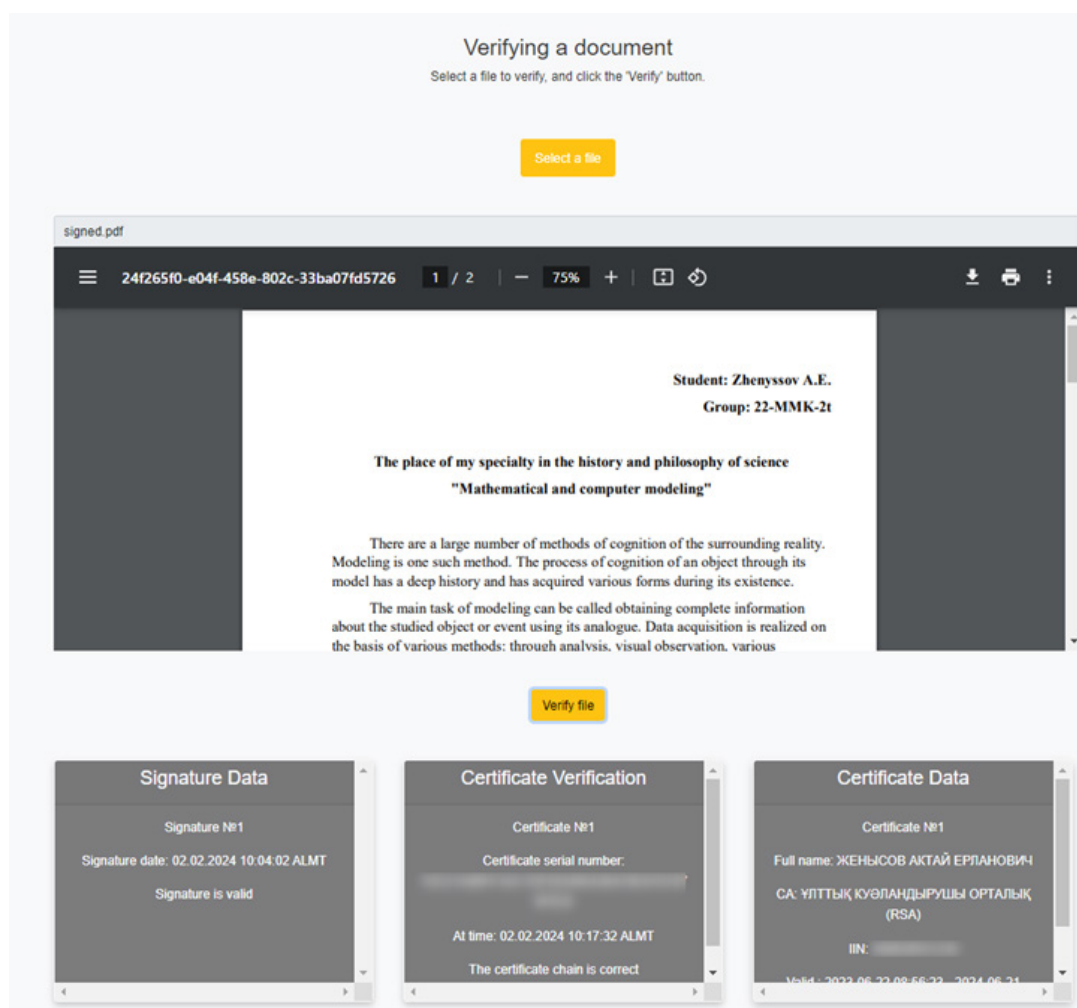


Figure 5 – “Check Document” page

Results

Currently, documents in CMS and XML formats are checked. Document verification is implemented using tools from the KalkanCrypt crypto library. To check the validity of the document, user must click the file selection button, and then the “Check” button. If a signature is found in a document, the service will issue a response in the form of several blocks, which indicate signature data (number of signatures, date of signing and current validity), certificate verification (serial number and certificate status), as well as signer’s certificate data (name, certification center, BIN/IIN, validity date). The functionality of the page is the same for both authorized and unauthorized users.

In order for documents to be stored in the system, a server model was implemented within the service. This means that data on signed documents is stored in the system for a certain period of time. To work with documents, user need to go to the “My Documents” page, where various operations with documents are available. First of all, this is the storage of documents within the service. Here user can see signed and unsigned client documents (Figure 6).

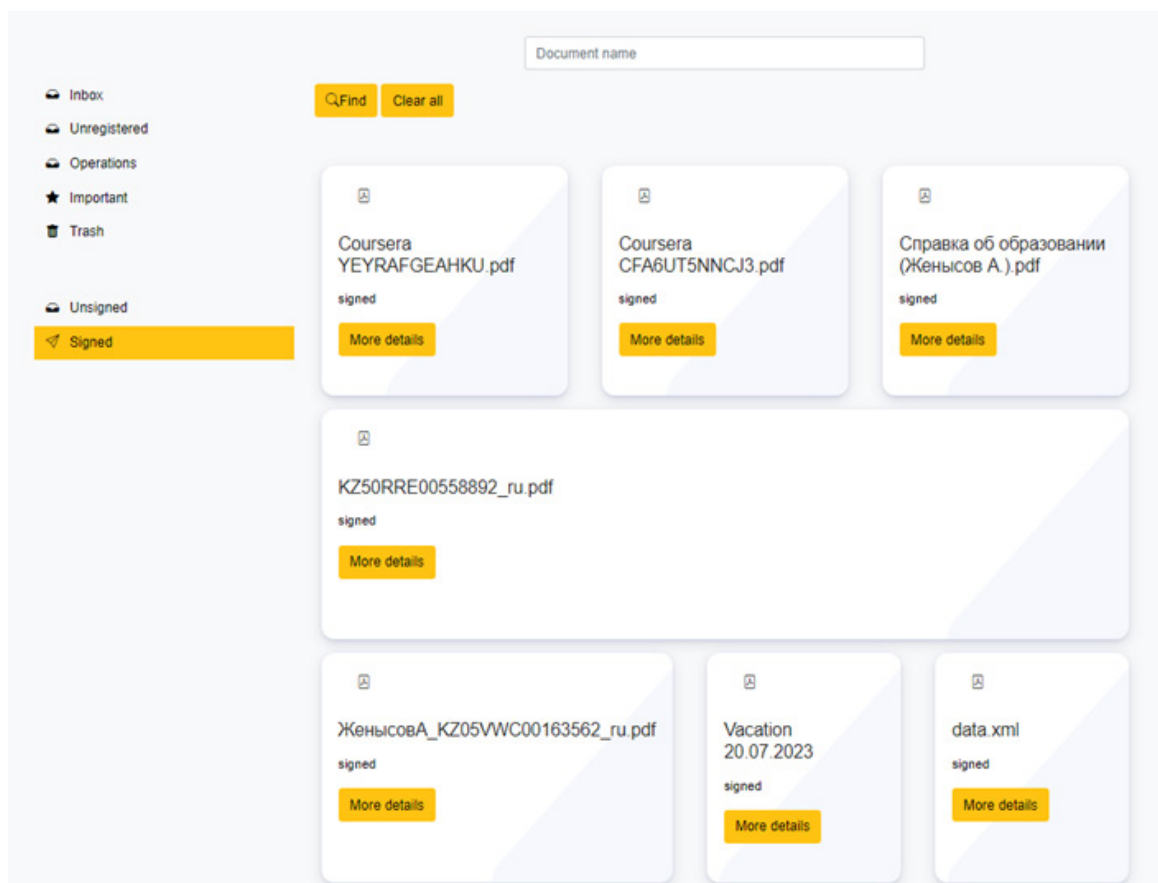


Figure 6 – User documents section

Each document has its own page on which user can see more detailed information about signatures (similar to the document verification page), send the document to counterparties, or download a zip container with signature information (Figure 7, p. 61).

When downloading the container, the user receives two documents: a signed document and a reference document, which contains all the signature information in printed form.

The signed document can be used for further operations, in particular, it can be verified through the “ezSigner” service, which is one of the popular services for verifying electronic documents in the Republic of Kazakhstan. Sending documents is implemented from several angles. Firstly, sending occurs between users of the service. There are no obstacles here; the service sends documents through internal sending mechanisms. This is implemented in the document sending block, through a separate modal form.

Discussion

However, it was decided that the transit of documents should be carried out not only between authorized clients, but also between others. Therefore, it is possible to send a document to an

unauthorized user via email. To do this, when sending, a letter is generated to the specified email address with a unique code that is valid for a limited time. The counterparty must enter the code on a unique code entry page in order to access the document page and sign it.

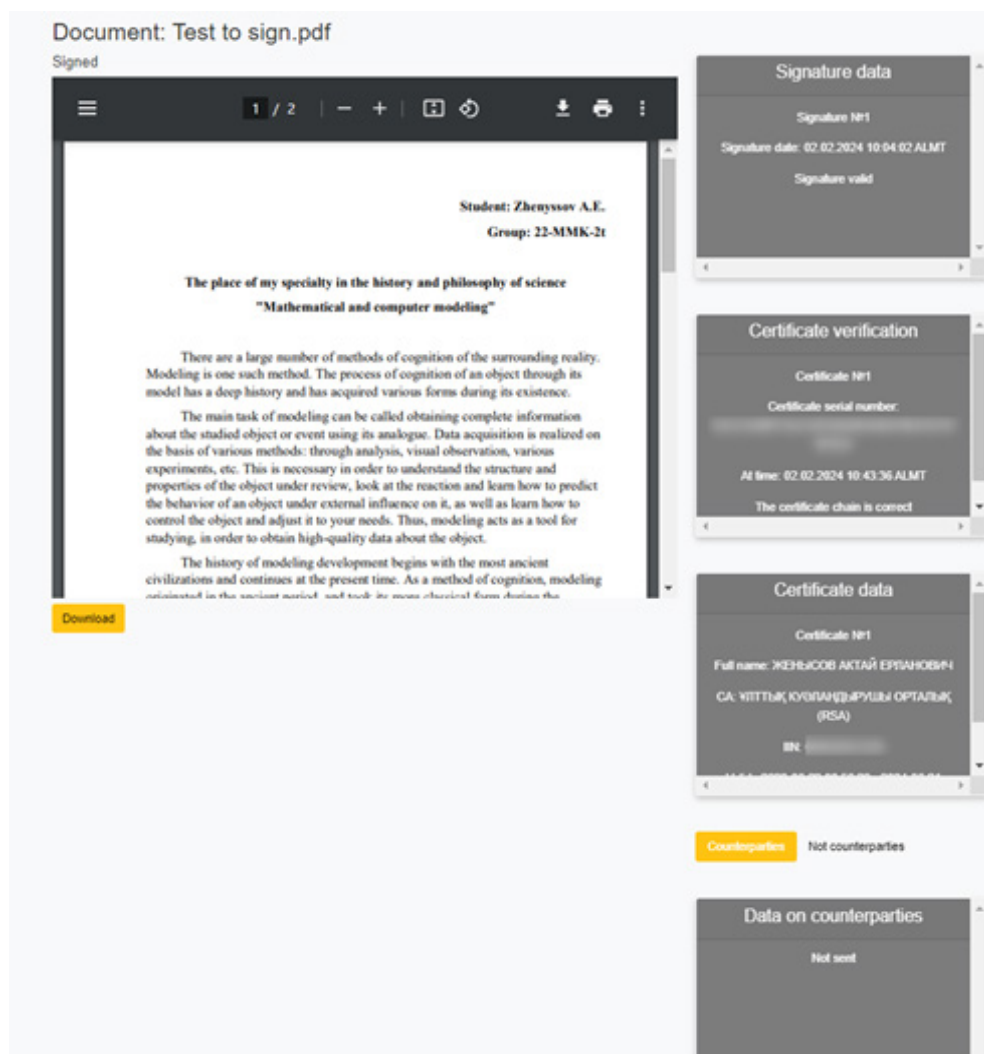


Figure 7 – Document page

In the future, it will be possible to get to the document page using this code. An algorithm for sending documents within the company has also been implemented. To do this, use a special section “Operations” (Figure 8, p. 62), where user can specify any document from list and send it to any members of the company in which the sender is listed for signing.

User can also request certain employees to sign documents of the same type. Inside the service, on the pages of the “My Documents” section, user can see both incoming and outgoing documents. User can click on each message and see the text from the sender and the attached document. Thus, the basic algorithm for electronic mail services was implemented.

In the process of working on the service, some of its advantages and disadvantages were identified over other services that work with electronic signatures of the Republic of Kazakhstan (Table 1, p. 62).

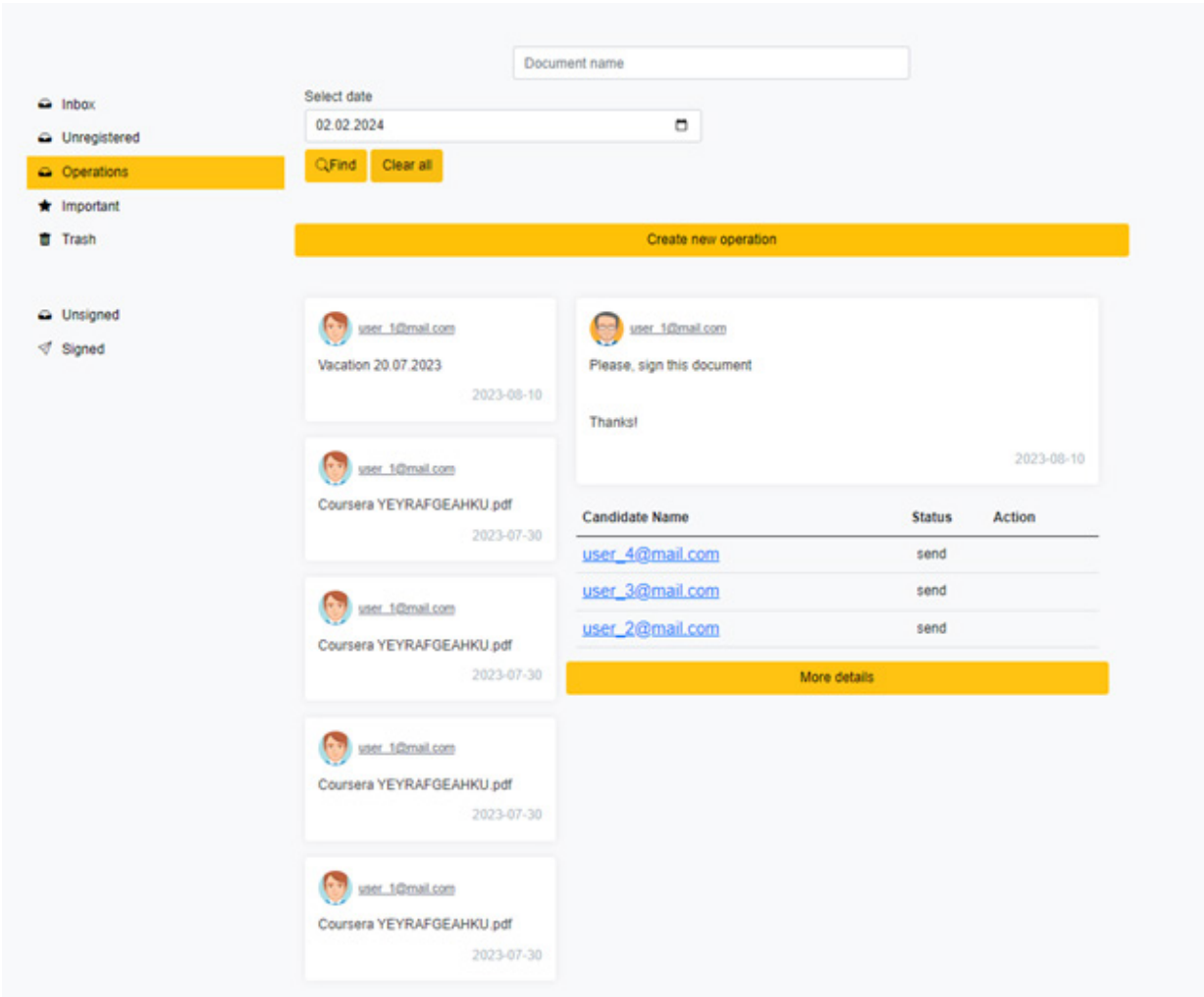


Figure 8 – Section “Intra-company operations”

Table 1 – Advantages and disadvantages of the project

Advantages	Disadvantages
Document formats implemented by NCA were added to the service. These formats include both common (XML, PDF, Word and Excel) and less familiar types to the general user (binary data, document hash functions, WS messages).	The interface and behavior of some features is very basic in functionality and lags behind others. This is due to the amount of work that requires a much larger amount of time, money and people to develop the project.
One of the advantages of the system is the ability to work in unauthorized mode. Many services require at least registration via e-mail to receive the basic functions of the program, and sometimes additional payment is required to work with the full version.	Lack of an advanced security system. Implementing a cybersecurity system requires in-depth knowledge in this area. Many services resort to the use of third-party developments or the services of specialized companies. The application implements basic functions to protect information.
It is based on the “open code” model, with the creation of a universal code for further implementation in companies of any structure and specialization. The service will be convenient for large enterprises that have their own staff of developers.	Not identified

The created application also involves a transition to an «open source» model, with the creation of a universal code for further implementation in companies of any structure and specialization. Thus, the service will be convenient for large enterprises that have their own development staff. At the same time, aspects of legislation are taken into account, which is why some functionality requires coordination with government agencies.

Conclusion

As a result of the design, we can come to the conclusion that the development and implementation of an electronic document management system based on business process modeling is an integral step in modern business. The practical significance of this project lies in the real possibility of increasing the efficiency of document management and optimizing key business processes of the enterprise.

During the implementation of the project, the advantages of an electronic document management system were identified, based on reducing the likelihood of errors and adding functions that are missing in other systems. These factors contribute to the overall effectiveness of the service, helping to increase its competitiveness in a dynamic market environment.

Based on the data obtained, a practical solution has been created for enterprises that decide to implement such systems. An electronic document management system, created on the basis of business process modeling, is an effective tool for modern organizations seeking to improve their operations and strengthen their leadership in the market.

REFERENCES

- 1 Diffie W. and Hellman M.E. (2022) Democratizing Cryptography: The Work of Whitfield Diffie and Martin Hellman, pp. 365–390. <https://doi.org/10.1145/3549993.3550007>
- 2 Inam S., Kanwal S., Zahid A. and Abid M. (2020) European Journal of Engineering Science and Technology, vol.3, no. 1, pp. 22–30. <https://doi.org/10.33422/ejest.v3i1.157>.
- 3 Amangeldy A.A. (2021) European and Asian Law Review, vol. 4, no. 1, pp. 52–60. https://doi.org/10.34076/27821668_2021_4_1_52.
- 4 Manin S., Sabikenov S. and Manina Y. (2024) International Journal of Electronic Security and Digital Forensics, vol. 16, no. 1, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1504/IJESDF.2024.136023>.
- 5 Order of the Head of the Department for Supporting the Activities of Courts at the Supreme Court of the Republic of Kazakhstan (Apparatus of the Supreme Court of the Republic of Kazakhstan) no. 6001-18-7-6/188 “On approval of the Rules for the technical application of means of filing documents with the courts in the form of an electronic document, their registration, processing, familiarization with them” dated June 9, 2018, <https://doi.org/adilet.zan.kz/rus/docs/V1800017148>.
- 6 On approval of the list of standard documents produced during the work of governmental and non-governmental organizations, specifying the storing date – Order Acting Minister of Culture and Sport of the Republic of Kazakhstan of September 29, 2017, no. 263. Registered with the Ministry of Justice of the Republic of Kazakhstan of November 18, 2017, no. 15997. <https://doi.org/adilet.zan.kz/eng/docs/V1700015997>.
- 7 Stapleton J. (2011) Information Security Management Handbook, no. 5, pp. 343–363.
- 8 Ribeiro R.C., de Almeida M.G. and Canedo E. D. (2021) Information, vol. 12, no. 8, p. 289.
- 9 Kutylowski M. and Błażkiewicz P. (2023) Computer Standards & Interfaces, no. 83, p. 103644. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2022.103644>.
- 10 ISO 32000-1:2008 Document management – Portable document format – Part 1: PDF 1.7. International Organization for Standardization ISO. Retrieved 22 March 2016. <https://www.iso.org/standard/51502.html>.
- 11 Andraško J. and Mesarčik M. (2021) TalTech Journal of European Studies, vol. 11, no. 2, pp. 3–24. <https://doi.org/10.2478/bjes-2021-0012>.
- 12 Iavich M., Iashvili G., Gnatyuk S., Tolbatov A. and Mirtskhulava L. Proc. of the 27th International Conference ICIST (Kaunas, Lithuania, October 14–16, 2021), pp. 185–193. https://doi.org/10.1007/978-3-030-88304-1_15.

^{1*}Увалиева И.М.,

PhD, ORCID-ID: 0000-0002-2117-5390, e-mail: indirauvalieva@gmail.com

¹Женысов А.Е.,

бакалавр, ORCID-ID: 0009-0006-6441-7747, e-mail: zhenysov@mail.ru

²Шайханова А.К.,

PhD, ORCID-ID: 0000-0001-6006-4813, e-mail: aigul.shaikhanova@gmail.com

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
070004, Өскемен қ., Қазақстан²Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, 010000, Астана қ., Қазақстан

БИЗНЕС-ПРОЦЕСТЕРДІ МОДЕЛЬДЕУ НЕГІЗІНДЕ КӘСІПОРЫННЫҢ ЭЛЕКТРОНДЫҚ ҚҰЖАТ АЙНАЛЫМЫ ЖҮЙЕСІН ӘЗІРЛЕУ

Андатпа

Бұл мақалада электрондық құжат айналымы жүйесінің функционалдығы талқыланады. Пайдаланушыға бағыт-бағдар беру үшін интерфейс, қолданбаның негізгі қызметтері мен мақсаты осы жерде сипатталады. Электрондық құжат айналымы қызметі Қазақстандық нарықтағы қолданыстағы шешімдерді талдау негізінде жасалған. Қолданбаны әзірлеу кезінде біз басқа қызметтердің көпшілігінде бар стандартты қызметтерді, сондай-ақ ол жерде жоқ немесе бөлек орындалатын қызметтерді ескердік. Бұл мақала жоба бойынша жұмыстың барлық нәтижесін біріктіреді және қолданбаның соңғы нұсқасын соңғы пайдаланушы тұрғысынан қарауға көмектеседі. Бағдарламамен жұмыс істеудің әрбір кезеңін сипаттай отырып, автор өзі үшін бұрын жіберіп алған кейбір ерекшеліктер мен мәліметтерді де жинай алады. Осы жобаның нәтижелері бизнес-процестерді модельдеуге негізделген заманауи электрондық құжат айналымы жүйесін енгізу арқылы операциялық тиімділігін арттыруға ұмтылатын кәсіпорындар үшін электрондық құжат айналымы жүйесін ұсынады.

Тірек сөздер: пайдаланушы, құжат, операция, құжат маршруты, электрондық цифрлық қолтаңба, криптовалюта, ЭЦҚ кілтінің сертификаты.

^{1*}Увалиева И.М.,

PhD, ORCID-ID: 0000-0002-2117-5390, e-mail: indirauvalieva@gmail.com

¹Женысов А.Е.,

бакалавр, ORCID-ID: 0009-0006-6441-7747, e-mail: zhenysov@mail.ru

²Шайханова А.К.,

PhD, ORCID-ID: 0000-0001-6006-4813, e-mail: aigul.shaikhanova@gmail.com

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
070004, г. Усть-Каменогорск, Казахстан²Евразийский университет имени Л.Н. Гумилева, 010000, г. Астана, Казахстан

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

Аннотация

В этой статье будет рассмотрен функционал системы электронного документооборота. Интерфейс, основные функции и назначение приложения будут описаны здесь для руководства пользователя. Сервис электронного документооборота был разработан на основе анализа существующих решений на казахстанском рынке. При разработке приложения мы учитывали стандартные функции, присутствующие в большинстве других сервисов, а также те, которые там отсутствуют или реализованы отдельно. Эта статья обобщает весь результат работы над проектом и помогает взглянуть на окончательную версию приложения с точки зрения конечного пользователя. Описав каждый этап работы с программой, автор также может почерпнуть для себя некоторые нюансы и детали, которые он ранее упускал. Результаты этого проекта позволяют создать систему электронного документооборота для предприятий, стремящихся повысить эффективность своей деятельности за счет внедрения современной системы электронного документооборота, основанной на моделировании бизнес-процессов.

Ключевые слова: пользователь, документ, операция, маршрут документа, электронная цифровая подпись, криптобиблиотека, сертификат ключа ЭЦП.

UDK 004.773
IRSTI 20.15.05

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-65-82>

¹**Uvaliyeva I.,**

PhD, ORCID: 0000-0002-2117-5390, e-mail: iuvalieva@ektu.kz.

²**Rustamov S.,**

PhD, Associate Professor, ORCID: 0000-0002-3247-5882, e-mail: Srustamov@ada.edu.az

^{3*}**Belginova S.,**

PhD, ORCID: 0000-0002-7238-6016, e-mail: sbelginova@gmail.com

¹**Rakhmetullina Zh.,**

Candidate of Physical- Mathematical Sciences, ORCID: 0000-0002-0554-7684,
e-mail: zhrakhmetullina@ektu.kz

¹D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 070004, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

²ADA University, Baku, Azerbaijan

³University «Turan», 050013, Almaty, Kazakhstan

DEVELOPMENT OF A WEB APPLICATION FOR DATA ANALYSIS AND VISUALIZATION TO ENSURE THE SAFETY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

Abstract

Modern technologies have developed quite well lately, and in addition to the banal data collection and processing, modern algorithms are able to predict the behavior of equipment and prevent the occurrence of malfunctions and failures in advance and take actions to reduce the likelihood of an accident and warn the relevant employees. Within the framework of this study, the authors proposed the development of a web-application for the analysis and visualization of data from UK-TPP to ensure the safety of technological processes. Ust-Kamenogorsk TPP is a regional thermal power plant, heat and electricity generation covers 80% of the load of the housing and communal sector of the city and industrial enterprises. The TPP is part of the unified energy system of Kazakhstan. The application being developed has a web interface that will display and visualize data from the main sensors and instruments of the UK TPP, as well as prevent equipment malfunctions and analyze the behavior of sensors using machine learning. Node.js was chosen as the main software platform used, built on the java script programming language, using additional modules that expand the capabilities of this programming language, written in c ++, which speeds up working with data arrays, receiving, and sending them.

Key words: data analysis, visualization, safety of technological processes, UK-TPP, device, Web-application, monitoring, node.js, java script.

Introduction

Analysis and visualization of large data arrays is a topical issue in many areas of activity that use data arrays in their work. The issue of automation of work with data is an important aspect in the modern world, the arrays of data used are only increasing every year and there are not enough human resources for a one-time continuous analysis and monitoring of indicators [1]. The issue of automation is extremely acute in such enterprises as a combined heat and power plant since the issue of analyzing and tracking data in such enterprises is the most important aspect of work. Analysis and timely search for critical indicators can prevent equipment breakdown and emergency situations. Monitoring the behavior of equipment, timely transmission of data, the use of visualization modules, ensuring the safety of technological processes by means of alerting users are key in terms of solving this issue [2].

Among the latest modern tools, advanced technologies based on machine learning are used, which, with the help of machine code learning, are able to solve the problems of analyzing and predicting the behavior of large data sets at a level close to human thinking, but at the same time, many times higher than the performance and speed of human thinking, which is many times more effective than an ordinary employee [3].

In addition, the program can independently analyze critical data and inform the relevant employees about the behavior of faulty equipment, visualize the change in sensors over time [4]. To analyze the emergencies that have occurred, the arrays of processed data are recorded in various databases, using backup, so that even in the event of global emergencies, the picture of the events that have occurred can be restored.

To optimize the analysis of indications of various equipment, web interfaces are created so that employees can analyze the behavior of the equipment they need live. Modern interfaces can be viewed using mobile devices, thanks to which employees are not “tied” to the workplace because of the computer, which greatly optimizes the work with data [5]. For the same purpose, to alert about the occurrence of emergencies, bots are used that send alerts in various popular social networks. This is an effective solution, since every modern person has a mobile device at hand, which will significantly speed up the notification of the relevant employees and taking measures to eliminate existing problems.

The aim of the study is to develop a web-application for the analysis and visualization of data from UK-TPP to ensure the safety of technological processes. The application being developed has a web interface that will display and visualize the data of the main sensors and instruments of the UK TPP [6], prevent the occurrence of equipment malfunctions, and analyze the behavior of sensors using machine learning.

The main task of the thermal power plant is to provide hot water and electricity supply services for consumers. Node.js was chosen as the main software platform used [7], built on the java script programming language, using additional modules that expand the capabilities of this programming language, written in C ++ [8], which speeds up working with data arrays, receiving, and sending them.

As part of the study, the node-red visual programming interface was chosen [9], since it is quite easy to use and configure, which does not require great programming skills and work with other software, therefore, to work with this web interface, you do not need to have great skills in working with programs, which will simplify the introduction of a new program. Java Script is the main programming language of this platform [10], and all the code of each module is written in it, also, using additional nodes, you can connect third-party libraries of other programming languages, such as python [11].

Methology

The role of machine learning in the technological process of ensuring security

Machine learning plays a key role in the creation of intelligent monitoring and control systems that help prevent equipment failures and ensure the continuous and safe operation of production processes, such as:

- ♦ Anomaly detection: Machine learning allows you to create models that can analyze data from sensors and identify abnormal behavior of equipment that may indicate a potential malfunction. This may be a deviation from normal operating parameters, as well as the appearance of specific signals or patterns preceding a malfunction.
- ♦ Predicting the probability of failure: Machine learning models can be used to predict the probability of equipment failure in the future based on its current state and already existing data. This helps to take proactive measures to prevent breakdowns and plan maintenance.

♦ Adaptive Hardware Management: Machine learning models can be integrated into hardware management systems for real-time decision making. For example, based on the analysis of sensor data, the model can automatically adjust the operating parameters of the equipment to minimize the risk of malfunctions.

♦ Maintenance optimization: Machine learning helps to optimize the maintenance schedule of equipment. Based on predicting the probability of failure and analyzing data on the condition of equipment, optimal maintenance strategies can be developed, for example, to carry out maintenance when it is really necessary, and not according to a strict schedule.

♦ Improving production efficiency: Fault prevention using machine learning helps to reduce equipment downtime and avoid loss of production capacity due to unexpected failures. This helps to increase the efficiency and cost-effectiveness of production processes.

The process of preventing equipment malfunction using machine learning and analyzing sensor behavior can be described as follows:

1) Sensor selection and equipment installation. At the beginning of the process, the necessary sensors are determined to monitor various equipment parameters. These include: temperature, vibration, pressure, liquid level sensors and others, depending on the type of equipment.

2) Data collection. Sensors are installed on the equipment, and data collection on its operation begins.

3) Data preprocessing. In order for the data to be ready for analysis, it must be preprocessed. This includes noise filtering, elimination of outliers, normalization of values.

4) Modeling and training. At this stage, machine learning methods are used to create a model capable of predicting possible malfunctions. Classification and regression algorithms are used, depending on the specific task. The model is trained on existing data that contains information about the condition of the equipment and actual malfunctions.

5) Model implementation. After training the model, it is ready for use in real time. The model can be integrated with an equipment monitoring system for continuous analysis of data coming from sensors.

6) Anomaly detection and warning. When the equipment is in operation, the model analyzes data from sensors in real time and identifies abnormal or unusual indicators that may indicate a potential malfunction. If such anomalies are detected, a warning or an automatic signal is generated to the operator or control system to take the necessary measures.

7) Model update. New data on the operation of the equipment is constantly being collected, and this data can be used to continuously improve the model. The model is periodically updated and retrained on new data, which improves its accuracy and efficiency.

This process allows you to quickly detect potential problems with the equipment, minimizing the risk of accidents and increasing the efficiency of its operation.

Technological processes of UK TPP

Ust-Kamenogorsk TPP is a regional thermal power plant, in which the generation of heat and electricity covers 80% of the load of the housing and communal sector of the city and industrial enterprises. The TPP is part of the unified energy system of Kazakhstan [12].

Ust-Kamenogorsk TPP was launched in 1947, for the first time in Kazakhstan, high-pressure equipment was installed on it. In Soviet times, it was part of the regional energy management department, covering the territories of the East Kazakhstan and Semipalatinsk regions [13]. In 1997, it was among the six power plants transferred to the American energy corporation AES. In April 2017, AES sold the Ust-Kamenogorsk and Sogrinsk TPPs to the Kazakh company Kazakhstan Utility Systems [14].

The main purpose of the combined heat and power plant, as the name suggests, is the generation of electricity and hot water to cover the needs of consumers.

The full cycle of operation of the UK TPP is shown in Figure 1 (p. 68).

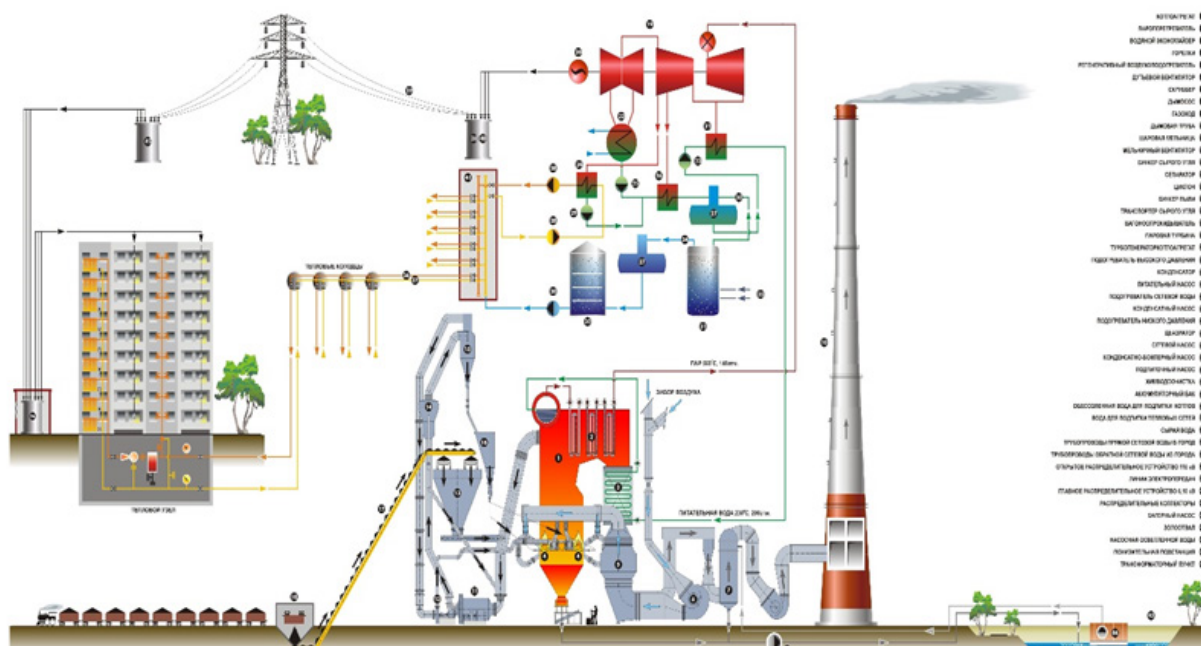


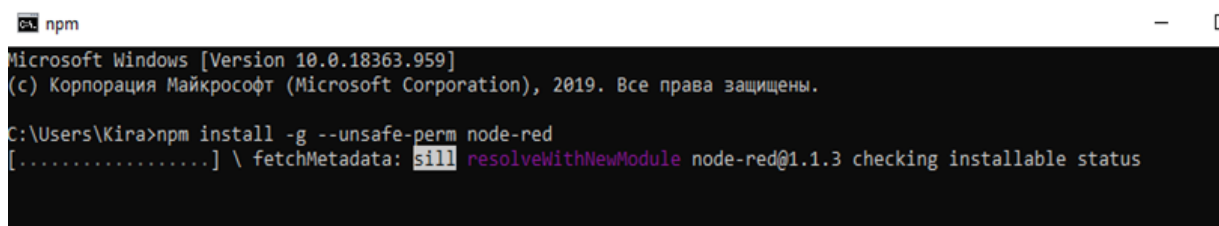
Figure 1 – Operation cycle of Ust-Kamenogorsk TPP

Simplistically, the operation of a combined heat and power plant can be described as follows – the cycle begins with the operation of a pumping station that pumps water from the Ulba River and also takes water from the return flow of hot water, then the process of distillation of the resulting water takes place using chemical water treatment, the resulting distilled water enters the boiler, where the water is heated with the help of coal obtained by conveyors, then the water is heated and converted into steam, the high-pressure steam is conveyed through the pipeline to the turbine, where, using steam pressure, turbines rotate, the turbines, in turn, rotate generators that convert mechanical energy into electricity, after which the generated electricity is passed through transformers, a stable alternating voltage is created and transmitted to the consumer [15]. The resulting steam passes further through the pipes and is transferred to the condensate, where the steam is converted into water and re-filtered, then the resulting water is mixed with that which has not evaporated in the boiler and enters the heat units for the final preparation of the coolant for supply to the consumer. Further, by means of pipes and thermal wells, hot water is transferred to the consumer. Unused hot water, having passed through the consumer, returns to the TPP, and repeats the entire chain again.

Within the framework of this work study, only the aspect of thermal generation of a combined heat and power plant will be used.

Results and Discussion

The main requirement for the functioning of the web interface is the presence of its software platform, namely, the key element of the application is Node.js [16]. This platform is installed using the usual installer of the latest stable version of the program. It is also necessary to install all the required software packages and libraries. The next condition is to install the main extension, which acts as the web interface itself, namely node-red. This extension will act as the main editor of various chains of nodes and program code, will act as a link for all elements. This extension is installed using the package installation manager – NPM, using the appropriate command (Figure 2, p. 69).

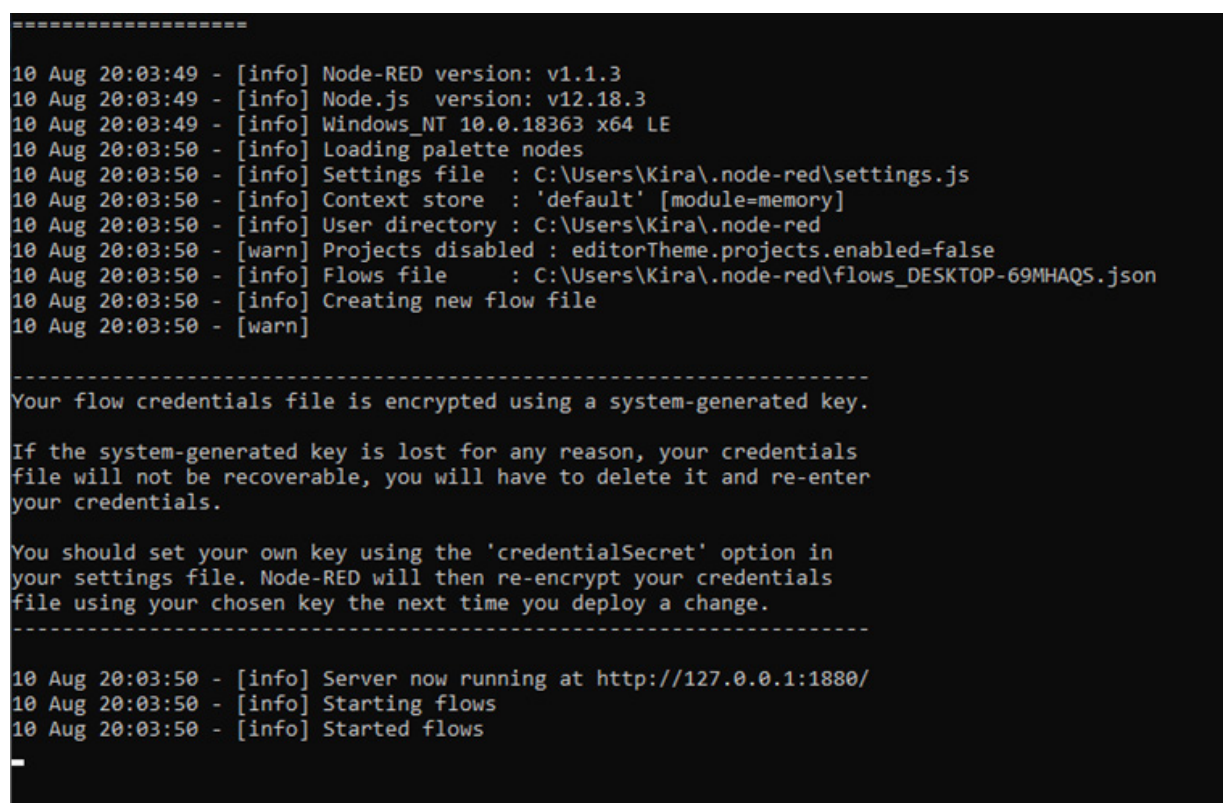


```

C:\Users\Kira>npm install -g --unsafe-perm node-red
[.....] \ fetchMetadata: sill resolveWithNewModule node-red@1.1.3 checking installable status
  
```

Figure 2 – Launching the node red package installation manager using the command line

To start working with the web interface, you need to run the executable module on the command line using the appropriate command (Figure 3).



```

=====
10 Aug 20:03:49 - [info] Node-RED version: v1.1.3
10 Aug 20:03:49 - [info] Node.js version: v12.18.3
10 Aug 20:03:49 - [info] Windows_NT 10.0.18363 x64 LE
10 Aug 20:03:50 - [info] Loading palette nodes
10 Aug 20:03:50 - [info] Settings file : C:\Users\Kira\.node-red\settings.js
10 Aug 20:03:50 - [info] Context store : 'default' [module=memory]
10 Aug 20:03:50 - [info] User directory : C:\Users\Kira\.node-red
10 Aug 20:03:50 - [warn] Projects disabled : editorTheme.projects.enabled=false
10 Aug 20:03:50 - [info] Flows file : C:\Users\Kira\.node-red\flows_DESKTOP-69MHAQS.json
10 Aug 20:03:50 - [info] Creating new flow file
10 Aug 20:03:50 - [warn]

-----
Your flow credentials file is encrypted using a system-generated key.

If the system-generated key is lost for any reason, your credentials
file will not be recoverable, you will have to delete it and re-enter
your credentials.

You should set your own key using the 'credentialSecret' option in
your settings file. Node-RED will then re-encrypt your credentials
file using your chosen key the next time you deploy a change.
-----

10 Aug 20:03:50 - [info] Server now running at http://127.0.0.1:1880/
10 Aug 20:03:50 - [info] Starting flows
10 Aug 20:03:50 - [info] Started flows
  
```

Figure 3 – Running node-red using the command line

The editing menu of this web interface (Figure 4, p. 70) is launched on the local host using port 1880 (<http://127.0.0.1:1880>). You can open this menu in any browser, but it is preferable to use the Google Chrome browser, as some functions may not be supported in other browsers, or the displayed information may not be correct. As mentioned earlier, using this interface, you can create a sequence of nodes that will execute the program code sequentially, according to the location of the nodes in the chain. For each block of this chain (node), you can prescribe certain parameters, set your own program code, customize the appearance of the displayed element, and specify the behavior algorithm. Program code is written primarily in the java script programming language.

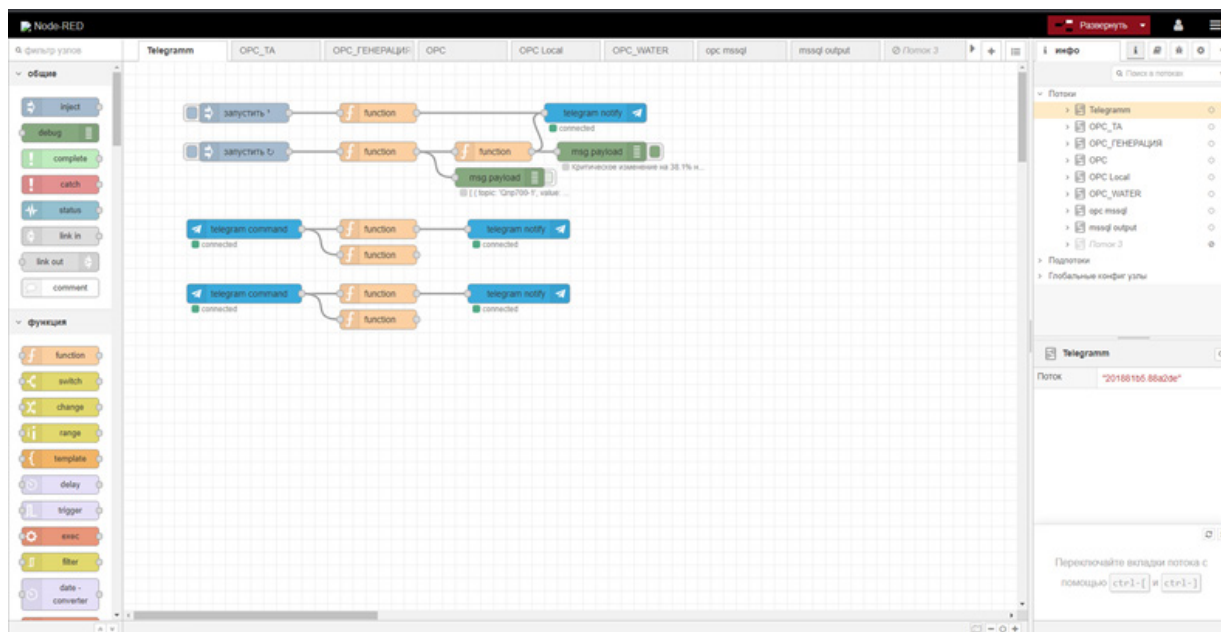


Figure 4 – Node-red interface window

For all aspects of the program to function correctly, it is necessary to install all the main node libraries (Figure 5).

The chains of program nodes are built from the nodes listed by the libraries. Nodes can act as various structural blocks responsible for various tasks: receiving and outputting information, outputting data of various formats to a web page, executing special program code, processing data, interacting with programs and servers using various data transfer protocols, interacting with databases, etc.

The web interface is a tool for providing a user interface, by means of dynamic web pages, for the purpose of managing the program, by means of the http protocol [17]. In this case, node-red is selected as the web interface (Figure 6). Node-red is a web interface that acts as a visual programming tool that uses various libraries and extensions, of which there are a huge number of variations, which greatly simplifies the development of various programs [18]. This web interface was chosen because it does not require much knowledge in programming and any employee can easily interact with this interface. Working with the interface, as the name says, is carried out by means of working with a dynamic web page that acts as a web interface.

The Node-red web interface consists of several parts. On the left side is a list of all installed nodes that can be used as modules to create node chains. In the center is located directly the workspace for the location of these very nodes, called the flow. For the convenience of debugging and load distribution, several threads should be used, so that in the event of a malfunction, a qualified employee can turn off a certain thread so that the program can continue its work, and the employee can fix the malfunction without harm to users.

Customizable web interface tabs:

1. The “Info” tab is used to display detailed information about streams and the global node configuration.
2. The “Help” tab displays brief information about the selected node.
3. The “Debug” tab is used for debugging and troubleshooting.
4. The “Configuration” tab is used to display information about the elements used (the number of elements used on streams).

“MSSQL”

- node used to connect to the database, create and receive SQL queries using the TDS protocol.

“Dashboard”

- a dashboard used to display information in the form of various graphs, instrument indicators, tables and diagrams. Also, with the help of this node, tools for interaction are used: buttons, sliders, input fields, etc.

“Bool-gate”

- a node that is a switch using boolean values.

“Date-converter”

- a node used to convert time from various formats.

“Modbus”

- a node used to connect to a server built on OPC technology that transmits and receives information via the modbus protocol.

“OPC-DA”

- node used to connect and interact with servers that work according to the OPC-DA standard. This standard is used for real-time data exchange.

“Time”

- the node used to get the current date and time.

“Telegrambot”

- host used to manage the telegram bot.

“Random”

- node used to generate random numbers.

“PythonShell”

- node used to connect third-party libraries built in the python programming language.

Figure 5 – Main node libraries

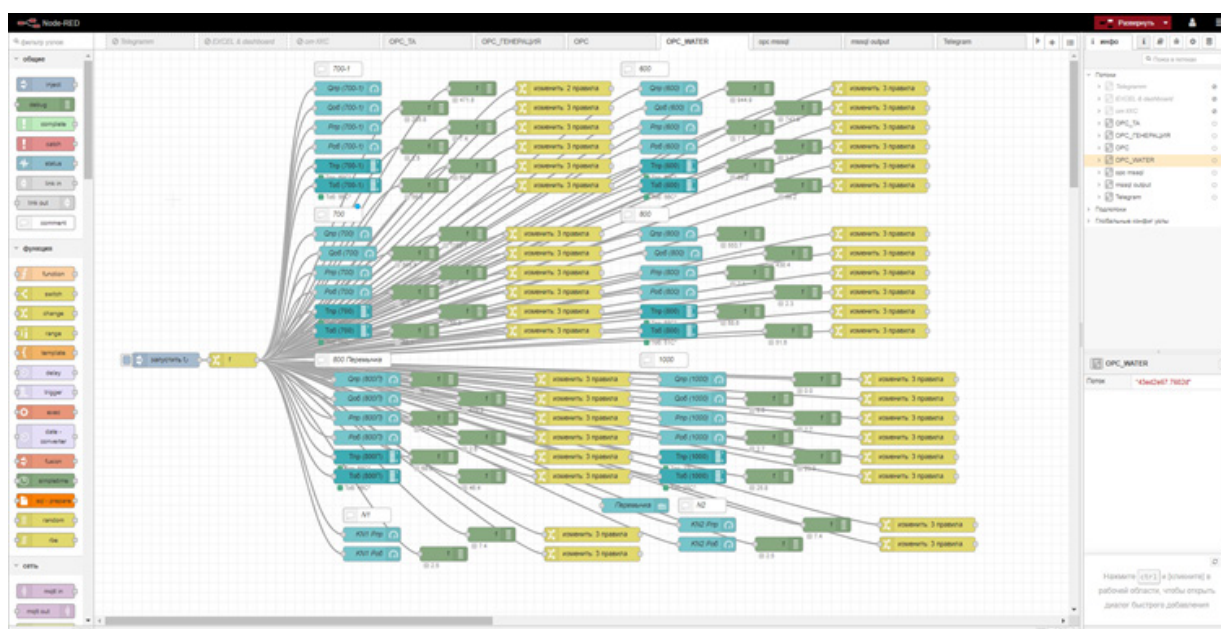


Figure 6 – Node-red web interface window

The main node used to display information from the sensors and devices of the UK TPP is the Dashboard node. This node is a graphical panel consisting of several elements that can be used to

display sensor data in the form of various diagrams, graphs, tables, etc. The main elements of this node are: “Text” (output of static and dynamic text), “Graph” (output of graphs), “Audio” (audio output), “Dashboard” (output of sensor readings in the form of a dashboard), “Alert” (display an alert), “Number” (select numerical values using the interface arrows), “Dropdown Menu” (select from multiple pop-up panels, when clicked), “Select Color” (select a color from the color palette), “Switch” (boolean switch), “Slider” (horizontal slider with which you can adjust the transmitted value), “Form” (fillable form), “Text” (text input), “Date” (date selection).

This dashboard will be displayed on the local host by the link <http://localhost:1880/ui>. It is this page that all users will use to display information and interact with the interface, except that to connect, users will need to specify the IP address of the server instead of the “localhost” value. You can automate this process using the local DNS of the current server by creating a record of the ratio of the IP address of the dashboard [19] and, for example, the name of the page “UkTPPDashboard”. Thus, when entering this combination of words in the browser, the server will find the ratio of the record and open the dashboard page.

To display indicators, it is necessary to create sections with information output and display them according to special templates. The templates should also be optimized for mobile devices. The main sections are:

1. “Generation” – This section is used to display basic data on heat generation at the UK-TPP, namely indicators of total generation, loss and net return to consumers. Basic graphs and data from the database.

2. “Ta” The main indications of all heat units and a general graph of all indicators.

3. “Water” – Readings of all pipes and jumpers, such as: flow rate, pressure, temperature, etc.

4. “Water (graphs)” – Displaying pipe indicators on general graphs.

5. “Table” – Output of any indicators from the database for a certain period using the selection drop-down menu.

6. “Graph” – Displays graphs for any indicators for a certain period using the drop-down menu of choice.

Main modules of the web application

a) Module “Ta”

This section is used to display the performance of all heat units. The heat unit is a key link in the heat supply system, designed to prepare the heat carrier in accordance with consumer demand. This heating system is centralized and has a high efficiency. The heat carrier in this case is hot water, with the necessary indication of temperature and pressure. If the values of the unit heat indicators are equal to 0, this means that this heat unit is turned off due to repair or another reason. General readings of all heat units go to the “Generation” section.

Nodes used in this chain:

1. Injector – a node used to launch a chain of actions, it initializes the launch of the chain with the required interval and action parameters.

2. Change – a node used to write data to local and global variables for further use in other chains of nodes.

3. Function – a node used to execute program code written in the java script programming language.

4. Dashboard – elements of this node are used to visualize information in the form of various graphs, tables, dashboards, text, etc. To use them, certain parameters of input data and displayed elements are filled. The dashboard itself with graphs and indicators “Dashboard” will be a dynamic web page that opens at the link <http://127.0.0.1:1880/ui>.

5. Debug – this node is used to debug the input data and indicate the operation of the node.

6. Delay – a node used to create a delay before transmitting data to the next node.

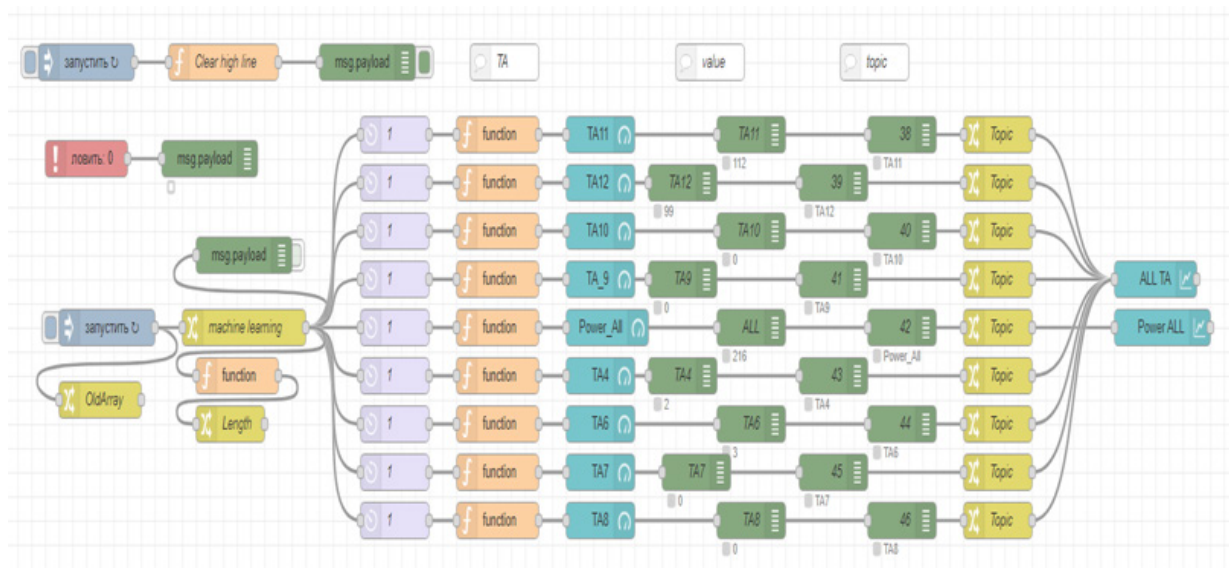


Figure 7 – Scheme of the “TA” module

For data visualization nodes to work, they need to set: a navigation bar tab and a group (where the element will be displayed on the dashboard), set the size corresponding to the size of the average screen of a mobile device, the input data format (values that will be transferred from the local array), set units of measurement, set the color of the dashboard to change when it goes beyond the norm (Figures 8).

In addition, this chain of nodes uses the delay node, this node sets the delay before executing the next node. The node was added in order to sequentially update the dashboard data, to optimize the updated data, since with a one-time update of all dashboard sensors, on weak devices, the load increases at that moment, as a result of which the browser freezes slightly, sequential data updating solves this problem.

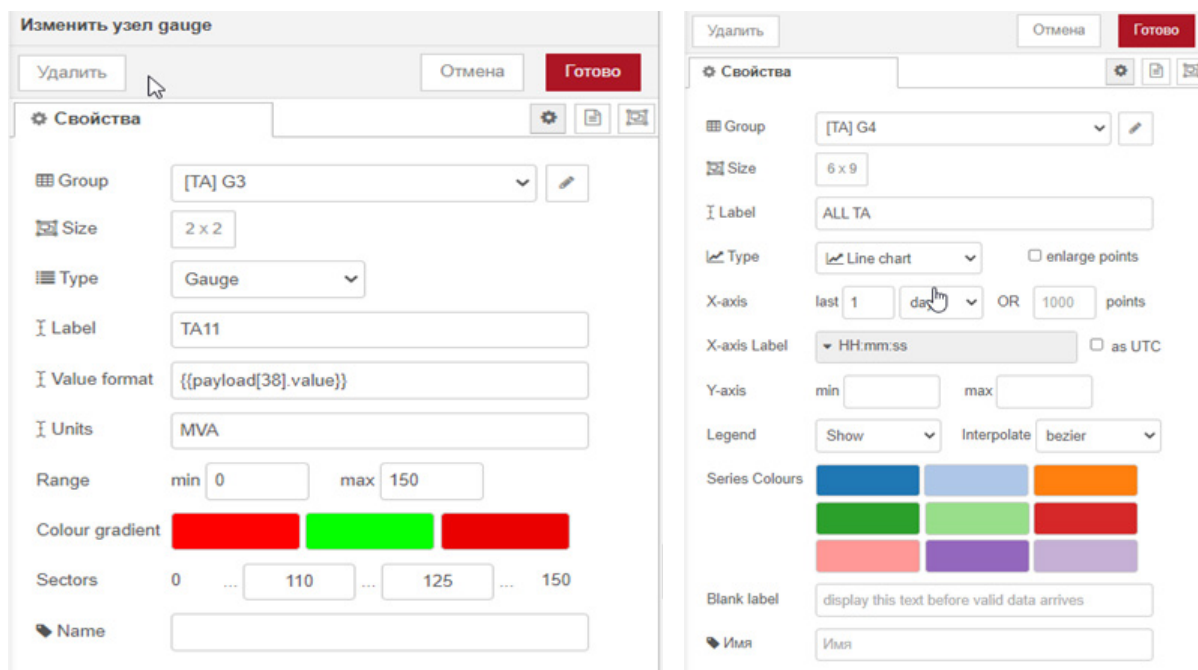


Figure 8 – Dashboard Gauge Setting Window and Graph Setting Window

The display of the section on the computer and mobile devices can be seen in Figure 9 and Figure 10.

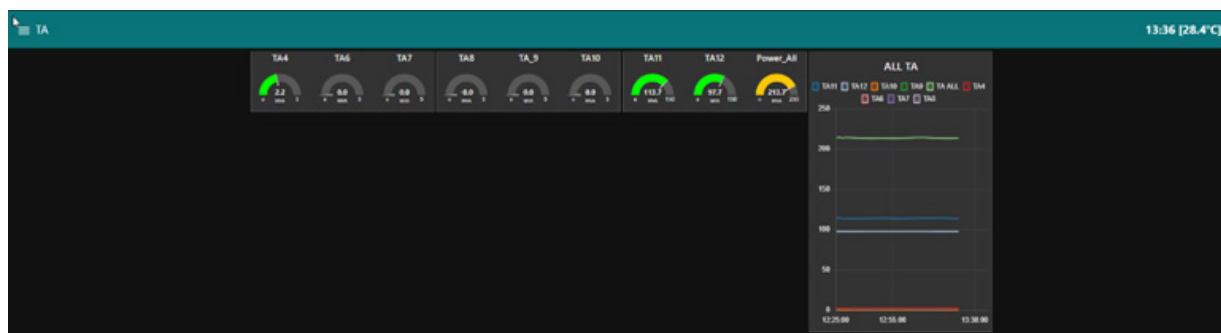


Figure 9 – Display window of the “TA” module on the computer



Figure 10 – Display window of the “TA” module on the smartphone

b) “Generation” module

This section (Figure 11) is used to display the main statistics for warm water. The main calculation indicators are derived: losses, given to consumers and generation. These readings are also displayed in a schematic circular graph.

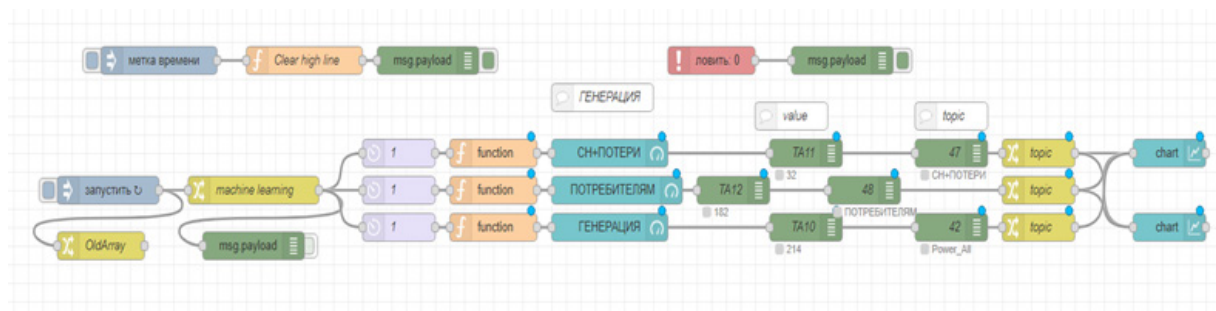


Figure 11 – Scheme of the “Generation” module

The display of the “Generation” section on a computer and mobile devices can be seen in Figures 12 and 13.

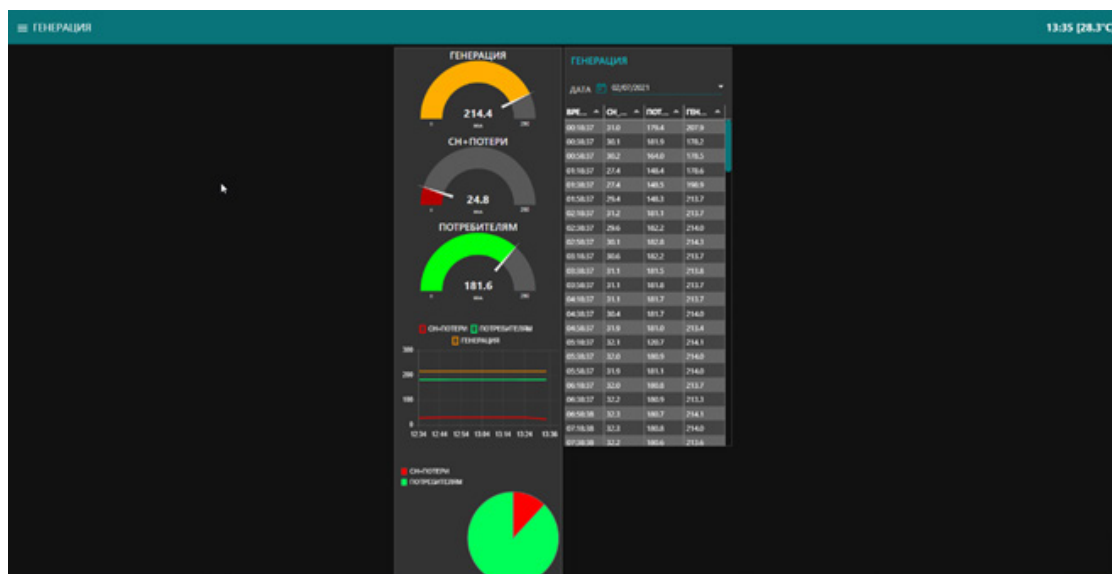


Figure 12 – Display window of the “Generation” module on the computer



Figure 13 – Display window of the “Generation” module on mobile devices

c) “Water” module

This section (Figures 14 and 15, p. 76) displays the indicators of the main pipes responsible for supplying hot water to the consumer, various jumpers, and collectors. The section displays pipe indicators, namely: temperature, density, and water flow rate. A feature of this section is that for data

visualization, in addition to the dashboard node, the “Charts” node is used, which is responsible for temperature visualization.

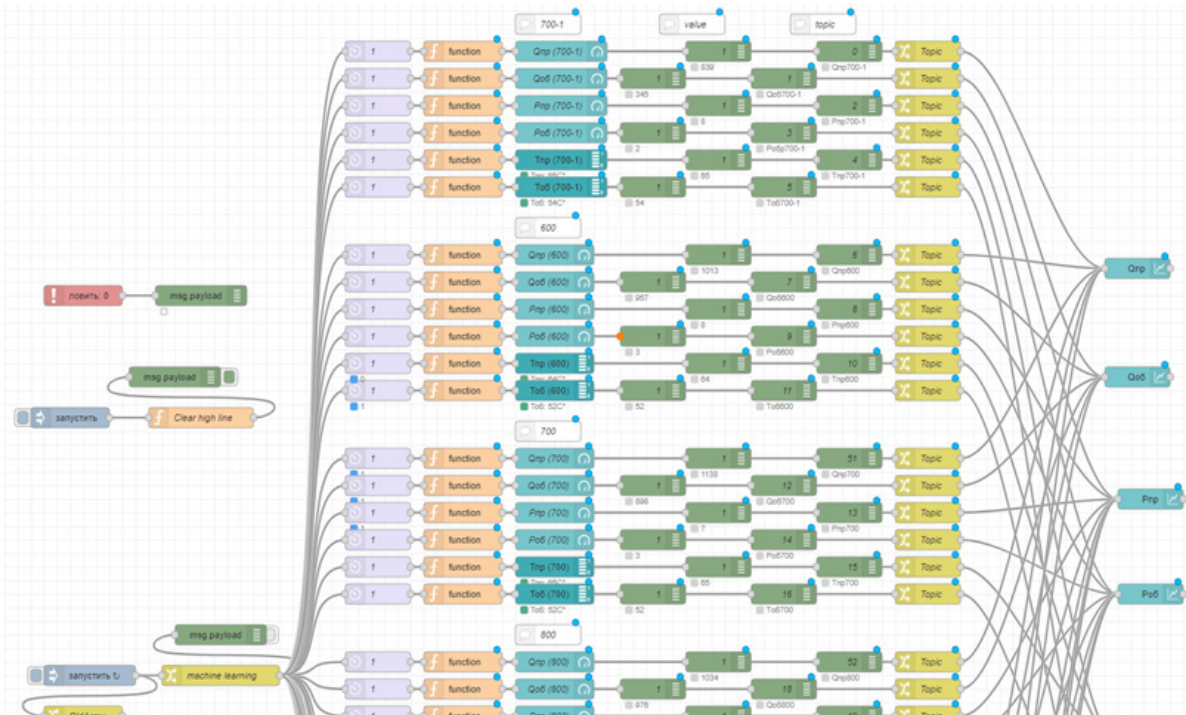


Figure 14 – Scheme of the “Water” module, part 1

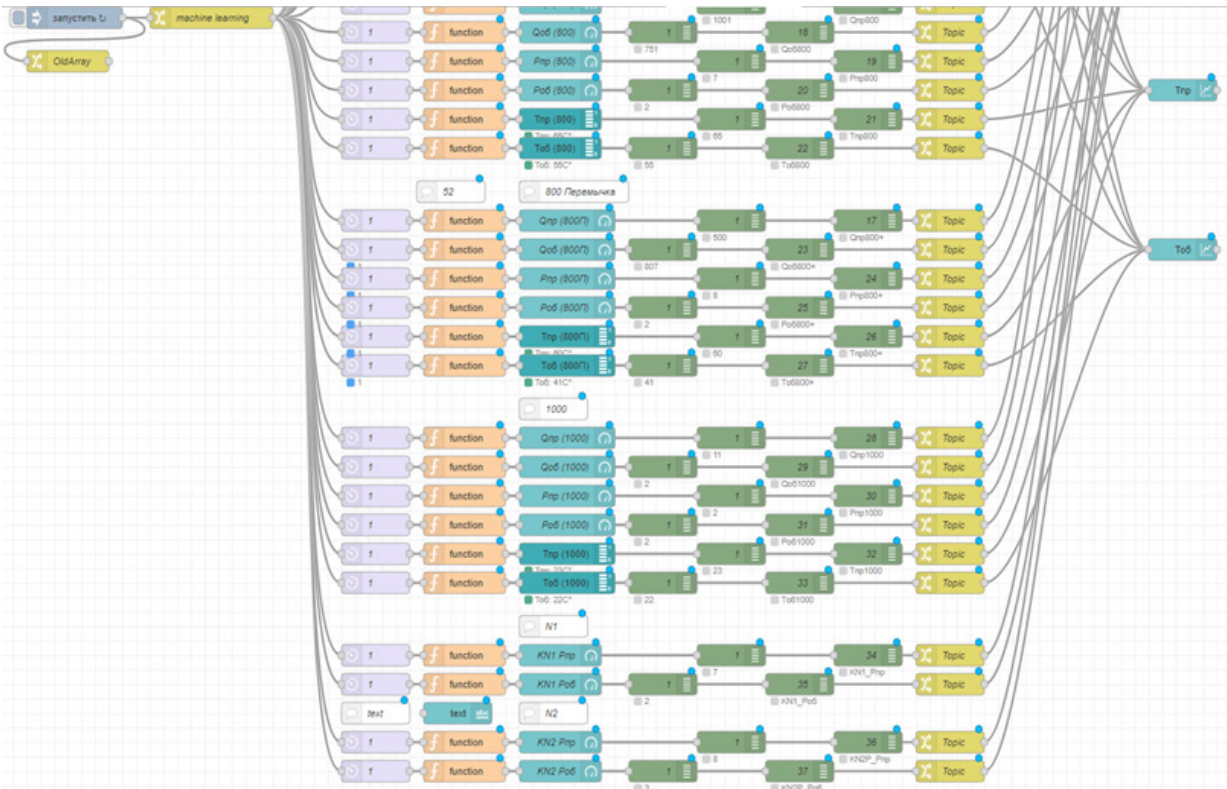


Figure 15 – Scheme of the “Water” module, part 2

The chain of this node begins by running the loop along with the program and then polling the chain once every ten seconds. Next comes the process of obtaining an array of machine learning data and writing to a local one, to further process the data. With the help of functions, the node analyzes the received data and compares them with the corresponding sensors, creates local arrays to configure each sensor and graph. The resulting data is passed to the dashboard and ladder nodes to visualize the corresponding values. Values such as: the name of the current sensor, its value, critical data ranges, maximum sensor ranges, whether the value is critical, etc. After visualizing the data, debug nodes follow, displaying the correctness of the transmitted data and signaling the operation of the node. Further, if necessary, a more precise name is specified for the sensor, to correctly display it on the chart. The last element in the chain is the dashboard node responsible for plotting the graph.

For the data visualization nodes to work, they need to set: a navigation panel tab and a group, set the size corresponding to the size of the average screen of a mobile device, the input data format, set the units of measurement, set the dashboard color to change when it goes beyond the norm. In addition, this chain of nodes uses the delay node, the node sets the delay before executing the next node. This node was added to sequentially update the dashboard data, to optimize the updated data, since with a one-time update of all dashboard sensors, the load on weak devices increases at this moment, because of which the browser freezes slightly, sequential data updating solves this problem.

The readings of one pipe are a block [20] consisting of the name of this pipe and its indicators (temperature, pressure, flow rate), this block can be seen in Figure 16.

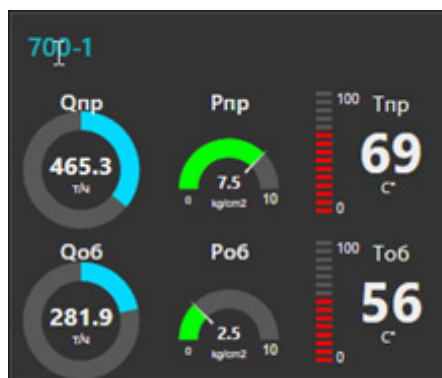


Figure 16 – Example of a block of one pipe in the dashboard

The display of the section on a computer and mobile devices is shown in Figures 17 and 18 (p. 78).

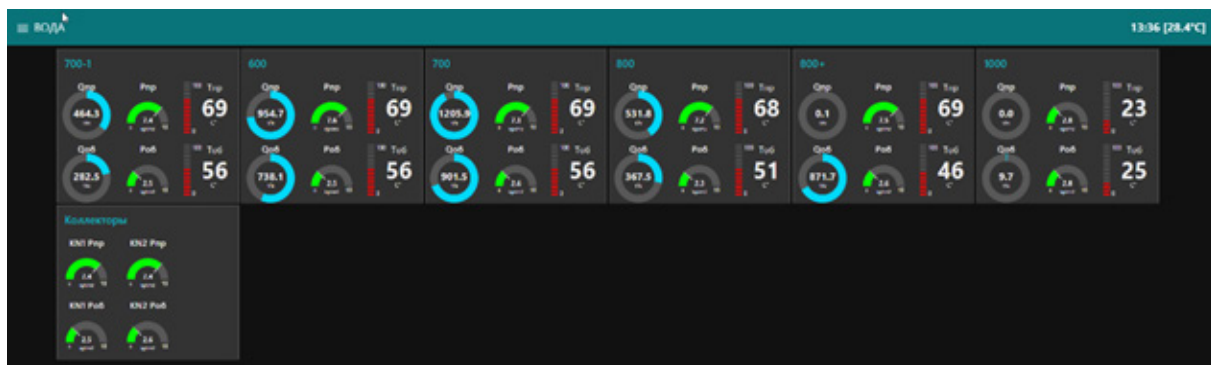


Figure 17 – The window for displaying indicators on computers.



Figure 18 – The window for displaying indicators on mobile devices

d) Web application navigation bar

“Header” – is the top strip of the dashboard, in which you can display any dynamic and static information. The dashboard header contains the name of the selected section, time, and outdoor temperature. The operation of this section is based on the chain of nodes that form the circuit shown in Figure 19.

This scheme consists of:

1. An injector that is set to launch along with node-red with a certain frequency of polling a chain of nodes.
2. A time converter that converts the time to a standard format and transfers it to the original array.
3. The change node, which receives the air temperature from the sensor from the global OPC-DA array.
4. A function node that rounds the data and writes it in t°C format.
5. The join node, which combines time and temperature into a single array to output data through the template node.
6. The template node, with a customized html template specifically for the header, to correctly display the text.
7. Debug – this node is used for debugging input data and indicating node operation.

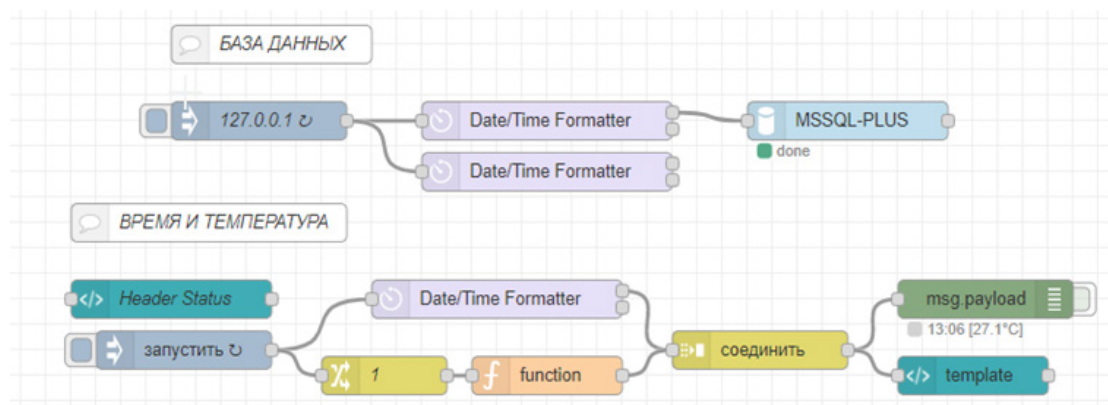


Figure 19 – Time and temperature display diagram

The chain of this node begins by running the loop along with the program and then polling the chain once every ten seconds. Next comes the process of obtaining an array of machine learning data and writing this array to a local one, to further process the data. There is also a conversion of time from UNIX format to standard [21], for the correct display of data. Further, the initial data is combined into a single data array and transferred to the node for data substitution in the html template to display data in the header (Figure 20) of the dashboard.

The image shows a code editor window titled "Template". It contains HTML code with CSS and JavaScript. The CSS part defines styles for a header status element, with rules for online (lime green) and offline (tomato red) states. The JavaScript part uses jQuery to initialize the header status by checking for the existence of the element and appending it to a toolbar if it's not present. The code is as follows:

```
1 - <style>
2 -     #headerStatus {
3 -         font-weight: bold;
4 -         text-transform: uppercase;
5 -     }
6 -     #headerStatus.online {
7 -         color: lime;
8 -     }
9 -     #headerStatus.offline {
10 -        color: tomato;
11 -    }
12 - </style>
13
14 - <script id="titleScript" type="text/javascript">
15 - $(function() {
16 -     if($('.md-toolbar-tools').length){
17 -         initHeader();
18 -     } else setTimeout(initHeader, 500)
19 - });
20
21 - function initHeader(){
22 -     if (!$('#headerStatus').length) {
23 -         var toolbar = $('.md-toolbar-tools');
24 -         var div = $('<div/>');
25 -         var p = $('<p id="headerStatus" />');
26 -         div[0].style.margin = '5px 5px 5px auto';
27 -         div.append(p);
28 -         toolbar.append(div);
29 -     }
30 - }
31 - </script>
```

Figure 20 – Html “template” containing java script code

Sections of the navigation bar are created using, setting in the settings of group nodes and sections of the navigation bar.

Conclusion

The created application is an effective tool for solving the tasks set by the UK TPP. All requirements were met, threats to information security were foreseen, issues of optimization, machine learning and data analysis were resolved. All the main aspects of the functioning of this application were considered and analyzed. This work is an effective tool for optimizing the work of various departments and workshops of the UK TPP. One of the main tasks was to prevent critical situations related to the equipment of the workshops, analyze the behavior of the equipment, and increase the efficiency of the devices, thanks to the timely replacement of the necessary equipment. If the indicators of the devices go beyond their norm, the relevant employees will be immediately informed, in addition, thanks to the database used. The database is systematically backed up, which

in the event of a hardware breakdown or other malfunction will save data from loss. Also, the application optimizes the visualization of key indicators for employees of various workshops to increase labor productivity. The software used is clear and intuitive for all employees, so there should be no problems using the dashboard and interface.

REFERENCES

- 1 Pérez J. B., Falótico A. J. A. (2019) Various perspectives of labor and human resources challenges and changes due to automation and artificial intelligence, *Academicus*, no.20, p. 106.
- 2 Koopman P., Wagner M. (2017) Autonomous vehicle safety: An interdisciplinary challenge, *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 9, no.1, pp. 90–96.
- 3 Sadoun A.M. et al. (2022) Utilization of improved machine learning method based on artificial hummingbird algorithm to predict the tribological behavior of Cu-Al₂O₃ nanocomposites synthesized by in situ method, *Mathematics*, vol. 10, no. 8, p. 1266.
- 4 Hao L. et al. (2022) When is silence golden? A meta-analysis on antecedents and outcomes of employee silence, *Journal of Business and Psychology*, vol. 37, no. 5, pp. 1039–1063.
- 5 Oviatt S., Cohen P.R. (2022.) The paradigm shift to multimodality in contemporary computer interfaces, Springer Nature.
- 6 Zhamalkanov T.A. (2023) Razvitiye sistemy tsentralizovannogo teplosnabzheniya goroda Ust'-Kamenogorsk, Sostav redaktsionnoy kollegii i organizatsionnogo komiteta [in Russian].
- 7 Tilkov S., Vinoski S. (2010) Node.js: Using JavaScript to build high-performance network programs, *IEEE Internet Computing*, vol. 14, no. 6, pp. 80–83.
- 8 Josuttis N.M. (2012) The C++ standard library: a tutorial and reference.
- 9 Ferencz K., Domokos J. (2019) Using Node-RED platform in an industrial environment, XXXV. Jubileumi Kandó Konferencia, Budapest, pp. 52–63.
- 10 Malik R.S., Patra J., Pradel M. (2019) NL2Type: inferring JavaScript function types from natural language information, 2019 IEEE/ACM 41st International Conference on Software Engineering (ICSE), IEEE, pp. 304–315.
- 11 Stančin I., Jović A. (2019) An overview and comparison of free Python libraries for data mining and big data analysis, 2019 42nd International convention on information and communication technology, electronics, and microelectronics (MIPRO), IEEE, pp. 977–982.
- 12 Turarov ZH. T., Sedelev V.A. (2019) Razrabotka nauchnykh osnov sberezheniya energeticheskikh resursov TOO "Ust'-Kamenogorskaya TETS", *Vestnik Vostochno-Kazakhstanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. D. Serikbayeva*, no. 1, pp. 204–207.
- 13 Shair J. et al. (2021) Power system stability issues, classifications, and research prospects in the context of high penetration of renewables and power electronics, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 145, p. 111111.
- 14 Bayazitova Z.E. et al. (2022) Relevance of Environmental Surveys on the Design of a New Municipal Waste Management System on the City of Kokshetau (Kazakhstan), *Sustainability*, vol. 14, no. 21, p. 14368.
- 15 Dudjak V. et al. (2021) Impact of local energy markets integration in power systems layer: A comprehensive review, *Applied Energy*, vol. 301, p. 117434.
- 16 Cantelon M. et al. (2014) Node.js in Action, Greenwich, Manning, 2014, pp. 17–20.
- 17 King G., Wang H. (2023) Httpa: Https attestable protocol, Future of Information and Communication Conference. – Cham : Springer Nature Switzerland, pp. 811–823.
- 18 Larrinaga F. et al. (2022) Node-red workflow manager for edge service orchestration, NOMS 2022-2022 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, IEEE, pp. 1–6.
- 19 Lencse G. (2020) Benchmarking authoritative DNS servers, *IEEE Access.*, vol. 8, pp. 130224–130238.
- 20 Rennels D.C. (2022) Pipe flow: A practical and comprehensive guide, John Wiley & Sons.
- 21 Ardiansah I. et al. (2021) Design of micro-climate data monitoring system for tropical greenhouse based on arduino UNO and raspberry pi, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing.

¹Увалиева И.,

PhD, ORCID: 0000-0002-2117-5390, e-mail: iuvalieva@ektu.kz

²Рустамов С.,

PhD, қауымдастырылған профессор, ORCID: 0000-0002-3247-5882,
e-mail: Srustamov@ada.edu.az

^{3*}Бельгинова С.,

PhD, ORCID: 0000-0002-7238-6016, e-mail: sbelginova@gmail.com

¹Рахметуллина Ж.,

ф.-м.ғ.к., ORCID: 0000-0002-0554-7684, e-mail: zhrakhmetullina@ektu.kz

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
070004, Өскемен қ., Қазақстан

²ADA университеті, Баку қ., Әзірбайжан

³«Тұран» университеті, 050013, Алматы қ., Қазақстан

ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ҮРДІСТЕРДІҢ ҚАУІПСІЗДІГІН ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУ ҮШІН ДЕРЕКТЕРДІ ТАЛДАУ МЕН ВИЗУАЛИЗАЦИЯЛАУҒА АРНАЛҒАН WEB-ҚОЛДАНБА ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа

Соңғы уақытта заманауи технологиялар қарқынды түрде дамуда және қарапайым деректерді жинап, өңдеп қана қоймай, қазіргі алгоритмдер жабдықтың әрекетін болжауға, түрлі ақаулардың алдын алуға, апаттың ықтималдығын азайту үшін шаралар қабылдауға, тиісті қызметкерлерге ескерту сияқты мүмкіндіктерге ие болды. Осы зерттеу аясында авторлар технологиялық үрдістердің қауіпсіздігін қамтамасыз ету мақсатында Өскемен жылу электр орталығының деректерін талдау және визуализациялау үшін веб-қосымшаны әзірлеуді ұсынады. Өскемен ЖЭО облыстық жылу электр орталығы – қаланың тұрғын үй-коммуналдық секторы мен өнеркәсіптік кәсіпорындар жүктемесінің 80%-ын қамтамасыз ететін жылу және электр энергиясын өндіруші. ЖЭО – Қазақстанның біртұтас энергетикалық жүйесінің бөлігі. Әзірленіп жатқан қосымшада Өскемен ЖЭО негізгі сенсорлары мен аспаптарынан алынған деректерді көрсететін және визуализациялайтын, сондай-ақ жабдықтың ақауларын болдырмайтын, машиналық оқытуды қолдана отырып, сенсорлардың әрекетін талдайтын веб-интерфейс қарастырылады. Пайдаланылатын негізгі бағдарламалық платформа ретінде Node.js таңдалды, java скрипттік бағдарламалау тілінде құрастырылып, бағдарламалау тілінің мүмкіндіктерін кеңейтетін c++ тілінде жазылған, сондай-ақ деректер ауқымымен жұмыс істеуді, оларды қабылдауды және жіберуді жылдамдататын қосымша модульдер пайдаланылды.

Тірек сөздер: деректерді талдау, визуализациялау, технологиялық процестердің қауіпсіздігі, Өскемен-ЖЭО, құрылғы, Web-қосымша, мониторинг, node.js, java script.

¹Увалиева И.,

PhD, ORCID: 0000-0002-2117-5390, e-mail: iuvalieva@ektu.kz

²Рустамов С.,

PhD, ассоциированный профессор, ORCID: 0000-0002-3247-5882,

e-mail: Srustamov@ada.edu.az

^{3*}Бельгинова С.,

PhD, ORCID: 0000-0002-7238-6016, e-mail: sbelginova@gmail.com

¹Рахметуллина Ж.,

канд. физ.-мат. наук, ORCID: 0000-0002-0554-7684, e-mail: zhrakhmetullina@ektu.kz

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,

070004, г. Усть-Каменогорск, Казахстан,

²Университет ADA, г. Баку, Азербайджан

³Университет «Туран», 050013, г. Алматы, Казахстан

РАЗРАБОТКА WEB-ПРИЛОЖЕНИЯ АНАЛИЗА И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Аннотация

Современные технологии довольно хорошо развились за последнее время, и кроме банального сбора и обработки данных современные алгоритмы способны предугадывать поведение оборудования и предупреждать возникновение неполадок и выход из строя заблаговременно и предпринимать действия по снижению вероятности возникновения аварии и предупреждению соответствующих сотрудников. В рамках данного исследования авторами предложена разработка web-приложения анализа и визуализации данных УК-ТЭЦ для обеспечения безопасности технологических процессов. Усть-Каменогорская ТЭЦ является тепловой электростанцией регионального назначения, выработка тепла и электричества покрывает 80% нагрузки жилищно-коммунального сектора города и промышленных предприятий. ТЭЦ входит в единую энергосистему Казахстана. Разрабатываемое приложение имеет веб-интерфейс, который будет отображать и визуализировать данные основных датчиков и приборов УК ТЭЦ, а также предупреждать возникновение неисправности оборудования и анализировать поведение датчиков с помощью машинного обучения. В качестве основной используемой программной платформы была выбрана node.js, построенная на языке программирования java script, с использованием дополнительных модулей, расширяющих возможности данного языка программирования, написанных на c++, что ускоряет работу с массивами данных, их получение и отправку.

Ключевые слова: анализ данных, визуализация, безопасность технологических процессов, УК-ТЭЦ, прибор, Web-приложение, мониторинг, node.js, java script.

ӘОЖ 519.872.1
ҒТАХР 28.23.25

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-83-94>

^{1,3}**Черикбаева Л.Ш.**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-8948-4205, e-mail: cherikbayeva.lyailya@gmail.com

²**Мукажанов Н.К.**

PhD, ORCID ID: 0000-0003-4835-5751, e-mail: n.mukazhanov@satbayev.university

²**Алибиева Ж.М.**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-9565-5621, e-mail: alibievajibek@gmail.com

¹**Адилжанова С.А.**

PhD, ORCID ID: 0000-0003-1768-064, e-mail: asaltanat81@gmail.com

¹**Тюлепбердинова Г.А.**

ф.-м.ғ.к., доцент, PhD, ORCID ID: 0000-0002-4322-8983, e-mail: tyulepberdinova@gmail.com

¹**Сақыпбекова М.Ж.**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-6652-1357, e-mail: sakypbekova.meruyert@gmail.com

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

²Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университет,
050013, Алматы қ., Қазақстан

³Ақпараттық және есептеу технологиялары институты,
050040, Алматы қ., Қазақстан

РЕГУЛИЗАЦИЯ МЕН КОАССОЦИАЦИЯЛЫҚ МАТРИЦАНЫ ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП НАШАР БАҚЫЛАНАТЫН РЕГРЕССИЯ ЕСЕБІН ШЕШУ

Аңдатпа

Қазіргі уақытта машиналық оқыту теориясы мен әдістері (МТ) қарқынды дамып келеді және ғылым мен техниканың әртүрлі салаларында, атап айтқанда, өндірісте, білім беруде және медицинада көбірек қолданылуда. Нашар бақыланатын оқыту – әртүрлі ақпаратты талдаудың модельдері мен әдістерін әзірлеуге бағытталған машиналық оқыту зерттеулерінің бөлігі. Нашар бақыланатын оқу мәселесін қарастыру кезінде, модельдегі кейбір объектілер дұрыс емес белгіленген деп есептеледі. Бұл дәлсіздікті әртүрлі түсінуге болады. Нашар бақыланатын оқыту – бұл толық дұрыс белгіленген деректерді пайдаланудың орнына, толық, дәл емес немесе анық емес бақылау сигналдарын қолдану арқылы модель оқытылатын машиналық оқыту техникасының бір түрі. Нашар бақылау әртүрлі себептерге байланысты нақты мәселелерде жиі туындайды. Бұл деректерді белгілеу үрдісінің қымбат болуына, сенсорлардың дәлдігінің нашарлығына, мамандардың біліктілігінің жеткіліксіздігіне немесе адамның қателігіне байланысты болуы мүмкін. Мысалы, нашар бақылауды белгілеу краудсорсинг әдістерін қолдана отырып алынған жағдайларда жүзеге асырылады: әр объект үшін әртүрлі белгілер жиынтығы бар, олардың сапасы орындаушылардың шеберлігіне байланысты. Тағы бір мысал кескіндегі объектілерді анықтау есебі. Шектеу сызықтары объектілерді анықтау есептерінде кескінде анықталған объектілердің орны мен көлемін көрсетудің жалпы тәсілі. Жұмыста Вассерштейн метрикасын, әртүрлі жүйелеуді және ұқсастық матрицасы ретінде коассоциация матрицасын пайдалана отырып, көп мақсатты нашар бақыланатын регрессия есебін шешу алгоритмін ұсынамыз. Жұмыста орташа салмақты ұқсастық матрицасын есептеу алгоритмі де жетілдірілді. Соңында біз ұсынылған алгоритмді синтетикалық және нақты деректердегі бақылаудағы оқытудың және нашар бақыланатын оқытудың алгоритмдерімен салыстырамыз.

Тірек сөздер: Нашар бақыланатын оқыту, кластерлік ансамбль, көп мақсатты регрессия, төмен дәрежелі ұқсастық матрицасы, коассоциация матрицасы.

Кіріспе

Айталық, P_x үлестірімінен $X = \{x_1, \dots, x_n\}$, $x_i = (x_i^1, \dots, x_i^p) \in \mathbb{R}^p$ берілсін, мұндағы n -үлгідегі объектілер саны, ал p -мүмкіндіктер кеңістігінің өлшемділігі. Өз кезегінде, $Y = \{y_1, \dots, y_n\}$, $y_i = (y_i^1, \dots, y_i^m)T \in \mathbb{R}^m$ мақсатты белгілер, мұндағы m -мақсатты белгілер кеңістігінің өлшемі.

Жартылай бақыланатын трансдуктивті оқыту мәселесінде

$X \times Y = \{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$ деректер жиыны қарастырылады, бірақ мақсатты белгілер $y_1, \dots, y_{n_1} = Y_1 \subseteq Y$ қол жетімді деректердің аз ғана бөлігі үшін белгілі $x_1, \dots, x_{n_1} = X_1 \subseteq X$. Қалған объектілер $\{x_{n_1+1}, \dots, x_n\} = X_0 \subseteq X$ белгіленген.

Есептің қойылымы: $Y_0 = \{y_{n_1+1}, \dots, y_n\}$ белгілерін кейбір критерий бойынша мүмкіндігінше дәл болжау. Бақыланатын белгілердің белгісіздігін модельдеу үшін біз көп айнымалы қалыпты үлестіруді қолданамыз. Әрбір i -ші деректер нүктесі үшін, $i = 1, \dots, n_1$, мақсатты мүмкіндіктің y_i мәні анықталған жинақтаушы таралу функциясы (cdf) $F_i(y)$ бар Y_i кездейсоқ шамасының іске асырылуы деп болжаймыз $D_Y \subset \mathbb{R}^m$:

$$Y_i \sim N(\mu_i, \Sigma_i), \quad (1)$$

мұндағы $\mu_i \in \mathbb{R}^m$ орташа вектор, $\Sigma_i \in \mathbb{R}^{m \times m}$ коварианттық матрица, $i = 1, \dots, n_1$. Белгісіздіктің жалпы дәрежесін $T_i = |\Sigma_i|$ деп түсіндіруге болады: ол неғұрлым үлкен болса, белгінің белгісіздігі соғұрлым жоғары болады. Тиісінше, қатаң таңбаланған объектілер үшін $T_i \approx 0$ болады деп күтілуде. Сонымен есептің қойылымы объективті критерий бойынша $i = n_1+1$ үшін $F_i(y)$ анықтаушы.

Негізгі ережелер

Зерттеумен байланысты жұмыстар: Жұмыс [10] бір өлшемді мақсатты айнымалы жағдайында трансдуктивті тұжырымда әлсіз бақыланатын регрессия мәселесін шешу алгоритмін ұсынады. Ол дәлсіздікті модельдеу үшін бір айнымалы қалыпты үлестіруді пайдаланады: $Y_i \sim N(a_i, \sigma_i)$, мұндағы σ_i дәлсіздіктің көрсеткіші. Содан кейін көп реттік реттеуді пайдалана отырып, болжамды және нақты үлестірулер арасындағы қашықтықты азайту арқылы оңтайландыру мәселесін шешу ұсынылады. Мұнда ұқсастық матрицасын жуықтау үшін коассоциация матрицасы пайдаланылады және ұқсастық матрицасын алу үшін кластер ансамблі және ко-ассоциация матрицасын алу үшін кластер ансамблі және k-орталар алгоритмі қолданылған. Дегенмен, мұнда алгоритм көпөлшемді жағдайға жалпыланбайды. Көп мақсатты регрессияны шешу үшін әрбір мақсатты айнымалы үшін жеке модельді оқыту қажет. Бұл тәсілдің көмегімен мақсатты айнымалылар бір-бірінен тәуелсіз болатын мәселелерді тиімді шешуге болады.

[11] мақалада коассоциация матрицасы мен оны құру алгоритмінің толықтай талдауы берілген. Дегенмен ол k-орталар алгоритмінің негізгі нұсқасына сүйенеді, оның маңызды кемшіліктері бар, соның ішінде бір метрикалық опцияны пайдалану және кластерлердің сәйкес санын таңдау белгісіз. [12] авторлар k-орташа алгоритмі бойынша кластерлеу сапасына Евклидтіктен басқа көрсеткіштердің әсерін талдайды.

Материалдар мен әдістер

Ұсынылған әдіс: Айталық,

– $F^* = \{F_1^*, \dots, F_{n_1}^*, \dots, F_n^*\}$ ерікті көп айнымалы қалыпты cdf жиыны болсын, әрбір $F_i^* (a_i, S_i)$ жұбы арқылы көрсетіледі;

– $F = F_1, \dots, F_{n_1}$ белгілі cdf жиыны болсын, әрбір F_i жұппен ұсынылған (μ_i, Σ_i) .

Келесіде Σ_i және S_i екеуін де оң-анықталған матрицалар деп есептейміз. $\Sigma_i = \Sigma_i^{1/2} \Sigma_i^{1/2}$, $S_i = S_i^{1/2} S_i^{1/2T}$. Біз $S_i^{1/2}$ элементтерін s_{jk}^i деп алып, ал $\Sigma_i^{1/2}$ элементтерін σ_{jk}^i деп белгілейміз.

Функционалдық міндет: Келесі оңтайландыру мәселесін қарастырайық:

$$\text{find } F^{**} = \arg \min_{F^*} J(F, F^*)$$

мұндағы

$$J(F, F^*) = \sum_{i=1, \dots, n} W(F_i, F_i^*) + \gamma \sum_{x_i x_j \in X} W(F_i^*, F_j^*) W_{ij} \quad (2)$$

мұндағы W – 2-Вассерштейн метрикасы [60], $\gamma > 0$ – параметр, ал матрица $W = (W_{ij})$ деректер жиынының элементтері арасындағы ұқсастық өлшемдерін білдіреді. Екі көп айнымалы Гаусс үлестірімдері үшін $N(\mu_0, \Sigma_0)$ және $N(\mu_1, \Sigma_1)$, 2-Вассерштейн қашықтығы ол:

$$W(N(\mu_0, \Sigma_0), N(\mu_1, \Sigma_1)) = \|\mu_0 - \mu_1\|_2^2 + \|\Sigma_0^{1/2} - \Sigma_1^{1/2}\|_F^2.$$

$$\text{find } (\alpha^*, S^*) = \arg \min J(\mu, \Sigma, a, S)$$

мұндағы

$$J(\mu, \Sigma, a, S) = \sum_{x_i \in X_1} \|\mu_i - a_i\|_2^2 + \|\Sigma_i^{1/2} - S_i^{1/2}\|_F^2 + \gamma \sum_{x_i x_j \in X} W_{ij} (\|a_i - a_j\|_2^2 + \|S_i^{1/2} - S_j^{1/2}\|_F^2) + \beta \sum_{i=1, \dots, n} \|a_i\|_2^2 + \|S_i\|_F^2.$$

Оңтайлы шешімді табу үшін a_i және $S_i^{1/2}$, $i = 1, \dots, n$ элементтеріне қатысты (2) дифференциалдаймыз:

$$\frac{\partial J}{\partial a_{ij}} = 2(\mu_{ij} - a_{ij}) + 4\gamma \sum_{l=1, \dots, n} W_{lj} (a_{lj} - a_{ij}) + 2\beta a_{ij}, i = 1, \dots, n_1$$

$$\frac{\partial J}{\partial a_{ij}} = 4\gamma \sum_{l=1, \dots, n} W_{lj} (a_{lj} - a_{ij}) + 2\beta a_{ij}, i = n_1, \dots, n$$

$$\frac{\partial J}{\partial s_{jk}^i} = 2(s_{jk}^i - \sigma_{jk}^i) + 4\gamma \sum_{l=1, \dots, n} W_{lj} (s_{jk}^i - s_{jk}^i) + 2\beta s_{jk}^i, i = 1, \dots, n_1$$

$$\frac{\partial J}{\partial s_{jk}^i} = 4\gamma \sum_{l=1, \dots, n} W_{lj} (s_{jk}^i - s_{jk}^i) + 2\beta s_{jk}^i, i = n_1, \dots, n.$$

$\sum_i^{1/2}$ матрицаларының төменгі үшбұрыш екенін ескере отырып, жоғарыдағы барлық элементтерді түрлендіретін $\text{vec}_2 : \mathbb{R}^{m \times m} \rightarrow \mathbb{R}^{\frac{m(m+1)}{2}}$ көмекші операциясын енгіземіз. Сондай-ақ, төменгі үшбұрышты матрицаны келесі операциясы арқылы вектордан алуға болады.

$$\text{vec}_2^{-1} : \mathbb{R}^{\frac{m(m+1)}{2}} \rightarrow \mathbb{R}^{m \times m}. \text{ Ұқсас, } \text{vec}_3 \text{ операциясы: } \mathbb{R}^{n \times m \times m} \rightarrow \mathbb{R}^{n \times \frac{m(m+1)}{2}}$$

(сонымен қатар $\text{vec}_3^{-1} : \mathbb{R}^{n \times \frac{m(m+1)}{2}} \rightarrow \mathbb{R}^{n \times m \times m}$) элементтері төменгі үшбұрышты матрицалар болып табылатын үш өлшемді тензорлар үшін анықталуы мүмкін. Белгілеу енгізсек:

$$Y_{1,0} = (\mu_1^T, \dots, \mu_{n_1}^T, 0, \dots, 0) \in \mathbb{R}^{n \times m}$$

$$\sum_{1,0} = (\text{vec}_2(\sum_1^{\frac{1}{2}})^T, 0, \dots, 0) \in \mathbb{R}^{n \times \frac{m(m+1)}{2}}$$

$$B = \text{diag}(\beta + 1, \dots, \beta + 1, \beta, \dots, \beta) \in \mathbb{R}^{n \times n}.$$

Содан кейін оңтайландыру мәселесінің шешімін матрица түрінде беруге болады:

$$a^* = (B + 2\gamma L)^{-1} Y_{1,0}$$

$$S^* = \text{vec}_3^{-1}((B + 2\gamma L)^{-1} \Sigma_{1,0}) \quad (3)$$

мұндағы L – Лапласий матрицасы, яғни, $L = D - W$, D бұл элементтері $D_{ii} = \sum_j W_{ij}$ -ға тең диагональды матрица. Егер біз $W = VV^T$ болатындай $V \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $q \ll n$ бар деп есептесек, онда

$$B + 2\gamma L = B + 2\gamma D - 2\gamma VV^T = G - 2\gamma VV^T.$$

мұндағы $G = B + 2\gamma D$. Вудбери сәйкестендіруін [16] пайдалану арқылы шешімдегі $O(n^3)$ амалдарын қабылдайтын кері $B + 2\gamma L$ операторын келесідей көрсетуге болады:

$$(G - 2\gamma VV^T)^{-1} = G^{-1} + 2\gamma G^{-1}V(I - 2\gamma V^T G^{-1}V)^{-1}V^T G^{-1} \quad (4)$$

мұндағы G диагональды матрица, $I - 2\gamma VV^T G^{-1}V \in \mathbb{R}^{q \times q}$. Сондықтан кері мәнді орындау үшін $O(nq + q^3)$ қажет, бұл есептеулерді айтарлықтай азайтады, өйткені болжам бойынша $q \ll n$. Соңында біз келесі формуланы аламыз:

$$a^* = (G^{-1} + 2\gamma G^{-1}V(I - 2\gamma V^T G^{-1}V)^{-1}V^T G^{-1}), Y_{1,0} \quad (5)$$

$$S^* = \text{vec}_3^{-1} (G^{-1} + 2\gamma G^{-1}V(I - 2\gamma V^T G^{-1}V)^{-1}V^T G^{-1}) \Sigma_{1,0}.$$

Орташа өлшенген ко-ассоциация матрицасы келесідей:

$$H = \sum_{l=1}^r \omega_l H_l, \quad (6)$$

мұндағы $H_1, \dots, H_r$ жұбының осы бөлімнің бір кластеріне жататынын немесе жатпағанын көрсететін элементтері бар $P_1, \dots, P_r$ бөлімдері үшін бірлескен ассоциация матрицалары, x_i, x_j ансамбль элементтерінің салмақтары, $\omega_l \geq 0, \sum \omega_l = 1$.

Бұл матрицаның төмен дәрежелі көрінісі бар:

$$H = VV^T,$$

мұндағы $V = [V_1 V_2 \dots V_r]$ – блок матрицасы, $V_l = \sqrt{\omega_l} Z_l, Z_l \in \mathbb{R}^{n \times K_l}$ l -ші бөлім үшін кластерді тағайындау матрицасы: partition:

$Z_l(i, k) = \mathbb{I}[c(x_i) = k], i = 1, \dots, n, k = 1, \dots, K_l$ және $K_l, P_l, K_l \ll n$ бөліміндегі кластерлер саны. Сонымен қатар H матрицасы үшін лапласиялық L матрицасын келесі түрде жазуға болатыны көрсетілген:

$$\begin{aligned} L &= D' - H, \\ D' &= \text{diag}(D'_{11}, \dots, D'_{nn}), \\ D'_{ii} &= \sum_{j=1}^n H(i, j) = \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^r \omega_l \sum_{k=1}^{K_l} Z_l(i, k) Z_l(j, k). \end{aligned} \quad (7)$$

Енді (4) оңтайлы шешімді (6) ұқсастық матрицасының және (7) диагональды төмен дәрежелі матрицаны қолдану арқылы табуға болады.

Коассоциациялық матрица: Төмен дәрежелі ұқсастық матрицасын ұсыну үшін біз ұқсастық матрицасы ретінде орташа өлшенген коассоциация матрицасын қолданамыз. Дегенмен, орташа салмақты коассоциация матрицасын есептеудің стандартты алгоритмінің [17, 18] бірқатар кемшіліктері бар:

- ♦ Евклидтік метрикуны қолданатын k -орталар алгоритмі тек сфералық кластерлерді таба алады, сондықтан деректердегі кейбір күрделі қатынастар кластерлеу нәтижесінде табылмауы мүмкін;

- ♦ Нәтижеге k -орталар алгоритмі үшін қажетті кластер санын таңдау да, ансамбльдегі әртүрлі бөлімдер саны да әсер етеді.

Бұл есептерді шешу үшін біз орташа салмақты ассоциация матрицасын есептеу алгоритмін жетілдіруді шештік. Біріншіден, біз k -орташа алгоритмінде қолданылатын қашықтық метрикасы бойынша бірлескен ассоциация матрицасын орташалауды ұсынамыз. Екіншіден, қажетсіз бөлімдердің әсерін азайту және ансамбль көлемін азайту үшін ансамбльде кластердің жарамдылық индексі тұрғысынан тек оңтайлы бөлімдерді пайдалануды ұсынамыз.

Мультиметриялық орташа өлшенген коассоциациялық матрица

$\{M_t\}_{t=1}^d$ нүктелер арасындағы қашықтық ретінде k - алгоритмінде нүктелер арасындағы қашықтық ретінде қолдануға болатын көрсеткіштер жиыны болсын, мысалы, p – ретті Минковский қашықтығы. Содан кейін осы жиынтықтағы әрбір метрика үшін кластерлік ансамбльдің көмегімен $\{P_l^{M_y}\}_{l=1}^{r^{M_t}}$ бөлімдерінің нұсқаларының ерікті жиынтығын алуға болады. Сол сияқты, әр бөлім үшін $H_l^{M_t}$ коассоциация матрицасын табуға болады [19]. Содан кейін біз мультиметриялық орташа өлшенген коассоциация матрицасын келесідей анықтаймыз:

$$H = \sum_{t=1}^d H^{M_t} = \sum_{t=1}^d \sum_{l=1}^{r^{M_t}} \omega_l^{M_t} H_l^{M_t},$$

мұндағы $\omega_1^{M_t}, \dots, \omega_r^{M_t}$ ансамбль элементтерінің салмақтары, $\omega_l^{M_t} \geq 0$, $\sum_{l=1}^{r^{M_t}} \omega_l^{M_t} = 1$ әрбір $M_t, t = 1, \dots, d$ үшін.

Бөлімнің салмағы $\omega_l^{M_t}$ тәуелді болатын кластерлеу сапасының индексі нүктелер арасындағы қашықтық ретінде таңдалған көрсеткішті қолдануы керек екенін ескеру қажет.

Сондықтан $\sum_{t=1}^d \sum_{l=1}^{r^{M_t}} \omega_l^{M_t} = 1$ емес, әрбір $M_t, t = 1, \dots, d$ үшін $\sum_{l=1}^{r^{M_t}} \omega_l^{M_t}$ деп есептейміз. Әрі қарай жақсарту ретінде коассоциация матрицаларын да өлшеуге болады.

Оңтайлы өлшенген орташа коассоциация матрицасы: Жалпы, әр бөлімдегі кластерлер саны гиперпараметр болып табылады. Мысалы, [3] ішінде екі түрлі параметрлер жиыны пайдаланылады:

Ансамбльдің өлшемі $r = 10$, i -ші бөлімдегі K_i кластерлерінің саны: $K_i = 2 + i, i = 1, \dots, r$:

Ансамбльдің өлшемі $r = 10$, i -ші бөлімдегі K_i кластерлерінің саны: $K_i = 100 + i, i = 1, \dots, r$.

Дегенмен бұл таңдау оңтайлы болмауы мүмкін. Сонымен, бірінші жағдайда кластерлердің саны аз бөлімдер үшін алгоритм салмақтары өте аз болуы мүмкін, бұл олардың орташа салмақты коассоциация матрицасына әсері шамалы болады дегенді білдіреді. Екінші жағдайда, кластерлердің үлкен саны бар бөлімдерді табудың жоғары есептеу күрделілігіне қоса, барлық алынған бөлімдер бір-біріне ұқсас және бірдей дерлік салмаққа ие болуы мүмкін. Сондай-ақ, екі жағдайда да кез келген критерий бойынша кем дегенде бір оңтайлы бөлімнің табылуына кепілдік берілмейді: мысалы, кластердің жарамдылық индексінің жергілікті оптимумына қол жеткізетін бөлім.

Біз оңтайлы бөлімдермен орташа өлшенген коассоциация матрицасын есептейтін басқа алгоритмді ұсынамыз. Осылайша алынған H^* матрицасы оптималды орташа салмақты ко-ассоциация матрицасы деп аталады. Бұл матрица оңтайлы болып табылады, өйткені оны есептеуде кластердің жарамдылық индексіне сәйкес оңтайлы бөлімдер ғана қолданылады. Төменде оңтайлы орташа өлшенген коассоциациялық матрицаны қадамдар бойынша есептеу алгоритмі берілген:

Кіріс:

X – деректер жиыны.

r – кластерлік ансамбль өлшемі.

k_{min} – бөлімдегі кластерлердің минималды саны.

k_{max} – бөлімдегі кластерлердің максималды саны.

Шығыс:

H^* – орташа өлшенген оңтайлы коассоциация матрицасы.

Қадамдар:

k әр түрлі кластерлер саны бар k-means алгоритмін қолдана отырып X жиынынан $\{P_k\}_{k=k_{min}}^{k_{max}}$ бөлулер жиынын табыңыз.

$\{P_{k_i}\}_{i=1}^r$ бөлімдер жиыны үшін кластерлер индексінің мәндерінің жиынын $\{\omega_k\}_{k=k_{min}}^{k_{max}}$ есептеу.

$\{\omega_k\}_{k=k_{min}}^{k_{max}}$ жиынынан және $\{P_{k_i}\}_{i=1}^r$ сәйкес бөлімдер жиынынан $\{\omega_{k_i}\}_{i=1}^r$ мәндерінің ең үлкен r мәндерін таңдау.

$\{P_{k_i}\}_{i=1}^r$ бөлімдерінің жиыны үшін $\{H_{k_i}\}_{i=1}^r$ коассоциация матрицаларының жиынын есептеу.

$H^* = \sum_{l=1}^r \omega_{k_l} H_{k_l}$ оңтайлы орташа коассоциация матрицасын есептеу.

соңы.

Осылайша алынған оңтайлы орташа өлшенген коассоциация матрицасын мультиметриялық орташа өлшенген коассоциация матрицасын есептеу үшін пайдалануға болады:

$$H^* = \sum_{t=1}^d H^{*M_t} \quad (10)$$

C – ABR алгоритмі

Корреляциялық нашар бақыланатын регрессия (C- ABR) алгоритмінің үш негізгі нұсқасын тұжырымдаймыз:

- ♦ RNF: ұқсастық матрицасын есептеу үшін радиалды негіз функциясы пайдаланылады;
- ♦ TDKM: ұқсастық матрицасын есептеу үшін орташа салмақты төмен дәрежелі коассоциация матрицасы пайдаланылады;
- ♦ NDMKM: ұқсастық матрицасын есептеу үшін оңтайлы мультиметриялық орташа салмақты төмен дәрежелі коассоциация матрицасы (10) пайдаланылады.

Кіріс:

X – әлсіз бақыланатын деректер жиынтығы, $X_1 \subset X$ – белгіленген объект, $X_2 \subset X$ – қате белгіленген объект, $X_3 \subset X$ – белгіленбеген объект.

a_i, Σ_i – әрбір $x_i \in X_1 \cup X_2$ үшін мақсатты үлестірулердің орташа векторлары мен коварианттық матрицалары.

TDKM нұсқасы: r, Ω – кластерлік ансамбльдің өлшемі және k – кластерлеу құралдарына арналған параметрлер жиынтығы.

LROMCM нұсқасы: M, k – алгоритмге арналған көрсеткіштер жиынтығы, r – кластер ансамблінің өлшемі, k_{min} – жиындағы кластерлердің ең аз саны, k_{max} – жиындағы кластерлердің ең көп саны.

Шығыс:

a^*, S^* – болжамды орташа векторлар және X жиынындағы объектілер үшін мақсатты үлестірімдердің коварианттық матрицалары (таңбаланбаған объектіге арналған болжамдарды есепке алғанда).

RNF нұсқасының қадамдары:

(2) және (4) формулаларының көмегімен мақсатты үлестірулердің болжамды орташа векторлары мен коварианттық матрицаларын тікелей есептеу керек.

TDKM нұсқасының қадамдары:

Ω – ден кездейсоқ таңдалған параметрлер үшін кластерлік бөлімнің r нұсқаларын құрыңыз; орташа өлшенген коассоциация матрицасын есептеу.

Лапласиан графигін (6) және (7)-формуладан D' қолдану арқылы төмен дәрежелі кескінде табу.

(5) формуланы қолдану арқылы мақсатты үлестірулердің болжамды орташа векторлары мен коварианттық матрицаларын есептеу.

LROMCM нұсқасының қадамдары:

M жиынындағы метрикалармен және (8) және (9) арқылы r, k_{min}, k_{max} параметрлері бар оңтайлы мультиметриялық орташа салмақты коассоциация матрицасын есептеу.

Лапласиан графигін (6) және (7) -дегі D' көмегімен төмен дәрежелі кескінде табу.

(5) формуланы қолдану арқылы мақсатты үлестірулердің болжамды орташа векторлары мен коварианттық матрицаларын есептеу.

соңы.

Нәтижелер мен талқылау

Бұл бөлімде ұсынылған корреляциялық әлсіз бақыланатын регрессия (C-ABR) алгоритмінің үш нұсқасы салыстырылды. Біз MWD және MAE метрикаларын ұсынған әлсіз бақыланатын оқыту алгоритмдерімен салыстыру кезінде пайдаланамыз:

$$MWD(y, y^*) = \frac{1}{n_{test}} \sum_{x_i \in X_{test}} \|\mu_i - a_i\|_2^2 + \left\| \sum_i^{1/2} - \mathbb{S}_i^{1/2} \right\|_F^2$$

$$MAE(y, y^*) = \frac{1}{n_{test}} \sum_{x_i \in X_{test}} \|\mu_i - a_i\|_2.$$

Мультиметриялық орташа өлшенген коассоциация матрицасын есептеу үшін салмақтарды және к біз салмақтарды және кластерлердің оңтайлы санын анықтау үшін индекстік кластердің жарамдылығы ретінде әртүрлі $p \in \{1, 2, \infty\}$ және Silhouette Minkowski метрикалық p_p пайдаланамыз.

Монте-Карло модельдеуі

$$N(\mu_k^*, \Sigma_k^*), \mu_k^* = (8k + 1, 8k + 2, \dots, 8k + d_x) \in \mathbb{R}^m, \Sigma_k^* = \text{diag}(1, \dots, 1) \in \mathbb{R}^{d_x \times d_x}, d_x = 8 \text{ және } k \in 1, 2, 3$$

көп айнымалы қалыпты үлестірулер жиынынан 1000 объектілердің деректер жинағы жасалынды.

k -ші құрамдас бөліктен құрылған объектілер үшін мақсатты функция $Y_k = k + \varepsilon_k$ деп есептейміз, мұндағы ε_k кездейсоқ шама, d_y —өлшемді қалыпты таралу(үлестіру) функциясы $N(0, D_k D_k^T)$, D_k кездейсоқ төменгі-қалыпты үлестірімнен іріктелген элементтері бар үшбұрышты матрица және және $d_y = 4$.

Нашар бақылауды қамтамасыз ету үшін біз деректер жиынтығының 10% -ы қатаң белгіленген, деректер жиынтығының 20%-ы дұрыс белгіленген объектілерден, ал қалған 70%-ы белгіленбеген деп есептедік. Анық емес белгілеуді модельдеу үшін (1) формуласымен анықталған параметрлерді қолданамыз: $\Sigma_i = \Sigma_Y$, мұндағы Σ_Y белгіленген деректерге арналған мақсатты функцияның коварианттық матрицасы. Қатаң белгіленген объектілер үшін Σ_i матрицасын нөлдік матрица деп есептейміз.

C-ABR-TDKM алгоритмдері үшін $r = 30$ өлшемді кластерлік ансамбльді және i -ші бөлімдегі K_i кластерлер санын қолдандық:

$K_i = 2 + i, i = 1, \dots, 30$. C-ABR -NDMKM алгоритмі үшін $r = 10, k_{min} = 2$ және $k_{max} = 30$ параметрлері қолданылды. Барлық алгоритмдер үшін $\beta = 0.001$ және $\gamma = 0.001$ жүйелеу коэффициенттері орнатылды. Алынған сапа көрсеткіштерінің орташа есеппен 100-ден астамы орындалды. Нәтижелер 1-кестеде берілген.

Кесте 1 – Монте-Карло симуляциясы бойынша салыстыру

Supervision type	C-ABR		
	RNF	TDKM	NDMKM
MWD	0.382	0.324	0.227

Тәжірибеде қолданылған деректер жиыны

CO / NOx деректер жинағы үшін [20] 2015 жылғы көмірқышқыл газы (CO) және азот оксидтері (NOx) шығарындыларын пайдаланамыз. Бұл деректер жиынтығында газ турбинасының сипаттамаларын сипаттайтын және 36733 бақылауды қамтитын 11 ерекшелік бар.

Деректердің 1%-ы қатаң белгіленген, 9%-ы дұрыс белгіленген және 90%-ы белгіленбеген деп есептеледі. Деректер жиынтығы үлкен болғандықтан, дұрыс емес белгілеуді модельдеу үшін біз μ_i орташа векторларын және Σ_i коварианттық матрицаларын ең жақын 50 көршілері бойынша бағалаймыз. Қатаң белгіленген объектілер үшін дәл белгілеу орташа вектор μ_i ретінде пайдаланылады, Ал Σ_i нөлдік матрицаға тең. Синтетикалық деректер сияқты, жүйелеу коэффициенттері $\beta = 0,001$ және $\gamma = 0,001$ орнатылған. C-ABR-TDKM және C-ABR-TDKM алгоритмдері үшін i -ші бөлімдегі K_i кластерлерінің санымен $r = 30$ өлшемді кластерлік ансамбль қолданылады: $K_i = 10 + i, i = 1, \dots, 30$.

C-ABR-NDMKM алгоритмі $r = 10, k_{min} = 2, k_{max} = 50$ параметрлерімен оқытылған. Бақыланатын оқыту алгоритмдері (көп айнымалылы сызықтық регрессия (MLR) және XGBoost (XGB)) тек қатаң белгіленген объектілермен оқытылған. Деректер жиынындағы деректердің үлкен көлеміне байланысты RBF нұсқасында кері матрицаны табу есептеу ресурстарының, әсіресе жедел жадтың айтарлықтай көлемін қажет ететінін ескеріңіз. Нәтижелер 2 -кестеде ұсынылған.

Кесте 2 – CO/NOx деректер жинағындағы салыстыру

Supervision type	C- ABR			SR	
	RNF	TDKM	NDMKM	MLR	XGB
MWD	65.45	52.22	44.74	–	–
MAE	38.84	31.92	26.83	38.69	30.48

Осылайша, эксперименттердің нәтижелері ұсынылған әдістің дәлдігінің айтарлықтай жақсарғанын көрсетеді.

Қорытынды

Жұмыста трансдуктивті ортадағы шулы деректермен берілген көп мақсатты нашар бақыланатын регрессия мәселесі қарастырылды. Вассерштейн метрикасы мен мультирегуляризацияны пайдалана отырып, оңтайландыру мәселесін шешу алгоритмі ұсынылды. Оңтайландыру мәселесін шешуді жылдамдату үшін коассоциациялық матрицаны алу үшін кластерлік ансамбльді және алынған матрицаларды сығу үшін төмен дәрежелі көрсету әдісі қолданылды. Ұсынылған алгоритм оқыту кезінде белгісіз көп өлшемді белгілерді пайдалана алмайтын бар машиналық оқыту алгоритмдерінен артықшылығын көрсетті. Сондай-ақ оңтайлы муьлтиметриялық орташа салмақты коассоциациялық матрицаны енгізу арқылы орташа салмақты коассоциация матрицасын есептеуге бірнеше маңызды жақсартулар жасалынду. Жаңа тәсіл алгоритмнің сапасы мен тұрақтылығын айтарлықтай жақсартта алады, сонымен қатар әрбір нақты мәселені шешу үшін оңтайлы гиперпараметрлерді іздеуді жеңілдетеді.

ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Qin Q., Zhou X., Jiang Y. (2021) Prognosis Prediction of Stroke based on Machine Learning and Explanation Model, *International Journal of Computers, Communications and Control*, vol. 6, pp. 1–13.
- 2 Merembayev T., Amirgaliyeva S. & Kozhaly K. (2021) Using item response theory in machine learning algorithms for student response data. In *2021 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, pp. 1–5. IEEE
- 3 Shahana I., Tri N., Xiao F., Fu D.Y., Chen M.F., Zhang M., Fatahalian K., Ré C. The Details Matter: Preventing Class Collapse in Supervised Contrastive Learning. *Computer Science Math. Forum* 2022.
- 4 Xiao Y., Yin Z., Liu B. (2020) A similarity-based two-view multiple instance learning method for classification. *Knowl.-Based Syst.*, pp. 201–202.
- 5 Qian X., Lin C., Chen Z., Wang W. (2024) SAM-Induced Pseudo Fully Supervised Learning for Weakly Supervised Object Detection in Remote Sensing Images. *Remote Sens.*, vol. 16, p. 1532.
- 6 Zheng S., Wu Z., Xu Y., Wei Z. (2024) Weakly Supervised Object Detection for Remote Sensing Images via Progressive Image-Level and Instance-Level Feature Refinement, *Remote Sens.*, no. 16, p. 1203.
- 7 Tan C., Song W. (2024) Weakly Supervised Depth Estimation for 3D Imaging with Single Camera Fringe Projection Profilometry, *Sensors*, no. 24, p. 1701.
- 8 Wang Z., Zhang J., Bai L., Chang H., Chen Y., Zhang Y., Tao J. (2024) A Deep Learning Based Platform for Remote Sensing Images Change Detection Integrating Crowdsourcing and Active Learning, *Sensors*, no. 24, p. 1509.
- 9 Yang Z., Mahajan D., Ghadiyaram D., Nevatia R., Ramanathan V. (2019) Activity driven weakly supervised object detection, pp. 2912–2921.
- 10 Zhou Z.H. (2017) A brief introduction to weakly supervised learning. *Natl. Sci. Rev.*, no. 5, pp. 44–53.
- 11 Bogachev V.I., Kolesnikov A. (2012) The Monge-Kantorovich problem: achievements, connections, and perspectives *Russ. Math. Surv.*, 67, pp. 785–890.
- 12 Aggarwal C.C., Hinneburg A., Keim D.A. (2001) On the surprising behavior of distance metrics in high dimensional space. In: Van den Bussche, J., Vianu, V. (eds.) *ICDT 2001*. LNCS, vol. 1973, pp. 420–434. Springer, Heidelberg.
- 13 Kaya H., Tufekci P., Uzun E. (2019) Predicting CO and NOx emissions from gas turbines: novel data and a benchmark PEMS. *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, 27, pp. 4783–4796.
- 14 Al-Mekhlafi Z., Senan E., Rassem T., Mohammed B., Makbol N., Alanazi A., Almurayziq T., Ghaleb F. (2022) Deep learning and machine learning for early detection of stroke and haemorrhage, *Comput. Mater. Contin.*, 72, pp. 775–796.
- 15 Alhakami H., Alraddadi S., Alseady S., Baz A., Alsubait T. (2020) A Hybrid Efficient Data Analytics Framework for Stroke Prediction. *Int. J. Comput. Sci. Netw. Secur.*, 20, pp. 240–250.
- 16 Higham N. (2002) Accuracy and Stability of Numerical Algorithms. SIAM.

17 Cherikbayeva L., Daiyrbayeva E., Yerimbetova A. Research of Cluster Analysis Methods for Group Solutions of the Pattern Recognition Problem, Proceedings – 6th International Conference on Computer Science and Engineering, UBMK 2021, pp. 494–497. Date Added to IEEE Xplore: 13 October 2021.

18 Merembayev T., Kurmangaliyev D., Bekbauov B., Amanbek Y. (2021) A Comparison of machine learning algorithms in predicting lithofacies: Case studies from Norway and Kazakhstan. *Energies*, vol. 14, no. 7.

19 Abdrazakuly N., Cherikbayeva L. (2023) Creation Of An Effective Image Processing Algorithm Based On An Ensemble Approach, *Journal of Problem in Computer Science and Information Technologies*, no. 3(1). <https://doi.org/10.26577/1i32jpcsit2308>

20 UC Irvine Machine Learning Repository: Gas Turbine CO and NOx Emission Data Set, 06 April 2021. <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Gas+Turbine+CO+and+NOx+Emission+Data+Set>

^{1,3}**Cherikbayeva L.Ch.**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-8948-4205, e-mail: cherikbayeva.lyailya@gmail.com

²**Mukazhanov N.K.**

PhD, ORCID ID: 0000-0003-4835-5751, e-mail: n.mukazhanov@satbayev.university

²**Alibiyeva Zhibek**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-9565-5621, e-mail: alibievajibek@gmail.com

¹**Adilzhanova S.A.**

PhD, ORCID ID: 0000-0003-1768-064, e-mail: asaltanat81@gmail.com

¹**Tyulepberdinova G.A.**

ф.-м.ф.к., доцент, PhD, ORCID ID: 0000-0002-4322-8983, e-mail: tyulepberdinova@gmail.com

¹**Sakypbekova M.Zh.**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-6652-1357, e-mail: sakypbekova.meruyert@gmail.com

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

²Satbayev University, 050013, Almaty, Kazakhstan

³Institute of Information and Computing Technologies, 050040, Almaty, Kazakhstan

SOLUTION TO THE PROBLEM WEAKLY CONTROLLED REGRESSION USING COASSOCIATION MATRIX AND REGULARIZATION

Abstract

Currently, the theory and methods of machine learning (ML) are rapidly developing and are increasingly used in various fields of science and technology, in particular in manufacturing, education and medicine. Weakly supervised learning is a subset of machine learning research that aims to develop models and methods for analyzing various types of information. When formulating a weakly supervised learning problem, it is assumed that some objects in the model are not defined correctly. This inaccuracy can be understood in different ways. Weakly supervised learning is a type of machine learning method in which a model is trained using incomplete, inaccurate, or imprecise observation signals rather than using fully validated data. Weakly supervised learning often occurs in real-world problems for various reasons. This may be due to the high cost of the data labeling process, low sensor accuracy, lack of expert experience, or human error. For example, labeling of poor control is carried out in cases obtained by crowdsourcing methods: for each object there is a set of different assessments, the quality of which depends on the skill of the performers. Another example is the problem of object detection in an image. Boundary lines are a common way to indicate the location and size of objects detected in an image in object detection tasks. The article presents an algorithm for solving a multi-objective weakly supervised regression problem using the Wasserstein metric, various regularizations and a co-association matrix as a similarity matrix. The work also improved the algorithm for calculating the weighted average co-association matrix. We compare the proposed algorithm with existing supervised learning and unsupervised learning algorithms on synthetic and real data.

Key words: Weakly supervised learning, cluster ensemble, multi-objective regression, low-rank similarity matrix, co-association matrix.

^{1,3} **Черикбаева Л.Ш.**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-8948-4205, e-mail: cherikbayeva.lyailya@gmail.com

² **Мукажанов Н.К.**

PhD, ORCID ID: 0000-0003-4835-5751, e-mail: n.mukazhanov@satbayev.university

² **Алибиева Ж.М.**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-9565-5621, e-mail: alibievajibek@gmail.com

¹ **Адилжанова С.А.**

PhD, ORCID ID: 0000-0003-1768-064, e-mail: asaltanat81@gmail.com

¹ **Тюлепбердинова Г.А.**канд. физ.-мат. наук, доцент, PhD, ORCID ID: 0000-0002-4322-8983,
e-mail: tyulepberdinova@gmail.com¹ **Сакыпбекова М.Ж.**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-6652-1357, e-mail: sakypbekova.meruyert@gmail.com

¹КазНУ имени аль-Фараби, 050040, г. Алматы, Казахстан²КазННТУ имени К.И. Сатпаева, 050013, г. Алматы, Казахстан³Институт информационных и вычислительных технологий,
050040, г. Алматы, Казахстан

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СЛАБО КОНТРОЛИРУЕМОЙ РЕГРЕССИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЦЫ КОАССОЦИИ И РЕГУЛЯРИЗАЦИИ

Аннотация

В настоящее время теория и методы машинного обучения (МО) быстро развиваются и все шире используются в различных областях науки и техники, в частности в производстве, образовании и медицине. Слабо контролируемое обучение – это часть исследований в области машинного обучения, направленная на разработку моделей и методов анализа различных типов информации. При формулировании задачи обучения со слабо контролируемой обучением предполагается, что некоторые объекты в модели определены неправильно. Эту неточность можно понимать по-разному. Слабо контролируемое обучение – это тип метода машинного обучения, при котором модель обучается с использованием неполных, неточных или неточных сигналов наблюдения, а не с использованием полностью проверенных данных. Слабо контролируемое обучение часто возникает в реальных задачах по разным причинам. Это может быть связано с высокой стоимостью процесса маркировки данных, низкой точностью датчиков, недостатком опыта экспертов или человеческой ошибкой. Например, маркировка плохого контроля осуществляется в случаях, полученных методами краудсорсинга: для каждого объекта имеется набор различных оценок, качество которых зависит от мастерства исполнителей. Другой пример – проблема обнаружения объекта на изображении. Ограничительные линии – это распространенный способ указания местоположения и размера объектов, обнаруженных на изображении, в задачах обнаружения объектов. В статье представлен алгоритм решения многокритериальной задачи слабо контролируемой регрессии с использованием метрики Вассерштейна, различной регуляризации и матрицы коассоциации в качестве матрицы подобия. В работе также был усовершенствован алгоритм расчета средневзвешенной матрицы коассоциаций. Мы сравниваем предложенный алгоритм с существующими алгоритмами обучения с учителем и обучения без учителя на синтетических и реальных данных.

Ключевые слова: слабо контролируемое обучение, кластерный ансамбль, многоцелевая регрессия, матрица сходства низкого ранга, матрица коассоциации.

UDC 004.021
IRSTI 28.25.23

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-95-105>

¹Amanov A.,

PhD student, ORCID ID: 0000-0002-7669-0656,

e-mail: alimzhan.amanov@gmail.com

¹Kazakh-British Technical University, 050000, Almaty, Kazakhstan

INVARIANT POLYNOMIALS WITH APPLICATIONS TO QUANTUM COMPUTING

Abstract

In quantum information theory, understanding the complexity of entangled states within the context of SLOCC (stochastic local operations and classical communications) involving d qubits (or qudits) is essential for advancing our knowledge of quantum systems. This complexity is often analyzed by classifying the states via local symmetry groups. The resulting classes can be distinguished using invariant polynomials, which serve as a measure of entanglement. This paper introduces a novel method for obtaining invariant polynomials of the smallest degrees, which significantly enhances the efficiency of characterizing SLOCC classes of entangled quantum states. Our method not only simplifies the process of identifying these classes but also provides a robust tool for analyzing the entanglement properties of complex quantum systems. As a practical application, we demonstrate the derivation of minimal degree invariants in specific cases, illustrating the effectiveness of our approach in real-world scenarios. This advancement has the potential to streamline various processes in quantum information theory, making it easier to understand, classify, and utilize entangled states effectively.

Key words: invariant polynomials, quantum entanglement, SLOCC.

Introduction

Understanding entanglement is a basic idea in quantum information theory. The main issue is figuring out how to measure and sort the entanglement in quantum states [1]. It's seen as an important part of quantum information and become an important field of research [3, 4, 5]. Polynomial functions that stay the same with stochastic local operations and classical communication (SLOCC) changes have been investigated extensively over the past years [2, 3, 7]. These functions are sometimes exploited to measure the entanglement [13].

Stochastic Local Operations and Classical Communication (SLOCC) is a pivotal concept in this context, offering a framework for classifying entangled states based on their convertibility through local operations and classical communication. This classification is vital because it helps identify which quantum states can be transformed into each other using local operations, shedding light on the fundamental structure of quantum entanglement and its implications for quantum information processing. Within the SLOCC framework, the complexity of entangled states, particularly with systems composed of d quantum units (qudits, n states), becomes a critical area of study. The challenge lies in efficiently categorizing these states to understand their potential for various quantum information tasks.

This paper addresses the challenge of classification of entangled states under SLOCC, for odd number $d \geq 3$ of parties each having a single qudit. It introduces an improved method for the derivation of invariant polynomials of smallest degrees, which serve as a robust tool for efficiently characterizing SLOCC classes of entangled quantum states [2, 3, 13, 14, 15]. This way of derivation was shown in [8, 9] and developed in [10]. Using representation theory, particularly Schur-Weyl

duality, we obtain the spanning set of homogeneous invariant polynomials of fixed degree over state space of d qubits.

The motivational problem of this research can be stated as follows.

Problem 1 (Orbit separation problem). For two entangled states is it possible to transform one to another by stochastic local operations?

To address this problem, we reformulate it in the mathematical setting. Quantum states are interpreted mathematically as elements of $V = \square^n \otimes \dots \otimes \square^n$ (repeated d times) scaled to unit norm. Under the fixed basis, each state can be associated with d -dimensional hypermatrix $\{A_{i_1 \dots i_d}\}$. Stochastic local operations are associated with the elements of the group $G = SL(n) \times \dots \times SL(n)$ (repeated d times), where each group copy acts independently on the corresponding tensor component by left multiplication. Here $SL(n)$ is the group of $n \times n$ matrices of a determinant 1. Thus, SLOCC classes are exactly the orbits of a group action.

The polynomial P over the vector space V is G -invariant when it is constant on the orbits of G -action, i.e., $P(gv) = P(v)$. One way to separate tensor orbits (state classes) is to provide different evaluations on some invariant polynomial. Thus, generation of such polynomials is the crucial task for QIT.

Problem 2 (Invariant calculation problem). Given tensor space, compute the smallest tensor invariants.

Our main contribution is that we provide a method to produce polynomials of the smallest possible degree. This problem is of Computer Science nature, as it requires development of an algorithm based on the structure of underlying tensor space. The findings and methods can also be exploited in other areas of computer science, where tensors are applied, since they shed light to the symmetries of a tensor space with respect to the natural group action.

In the context of SLOCC (Stochastic Local Operations and Classical Communication), certain types of entangled states play significant roles. Here's a brief exposition of the EPR state, GHZ state, and W-state in terms of SLOCC:

1. EPR state is a maximally entangled state between two qubits:

$$\text{EPR} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \quad (1)$$

2. GHZ State, named after Greenberger-Horne-Zeilinger, is a maximally entangled state, generalizing EPR state, involving three or more qubits, where all qubits are entangled with each other:

$$\text{GHZ}_{d,n+1} = \frac{1}{\sqrt{n+1}}(|0 \dots 0\rangle + \dots + |n \dots n\rangle). \quad (2)$$

3. W-State is another type of multipartite entangled state, usually involving three or more qubits:

$$\text{W}_d = \frac{1}{\sqrt{d}}(|10 \dots 0\rangle + |01 \dots 0\rangle + \dots + |00 \dots 1\rangle). \quad (3)$$

These states are fundamental examples of multipartite entanglement and play crucial roles in various aspects of quantum information processing, including quantum communication, cryptography, and computation. For instance, in [12] W-state were constructed on a quantum computer.

We shall describe the theoretical background hidden behind the generation of smallest invariant polynomials, provide the basis of smallest degree polynomial invariants in case of 5 qubits and 5 qutrits.

Literature review

Invariant polynomials are critical tools in the classification of quantum states, particularly within the framework of quantum computing and quantum information theory. By leveraging these poly-

nomials, one can efficiently characterize and measure the complexity of entangled states under local operations and classical communications (SLOCC). This review explores the foundational theories, practical applications, and computational techniques associated with invariant polynomials, emphasizing their significance in quantum computing.

The foundational work by Dür, Vidal, and Cirac [1] demonstrated the distinct ways three qubits can be entangled, laying the groundwork for understanding polynomial invariants in quantum systems. Their findings revealed the existence of two inequivalent classes of entangled states, which are distinguished by different sets of polynomial invariants. This seminal work emphasized the role of local symmetry groups in classifying entangled states, which has become a cornerstone in the study of quantum information theory.

Building on this foundation, Luque and Thibon [2, 3] expanded the scope of polynomial invariants to systems with four and five qubits. See also [14]. Their research provided explicit descriptions and closed formulas for these invariants, facilitating the classification of more complex quantum states. By deriving minimal degree invariants, they enabled more efficient characterization of SLOCC classes, thereby advancing the practical applications of these mathematical tools in quantum computing.

Hillery, Bužek, and Berthiaume [6] explored the application of polynomial invariants in quantum secret sharing, demonstrating how these invariants can be used to secure quantum communication protocols. Their work highlighted the practical relevance of invariant polynomials in real-world quantum information tasks, showcasing the versatility of these mathematical constructs.

In [21] a novel method was proposed for the canonicalization of Riemann tensor polynomials by employing a block distance invariant approach. This technique simplifies the process of reducing monotermin tensor polynomials to their canonical forms, providing an efficient computational framework for handling tensor polynomials in algebraic computations.

Hrushovski et al. [25] investigated the strongest algebraic program invariants, providing a new approach to understanding algebraic invariants in the context of program verification. Their findings offer robust tools for the analysis and verification of polynomial dynamical systems.

In [26] advanced visualization techniques for tensor fields were developed using fiber surfaces of invariant spaces. This method enhances the visualization and interpretation of complex tensor fields, offering practical applications in scientific visualization and data analysis.

Miyake [7] further extended the classification of multipartite entangled states by employing multidimensional determinants, which are closely related to polynomial invariants. This approach allowed for a more nuanced understanding of entanglement in higher-dimensional quantum systems, bridging the gap between abstract mathematical theory and practical quantum computing applications.

The identification of fundamental invariants by Bürgisser and Ikenmeyer [8] marked a significant advancement in the field, as they explored the role of these invariants in orbit closures within algebraic geometry. Their research provided deeper insights into the structure of polynomial invariants, enhancing the theoretical framework for their application in quantum computing.

In a related study, Bürgisser et al. [9] investigated scaling algorithms and the null-cone problem from the perspective of invariant theory. Their work demonstrated the computational efficiency of these algorithms in determining invariant polynomials, offering practical tools for quantum information scientists to employ in their research.

Leifer, Linden, and Winter [5] presented a novel approach to measuring polynomial invariants of multipartite quantum states. They developed networks that estimate these invariants under local unitary transformations and SLOCC, providing a practical method for experimental physicists to measure entanglement. This work bridged the gap between theoretical constructs and experimental applications, making polynomial invariants more accessible for practical use.

Grassl, Rötteler, and Beth [8] focused on computing local invariants of qubit systems, demonstrating how these invariants can be used to test local equivalence of quantum systems. Their

research provided concrete examples and computational techniques for deriving invariant polynomials, contributing valuable tools for the quantum computing community.

In [19] the author provides a fixed parameter tractable algorithm to compute quantum invariants of links presented by planar diagrams, including the Reshetikhin-Turaev invariants derived from simple Lie algebras. While in [20] the neural networks and machine learning techniques were used to compute invariant polynomials.

In [22, 23] the counting of $O(N)$ tensor invariants were examined, offering significant insights into the combinatorial aspects of tensor models. Their work elucidates the structure of tensor invariants, contributing to the broader understanding of tensor algebra and its applications in theoretical physics.

In general, most tensor problems are NP-hard as were shown in [27], another example refers to [24], so it is hopeless to expect, that tensor related problems could be solved fast.

The study of invariant polynomials is indispensable for classifying and measuring entangled quantum states in the context of quantum computing. By providing a robust mathematical framework, these invariants facilitate the efficient characterization of SLOCC classes and offer practical tools for quantum information processing. The development of minimal degree invariants and advanced computational techniques continues to enhance the applicability of these methods in both theoretical and experimental quantum computing research.

Main provisions

A. Tensors and invariants

We denote $[n] = \{0, \dots, n-1\}$. Let $V = (\square^n)^{\otimes d}$ be the space of tensors (state space). Elements of V written in a fixed basis correspond to hypermatrices $(X_{i_1, \dots, i_d})$ indexed by $(i_1, \dots, i_d) \in [n_1] \times \dots \times [n_d]$ and we shall usually identify tensors in V with corresponding hypermatrices.

The group $G = SL(n)^{\times d}$ naturally acts on the space of tensors $V = (\square^n)^{\otimes d}$ by

$$(g_1, \dots, g_d)v_1 \otimes \dots \otimes v_d = g_1 v_1 \otimes \dots \otimes g_d v_d \quad (4)$$

for $g_i \in SL(n), v_i \in \square^n$ and extended multilinearly. Let $\text{PInv}_d(n)$ be the ring of G -invariant polynomials that inputs elements of V . It is known [2, 3] that the degree of any polynomial in $\text{PInv}_d(n)$ is a multiple of n . By $\text{PInv}_d(n, k)$ we denote the homogeneous degree nk part of $\text{PInv}_d(n)$, which provide the grade decomposition:

$$\text{PInv}_d(n) = \bigoplus_{k \geq 0} \text{PInv}_d(n, k). \quad (5)$$

The dimensions of the grades are counted by rectangular generalized Kronecker coefficients $g_d(n, k) := g(n \times k, \dots, n \times k)$ (repeated d times). The (generalized) Kronecker coefficients are structural constants of tensor products of irreducible symmetric group representations. It is the major problem to give a combinatorial interpretation for these numbers; this problem sometimes referred to as last open problem in algebraic combinatorics. Decision problem of positivity of Kronecker coefficients is known to lie in NP class.

In [10], the authors studied dimension sequences via Kronecker coefficients. it was obtained the lower bound for smallest k for which $\dim \text{PInv}_d(n, k) > 0$. Denote

$$\delta'_d(n) = \min\{k \mid \dim \text{PInv}_d(n, k) > 0\}. \quad (6)$$

It is known, that $\delta'_d(n) = 1$ for even d and there is a unique polynomial invariant of that degree called Cayley's first hyperdeterminant [15, 16]. For odd d situation is completely different. The following theorem sheds light to odd d case.

$$\left\lceil n^{\frac{1}{d-1}} \right\rceil \leq \delta'_d(n) \leq n. \quad \text{d we have the bounds:} \quad (7)$$

In particular, the lower bound is sharp in cases $n \leq 2^{d-1}$ and $3^{d-1} \leq n \leq 4^{d-1}$.

By computing the Kronecker coefficients we know the dimensions of the grades by $g_d(n, k) = \dim \text{PInv}_d(n, k)$. See the figures in the Results section for dimension sequences.

Our aim is to describe the minimal possible invariants. For that we require a few combinatorial definitions.

B. Magic sets and its signature function

We refer to elements of the box $[k]^d$ as cells. A slice of $[k]^d$ is a subset of all cells with fixed i -th coordinate (called direction) for some $i \in [d]$. A diagonal of the box $[k]^d$ is a subset of size k with no two cells lying in the same slice.

A magic set is a subset of $[k]^d$ which has an equal number of elements in every slice of $[k]^d$, and this number is called magnitude. We can represent a magic set T as a magic hypermatrix with 1 at cells corresponding to elements of T and 0 elsewhere. Magic hypermatrix is a natural generalization of (0,1)-magic squares. Denote the set of all magic sets in $[k]^d$ of magnitude n as $B_d(n, k)$.

Each magic set T in $[k]^d$ of magnitude n and cardinality $m = nk$ can be represented as $d \times m$ table with entries in $[n]$ as follows: iterate over cell $I = (i_1, \dots, i_d)$ of $[k]^d$ in lexicographical order and add column I to the table whenever $T_{i_1, \dots, i_d} = 1$. We refer to resulting table as magic table T . For instance, for $d = 3$ and $k = 3$ assume $T_{000} = 1, T_{001} = 1, T_{110} = 1$ and $T_{111} = 1$ and zero elsewhere, then the corresponding table is:

$$T = \begin{pmatrix} 0011 \\ 0011 \\ 0101 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

We identify magic sets and corresponding tables. Note, that if $T \in B_d(n, k)$ then corresponding magic table is of size $d \times nk$ and each row consist of letters from $[k]$ each appearing n times. Since $T_{i_1, \dots, i_d} \in \{0, 1\}$ the columns of magic table do not repeat.

For each magic set let us introduce a 'filter' for (noncommutative) monomials involved in polynomials of $\text{PInv}_d(n)$ of degree nk . For the map $\sigma: [nk] \rightarrow [n]^d$ denote monomial $X_\sigma = \prod_{i=1}^{nk} X_{\sigma(i)}$. The map σ can also be regarded as $d \times nk$ table with i -th column being $\sigma(i)$ with each row containing letters from $[n]$ each appearing k times.

For the magic table $T \in B_d(n, k)$, define the sign function $\text{sgn}_T(\sigma) \in \{-1, 0, 1\}$ as follows: overlay table σ on table T and consider all symbols of table σ that lie in the same row and have the same underlying symbol from T , denote resulting sequence $a = (a_1, \dots, a_n)$, if a results into permutation then multiply the result by the sign of this permutation; otherwise set $\text{sgn}_T(\sigma) = 0$. In other words, $\text{sgn}_T(\sigma)$ is the result of overlaying of σ on T where we expect each block of equal letters within the same row of T be covered by permutation and the product of all signatures of resulting permutations is exactly the quantity $\text{sgn}_T(\sigma)$.

C. Spanning set of invariant polynomials

For a magic set $T \in B_d(n, k)$ define the polynomial

$$\Delta_T = \sum_{\sigma: [nk] \rightarrow [n]^d} \text{sgn}_T(\sigma) \prod_{i=1}^{nk} X_{\sigma(i)} \quad (9)$$

where sum runs over all possible such maps σ . It turns out, that these polynomials are enough to span $\text{PInv}_d(n, k)$.

Proposition 3 ([9, 10]). Polynomials $\{\Delta_T\}$ are invariant, for T running over $B_d(n, k)$, and linearly spans the space $\text{PInv}_d(n, k)$.

We note that the polynomials $\{\Delta_T\}$ may and will be linearly dependent. Also, the size of $B_d(n, k)$ is still much larger than the dimension of $\text{PInv}_d(n, k)$, but in the next chapter we provide several optimizations on search of $B_d(n, k)$ by means of representation theory.

Materials and methods

In this section we provide the pipeline of generating the spanning set of $\text{PInv}_d(n, k)$. By Proposition 2 we know that the set $\{\Delta_T \mid T \in B_d(n, k)\}$ linearly spans $\text{PInv}_d(n, k)$. But the size of the set grows exponentially fast, the rough upper bound would be $B_d(n, k) \leq \binom{k^d}{nk}$.

The following fact helps to enhance the search of smaller spanning set. We call a word $w = (w_1, \dots, w_m) \in [k]^m$ lattice if for each $i = 1, \dots, m$ the number of occurrences of j in the word $(w_1, \dots, w_i)$ is at least as the number of occurrences of $j + 1$ in $(w_1, \dots, w_i)$ for each $j = 1, \dots, k$. Let $B_d^+(n, k) \subseteq B_d(n, k)$ be the subset of magic sets called lattice magic sets, if each row of a corresponding magic table is a lattice word.

Proposition 4 [10]. The set $\{\Delta_T\}$ where T ranges in $B_d(n, k)$ is the spanning set of $\text{PInv}_d(n, k)$.

Theorem 5. The set $\{\Delta_T\}$ where T ranges in $B_d^+(n, k)$ is the spanning set of $\text{PInv}_d(n, k)$.

This combining with Proposition 3 provides an enhanced method of generating such polynomial invariants. Theorem 5 in practice allows to dramatically reduce the size of search space of T from $B_d(n, k)$ to $B_d^+(n, k)$. This can be done with simple backtracking algorithm.

Results and discussion

In this section basis for the space of invariant polynomials of minimal degree is obtained. Using Sage [18] several dimension sequences are presented. As we can see from the data, there is the unique invariant of degree 4 for 3 qubits:

Table 1 – Dimension sequences of polynomial invariants of degree NK for 3 qubits

$k \backslash n$	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	1	0	0	0	0
3	1	0	1	1	1	1	0	1
4	1	1	2	5	6	13	14	18
5	1	0	1	4	21	158	1456	9854

the celebrated $2 \times 2 \times 2$ hyperdeterminant. This invariant was first obtained by Cayley, since then referred to as Cayley's second hyperdeterminant [16]. Almost 150 years later, this invariant was generalized by Gelfand-Kapranov-Zelevinsky [17].

The following table characterizes degree sequences for degree 4 invariants of $\mathbf{d}$ qunits for various $\mathbf{n}$.

Table 2 – Dimension sequences of polynomial of degree $2\mathbf{N}$ for $\mathbf{D}$ qunits $G_{\mathbf{D}}(\mathbf{N}, 2) = \text{DIM PINV}_{\mathbf{D}}(\mathbf{N}, 2)$

$\mathbf{n} \backslash \mathbf{d}$	3	5	7
0	1	1	1
1	1	1	1
2	1	5	21
3	1	11	161
4	1	35	3341
5	0	52	64799
6	0	112	1407329
7	0	130	27536390
8	0	166	482181504
9	0	130	7403718609
10	0	112	99468725538
11	0	52	1168191022248
12	0	35	12009002387858
13	0	11	108266717444858
14	0	5	857991447205123
15	0	1	5991301282600760
16	0	1	36953889463653995

The following table characterizes degree sequences for degree 6 invariants of $\mathbf{d}$ qunits for various $\mathbf{n}$.

Table 3 – Dimension sequences of polynomial of degree $3\mathbf{N}$ for $\mathbf{D}$ qunits, $G_{\mathbf{D}}(\mathbf{N}, 3) = \text{DIM PINV}_{\mathbf{D}}(\mathbf{N}, 3)$

$\mathbf{n} \backslash \mathbf{d}$	3	5	7
0	1	1	1
1	1	1	1
2	0	1	70
3	1	385	636177
4	1	44430	9379255543
5	1	5942330	215546990657498
6	1	781763535	6136455833113627910
7	0	93642949102	191473697724924688999920
8	1	9856162505065	6100591257296003780834337810
9	1	894587378523908	190121112332748795911599731191284

D. 3 qubits

Let $\mathbf{d} = 3, \mathbf{n} = 2, \mathbf{k} = 2$. As mentioned earlier there is a unique invariant polynomial of degree 4 which is $2 \times 2 \times 2$ hyperdeterminant. Associated magic table is the following:

$$T_{2 \times 2 \times 2} = \begin{pmatrix} 0011 \\ 0011 \\ 0101 \end{pmatrix} \quad (10)$$

E. 5 qubits

Let $d = 5, n = 2, k = 2$. There are 15 magic tables in the set $B_5^+(2,2)$ that span the space of invariant polynomials of degree 4. There are two possible lattice words in that case: **0011** and **0101**. Since, we restrict magic tables to have columns sorted the first row of magic set is always **0011**. Therefore, rest 4 rows may have any of two rows and there are $2^4 = 16$ possible tables, but one with repeating columns.

All 15 invariant polynomials are non-zero, but the dimension of $\dim Plnv_5(2,2) = 5$, therefore they are linearly dependent. Simple Gauss algorithm shows that polynomials with the following tables form the basis:

$$\begin{aligned} T_1 &= \begin{pmatrix} 0011 \\ 0011 \\ 0011 \\ 0011 \\ 0101 \end{pmatrix}, \quad T_2 = \begin{pmatrix} 0011 \\ 0011 \\ 0011 \\ 0101 \\ 0011 \end{pmatrix}, \quad T_3 = \begin{pmatrix} 0011 \\ 0011 \\ 0011 \\ 0101 \\ 0101 \end{pmatrix}, \\ T_4 &= \begin{pmatrix} 0011 \\ 0011 \\ 0101 \\ 0011 \\ 0101 \end{pmatrix}, \quad T_5 = \begin{pmatrix} 0011 \\ 0011 \\ 0101 \\ 0101 \\ 0011 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (11)$$

Each polynomial Δ_{T_i} is of degree 4 and has 192 terms. In contrast, geometric hyperdeterminant $\det_{2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2}$ is of degree 128 and has more than 10^6 terms.

F. 5 qutrits

Let $d = 5, n = 3, k = 2$. There are 239 magic tables, but only single invariant of degree 6. Thus, it is enough to find any non-zero polynomial. We ensure that the following magic table produce non-zero invariant polynomial:

$$T = \begin{pmatrix} 001122 \\ 010122 \\ 001212 \\ 010212 \\ 012012 \end{pmatrix} \quad (12)$$

In particular, the coefficient at

$$X_{00000}X_{00011}X_{01100}X_{10101}X_{11010}X_{11111} \quad (13)$$

of $\Delta_T(X)$ is equal to 1.

Conclusion

The problem of classification of SLOCC classes is hard. Not only because of the complicated nature of entanglement phenomena, but for practical reasons as well: the size of computational problem grows exponentially as the number of parties, or the number of possible particle states grow. This creates a need for fast and efficient methods to be developed. This paper addresses this

problem and proposes the method for derivation of a basis of homogeneous invariant polynomials of tensors. The present paper offers an efficient algorithm to produce invariant polynomials of tensors. The results also provide contextual understanding of a tensors with respect to symmetries, which is essential in computer science, since most of the methods of higher order machine learning or statistics expect tensors to be symmetric with respect to some of the coordinates.

Information on funding

This research was supported by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP14869221).

REFERENCES

- 1 Dür W., Vidal G. & Cirac J.I. (2000). Three qubits can be entangled in two inequivalent ways. *Physical Review A*, 62(6), 062314.
- 2 J.-G. Luque and Jean-Yves Thibon. (2003) Polynomial invariants of four qubits. *Physical Review A*, vol. 67, no. 4. <https://doi.org/10.1103/physreva.67.042303>.
- 3 J.-G. Luque and Jean-Yves Thibon. (2005) Algebraic invariants of five qubits. *Journal of physics*, vol. 39, no. 2, pp. 371–377. <https://doi.org/10.1088/0305-4470/39/2/007>.
- 4 Horodecki R., Horodecki P., Horodecki M. and Horodecki K. (2009) Quantum entanglement," *Reviews of Modern Physics*, vol. 81, no. 2, pp. 865–942. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.81.865>.
- 5 Nielsen M.A. and Chuang I.L. (2019) *Quantum computation and quantum information*. Cambridge Cambridge University Press.
- 6 Hillery M., Bužek V. & Berthiaume A. (1999) Quantum secret sharing. *Physical Review A*, 59(3), 1829.
- 7 Miyake A. (2003) Classification of multipartite entangled states by multidimensional determinants, *Physical Review A*, vol. 67, no. 1. <https://doi.org/10.1103/physreva.67.012108>.
- 8 Bürgisser P. and C. Ikenmeyer. (2017) Fundamental invariants of orbit closures. *Journal of Algebra*, vol. 477, pp. 390–434. <https://doi.org/10.1016/j.jalgebra.2016.12.035>.
- 9 Bürgisser P., Garg A., Oliveira R., Walter M. and Wigderson A. (2018) Alternating Minimization, Scaling Algorithms, and the Null-Cone Problem from Invariant Theory. In 9th Innovations in Theoretical Computer Science Conference (ITCS 2018). *Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs)*, vol. 94, pp. 24:1–24:20, Schloss Dagstuhl – Leibniz-Zentrum für Informatik. <https://doi.org/10.4230/LIPIcs.ITCS.2018.24>.
- 10 Amanov A. and Yeliussizov D. (2022) Fundamental Invariants of Tensors, Latin Hypercubes, and Rectangular Kronecker Coefficients, *International Mathematics Research Notices*, vol. 2023, no. 20, pp. 17552–17599. <https://doi.org/10.1093/imrn/rnac311>.
- 11 Bürgisser P., Garg A., Oliveira R., Walter M. and Wigderson A. (2018) Alternating Minimization, Scaling Algorithms, and the Null-Cone Problem from Invariant Theory. In 9th Innovations in Theoretical Computer Science Conference (ITCS 2018). *Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs)*, vol. 94, pp. 24:1–24:20, Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik. <https://doi.org/10.4230/LIPIcs.ITCS.2018.24>.
- 12 Blinder S.M. (2022) Three-Qubit W-States on a Quantum Computer, *Wolfram Demonstrations Project*. [Online]. Available: <http://demonstrations.wolfram.com/ThreeQubitWStatesOnAQuantumComputer/> (accessed: Jun. 14, 2024).
- 13 Cervera-Lierta A., Gasull A., Latorre J.I. and Sierra G. (2018) Multipartite entanglement in spin chains and the hyperdeterminant. *Journal of physics. A, Mathematical and theoretical (Print)*, vol. 51, no. 50, pp. 505301–505301. <https://doi.org/10.1088/1751-8121/aaee1f>.
- 14 Viehmann O., Eltschka C. and Siewert J. (2011) Polynomial invariants for discrimination and classification of four-qubit entanglement. *Physical Review A*, vol. 83, no. 5. <https://doi.org/10.1103/physreva.83.052330>.
- 15 Cayley A. (1844) *On the theory of determinants*. Pitt Press.
- 16 Cayley A. (1845) *On the theory of linear transformations*. E. Johnson.

- 17 Gelfand I.M., Kapranov M.M. and Zelevinsky A.V. (1992) Hyperdeterminants, *Advances in Mathematics*, vol. 96, no. 2, pp. 226–263. [https://doi.org/10.1016/0001-8708\(92\)90056-q](https://doi.org/10.1016/0001-8708(92)90056-q).
- 18 SageMath Mathematical Software System – Sage, SageMath Mathematical Software System. <http://www.sagemath.org> (accessed Apr. 04, 2024).
- 19 Maria C. (2021) Parameterized Complexity of Quantum Invariants, *Proceedings of the 37th International Symposium on Computational Geometry (SoCG 2021)*. <https://doi.org/10.4230/LIPIcs.SocG.2021.53>.
- 20 Haddadin W. (2021) Invariant polynomials and machine learning. *arXiv preprint arXiv:2104.12733*.
- 21 Liu J. (2019) Block distance invariant method for monotermin canonicalization of Riemann tensor polynomials, *ACM Communications in Computer Algebra*, vol. 53, pp. 134–137. <https://doi.org/10.1145/3377006.3377019>.
- 22 Avohou R.C., Geloun J.B. & Dub N. (2020) On the counting of $O(N)$ tensor invariants. *Advances in Theoretical and Mathematical Physics*, vol. 24, no. 4. <https://doi.org/10.4310/ATMP.2020.v24.n4.a1>.
- 23 Geloun J.B. (2020) On the counting tensor model observables as $U(N)$ and $O(N)$ classical invariants, *Proceedings of Corfu Summer Institute 2019 "School and Workshops on Elementary Particle Physics and Gravity" - PoS(CORFU2019)*. <https://doi.org/10.22323/1.376.0175>.
- 24 Grochow J.A. & Qiao Y. (2021) On the Complexity of Isomorphism Problems for Tensors, Groups, and Polynomials I: Tensor Isomorphism-Completeness, *Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs)*, vol. 2021, pp. 31:1–31:19. <https://doi.org/10.4230/LIPIcs.ITCS.2021.31>.
- 25 Hrushovski E., Ouaknine J., Pouly A. & Worrell J. (2023) On Strongest Algebraic Program Invariants. *Journal of the ACM*, vol. 70, pp. 1–22. <https://doi.org/10.1145/3614319>.
- 26 Raith F., Blecha C., Nagel T., Parisio F., Kolditz O., Günther F., Stommel M. & Scheuermann G. (2019) Tensor Field Visualization using Fiber Surfaces of Invariant Space, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 25, pp. 1122–1131. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2864846>.
- 27 Hillar C.J. & Lim L.H. (2013). Most tensor problems are NP-hard. *Journal of the ACM (JACM)*, 60(6), pp. 1–39.

¹Аманов А.,

PhD студенті, ORCID ID: 0000-0002-7669-0656,
e-mail: alimzhan.amanov@gmail.com

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

КВАНТТЫҚ ЕСЕПТЕУЛЕРГЕ ҚОЛДАНЫЛАТЫН ИНВАРИАНТТЫ КӨПМҮШЕЛЕР

Аңдатпа

Кванттық ақпарат теориясында SLOCC (стохастикалық жергілікті операциялар және классикалық байланыс) контекстінде d кубиттер (немесе кудиттер) арқылы шиеленіскен күйлердің күрделілігін түсіну кванттық жүйелер туралы білімімізді алға жылжыту үшін маңызды. Бұл күрделілік жиі жергілікті симметрия топтары арқылы күйлерді жіктеу арқылы талданады. Нәтижесінде алынған сыныптарды шиеленістіктің өлшемі болатын инварианттық полиномдар арқылы ажыратуға болады. Бұл мақалада шиеленіскен кванттық күйлердің SLOCC сыныптарын сипаттаудың тиімділігін айтарлықтай арттыратын ең кіші дәрежелі инварианттық полиномдарды алудың жаңа әдісі ұсынылған. Біздің әдісіміз бұл сыныптарды анықтау үрдісін жеңілдетіп қана қоймай, сонымен қатар күрделі кванттық жүйелердің шиеленіс қасиеттерін талдауға арналған сенімді құралды ұсынады. Арнайы жағдайларда минималды дәреже инварианттарын шығарып, біздің тәсіліміздің нақты сценарийлердегі тиімділігін ұсынуды тәжірибе жүзінде қолданамыз. Бұл жетістік кванттық ақпарат теориясындағы түрлі үрдістерді жеңілдету әлеуетіне ие, шиеленіскен күйлерді түсіну, жіктеу және тиімді пайдалану оңайырақ және тиімдірек болады.

Тірек сөздер: инвариантты көпмүшелер, кванттық түйісу, SLOCC.

¹Аманов А.,

PhD студент, ORCID ID: 0000-0002-7669-0656, e-mail: alimzhan.amanov@gmail.com

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

ИНВАРИАНТНЫЕ МНОГОЧЛЕНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ К КВАНТОВЫМ ВЫЧИСЛЕНИЯМ

Аннотация

В теории квантовой информации понимание сложности запутанных состояний в контексте SLOCC (стохастические локальные операции и классическая коммуникация) с d кубитами (или кудитами) является важным для продвижения наших знаний о квантовых системах. Эта сложность часто анализируется путем классификации состояний через локальные группы симметрии. Полученные классы можно различить с помощью инвариантных многочленов, которые служат мерой запутанности. В данной статье представлен новый метод получения инвариантных многочленов наименьших степеней, что значительно повышает эффективность характеристики классов SLOCC запутанных квантовых состояний. Наш метод не только упрощает процесс идентификации этих классов, но и предоставляет надежный инструмент для анализа свойств запутанности сложных квантовых систем. В качестве практического применения мы демонстрируем вывод инвариантов минимальной степени в специальных случаях, иллюстрируя эффективность нашего подхода в реальных сценариях. Это достижение имеет потенциал для упрощения различных процессов в теории квантовой информации, делая понимание, классификацию и использование запутанных состояний более легкими и эффективными.

Ключевые слова: инвариантные полиномы, квантовая запутанность, SLOCC.

**МАТЕМАТИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР
MATHEMATICAL SCIENCES
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

ӨОЖ 517.927.2

FTAXP 27.29.17, 27.41.19

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-106-115>^{1, 2}**Кадирбаева Ж.М.,**ф.-м.ғ. к., қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0001-8861-4100,
e-mail: zhkadirbayeva@gmail.com^{1, 3}**Темешева С.М.,**ф.-м.ғ.д., қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0002-3341-4539,
e-mail: temeshevasvetlana@gmail.com^{1, 4}**Минглибаева Б.Б.,**

ф.-м.ғ.к., ORCID ID: 0000-0002-7195-4480, e-mail: minglibayeva.bayan@gmail.com

⁴**Шаймерден Н.М.,**

магистр, ORCID ID: 0009-0005-5114-7197, e-mail: nurtai777@mail.ru

¹Математика және математикалық модельдеу институты, 050010, Алматы қ., Қазақстан²Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, 050040, Алматы қ., Қазақстан³Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, 050040, Алматы қ., Қазақстан⁴Қазақ ұлттық қышдар педагогикалық университеті, 050000, Алматы қ., Қазақстан**ИМПУЛЬСТІ ЖҮКТЕЛГЕН ДИФФЕРЕНЦИАЛДЫҚ ТЕНДЕУЛЕР
ҮШІН ПАРАМЕТРЛІ ШЕТТІК ЕСЕПТІ САНДЫҚ ШЕШУ****Аңдатпа**

Импульсті жүктелген дифференциалдық теңдеулер жүйесі үшін параметрден тәуелді шеттік есеп қарастырылады. Зерттеліп отырған параметрден тәуелді шеттік есепті сандық шешу мақсатында Жұмабаевтың параметрлеу әдісінің сандық жүзеге асыру алгоритмдері дамытылған. Жұмабаевтың параметрлеу әдісінің сандық жүзеге асыру алгоритмдері жай дифференциалдық теңдеулер жүйесі үшін Коши есептерін шешуге негізделген. Ұсынылған әдісті қолдану нәтижесі импульсті жүктелген дифференциалдық теңдеулер үшін параметрге тәуелді шеттік есептің шешімін табуды алгебралық теңдеулер жүйесінің шешімін табуға алып келеді. Бұл алгебралық теңдеулер жүйесі шеттік шарт пен импульс нүктелеріндегі шарттарға қатысты теңдіктерден тұрады. Жұмабаевтың параметрлеу әдісін сандық жүзеге асырылуының жоғары тиімділігін көрсететін сандық нәтиже ұсынылған. Мысал нәтижелері сандық және дәл шешімдер арасындағы дәлдіктің сәйкестігі жоғары ретті екенін көрсетеді.

Тірек сөздер: жүктелген дифференциалдық теңдеу, шеттік есеп, импульстік әсер, параметрлеу әдісі.

Кіріспе

Бұл мақалада төменде ұсынылған импульсті жүктелген дифференциалдық теңдеулер жүйесі үшін параметрлі шеттік есеп қарастырылады,

$$\frac{du(t)}{dt} = \mathcal{K}_0(t)u(t) + \sum_{i=1}^m \mathcal{K}_i(t) \lim_{t \rightarrow \eta_i+0} u(t) + \mathcal{K}_{m+1}(t)\mu + \mathcal{F}(t), \quad (1)$$

$$t \in [0, T] \setminus \{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m\}, u \in \mathbb{R}^n, \mu \in \mathbb{R}^l,$$

$$\mathcal{B}_0 u(0) + \mathcal{M}_0 \mu + \mathcal{C}_0 u(T) = d_0, d_0 \in \mathbb{R}^{n+l}, \quad (2)$$

$$\mathcal{B}_i \lim_{t \rightarrow \eta_i-0} u(t) - \mathcal{C}_i \lim_{t \rightarrow \eta_i+0} u(t) = d_i, i = \overline{1, m}, d_i \in \mathbb{R}^n, \quad (3)$$

мұндағы $(n \times n)$ – өлшемді $\mathcal{K}_i(t)$, $i = \overline{0, m}$; $(n \times l)$ – өлшемді $\mathcal{K}_{m+1}(t)$ матрицалары және n – өлшемді $\mathcal{F}(t)$ вектор – функциясы $[0, T]$ аралығында $t = \eta_i, i = \overline{1, m}$, нүктелерінде бірінші текті үзілістерімен бөлікті-үзіліссіз, $((n + l) \times n)$ – өлшемді $\mathcal{B}_0, \mathcal{C}_0$ матрицалары, $((n + l) \times l)$ – өлшемді $\mathcal{M}_0$ матрицасы, $(n \times n)$ – өлшемді $\mathcal{B}_i, \mathcal{C}_i, i = \overline{1, m}$, матрицалары – тұрақты матрицалар, $d_i, i = \overline{1, m}, n$ – өлшемді тұрақты векторлар;

$$\|u\| = \max_{i=1, n} |u_i|, 0 = \eta_0 < \eta_1 < \dots < \eta_m < \eta_{m+1} = T.$$

$[0, T]$ аралығында $t = \eta_i, i = \overline{1, m}$, нүктелерінде бірінші текті үзілістері болатын $u(t)$ бөлікті-үзіліссіз вектор-функциялар кеңістігін $PC([0, T], \eta, \mathbb{R}^n)$ арқылы белгілейік, $\|u\|_1 = \max_{i=0, m} \sup_{t \in [\eta_i, \eta_{i+1})} \|u(t)\|$.

(1) – (3) есебінің шешімі деп $(u^*(t), \mu^*)$ жұбын атаймыз, мұнда $u^*(t) \in PC([0, T], \eta, \mathbb{R}^n)$ және туындысы $\frac{du^*(t)}{dt} \in PC([0, T], \eta, \mathbb{R}^n)$, $\mu^* \in \mathbb{R}^l$, егер осы жұп $t \in [0, T] \setminus \{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m\}$ үшін (1) жүктелген дифференциалдық теңдеуін, (2) шеттік шартын және (3) импульстік әсерлер шарттарын параметрдің $\mu = \mu^*$ болғандағы мәні үшін қанағаттандыратын болса.

Импульстік дифференциалдық теңдеулер физикада, популяция динамикасында, экологияда, биологиялық жүйелерде, биотехнологияда, өндірістік робототехникада, фармакологияда, тиімді басқаруда және т.б. импульстік есептерді модельдеуге арналған. Импульстік дифференциалдық теңдеулер теориясы [1–5] жұмыстарында кеңінен зерттелген.

Автоматты басқару теориясындағы, ядролық реакторлар теориясының, электротехника мен машина жасаудағы, жер сілкінісін бақылаудағы, динамикалық жүйелердегі есептерді математикалық модельдеу де жүктелген дифференциалдық теңдеулер үшін шеттік есептерге әкеледі [6–12].

Жәй дифференциалдық және интегралдық-дифференциалдық теңдеулер үшін параметрлері бар шеттік есептерді көптеген ғалымдар кеңінен зерттеген [13–17]. Бұл есептер қолданбалы математиканың әртүрлі салаларында, биофизикада, биомедицинада, химияда қолданылады. Мұндай есептердің шешімін табу үшін дифференциалдық теңдеулердің сапалық теориясының әдістері, параметрлеу әдісі, тиімділеу теориясы, жоғарғы және төменгі шешімдер әдісі және т.б. әдістер қолданылған.

Бұл мақалада импульсті жүктелген дифференциалдық теңдеулер жүйесі үшін параметрлі шеттік есепті шешу үшін профессор Жұмабаев ұсынған параметрлеу әдісінің [18, 19] сандық жүзеге асырылуы қолданылады. Осы параметрлеу әдісін дифференциалдық теңдеулердің әртүрлі кластары үшін есептерді шешуде қолдануын [20–25] жұмыстарынан көруге болады.

Негізгі ережелер

Параметрлеу әдісінің схемасын пайдаланып, берілген $[0, T]$ аралығын келесідей бөліктерге бөлейік:

$$[0, T) = \bigcup_{r=1}^{m+1} [\eta_{r-1}, \eta_r).$$

$C([0, T], \eta, \mathbb{R}^{n(m+1)})$ кеңістігін енгізейік:

1) $C([0, T], \eta, \mathbb{R}^{n(m+1)})$ кеңістігі $u[t] = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_{m+1}(t))$ функциялар жүйесінен тұрады, мұндағы $u_r: [\eta_{r-1}, \eta_r) \rightarrow \mathbb{R}^n$ функциялары $[\eta_{r-1}, \eta_r), r = \overline{1, m+1}$, аралықтарында үзіліссіз және барлық $r = \overline{1, m+1}$ үшін $\lim_{t \rightarrow \eta_r-0} u_r(t)$ ақырлы сол жақ шектері бар;

2) $C([0, T], \eta, \mathbb{R}^{n(m+1)})$ кеңістігіндегі $u[t]$ функциялар жүйесінің нормасы $\|u[\cdot]\|_2 = \max_{r=\overline{1, m+1}} \sup_{t \in [\eta_{r-1}, \eta_r)} \|u_r(t)\|$ түрінде болады.

Ізделінді $u(t)$ функциясының $t \in [\eta_{r-1}, \eta_r), r = \overline{1, m+1}$, аралықтарға сығылуын $u_r(t)$ деп белгілеп, қосымша $v_r = u_r(\eta_{r-1}), r = \overline{1, m+1}$, параметрлерін енгізейік. Ал енді $v = (v_1, v_2, \dots, v_{m+1}, v_{m+2})$ векторын құрайық, мұндағы ең соңғы компонент (1)–(3) есебіндегі μ параметрі, яғни $v_{m+2} = \mu$.

Әрбір $[\eta_{r-1}, \eta_r), r = \overline{1, m+1}$, аралықтарында $w_r(t) = u_r(t) - v_r, r = \overline{1, m+1}$, алмастырып, келесідей (1)–(3) есебіне пара-пара параметрлері бар шеттік есепке көшеміз:

$$\frac{dw_r}{dt} = \mathcal{K}_0(t)(w_r + v_r) + \sum_{i=1}^{m+1} \mathcal{K}_i(t)v_{i+1} + \mathcal{F}(t), \quad (4)$$

$$t \in [\eta_{r-1}, \eta_r), r = \overline{1, m+1},$$

$$w_r(\eta_{r-1}) = 0, r = \overline{1, m+1}, \quad (5)$$

$$\mathcal{B}_0 v_1 + \mathcal{M}_0 v_{m+2} + \mathcal{C}_0 v_{m+1} + \mathcal{C}_0 \lim_{t \rightarrow T-0} w_{m+1}(t) = d_0, \quad (6)$$

$$\mathcal{B}_i v_i + \mathcal{B}_i \lim_{t \rightarrow \eta_i-0} w_i(t) - \mathcal{C}_i v_{i+1} = d_i, i = \overline{1, m}. \quad (7)$$

(4) – (7) есебінің шешімі деп $v^* = (v_1^*, v_2^*, \dots, v_{m+1}^*, v_{m+2}^*) \in \mathbb{R}^{n(m+1)+l}$, $w^*[t] = (w_1^*(t), w_2^*(t), \dots, w_{m+1}^*(t)) \in C([0, T], \eta, \mathbb{R}^{n(m+1)})$ элементтері бар $(v^*, w^*[t])$ жұбын айтамыз, мұндағы $w_r^*(t)$ функциялары $[\eta_{r-1}, \eta_r), r = \overline{1, m+1}$,

аралықтарында үзіліссіз дифференциалданады және (4) жәй дифференциалдық теңдеулерін, $v_r = v_r^*, r = \overline{1, m+2}$, болғанда (5) – (7) шарттарын қанағаттандырады.

Бастапқы берілген (1) – (3) және параметрлері бар (4) – (7) есептері пара-пар есептер болып табылады. Егер $(u^*(t), \mu^*)$ жұбы бастапқы берілген (1) – (3) есебінің шешімі болса, онда келесі $(w^*[t], v^*)$ жұбы, мұндағы

$$w^*[t] = (u^*(t) - u^*(\eta_0), u^*(t) - u^*(\eta_1), \dots, u^*(t) - u^*(\eta_m)),$$

$$v^* = (u^*(\eta_0), u^*(\eta_1), \dots, u^*(\eta_m), \mu^*)$$

параметрлері бар (4) – (7) есебінің шешімі болады. Ал енді керісінше, егер де $(\hat{w}[t], \hat{v})$ жұбы параметрлері бар (4) – (7) есебінің шешімі болса онда

$$\hat{u}(t) = \hat{v}_r + \hat{w}_r(t), t \in [\eta_{r-1}, \eta_r], r = \overline{1, m+1},$$

$$\hat{u}(T) = \hat{v}_{m+1} + \lim_{t \rightarrow T-0} \hat{w}_{m+1}(t), \hat{\mu} = \hat{v}_{m+2},$$

теңдіктерімен анықталатын $(\hat{u}(t), \hat{\mu})$ жұбы бастапқы берілген (1) – (3) есебінің шешімі болады.

Материалдар мен әдістер

Қосымша параметрлерді енгізу $w[t] = (w_1(t), w_2(t), \dots, w_{m+1}(t))$ белгісіз функциялар жүйесінің компоненттері үшін $w_r(\eta_{r-1}) = 0, r = \overline{1, m+1}$, бастапқы мәндерін алуға мүмкіндік береді және де $\tilde{v} = (\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \dots, \tilde{v}_{m+2})$ параметрлерінің бекітілген мәндерінде (4), (5) есептері Коши есептері болып табылады. Бұл Коши есептері $[\eta_{r-1}, \eta_r]$, $r = \overline{1, m+1}$, аралықтарында жеке-жеке шешіледі де, шешімдерін табу үшін іргелі матрица қолданылады.

$[\eta_{r-1}, \eta_r], r = \overline{1, m+1}$, аралықтарында $\frac{dx}{dt} = A(t)x$ дифференциалдық теңдеуінің $\Phi_r(t)$ – іргелі матрицасын қолданып (4), (5) Коши есебінің шешімін келесі түрде жазайық:

$$w_r(t) = \Phi_r(t) \int_{\eta_{r-1}}^t \Phi_r^{-1}(\tau) \mathcal{K}_0(\tau) v_r d\tau + \Phi_r(t) \int_{\eta_{r-1}}^t \Phi_r^{-1}(\tau) \sum_{j=1}^{m+1} \mathcal{K}_j(\tau) v_{j+1} d\tau +$$

$$+ \Phi_r(t) \int_{\eta_{r-1}}^t \Phi_r^{-1}(\tau) \mathcal{F}(\tau) d\tau, \quad t \in [\eta_{r-1}, \eta_r], r = \overline{1, m+1}. \quad (8)$$

Бұл соңғы өрнекті шешіп, $w(t)$ мәнін $v \in \mathbb{R}^{n(m+1)+l}$ және $\mathcal{F}(t)$ терминдерінде табамыз. Осы (8) өрнегін (6) және (7) шарттарына қою арқылы $v \in \mathbb{R}^{n(m+1)+l}$ белгісіз параметрлерін табуға арналған келесідей жүйені аламыз:

$$\mathcal{B}_0 v_1 + \mathcal{M}_0 v_{m+2} + \mathcal{C}_0 v_{m+1} +$$

$$+ \mathcal{C}_0 \Phi_{m+1}(T) \int_{\eta_m}^T \Phi_{m+1}^{-1}(\tau) \left[\mathcal{K}_0(\tau) v_{m+1} + \sum_{j=1}^{m+1} \mathcal{K}_j(t) v_{j+1} \right] d\tau = \quad (9)$$

$$= d_0 - \mathcal{C}_0 \Phi_{m+1}(T) \int_{\eta_m}^T \Phi_{m+1}^{-1}(\tau) \mathcal{F}(\tau) d\tau,$$

$$B_i v_i + B_i \Phi_i(\eta_i) \int_{\eta_{i-1}}^{\eta_i} \Phi_i^{-1}(\tau) \left[\mathcal{K}_0(\tau) v_i + \sum_{j=1}^{m+1} \mathcal{K}_j(t) v_{j+1} \right] d\tau - \mathcal{C}_i v_{i+1} = \quad (10)$$

$$= d_i - B_i \Phi_i(\eta_i) \int_{\eta_{i-1}}^{\eta_i} \Phi_i^{-1}(\tau) \mathcal{F}(\tau) d\tau, \quad i = \overline{1, m}.$$

Осы (9), (10) жүйесінің сол жағындағы белгісіз параметрлер алдындағы коэффициенттерден тұратын матрицаны $Q(\eta)$ деп белгілеу арқылы осы (9), (10) жүйесін келесі түрде жазайық

$$Q(\eta)v = \mathcal{F}(\eta), v \in \mathbb{R}^{n(m+1)+l}, \quad (11)$$

мұндағы

$$\mathcal{F}(\eta) = \left(d_0 - \mathcal{C}_0 \Phi_{m+1}(t) \int_{\eta_m}^T \Phi_{m+1}^{-1}(\tau) \mathcal{F}(\tau) d\tau, \right.$$

$$d_1 - B_1 \Phi_1(t) \int_{\eta_0}^{\eta_1} \Phi_1^{-1}(\tau) \mathcal{F}(\tau) d\tau, \dots, d_m - B_m \Phi_m(t) \int_{\eta_{m-1}}^{\eta_m} \Phi_m^{-1}(\tau) \mathcal{F}(\tau) d\tau \left. \right)^T$$

Бастапқы берілген (1) – (3) шеттік есебінің шешілімділігі (11) жүйесінің шешілімділігіне пара-пар екенін көрсету қиын емес.

Нәтижелер мен талқылау

(1) – (3) есебін сандық шешу алгоритмі. Алгоритмді ұсынбас бұрын ішкі аралықтарда жәй дифференциалдық теңдеулер үшін Коши есептерін қарастырайық:

$$\frac{dy}{dt} = \mathcal{K}_0(t)y + \mathcal{P}(t),$$

$$y(\eta_{r-1}) = 0, t \in [\eta_{r-1}, \eta_r], r = \overline{1, m+1}, \quad (12)$$

мұндағы $\mathcal{P}(t)$ – $(n \times n)$ өлшемді матрица, немесе n өлшемді вектор, екеуі де $[\eta_{r-1}, \eta_r]$, $r = \overline{1, m+1}$, аралығында үзіліссіз. (12) Коши есебінің шешімі матрица немесе вектор болып табылады. Осы шешімді $a(P, t)$ деп белгілейік. Олай болса,

$$a(P, t) = \Phi_r(t) \int_{\eta_{r-1}}^t \Phi_r^{-1}(\tau) \mathcal{P}(\tau) d\tau, t \in [\eta_{r-1}, \eta_r], r = \overline{1, m+1}.$$

Ұсынылып отырған сандық әдіс (11) жүйені құруға және шешуге негізделген. (9), (10) теңдеулерінен көрініп тұрғандай (11) жүйенің коэффициенттері мен оң жағы жәй дифференциалдық теңдеулер үшін матрицалық және векторлық Коши есептерінің шешімі ретінде:

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dt} &= \mathcal{K}_0(t)y + \mathcal{K}_j(t), y(\eta_{r-1}) = 0, \\ t &\in [\eta_{r-1}, \eta_r], r = \overline{1, m+1}, j = \overline{0, m+2}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\frac{dy}{dt} = \mathcal{K}_0(t)y + \mathcal{F}(t), y(\eta_{r-1}) = 0, t \in [\eta_{r-1}, \eta_r], r = \overline{1, m+1}. \quad (14)$$

$0 = \eta_0 < \eta_1 < \dots < \eta_m < \eta_{m+1} = T$ аралығын қарастырайық. Әрбір $[\eta_{r-1}, \eta_r], r = \overline{1, m+1}$, аралығын $h_r = (\eta_r - \eta_{r-1})/N_r$ кадаммен $N_r, r = \overline{1, m+1}$, бөліктерге бөлеміз. (11) жүйенің коэффициенттері мен оң жағының жуық мәндерін әрбір ішкі аралықта h_r кадаммен 4-ші ретті Рунге-Кутта әдісінің көмегімен (13), (14) матрицалық және векторлық Коши есептерін шешу арқылы табамыз. Яғни $a_r(\mathcal{K}_i, \hat{\eta}), j = \overline{0, m+2}, r = \overline{1, m+1}$, $(n \times n)$ -матрицалары мен $a_r(\mathcal{F}, \hat{\eta}), r = \overline{1, m+1}$, n -векторының мәндерін табамыз.

Сонда келесі жуық жүйені аламыз:

$$Q_*^{\tilde{h}}(\eta)v = -\mathcal{F}_*^{\tilde{h}}(\eta), v \in \mathbb{R}^{n(m+1)+l}, \quad (15)$$

Бұл (15) жүйесінің шешімі $v^{\tilde{h}}$. Жоғарыда айтқандай: $u^{\tilde{h}}_r(\eta_{r-1}) = v^{\tilde{h}}_r, r = \overline{1, m+1}$, $\mu^{\tilde{h}}_r = v^{\tilde{h}}_{m+2}$. Ішкі аралықтардың қалған нүктелеріндегі шешімнің жуық мәндері келесідей Коши есептерінің шешімдерімен анықталады:

$$\frac{du}{dt} = \mathcal{K}_0(t)u + \sum_{i=1}^{m+1} \mathcal{K}_i(t)v^{\tilde{h}}_{i+1} + \mathcal{F}(t), \quad (16)$$

$$u(\eta_{r-1}) = v^{\tilde{h}}_r, t \in [\eta_{r-1}, \eta_r], r = \overline{1, m+1}. \quad (17)$$

Соңғы (16), (17) Коши есептерін 4-ші ретті Рунге-Кутта әдісімен шеше отырып, (1) – (3) импульсті жүктелген дифференциалдық теңдеулер жүйесі үшін параметрі бар шеттік есептің сандық шешімін табамыз. Бастапқы берілген (1) – (3) импульсті жүктелген дифференциалдық теңдеулер жүйесі үшін параметрі бар шеттік есептің сандық шешімін табу алгоритмінің жүзеге асырылуын көрсету үшін келесі мысалды қарастырайық.

Мысал. Импульсті жүктелген дифференциалдық теңдеулер жүйесі үшін параметрі бар шеттік есепті қарастырайық:

$$\begin{aligned} \frac{du(t)}{dt} &= \begin{pmatrix} 3t^4 & t-5 \\ 7 & t^3 \end{pmatrix} u(t) + \begin{pmatrix} 4 & 12t \\ 2t^3 & 8 \end{pmatrix} \lim_{t \rightarrow \frac{1}{2}+0} u(t) + \\ &+ \begin{pmatrix} t & 3 & t^4 \\ 0 & 3t^2-3 & 12 \end{pmatrix} \mu + \mathcal{F}(t), t \in [0, T] \setminus \left\{ \frac{1}{2} \right\}, u \in \mathbb{R}^2, \mu \in \mathbb{R}^3, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 5 & 1 \\ 0 & 7 \\ -3 & 5 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} u(0) + \begin{pmatrix} 5 & 3 & 1 \\ 9 & 5 & 1 \\ 0 & 5 & -8 \\ -3 & 11 & 8 \\ 7 & 6 & 0 \end{pmatrix} \mu + \begin{pmatrix} -4 & 8 \\ 9 & 0 \\ 3 & 4 \\ -6 & 9 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} u(T) = \begin{pmatrix} 59 \\ 432 \\ -105 \\ 281 \\ 221 \end{pmatrix}, \quad (19)$$

$$\begin{pmatrix} 8 & 0 \\ 16 & 5 \end{pmatrix} \lim_{t \rightarrow \frac{1}{2}-0} u(t) - \begin{pmatrix} -4 & -6 \\ 8 & 15 \end{pmatrix} \lim_{t \rightarrow \frac{1}{2}+0} u(t) = \begin{pmatrix} 83 \\ 97 \end{pmatrix}, \quad (20)$$

$$\mathcal{F}(t) = \begin{pmatrix} 26t^2 - 8t^5 - 12t^4 - 21t^7 + 48t - 125 \\ 5t^4 - 8t^7 - 48t^3 - 63t^2 - 307 \end{pmatrix}, t \in \left[0, \frac{1}{2}\right);$$

$$\mathcal{F}(t) = \begin{pmatrix} 20t^2 - 70t^4 - 4t^3 - 15t^5 + 81t - 160 \\ -4t^5 - 23t^3 - 63t^2 - 27t - 244 \end{pmatrix}, t \in \left[\frac{1}{2}, 1\right).$$

(18) – (20) есебін шешу үшін параметрлеу әдісінің жоғарыда ұсынылған сандық жүзеге асырылуын қолданамыз. Яғни (15) теңдеулер жүйесін шешіп, параметрлердің сандық мәндерін аламыз

$$v_1^{\tilde{h}} = \begin{pmatrix} 6.99998828 \\ -0.000032228 \end{pmatrix}, v_2^{\tilde{h}} = \begin{pmatrix} 15.500002645 \\ -6.999990617 \end{pmatrix}, v_3^{\tilde{h}} = \begin{pmatrix} 10.999997352 \\ 21.00000678 \\ 30.999990026 \end{pmatrix}.$$

Ішкі аралықтардың қалған нүктелерінде сандық шешімдерін (16), (17) Коши есептерін 4-ші ретті Рунге-Кутта әдісін қолдана отырып, шешу арқылы табамыз.

(18) – (20) есебінің дәл шешімі: $(u^*(t), \mu^*)$,

$$\text{мұндағы } u^*(t) = \begin{cases} \begin{pmatrix} 7t^3 + 7 \\ 8t^4 - 5t \end{pmatrix}, t \in \left[0, \frac{1}{2}\right); \\ \begin{pmatrix} 5t + 13 \\ 4t^2 - 8 \end{pmatrix}, t \in \left[\frac{1}{2}, 1\right), \end{cases} \quad \mu^* = \begin{pmatrix} 11 \\ 21 \\ 31 \end{pmatrix}.$$

Кесте 1 – (18) – (20) есебінің сандық шешімінің мәндері.

t	$\tilde{u}_1(t)$	$\tilde{u}_2(t)$	t	$\tilde{u}_1(t)$	$\tilde{u}_2(t)$
0	6.99998828	-0.000032228	0.5	15.500002645	-6.999990617
0.05	7.000872683	-0.249987604	0.55	15.750001343	-6.789991693
0.1	7.007008044	-0.499238179	0.6	16.000000628	-6.559992901
0.15	7.023642901	-0.745983849	0.65	16.250000499	-6.309993993
0.2	7.056025882	-0.987225007	0.7	16.500000915	-6.039994727
0.25	7.109405819	-1.218762486	0.75	16.750001805	-5.74999487
0.3	7.18903184	-1.435197465	0.8	17.000003077	-5.439994205
0.35	7.300153421	-1.629931343	0.85	17.250004632	-5.109992532
0.4	7.448020406	-1.795165604	0.9	17.500006374	-4.759989663
0.45	7.637882984	-1.921901688	0.95	17.750008215	-4.389985413
0.5	7.87499164	-1.999940869	1	18.000010081	-3.999979585

1-кестенің жалғасы

$\tilde{\mu}_1 = v_{31}^{\tilde{h}}$	$\tilde{\mu}_2 = v_{32}^{\tilde{h}}$	$\tilde{\mu}_3 = v_{33}^{\tilde{h}}$
10.999997352	21.00000678	30.999990026

Есептің $(u^*(t), \mu^*)$ дәл шешімі мен $(\tilde{u}(t), \tilde{\mu})$ сандық шешімдерінің арасындағы айырым үшін келесі бағалауды аламыз:

$$\max_{j=0,20} \|u^*(t_j) - \tilde{u}(t_j)\| < 0.00006 \text{ және } \max \|\mu^* - \tilde{\mu}\| < 0.00001.$$

Қорытынды

Бұл жұмыста импульсті жүктелген дифференциалдық теңдеулер жүйесі үшін параметрлі шеттік есебінің сандық шешімін табу үшін профессор Жұмабаев ұсынған параметрлеу әдісінің сандық жүзеге асырылуы қолданылды. Әрі қарай осы әдісті импульсті интегро-дифференциалдық теңдеулер жүйесі үшін параметрлі шеттік есебі үшін де қарастыру көзделіп отыр.

Қаржыландыру туралы ақпарат. Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті (грант № AP19675193) қаржыландырады.

ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Samoilenko A.M. and N.A. Perestyuk (1995) Impulsive Differential Equations, World Scientific, Singapore.
- 2 Bainov D. and P. Simenov (1993) Impulsive Differential Equations: Periodic Solutions and Applications, Part of Pitman Monographs and Surveys in Pure and Applied Mathematics, Longman Sci. Tech. Harlow.
- 3 Lakshmikantham V., Bainov D.D. and P.S. Simenov (1989) Theory of Impulsive Differential Equations, World Scientific, Singapore.
- 4 Akhmetov M.U. and Zafer A. (2000) Appl.Math. Lett. 13, pp. 99–105 [https://doi.org/10.1016/S0893-9659\(00\)00040-9](https://doi.org/10.1016/S0893-9659(00)00040-9).
- 5 Nieto J.J. and D. O'Regan, Nonlin. (2009). Anal.: Real World Appl. 10, pp. 680–690 <https://doi.org/10.1016/j.nonrwa.2007.10.022>.
- 6 Nakhushiev A.M. (1982) Differ. Equat. 18, pp. 72–81.
- 7 Yuldashev T.K., Islomov B.I. and Alikulov E.K. (2020). Lobachevskii J.Math. 41, pp. 926–944. <https://doi.org/10.1134/S1995080220050145>.
- 8 Yuldashev T.K. and Abdullaev O.Kh. (2021) Lobachevskii J.Math. 42, pp. 1113–1123. <https://doi.org/10.1134/S1995080221050218>.
- 9 Abdullaev V.M. and Aida-zade K.R. (2014) Comput.Math. Math. Phys. 54, pp. 1096–1109. <https://doi.org/10.1134/S0965542514070021>.
- 10 Dzhenaliev M.T. (2001) Differ. Equat. 37, pp. 51–57.
- 11 Dzhumabaev D.S., Bakirova E.A. and Mynbayeva S.T. (2020). Math. Methods Appl. Sci. 4, pp.1788–1802. <https://doi.org/10.1002/mma.6003>.
- 12 Assanova A.T., Imanchiyev A.E. and Kadirbayeva Zh.M. (2018). Comput.Math. Math. Phys. 58, pp. 508–516. <https://doi.org/10.1134/S096554251804005X>.
- 13 Akhmetov M.U., Zafer A. and Sevilova R.D. Nonlin. (2002). Anal. 48, pp. 271–286. [https://doi.org/10.1016/S0362-546X\(00\)00186-3](https://doi.org/10.1016/S0362-546X(00)00186-3).
- 14 Assanova A.T., Bakirova E.A., Kadirbayeva Zh.M. and Uteshova R.E. (2020) Comput. Appl. Math. 39, 248. <https://doi.org/10.1007/s40314-020-01298-1>.
- 15 Assanova A.T., Bakirova E.A. and Kadirbayeva Zh.M. (2020). Comput.Math. Math. Phys. 60, pp. 203–221. <https://doi.org/10.1134/S0965542520020049>.

- 16 Assanova A.T., Bakirova E.A. and Kadirbayeva Zh.M. (2021). *Math. Model. Anal.* 26, pp. 34–54. <https://doi.org/10.3846/mma.2021.11977>.
- 17 Minglibayeva B.B. and Assanova A.T. (2021). *Lobachevskii J. Math.* 42, pp. 587–597. <https://doi.org/10.1134/S199508022103015X>.
- 18 Dzhumabayev D.S. (1989). *USSR Comput. Math. Math. Phys.* 29, pp. 34–46.
- 19 Dzhumabaev D.S., J. (2016). *Comput. Appl. Math.* 294, pp. 342–357 <http://dx.doi.org/10.1016/j.cam.2015.08.023>.
- 20 Assanova A.T. and Kadirbayeva Zh.M. (2018). *Comput. Appl. Math.* 37, pp. 4966–4976. <https://doi.org/10.1007/s40314-018-0611-9>.
- 21 Temesheva S.M., Dzhumabaev D.S. and Kabdrakhova S.S. (2021). *Lobachevskii journal of mathematics.* 42, 606–612. <https://doi.org/10.1134/S1995080221030173>.
- 22 Kadirbayeva Zh.M. and Kabdrakhova S.S. (2022). *Open Math.* 20, pp. 1173–1183. <https://doi.org/10.1515/math-2022-0496>.
- 23 Kadirbayeva Zh.M., Kabdrakhova S.S. and Mynbayeva S.T. (2021). *Lobachevskii J. Math.* 42, pp. 3675–3683. <https://doi.org/10.1134/S1995080222030131>.
- 24 Bakirova E.A., Tleulesova A.B. and Kadirbayeva Zh.M. (2017). *Bull. Karag. Univ., Math.* 87 (3), pp. 43–50.
- 25 Assanova A.T., Bakirova E.A. and Vassilina G.K. (2020). *Analysis.* 4, pp. 175–191 <https://doi.org/10.1515/anly-2019-0021>.

^{1,2}**Kadirbayeva Zh.M.,**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
ORCID ID: 0000-0001-8861-4100, e-mail: zhkadirbayeva@gmail.com

^{1,3}**Temesheva S.M.,**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
ORCID ID: 0000-0002-3341-4539, e-mail: temeshevasvetlana@gmail.com

^{1,4}**Minglibayeva B.B.,**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, ORCID ID: 0000-0002-7195-4480,
e-mail: minglibayeva.bayan@gmail.com

⁴**Shaimerden N.M.,**

Master, ORCID ID: 0009-0005-5114-7197, e-mail: nurtai777@mail.ru

¹Institute of Mathematics and Mathematical Modeling, 050010, Almaty, Kazakhstan

²International Information Technology University, 050040, Almaty, Kazakhstan

³Al-Farabi Kazakh National University, 050040, Almaty, Kazakhstan

⁴Kazakh National Women's Teacher Training University, 050000, Almaty, Kazakhstan

NUMERICAL SOLUTION OF A BOUNDARY VALUE PROBLEM WITH A PARAMETER FOR IMPULSIVE LOADED DIFFERENTIAL EQUATIONS

Abstract

The boundary value problem depending on the parameter for the system of impulsive loaded differential equations is considered. Algorithms of numerical realization of the Dzhumabaev parameterization method are developed for numerical solving of the studied boundary value problem depending on the parameter. Algorithms of numerical realization of the Dzhumabaev parameterization method are based on the solving of Cauchy problems for the system of ordinary differential equations. As a result of application of the proposed method, finding a solution to the boundary value problem depending on the parameter for impulsive loaded differential equations leads to finding a solution to the system of algebraic equations. This system of algebraic equations consists of a boundary condition and equalities with respect to the conditions at the impulsive points. Numerical results showing the high efficiency of the numerical implementation of the Dzhumabaev parameterization method are given. The result demonstrate that there is congruence between the numerical and the exact results to a high order of accuracy.

Key words: loaded differential equation, boundary value problem, impulse effect, parametrization method.

^{1,2}**Кадирбаева Ж.М.,**

канд. физ.-мат.наук, ассоц. профессор, ORCID ID: 0000-0001-8861-4100,
e-mail: zhkadirbayeva@gmail.com

^{1,3}**Темешева С.М.,**

докт. физ.-мат.наук, ассоц. профессор, ORCID ID: 0000-0002-3341-4539,
e-mail: temeshevasvetlana@gmail.com

^{1,4}**Минглибаева Б.Б.,**

канд. физ.-мат.наук, ORCID ID: 0000-0002-7195-4480, e-mail: minglibayeva.bayan@gmail.com

⁴**Шаймерден Н.М.,**

магистр, ORCID ID: 0009-0005-5114-7197, e-mail: nurtai777@mail.ru

¹Институт математики и математического моделирования,
050010, г. Алматы, Казахстан

²Международный университет информационных технологий,
050040, г. Алматы, Казахстан

³Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, г. Алматы, Казахстан

⁴Казахский национальный женский педагогический университет,
050000, г. Алматы, Казахстан

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ С ПАРАМЕТРОМ ДЛЯ ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЖЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Аннотация

Рассматривается краевая задача, зависящая от параметра для системы импульсных нагруженных дифференциальных уравнений. Для численного решения исследуемой краевой задачи, зависящей от параметра, разработаны алгоритмы численной реализации метода параметризации Джумабаева. Алгоритмы численной реализации метода параметризации Джумабаева основаны на решении задач Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. В результате применения предложенного метода нахождение решения краевой задачи, зависящей от параметра для импульсных нагруженных дифференциальных уравнений, приводит к нахождению решения системы алгебраических уравнений. Эта система алгебраических уравнений состоит из граничного условия и равенств относительно условий в точках импульса. Приведены численные результаты, показывающие высокую эффективность численной реализации метода параметризации Джумабаева. Результаты примера показывают, что существует соответствие между численными и точными результатами с высоким порядком точности.

Ключевые слова: нагруженное дифференциальное уравнение, краевая задача, импульсное воздействие, метод параметризации.

UDC 511.41;514
IRSTI 27.15.27<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-116-126>^{1*}**Kazin A.,**

Bachelor, ORCID ID: 0000-0002-9658-9723, e-mail: aiken.kazin@sdu.edu.kz

²**Kadyrov Sh.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-8352-2597, e-mail: shirali.kadyrov@oxusuniversity.uz

¹SDU University, 040900, Kaskelen, Kazakhstan²Oxus University, Tashkent, Uzbekistan**FRACTAL GEOMETRY AND LEVEL SETS INCONTINUED FRACTIONS****Abstract**

Continued fractions offer a unique representation of real numbers as a sequence of natural numbers. Good's seminal work on continued fractions laid further research into fractal geometry and exceptional sets. This paper extends Good's findings by focusing on level sets constructed by restricting the partial quotients with lower bounds. Using elementary approaches, we establish new bounds on their Hausdorff dimension, providing theoretical insights and practical estimation methods. Additionally, we offer alternative proofs and corollaries that deepen our understanding of the relationship between continued fractions and fractal geometry. Continued fractions provide a distinctive means of expressing real numbers as a sequence of natural numbers, offering insights into the underlying structure of these numbers. Building upon Good's foundational research in continued fractions, this paper delves into the domain of fractal geometry and exceptional sets, exploring the interesting connections between these mathematical constructs. Our focus lies on investigating the Hausdorff dimension of level sets formed by constraining the partial quotients with lower bounds. Employing elementary methodologies, we present fresh theoretical bounds on Hausdorff dimension of these level sets, enriching our understanding of their geometric properties. Through combining theoretical advancements and practical techniques, this research contributes to mathematics, providing both deep theoretical insights and practical applications in understanding continued fractions and their geometric properties.

Key words: continued fractions, number theory, Hausdorff dimension, fractals, numerical approximation, Newton–Raphson method, Taylor series.

Introduction

Continued fractions are a unique way of representing a real number x in $[0,1)$ as a sequence $(a_n(x))$ of natural numbers:

$$x = \frac{1}{a_1(x) + \frac{1}{a_2(x) + \frac{1}{a_3(x) + \dots}}} \text{ or } [a_1, a_2, a_3, \dots]$$

They can be obtained through an iterative process of representing a number as the sum of its integer part and the reciprocal of the fractional part. This process can be finite or infinite, and it provides an alternative representation of real numbers, which has connections to various areas of mathematics such as number theory, hyperbolic geometry, and Diophantine approximation. Continued fractions have applications in various fields, including the analysis of rational approximations, the study of

quadratic irrationals, and the computation of irrational numbers like π . The study of continued fractions also has connections to fractal geometry and dimension theory. Fractals are complex geometric shapes that exhibit self-similarity at different scales and have a non-integer dimension. The connection between continued fractions and fractal geometry lies in self-similar properties of certain continued fractions, which can lead to the exploration of fractal sets with specific dimensions, such as the Box dimension and Hausdorff dimension [1]. Therefore, the study of continued fractions and fractal dimension provides a rich and interconnected area of mathematical research, with implications for diverse fields within mathematics and its applications.

In his work, Good [2] studied the Hausdorff dimension of various exceptional sets arising in continued fractions and in particular proved the following:

For $\alpha \geq 20$, the Hausdorff dimension of exceptional sets

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2\log(\alpha+2)} < \dim_H \{x \in [0,1] \mid a_n(x) \geq \alpha, \forall n\} < \frac{1}{2} + \frac{\log \log(\alpha-1)}{2\log(\alpha-1)}.$$

Here we denote $\log$ as the natural logarithm.

Let us define the set F of divergent partial quotients, namely

$$F = \{x \in [0,1] \mid a_n(x) \rightarrow \infty \text{ as } n \rightarrow \infty\}.$$

He also showed that

$$\dim_H F = \frac{1}{2}.$$

Numerous studies have been undertaken to generalize and build upon the findings since Good initially published his work. In two consecutive works, Hirst investigated the dimension of sets with partial quotients satisfying functions $a_n \geq f(n)$ tending to infinity [3-4]. Specifically, he demonstrated that the dimension of the set of real numbers with partial quotients satisfying $a_n \geq n^b$ is $1/(2b)$. Subsequently, Cusick demonstrated that for given values of a and b greater than 1, the set with $a_n \geq a^{b^n}$ for all n has a zero Hausdorff dimension [5]. Later Fan et al [6] obtained a general framework for calculating the dimension of the sets satisfying $s_n \leq a_n(x) \leq Ns_n$ with any increasing sequence s_n . Another avenue of generalization involved considering $\limsup$ sets rather than all statements. In this regard, Moorthy [7] established that the set with $a_n \geq a^{b^n}$ for infinitely many n has a dimension of at most $2/(1+b)$. He hypothesized that the exact dimension should be $1/(1+b)$, which was later confirmed by Luczak in 1997 [8]. Additionally, refer to [9] for an alternative proof of the lower bound. For further results in this area, please consult [10–12].

In recent years, there has been a notable increase in research focusing on the dimensions of divergent partial quotients. Particularly, the study of weakly divergent partial quotients was undertaken in [13]. Additionally, investigations into increasing partial quotients with joint constraints were conducted in both [14] and [15]. In [16–17], various formulas were derived pertaining to the dimension of sets where the growth rate of partial quotients a_n is comparable to $e^{\phi(n)}$, where $\phi(n)$ satisfies various conditions. Furthermore, in [18], the authors explored exceptional sets wherein the limit inferior and limit superior of $\log a_n / \log n$ converge to a and b respectively. They demonstrated that for positive values of a , the dimension is one half, and it is 1 if a equals zero. Takashi [19] delved into the study of slowly divergent partial quotients.

From the literature, it is evident that while numerous works have concentrated on sets with divergent partial quotients, there appears to be a gap in research regarding the dimension of level sets with lower bounds since Good's work. In this work, we plan to focus on this direction of research.

For any positive α we define the following level set

$$F_\alpha = \{x \in [0,1) \mid a_n(x) \geq \alpha, \forall n \geq 1\}.$$

In this work we consider an elementary approach in estimating the dimension of the level sets F_α and improvement of the Good's above-mentioned results. Our main result is the following.

Theorem 1. Let $\alpha \geq 2$ be an integer. Let $\epsilon(\alpha) \in (0,1)$ be a real number such that

$$\epsilon(\alpha) (\alpha - 1)^{\epsilon(\alpha)} > 1 \quad (1)$$

Then, the Hausdorff dimension of F_α satisfies

$$\dim_H F_\alpha < \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \epsilon(\alpha).$$

For $\epsilon(\alpha) = \frac{\log \log(\alpha-1)}{\log(\alpha-1)}$ with $\alpha \geq 20$ it is easy to see that the condition (1) is satisfied. Hence, this theorem can be thought as an improvement of Good's result. We note that we do not have any restrictions to α other than it being at least 2. Clearly, when $\alpha = 1$, the theorem is false, as in this case $F_1 = [0,1)$ which has full Hausdorff dimension 1. In fact, it has Lebesgue measure 1.

In the next, we consider various estimates for $\epsilon(\alpha)$. Using the Newton–Raphson method we obtain the following corollary.

Corollary 2. Let $\alpha \geq 17$ be an integer. Then, the Hausdorff dimension of F_α satisfies

$$\dim_H F_\alpha < \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{(\log \log(\alpha - 1))^2 + 1}{\log(\alpha - 1) (\log \log(\alpha - 1) + 1)}.$$

Another approach to estimate $\epsilon(\alpha)$ is to use Taylor's approximation. In this case, we have the following corollaries:

Corollary 3. Let $\alpha \geq 2$ be an integer. Then, the Hausdorff dimension of F_α satisfies

$$\dim_H F_\alpha < \frac{1}{2} + \frac{-1 + \sqrt{1 + 4 \log(\alpha - 1)}}{4 \log(\alpha - 1)}.$$

Corollary 4. Let $\alpha \geq 2$ be an integer. Then, the Hausdorff dimension of F_α satisfies

$$\dim_H F_\alpha < \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \frac{1}{2} \sqrt{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2p}{3}},$$

where $p = \frac{2}{3 \log^2(\alpha-1)}$ and $q = -\frac{20+54 \log(\alpha-1)}{27 \log^3(\alpha-1)}$.

As a by-product, we obtain another proof of Good's result that the dimension of the set of divergent partial quotients is one-half.

Main Provisions

Define the Hausdorff dimension:

Definition 1. Recall that a δ -cover of a set F is a countable (or finite) collection of sets $\{U_i\}$ with diameters $0 < |U_i| \leq \delta$ that cover F . Suppose that $F \subset R^n$ and $s \geq 0$. For each $\delta > 0$, we define

$$H_\delta^s(F) = \inf \{ \sum_{i=1}^{\infty} |U_i|^s : \{U_i\} \text{ is a } \delta\text{-cover of } F \}.$$

We call $H^s(F) = \lim_{\delta \rightarrow 0} H_\delta^s(F)$ the s -dimensional Hausdorff measure of F .

Definition 2. Let $H^s(F)$ be a Hausdorff measure, then Hausdorff dimension of a set F is

$$\dim_H F = \inf \{ s \geq 0 : H^s(F) = 0 \} = \sup \{ s > 0 : H^s(F) = \infty \}.$$

For any continued fraction $[a_1, a_2, a_3, \dots]$ we define the convergents p_n/q_n by

$$\frac{p_n}{q_n} = [a_1, a_2, a_3, \dots, a_n],$$

where p_n, q_n are in lowest terms, so that they are coprime positive integers. In fractal geometry to compute the dimension of the given set one often needs to find a minimal number of intervals needed to cover the given set and the lengths of these intervals. The following lemma gives us these building blocks.

Lemma 1. For any natural numbers $n, a_1, a_2, \dots, a_n$ we let $I_n(a_1, a_2, \dots, a_n)$ the following set $I_n(a_1, a_2, \dots, a_n) = \{x \in [0, 1] \mid a_1(x) = a_1, a_2(x) = a_2, \dots, a_n(x) = a_n\}$.

$$I_n(a_1, a_2, \dots, a_n) = \left(\frac{p_n}{q_n}, \frac{p_n + p_{n-1}}{q_n + q_{n-1}} \right) \text{ or } \left(\frac{p_n + p_{n-1}}{q_n + q_{n-1}}, \frac{p_n}{q_n} \right)$$

The lemma is well-known and for the proof we refer to [20].

Lemma 2. For any natural numbers $n, a_1, a_2, \dots, a_n$, the intervals have the following length estimate

$$|I_n(a_1, a_2, \dots, a_n)| \leq (a_1 a_2 \dots a_n)^{-2}.$$

$$|I_n(a_1, a_2, \dots, a_n)| = \left| \frac{p_n + p_{n-1}}{q_n + q_{n-1}} - \frac{p_n}{q_n} \right| = \frac{|p_{n-1}q_n - p_nq_{n-1}|}{q_n(q_n + q_{n-1})}.$$

Since $p_{n-1}q_n - p_nq_{n-1} = (-1)^n$, see e.g. [21], we have

$$|I_n(a_1, a_2, \dots, a_n)| = \frac{1}{q_n(q_n + q_{n-1})}$$

We now obtain the growth rate of q_n using the fact that the convergents can be constructed using difference equations [21]:

$$q_n = a_n q_{n-1} + q_{n-2} \geq a_n q_{n-1} = a_n (a_{n-1} q_{n-2} + q_{n-3}) \geq a_n a_{n-1} q_{n-2} \geq \dots \geq a_n a_{n-1} \dots a_1.$$

As a result, we have the following length estimate

$$|I_n(a_1, a_2, \dots, a_n)| = \frac{1}{q_n(q_n + q_{n-1})} \leq \frac{1}{(q_n)^2} \leq \frac{1}{(a_1 a_2 \dots a_n)^2}.$$

Materials and methods

In this section we prove our results stated in the introduction.

Proof of Theorem 1. From the definition of Hausdorff dimension we deduce that if there exists s such that $H^s(F_\alpha) = 0$, then $\dim_H(F_\alpha) \leq s$. Since $H_\delta^s(F_\alpha)$ is an infimum of sums, we see that for any family of δ -covers $\{U_i^\delta\}$ of F_α it holds

$$H^s(F_\alpha) = \lim_{\delta \rightarrow 0} H_\delta^s(F_\alpha) \leq \lim_{\delta} \sum_i |U_i^\delta|^s.$$

$$F_\alpha \subset \bigcup I_n(a_1, a_2, \dots, a_n),$$

where the union is taken over all possible integer tuples $a_1, a_2, \dots, a_n \geq \alpha$. This is a countable set and $\{I_n(a_1, a_2, \dots, a_n)\}$ provides a cover for F_α . Hence for a suitable δ it follows that

$$H_\delta^s(F_\alpha) \leq \sum_{a_1, \dots, a_n \geq \alpha} |I_n(a_1, a_2, \dots, a_n)|^s \leq \sum_{a_1, \dots, a_n \geq \alpha} (a_1 a_2 \dots a_n)^{-2s} \leq \frac{1}{(\sum_{k=\alpha}^{\infty} k^{-2s})^n}.$$

For the sum to converge, we need $s > 1/2$. We may recognize the sum as the lower Riemann sum for an integral:

$$(\sum_{k=\alpha}^{\infty} k^{-2s})^n \leq (\int_{\alpha-1}^{\infty} x^{-2s} dx)^n = (\frac{1}{(2s-1)(\alpha-1)^{2s-1}})^n.$$

We note that as n increases, the sizes of the intervals $I_n(a_1, a_2, \dots, a_n)$ decreases to zero, hence δ decreases to zero. Thus, to obtain that $H^s(F_\alpha) = 0$ we need to take s that depends on α such that $(2s-1)(\alpha-1)^{2s-1} > 1$. For such s we then have $\dim_H(F_\alpha) \leq s$. Making a change of variable $\epsilon(\alpha) = 2s-1$ we see that once $\epsilon(\alpha)(\alpha-1)^{\epsilon(\alpha)} > 1$ we have

$$\dim_H(F_\alpha) \leq s = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\epsilon(\alpha).$$

We do not turn in proving the corollaries.

Proof of Corollary 2. To prove the statement, we utilize the Newton-Raphson method. The Newton-Raphson method, a powerful tool for solving nonlinear equations, has been the subject of various studies [22]. Consider the function $f(x) = x(\alpha-1)^x - 1$. In view of Theorem 1 we need to approximate the root of the function $f(x)$ from above. The graph of the function for several values of α is depicted in Figure 1 (p. 30).

For $x = \frac{\log \log(\alpha-1)}{\log(\alpha-1)} = \log_{\alpha-1} \log(\alpha-1)$ we see that

$$f(x) = \frac{\log \log(\alpha-1)}{\log(\alpha-1)} (\alpha-1)^{\frac{\log \log(\alpha-1)}{\log(\alpha-1)}} - 1 = \log \log(\alpha-1) - 1.$$

Since $\log \log 16 \approx 1.01978$, it follows that for $\alpha \geq 17$ we have

$\log \log(\alpha-1) - 1 > 0$. In particular, if we initiate the Newton-Raphson method with the initial value $x_0 = \frac{\log \log(\alpha-1)}{\log(\alpha-1)}$, then in any iteration we remain on the right-hand side of the x -intercept due to convexity. We note that the derivative of the function is

$$f'(x) = (1 + x \log(\alpha-1))(\alpha-1)^x.$$

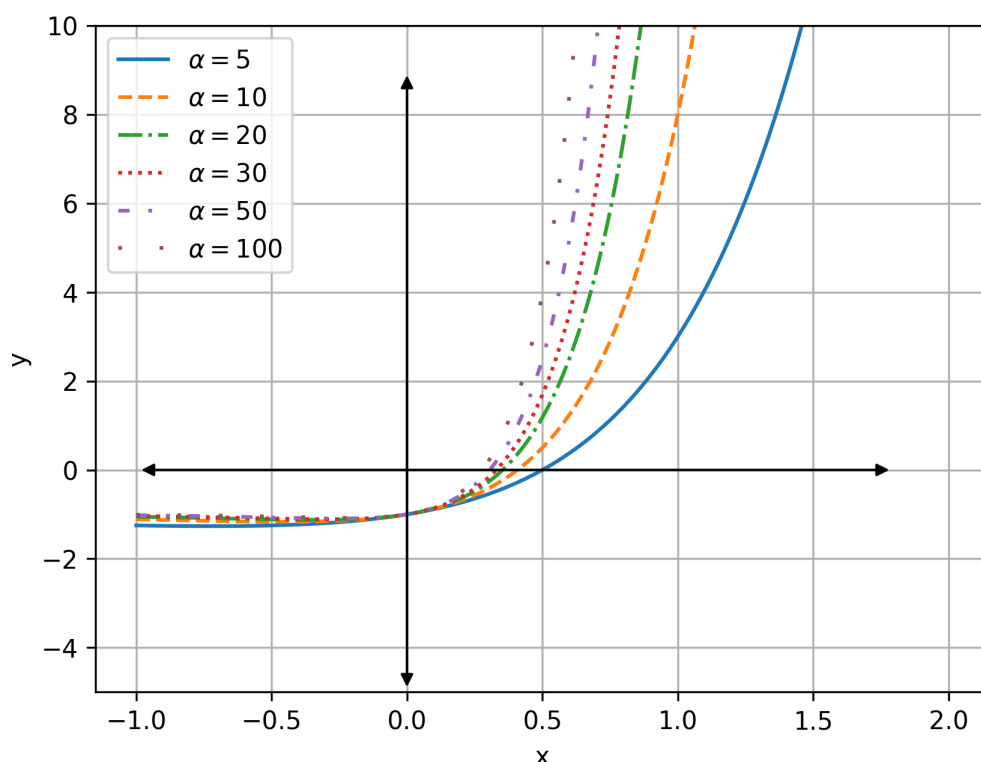


Figure 1. The graph of $f(x)$ for various values of α .

In one iteration of the Newton–Raphson method we get

$$\epsilon(\alpha) := x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} = x_0 - \frac{x_0(\alpha-1)^{x_0}-1}{(\alpha-1)^{x_0}(x_0 \log(\alpha-1)+1)},$$

$$\epsilon(\alpha) = \frac{(\log \log (\alpha-1))^2+1}{\log (\alpha-1)(\log \log (\alpha-1)+1)}.$$

Proof of Corollary 3. Our goal is to estimate $\epsilon(\alpha)$ from above such that $\epsilon(\alpha)(\alpha-1)^{\epsilon(\alpha)} > 1$. To this end, we use Taylor approximation. We know that e^x has Taylor expansion $e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$. Writing $(\alpha-1)^x = e^{x \log(\alpha-1)}$ we see that the Taylor expansion for $x(\alpha-1)^x$ is given by

$$x(\alpha-1)^x = x \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(x \log (\alpha-1))^n}{n!} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\log (\alpha-1))^n}{n!} x^{n+1}.$$

Considering 2nd order approximation we see that

$$x(\alpha-1)^x = x + \log (\alpha-1) x^2 + O(x^3).$$

From this it follows that if $x + \log (\alpha-1) x^2 = 1$, then $x(\alpha-1)^x = 1 + O(x^3) > 1$ which gives an upper estimate. Solving the quadratic equation

$$\log (\alpha-1) x^2 + x - 1 = 0$$

we get $\epsilon(\alpha) = x = \frac{-1+\sqrt{1+4 \log (\alpha-1)}}{2 \log (\alpha-1)}$. Now, applying Theorem 1 yields the desired estimate.

Proof of Corollary 4. Arguing as in the proof of Corollary 4, but this time considering 3rd order Taylor approximation we see that the positive solution to

$$x + \log(\alpha - 1)x^2 + \frac{\log^2(\alpha - 1)}{2}x^3 = 1$$

within the interval $(0,1)$ gives a good estimate for $\epsilon(\alpha)$. Let us analyze the function

$$f(x) = \frac{\log^2(\alpha-1)}{2}x^3 + \log(\alpha-1)x^2 + x - 1.$$

Taking derivative, we get $f'(x) = \frac{3 \log^2(\alpha-1)}{2}x^2 + 2 \log(\alpha-1)x + 1$. From Arithmetic mean – Geometric mean inequality we get

$$\frac{3 \log^2(\alpha-1)}{2}x^2 + 1 \geq 2 \sqrt{\frac{3 \log^2(\alpha-1)}{2}x^2} > 2 \log(\alpha-1)|x|.$$

It follows that $f'(x) > 0$ on the real line so that the function is strictly increasing. Since any cubic function has at least one root, we deduce that the function $f(x)$ has exactly one real root. Also, since $f(0) < 0 < f(1)$ we conclude that for any positive integer $\alpha \geq 2$ the unique real root must be on the interval $(0,1)$. It can be found using Cardano's formulas

$$\epsilon(\alpha) = x = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} - \sqrt{\frac{2p}{3}},$$

$$\text{where } p = \frac{2}{3 \log^2(\alpha-1)} \text{ and } q = -\frac{20+54 \log(\alpha-1)}{27 \log^3(\alpha-1)}.$$

Results and Discussion

In this section we compare our results to that of Good. To this end, we provide various graphical illustrations. In Figure 2, we compared the Hausdorff dimension estimates for F_α for various α ranging from 2 to 500 using different methods, namely 1st order Newton-Raphson, 2nd order Taylor expansion, and 3rd order Taylor expansion, against Good's upper bounds. Second order Taylor, as depicted in the graph, shows that it consistently remains above all other curves, indicating an over-estimation of the Hausdorff dimension. Our remaining two estimation methods, 1st order Newton-Raphson and 3rd order Taylor expansion, on the other hand, stays lower than Good, suggesting an improved result. The best upper estimate for the Hausdorff dimension among these methods turns out to be 1st order Newton-Raphson with initial value $\frac{\log \log(\alpha-1)}{\log(\alpha)}$. We note that clearly one can improve both Taylor and Newton-Raphson, however the dimension formulas get very complicated. These findings provide valuable insights into the performance and accuracy of different methods for estimating the Hausdorff dimension.

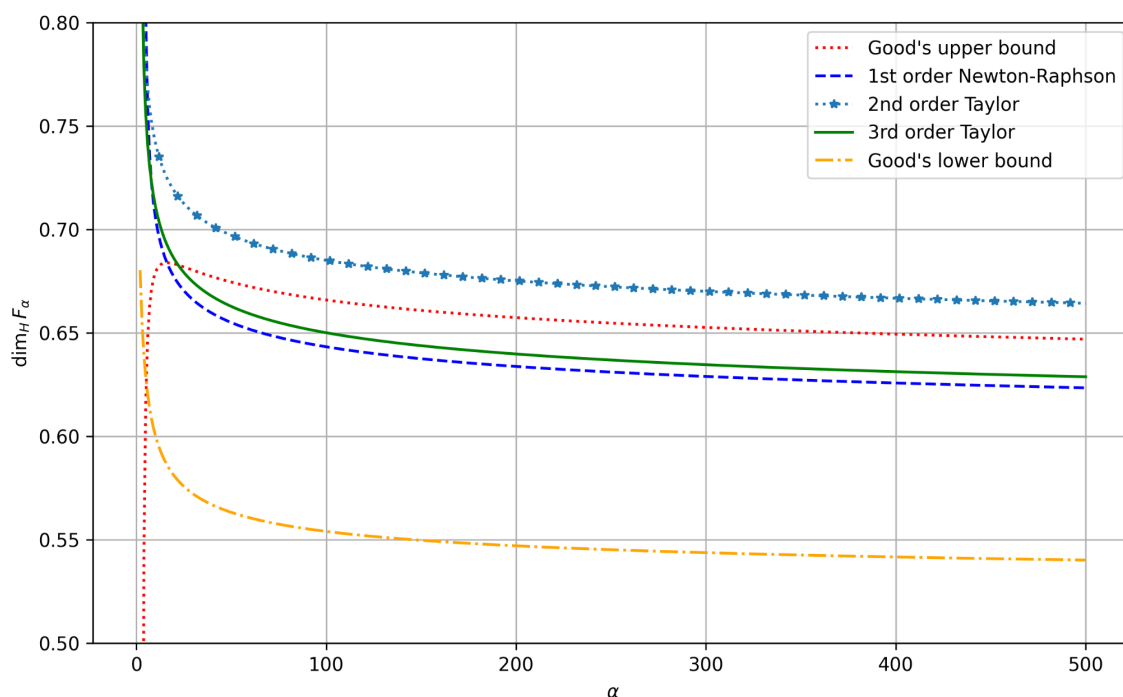


Figure 2. Dimension upper estimates of F_α for varying α

Conclusion

The exploration of continued fractions and their connection to fractal geometry has yielded significant advancements in mathematical theory and practical applications. Through this paper, we have extended Good's seminal work on continued fractions and exceptional sets, focusing particularly on level sets constructed by imposing lower bounds on partial quotients.

Our main result, Theorem 1 and its corollaries, provide new bounds on the Hausdorff dimension of these level sets, improving upon Good's earlier findings. In our corollaries, we offer practical estimation methods for the Hausdorff dimension of these sets. Utilizing approaches such as the Newton-Raphson method and Taylor series approximation, we provide insights into the behavior of these level sets under different constraints and parameters. By establishing conditions under which these level sets exhibit specific dimensional properties, we deepen our understanding of the intricate relationship between continued fractions and fractal geometry. Additionally, our graphical analysis comparing our estimations with Good's upper bounds highlights the effectiveness of our methods in providing accurate dimension estimates.

Overall, our obtained results contribute to the ongoing research in this field, shedding light on the complex structures inherent in continued fractions and their implications for fractal geometry. Further investigations into the properties of level sets with lower bounds present avenues for future exploration and refinement of dimension estimation techniques. Besides, similar numerical approaches can be utilized to better approximate the Hausdorff dimension of the level sets from below.

Information on funding

The authors acknowledge the support by a grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan within the framework of the project AP19676669.

REFERENCES

- 1 Zhong T.A. Family of fractal sets with Hausdorff dimension 0.618. *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 42, Issue 12, 2009, pp. 316–321.
- 2 Good I.J. The fractional dimensional theory of continued fractions. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 37, Issue 3, 1941, pp. 199–228.
- 3 Hirst K.E. A problem in the fractional dimension theory of continued fractions. *The Quarterly Journal of Mathematics*, 1970, no. 21(1), pp. 29–35.
- 4 Hirst K.E. Continued fractions with sequences of partial quotients. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 1973, no. 38(2), pp. 221–227.
- 5 Cusick T.W. Hausdorff dimension of sets of continued fractions. *The Quarterly Journal of Mathematics*, 1990, no. 41(3), pp. 277–286.
- 6 Fan A.H., Liao L.M., Wang B.W. and Wu J. On Khintchine exponents and Lyapunov exponents of continued fractions. *Ergodic Theory and Dynamical Systems*, 2009, no. 29(1), pp. 73–109.
- 7 Moorthy C.G. A problem of Good on Hausdorff dimension. *Mathematika*, 1992, no. 39(2), pp. 244–246.
- 8 Łuczak Tomasz. On the fractional dimension of sets of continued fractions. *Mathematika* 44, 1997, no. 1, pp. 50–53.
- 9 Feng De Jun, Jun Wu, Jyh-Ching Liang and Tseng S. J. Appendix to the paper by T. Łuczak-A simple proof of the lower bound. *Mathematika* 44, 1997, no. 87, pp. 54–55.
- 10 Wu Jun. A remark on continued fractions with sequences of partial quotients. *Journal of Number Theory* 128, 2008, no. 8, pp. 2394–2397.
- 11 Wang B.W. and Wu J. Hausdorff dimension of certain sets arising in continued fraction expansions. *Advances in Mathematics*, 218, 2008, pp. 1319–1339.
- 12 Sun Yu and Jun Wu. A dimensional result in continued fractions. *International Journal of Number Theory* 10, 2014, no. 4, pp. 849–857.
- 13 Dyussekenov D. and Kadyrov S. Weakly divergent partial quotients. *Asian-European Journal of Mathematics*, 2020, no.13(01), p.2050158.
- 14 Bakhtawar, Ayreena, Philip Bos, and Mumtaz Hussain. Hausdorff dimension of an exceptional set in the theory of continued fractions. *Nonlinearity* 33, 2020, no. 6, p. 2615.
- 15 Lü M. and Zhang, Z. On the increasing partial quotients of continued fractions of points in the plane. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*, 2022, no. 105(3), pp. 404–411.
- 16 Fang L., Ma J., Song K. and Wu M. Dimensions of certain sets of continued fractions with non-decreasing partial quotients. *The Ramanujan Journal*, 2023, no. 60(4), pp. 965–980.
- 17 Fang Lulu, Jihua Ma and Kunkun Song. Some exceptional sets of Borel–Bernstein theorem in continued fractions. *The Ramanujan Journal* 56, 2021, pp. 891–909.
- 18 Shang L. and Wu M. On the growth behavior of partial quotients in continued fractions. *Archiv der Mathematik*, 2023, no. 120(3), pp. 297–305.
- 19 Takahasi H. Hausdorff dimension of sets with restricted, slowly growing partial quotients. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 2023.
- 20 Khintchine A.Ya., *Continued Fractions* (University of Chicago Press, Chicago, 1964).
- 21 Einsiedler M. *Ergodic theory*. Springer; 2011.
- 22 Laverde, J.G.T. On the Newton-Raphson method and its modifications. *Ciencia en Desarrollo*, 2023, no. 14(2), pp. 75–80.

^{1*}Қазин А.,

бакалавр, ORCID ID: 0000-0002-9658-9723, e-mail: aiken.kazin@sdu.edu.kz

²Кадыров Ш.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-8352-2597, e-mail: shirali.kadyrov@oxusuniversity.uz

¹СДУ университеті, 040900, Қаскелең қ., Қазақстан

²Оксус университеті, Ташкент қ., Өзбекстан

ҮЗДІКСІЗ БӨЛШЕКТЕРДЕГІ ФРАКТАЛДЫ ГЕОМЕТРИЯ ЖӘНЕ ДЕҢГЕЙЛІ ЖИЫНДАР

Аңдатпа

Үздіксіз бөлшектер натурал сандар тізбегі ретінде нақты сандардың бірегей бейнесін түсінуге көмектеседі. Гудтың үздіксіз бөлшектер туралы негізгі жұмысы фракталды геометрия мен ерекше жиындардың әрі қарай зерттелуіне түрткі болды. Бұл мақалада төменгі шектермен шектеу арқылы алынған деңгей жиындарына баса назар аудару арқылы Гудтың нәтижелері одан әрі жетілдірілген. Қарапайым тәсілдер арқылы біз теориялық білім мен тәжірибелік бағалау әдістерін қолдана отырып, олардың Хаусдорф өлшемі үшін жаңа шекараларын орнатамыз. Сонымен қатар біз үздіксіз бөлшектер мен фракталдық геометрия арасындағы байланыс туралы түсінігімізді тереңдететін балама дәлелдер мен оның салдарын ұсынамыз. Үздіксіз бөлшектер нақты сандарды натурал сандар тізбегі ретінде өрнектеудің ерекше тәсілін ұсынады, бұл өз кезегінде осы сандардың негізгі құрылымын жақсырақ түсінуге көмектеседі. Гудтың үздіксіз бөлшектердегі іргелі зерттеулеріне сүйеніп, осы математикалық конструкциялар арасындағы қызықты байланыстарды зерттей отырып, бұл мақала фракталдық геометрия мен ерекше жиындар салаларына терең көз жүгіртеді. Біздің басты назарымыз үздіксіз бөлшектерді төменгі шектермен шектеу арқылы құрылған деңгей жиындарының Хаусдорф өлшемін зерттеу. Элементар әдістемелерді қолданып, біз олардың геометриялық қасиеттері туралы түсінігімізді кеңейте отырып, деңгей жиындарының Хаусдорф өлшеміне жаңа теориялық шекараларды ұсынамыз. Теориялық жетістіктер мен практикалық әдістерді біріктіре отырып, бұл зерттеу терең теориялық білім мен үздіксіз бөлшектер және олардың геометриялық қасиеттерін түсіну үшін практикалық қолданбаларды қамтамасыз ету арқылы математикаға үлес қосады.

Тірек сөздер: үздіксіз бөлшектер, сандар теориясы, Хаусдорф өлшемі, фракталдар, сандық жуықтау, Ньютон-Рафсон әдісі, Тейлор қатары.

^{1*}Қазин А.,

бакалавр, ORCID ID: 0000-0002-9658-9723, e-mail: aiken.kazin@sdu.edu.kz

²Кадыров Ш.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-8352-2597, e-mail: shirali.kadyrov@oxusuniversity.uz

¹Университет СДУ, 040900, г. Каскелен, Казахстан

²Университет Оксус, г. Ташкент, Узбекистан

ГЕОМЕТРИЯ ФРАКТАЛОВ И МНОЖЕСТВА УРОВНЕЙ В ЦЕПНЫХ ДРОБЯХ

Аннотация

Цепные дроби предлагают уникальное представление действительных чисел в виде последовательности натуральных чисел. основополагающая работа Гуда о цепных дробях положила начало дальнейшим исследованиям фрактальной геометрии и исключительных множеств. Эта статья расширяет выводы Гуда, сосредоточив внимание на множествах уровня, построенных путем ограничения частичных дробей нижними границами. Используя элементарные подходы, мы устанавливаем новые границы их хаусдорфовой размерности, предоставляя теоретические знания и практические методы оценки. Кроме того, мы предлагаем альтернативные доказательства и следствия, которые углубляют наше понимание взаимосвязи между

цепными дробями и фрактальной геометрией. Цепные дроби представляют особый способ выражения действительных чисел в виде последовательности натуральных чисел, что позволяет лучше понять основную структуру этих чисел. Основываясь на фундаментальных исследованиях Гуда в области цепных дробей, эта статья углубляется в область фрактальной геометрии и исключительных множеств, исследуя интересные связи между этими математическими конструкциями. Наше внимание сосредоточено на исследовании хаусдорфовой размерности множеств уровня, образованных путем ограничения частичных дробей нижними границами. Используя элементарные методологии, мы представляем новые теоретические границы хаусдорфовой размерности этих множеств уровней, обогащая наше понимание их геометрических свойств. Сочетая теоретические достижения и практические методы, это исследование вносит вклад в математику, предоставляя как глубокие теоретические знания, так и практические приложения для понимания цепных дробей и их геометрических свойств.

Ключевые слова: цепные дроби, теория чисел, размерность Хаусдорфа, фракталы, численное приближение, метод Ньютона-Рафсона, ряд Тейлора.

УДК 517.54
МРНТИ 27.23.25

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-127-138>

¹Майер Ф.Ф.,

канд. физ.-мат. наук, профессор, ORCID ID 0000-0002-2278-2723, e-mail: maiyer@mail.ru

¹Тастанов М.Г.,

канд. физ.-мат. наук, профессор, ORCID ID 0000-0003-1926-8958, e-mail: tastao@mail.ru

¹Утемисова А.А.,

канд. пед. наук, ORCID ID 0000-0001-5143-0260, e-mail: anar_utemisova@mail.ru

¹Ысмағұл Р.С.,

канд. физ.-мат. наук, профессор, ORCID ID 0009-0007-6594-7958, e-mail: ismagulr@mail.ru

¹НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмета Байтурсынулы»,
г. Костанай, 110000, Казахстан

ТОЧНЫЕ ОЦЕНКИ РЕГУЛЯРНЫХ ФУНКЦИЙ И РАДИУСЫ ВЫПУКЛОСТИ И ЗВЕЗДООБРАЗНОСТИ НЕКОТОРЫХ КЛАССОВ ЗВЕЗДООБРАЗНЫХ И ПОЧТИ ЗВЕЗДООБРАЗНЫХ ФУНКЦИЙ

Аннотация

Известно, что многие задачи для подклассов однолистных функций могут быть преобразованы в задачи минимизации или максимизации некоторых функционалов, связанных с исследуемыми подклассами однолистных функций. Часто в качестве такого функционала выступает логарифмическая производная регулярных функций. В настоящей статье вводится двухпараметрический подкласс $\mathcal{P}_n(a, \gamma)$ регулярных в единичном круге функций с положительной вещественной частью, разложение в ряд которых начинается с n -ной степени, обобщающий известный класс Р. Гоела и Д. Шаффера регулярных функций, значения которых содержатся в круге, симметричном относительно действительной оси, содержащем на границе точку 0. В указанном классе функций получены точные оценки различных функционалов, включая логарифмическую производную. В качестве приложений этих оценок найдены точные радиусы выпуклости (или звездообразности) различных классов звездообразных и почти звездообразных функций, заданных с использованием класса $\mathcal{P}_n(a, \gamma)$. Все полученные результаты являются точными и обобщают многие из ранее известных результатов. Применение полученных в статье оценок является перспективным, так как вносит вклад в теорию экстремальных задач, связанных с различными подклассами однолистных функций.

Ключевые слова: оценки регулярных функций, однолистные функции, звездообразные функции, радиус выпуклости, радиус звездообразности.

Введение

Решение многих экстремальных задач для подклассов однолистных функций $f(z)$ сводится к задаче максимизации или минимизации при $|z| = r, 0 < r < 1$ соответственно функционалов

$$\left| z \frac{\varphi'(z)}{\varphi(z)} \right|, \operatorname{Re} \left\{ \mu \varphi(z) + \eta z \frac{\varphi'(z)}{\varphi(z)} \right\}, \mu, \eta \geq 0, \quad (1)$$

на классе $\mathcal{M}(\varphi_0)$, определяющем класс функций $f(z)$.

Для классов функций $\varphi(z)$, заданных условиями $Re \varphi(z) \geq 0$ или $|\varphi(z) - 1| \leq 1$, точная оценка сверху первого из функционалов (1) получена в [1–3]. Обобщения этих результатов на случай, когда $\varphi(z)$ удовлетворяет условию $|\varphi(z) - a| \leq a$, найдены в [4–5].

Данные результаты использовались многими авторами при исследовании различных подклассов однолистных функций, так или иначе сводящихся к условию $|\varphi(z) - a| \leq a$.

В настоящей статье вводится класс $\mathcal{P}_n(a, \gamma)$ регулярных в E функций $\varphi(z) = 1 + c_n z^n + c_{n+1} z^{n+1} + \dots, n \geq 1, z \in E$, удовлетворяющих условию $|(\varphi(z))^{1/\gamma} - a| \leq a, a > 1/2, 0 < \gamma \leq 1$, не только обобщающий известный класс $\mathcal{P}$ Гоела [4] и Д. Шаффера [5], но и включающий класс функций с ограниченным аргументом. Для него получены точные оценки функционалов (1), и в качестве их приложений найдены точные радиусы выпуклости (или звездообразности) различных классов звездообразных и почти звездообразных функций, заданных с использованием класса $\mathcal{P}_n(a, \gamma)$. Все полученные результаты являются точными, дают как новые, так и обобщают ранее известные результаты.

Материалы и методы

Через S, S^o, S^* и K будем обозначать соответственно классы однолистных, выпуклых, звездообразных и почти выпуклых функций $f(z)$.

Основным методом исследования статьи является метод подчиненности регулярных функций. Будем говорить, что регулярная в E функция $\varphi(z)$ подчинена однолистной функции $\varphi_0(z)$ в круге E , и писать $\varphi(z) \prec \varphi_0(z)$, если $\varphi(E) \subset \varphi_0(E)$ и $\varphi(0) = \varphi_0(0)$.

Основные положения

Будем считать, что $\mathcal{R}_n$ – класс регулярных в круге $E = \{z: |z| < 1\}$ функций $\varphi(z)$, имеющих разложение вида $\varphi(z) = 1 + c_n z^n + c_{n+1} z^{n+1} + \dots, n \geq 1, z \in E$, и $\mathcal{N}_n$ – класс нормированных регулярных в E функций $f(z)$ вида $f(z) = z + a_{n+1} z^{n+1} + a_{n+2} z^{n+2} + \dots, n \geq 1, z \in E$.

Если $\mathcal{M}_n$ есть $\mathcal{R}_n$ или $\mathcal{N}_n$ или некоторый подкласс классов $\mathcal{R}_n$ или $\mathcal{N}_n$, то при $n = 1$ нижний индекс у класса $\mathcal{M}_n$ для упрощения обозначений будем опускать, то есть будем считать, что $\mathcal{M} \equiv \mathcal{M}_1$. И обратно, если $\mathcal{M}$ есть некоторый подкласс класса $\mathcal{R}$ или $\mathcal{N}$, то добавление нижнего индекса n у обозначения этого подкласса будет означать, что функции этого подкласса $\mathcal{M}_n$ имеют разложение соответственно вида $\varphi(z) = 1 + c_n z^n + c_{n+1} z^{n+1} + \dots, n \geq 1$, или $f(z) = z + a_{n+1} z^{n+1} + a_{n+2} z^{n+2} + \dots, n \geq 1$.

Пусть $\mathcal{P}_n$ – класс функций $\varphi(z)$ из $\mathcal{R}_n$, у которых $Re \varphi(z) \geq 0, z \in E$.

Обзор литературы

Пусть $\mathcal{M}(\varphi_0)$ обозначает класс функций $\varphi(z)$ из $\mathcal{R}$, который с помощью условия подчиненности функций

$$\varphi(z) = z \frac{f'(z)}{f(z)} \prec \varphi_0(z) \quad (2)$$

задаёт подкласс $S^*(\varphi_0)$ звездообразных функций $f(z)$ из $\mathcal{N}$.

Тогда, например,

1) $\mathcal{M}\left(\frac{1+z}{1-z}\right) \equiv \mathcal{P}$ и $S^*\left(\frac{1+z}{1-z}\right) \equiv S^*$ – есть класс всех звездообразных функций;

2) если $\varphi_0(z) = \frac{1+(1-2\alpha)z}{1-z}$, то получаем класс

$\mathcal{M}(\varphi_0) = \{\varphi(z) \in \mathcal{R}: \operatorname{Re} \varphi(z) \geq \alpha, 0 \leq \alpha < 1\}$, которому соответствует класс S_α^*

звездообразных функций $f(z)$ порядка α [6];

3) если $\varphi_0(z) = \sqrt{1+z}$, то получаем класс

$\mathcal{M}(\varphi_0) = \{\varphi(z) \in \mathcal{R}: |\varphi^2(z) - 1| \leq 1\}$ и соответствующий ему класс S_L^*

лемнискатных функций $f(z)$ [7];

4) функция $\varphi_0(z) = \frac{1+z}{1-(1-1/a)z}$ задаёт условие $|\varphi(z) - a| \leq a, a > \frac{1}{2}$, которое определяет класс $S^*(a)$ звездообразных функций $f(z)$, введенный Яновским [8].

Начиная с классического результата о радиусе выпуклости $r_0 = 2 - \sqrt{3}$ класса S , вычисление различных геометрических радиусов стало отдельным направлением в геометрической теории функций (см. напр. [7, 9–12]).

Работы М. Рида [13] и Т. МакГрегора [1–3, 14] стали началом изучения классов почти звездообразных функций (см. напр. [10, 11, 15]).

Таким образом, исходя из вышеописанного обзора исследований, в настоящее время сохраняет актуальность вопрос о введении новых классов регулярных функций $\varphi(z)$ из $\mathcal{R}_n$ и получении для них оценок функционалов (1), позволяющих проводить исследование новых классов функций $f(z)$ из $\mathcal{N}$.

Результаты и обсуждение

Оценки в некоторых классах регулярных функций

Лемма [16]. Пусть функция $\Phi(z) + 1 \in \mathcal{R}_n$ и удовлетворяет условию

$$\left| \exp \left\{ \frac{1}{\gamma} \Phi(z) \right\} - a \right| \leq a, a > \frac{1}{2}, 0 < \gamma \leq 1. \quad (3)$$

Тогда при $|z| = r < 1$ справедлива точная оценка

$$|\Phi'(z)| \leq \frac{\gamma(2a-1)nr^{n-1}}{(1-r^n)[a+(a-1)r^n]}. \quad (4)$$

Определение 1. Обозначим через $\mathcal{P}_n(a, \gamma)$ класс функций $\varphi(z) \in \mathcal{R}_n$, для которых

$$\left| (\varphi(z))^{\frac{1}{\gamma}} - a \right| \leq a, a > 1/2, 0 < \gamma \leq 1, z \in E. \quad (5)$$

При $a \rightarrow \infty$ класс $\mathcal{P}_n(a, \gamma)$ сводится к классу

$$\mathcal{P}_n(\gamma) = \left\{ \varphi(z) \in \mathcal{P}_n: |\arg \varphi(z)| \leq \frac{\gamma\pi}{2}, z \in E \right\}. \text{ При этом}$$

$$\mathcal{P}_n(a, \gamma) \subset \mathcal{P}_n(\gamma) \subset \mathcal{P}(1) = \mathcal{P}.$$

Теорема 1. Пусть $\varphi(z) \in \mathcal{P}_n(a, \gamma)$. Тогда при $|z| = r, 0 \leq r < 1$, имеют место оценки

$$\left(\frac{1 - r^n}{1 + (1 - 1/a)r^n} \right)^\gamma \leq \operatorname{Re} \varphi(z) \leq |\varphi(z)| \leq \left(\frac{1 + r^n}{1 - (1 - 1/a)r^n} \right)^\gamma, \quad (6)$$

$$|\arg \varphi(z)| \leq \gamma \arcsin \frac{(2 - 1/a)r^n}{1 + (1 - 1/a)r^{2n}}, \quad (7)$$

$$\left| z \frac{\varphi'(z)}{\varphi(z)} \right| \leq \frac{\gamma(2 - 1/a)nr^n}{(1 - r^n)(1 + (1 - 1/a)r^n)} \quad (8)$$

и для любых $\mu, \eta \geq 0$

$$\begin{aligned} & \mu \operatorname{Re} \varphi(z) + \eta \operatorname{Re} z \frac{\varphi'(z)}{\varphi(z)} \geq \\ & \geq \mu \left(\frac{1 - r^n}{1 + (1 - 1/a)r^n} \right)^\gamma - \eta \frac{\gamma(2 - 1/a)nr^n}{(1 - r^n)(1 + (1 - 1/a)r^n)}, \end{aligned} \quad (9)$$

Оценки точные и достигаются для функции $\varphi(z) = \varphi_0(z^n)$, где

$$\varphi_0(z) = \left(\frac{1 + z}{1 - (1 - 1/a)z} \right)^\gamma, \quad (10)$$

Доказательство. Условие (5) равносильно тому, что выполняется подчиненность функций $\varphi(z) \prec \varphi_0(z)$, где $\varphi_0(z)$ – отображение круга E на область $\{w: |w^{1/\gamma} - a| < a, \operatorname{Re} w > 0\}$, ограниченную кривой, сходной с правой половиной лемнискаты Бернулли с узловой точкой $w = 0$ и углом между касательными в узловой точке, равным $\gamma\pi$.

В силу подчиненности $\varphi(z) \prec \varphi_0(z)$ с учетом выпуклости функции $\varphi_0(z)$ и свойства ее симметрии $\varphi_0(\bar{z}) = \overline{\varphi_0(z)}$ относительно действительной оси при любом $r, 0 < r < 1$, имеет место включение $\varphi(|z| \leq r) \subset \varphi_0(|z| \leq r^n)$. Отсюда в силу геометрических свойств множества $\varphi_0(|z| \leq r^n)$ вытекает неравенство $\varphi_0(-r^n) \leq \operatorname{Re} \varphi(z) \leq |\varphi(z)| \leq \varphi_0(r^n)$, что равносильно оценке (6).

Поскольку

$$\varphi^{1/\gamma}(z) \prec w(z) = \frac{1 + z}{1 - (1 - 1/a)z},$$

где $w(z)$ есть отображение круга E на круг $|w - a| < a$, то $\varphi^{1/\gamma}(|z| \leq r) \subset w(|z| \leq r^n)$.

Поэтому при $|z| = r, 0 \leq r < 1$, выполняется неравенство

$$|\varphi^{1/\gamma}(z) - C(r)| \leq R(r),$$

$$C(r) = \frac{1 + (1 - 1/a)r^{2n}}{1 - (1 - 1/a)r^{2n}}, R(r) = \frac{(2 - 1/a)r^n}{1 - (1 - 1/a)r^{2n}}.$$

Отсюда в силу геометрических соображений нетрудно найти, что

$$\left| \frac{1}{\gamma} \arg \varphi(z) \right| = \left| \arg \varphi^{\frac{1}{\gamma}}(z) \right| \leq \arcsin \frac{R(r)}{C(r)},$$

откуда вытекает оценка (7).

Поскольку $\Phi(z) = \ln \varphi(z) < \Phi_0(z) = \ln \varphi_0(z)$, то условие (5) можно переписать в виде (3). Поэтому оценка (8) сразу вытекает из оценки (4).

Оценка (9) вытекает из оценки (8) и левой оценки (6).

Точность оценок (6)–(8) проверяется непосредственно. Отметим лишь важное для дальнейшего, что левая оценка (6) и оценки (8)–(9) достигаются для функции $\varphi(z) = \varphi_0(z^n)$ в точке $z = \sqrt[n]{-1} r$, где $\varphi_0(z)$ задана формулой (10).

Примечание. При $\gamma = n = 1$ оценки (6), (8) получены в [4], а при $\gamma = 1, n \geq 1$ совпадают с оценками из [5]. При $\gamma = n = 1$ случаи $a \rightarrow \infty$ ($Re \varphi(z) \geq 0$) и $a = 1$ ($|\varphi(z) - 1| \leq 1$) условия (5), а также случай $a \rightarrow \infty$ при $n \geq 1$ приводят соответственно к оценкам [1–3].

При $n = 1, a \rightarrow \infty, 0 < \gamma \leq 1$ оценка (8) получена в [17], а при $\gamma = 1/2, a = 1$, когда условие (5) равносильно подчиненности $\varphi(z) < \varphi_0(z) = \sqrt{1+z}$, частные случаи оценок (6), (8) совсем недавно получены в [18].

Если $\psi(z) \in \mathcal{P}_n(a, \gamma)$, то функция $\varphi(z) = 1/\psi(-z)$ удовлетворяет условию

$$\left| (\varphi(z))^{-1/\gamma} - a \right| \leq a, a > 1/2, 0 < \gamma \leq 1, z \in E.$$

Класс таких функций $\varphi(z)$ обозначим через $\widehat{\mathcal{P}}_n(a, \gamma)$. Поскольку $z \varphi'(z)/\varphi(z) = -z \psi'(-z)/\psi(-z)$, то из теоремы 1 вытекает

Следствие 1. Если функция $\varphi(z) \in \widehat{\mathcal{P}}_n(a, \gamma)$, то при $|z| = r < 1$ имеют место точные оценки

$$\left(\frac{1 - (1 - 1/a)r^n}{1 + r^n} \right)^\gamma \leq Re \varphi(z) \leq |\varphi(z)| \leq \left(\frac{1 + (1 - 1/a)r^n}{1 - r^n} \right)^\gamma,$$

$$\left| z \frac{\varphi'(z)}{\varphi(z)} \right| \leq \frac{\gamma(2 - 1/a)nr^n}{(1 - r^n)(1 + (1 - 1/a)r^n)}.$$

Экстремальная функция имеет вид $\varphi(z) = [\varphi_0(-z^n)]^{-1}$, где $\varphi_0(z)$ – функция из (10).

Заметим, что при $\gamma = 1$ функции $\varphi(z)$ из $\widehat{\mathcal{P}}_n(a, 1)$ удовлетворяют условию $Re \varphi(z) \geq \beta$, где $\beta = 1/(2a), 0 \leq \beta < 1$, и следствие 1 приводит к результатам из [5, 19], а при $\beta = 0$ и при $n = 1, 0 \leq \beta < 1$ – к результатам из [3, 20].

Радиусы выпуклости некоторых классов звездообразных функций

Определение 2. Будем считать, что функция $f(z)$ из $\mathcal{N}_n$ принадлежит классу $S_L^*(a, \gamma, n)$

тогда и только тогда, когда $z \frac{f'(z)}{f(z)} \in \mathcal{P}_n(a, \gamma)$, то есть выполняется условие

$$\left| \left(z \frac{f'(z)}{f(z)} \right)^{1/\gamma} - a \right| \leq a, a > 1/2, 0 < \gamma \leq 1, z \in E.$$

Введение данного класса было предложено Е. Папроцки и Ж. Соколом [21] как расширение класса функций [7], заданного условием $|(zf'(z)/f(z))^2 - 1| \leq 1$.

Теорема 2. Точный радиус выпуклости r_0 класса $S_L^*(a, \gamma, n)$ определяется как единственный на $(0; 1)$ корень уравнения

$$\left(\frac{1 - r^n}{1 + (1 - 1/a)r^n} \right)^\gamma - \frac{\gamma(2 - 1/a)nr^n}{(1 - r^n)(1 + (1 - 1/a)r^n)} = 0 \quad (11)$$

Доказательство. Обозначив $z \frac{f'(z)}{f(z)} = \varphi(z)$, получаем

$$1 + z \frac{f''(z)}{f'(z)} = z \frac{f'(z)}{f(z)} + z \frac{\varphi'(z)}{\varphi(z)} = \varphi(z) + z \frac{\varphi'(z)}{\varphi(z)}.$$

Поэтому в силу оценки (9) при $\mu = \eta = 1$ в круге $|z| \leq r$

$$\operatorname{Re} \left(1 + z \frac{f''(z)}{f'(z)} \right) \geq \left(\frac{1 - r^n}{1 + (1 - 1/a)r^n} \right)^\gamma - \frac{\gamma(2 - 1/a)nr^n}{(1 - r^n)(1 + (1 - 1/a)r^n)}.$$

Если r_0 – наименьший положительный корень уравнения (11), то в круге $|z| \leq r_0$ выполняется условие выпуклости $1 + \operatorname{Re} z \frac{f''(z)}{f'(z)} \geq 0$ и функция $f(z)$ является выпуклой.

Покажем, что на $(0; 1)$ уравнение (11) имеет единственный корень r_0 . Для этого преобразуем уравнение (11) к виду $\psi_0(r) - \psi_1(r) = 0$, где

$$\psi_0(r) = \left(\frac{1 - r^n}{1 + (1 - 1/a)r^n} \right)^{\gamma-1}, \quad \psi_1(r) = \frac{\gamma(2 - 1/a)nr^n}{(1 - r^n)^2}.$$

Поскольку для $z = r$ функция $\varphi_0(z)|_{z=r} = \left(\frac{1+r}{1-(1-1/a)r} \right)^\gamma$ из (10) на интервале $(0; 1)$ положительна и монотонно возрастает, то $\psi_0(r)$ на $(0; 1)$ монотонно убывает от $\psi_0(0) = 1$ до $\psi_0(1) = 0$. С другой стороны, нетрудно установить, что в силу условия $a > 1/2$ функция $\psi_1(r)$ монотонно возрастает на $(0; 1)$ от $\psi_1(0) = 0$ до $\psi_1(1) = +\infty$. Поэтому уравнение $\psi_0(r) - \psi_1(r) = 0$, а значит и (11), на $(0; 1)$ имеет единственный корень r_0 .

Для доказательства точности радиуса выпуклости определим экстремальную функцию $f_0(z)$ из уравнения $z \frac{f'(z)}{f(z)} = \varphi_0(z^n)$, где функция $\varphi_0(z)$ определена в (10). Тогда в точке $z = \sqrt[n]{-1} r$, где $r = r_0$, получаем

$$1 + \operatorname{Re} z \frac{f_0''(z)}{f_0'(z)} \Big|_{z=\sqrt[n]{-1}r} = \left(\frac{1 - r_0^n}{1 + (1 - 1/a)r_0^n} \right)^\gamma - \frac{\gamma(2 - 1/a)nr_0^n}{(1 - r_0^n)(1 + (1 - 1/a)r_0^n)} = 0.$$

Следовательно, радиус выпуклости увеличить нельзя. Теорема 2 доказана.

Заметим, что $S_L^*(1, \gamma, 1) \equiv S_L^*(\varphi_0)$, $\varphi_0(z) = (1+z)^\gamma$, $0 < \gamma \leq 1$, – есть класс лемнискатных функций $f(z)$ из [7], для которого уравнение (11) приобретает вид $(1-r)^{1+\gamma} = \gamma r$. То есть получаем теорему 2.15 из [9], а при $\gamma = 1/2$ – теорему 4 из [7].

При $\gamma = 1$ уравнение (11) преобразуется к виду $r^{2n} - (2+nc)r^n + 1 = 0$, где $c = 2 - 1/a$, откуда вытекает

Следствие 2. Если $f(z) \in S_L^*(a, 1, n)$, то есть удовлетворяет условию

$$\left| z \frac{f'(z)}{f(z)} - a \right| \leq a, a > 1/2, z \in E,$$

то точный радиус выпуклости

$$r_0 = \left(\left(2 + nc - \sqrt{nc(4+nc)} \right) / 2 \right)^{1/n}, c = 2 - 1/a.$$

При $n = 1$, $c = 1 - A$ следствие 2 дает результат статьи [12]:

$$\left| z \frac{f'(z)}{f(z)} - a \right| \leq a, a > 1/2 \Rightarrow r_0 = \frac{1}{2} \left(3 - A - \sqrt{5 - 6A + A^2} \right), A = \frac{1}{a} - 1.$$

Радиусы звездообразности некоторых классов почти звездообразных функций

В 1955 году М. Рид [13] по аналогии с классом почти выпуклых функций ввел класс CS^* почти звездообразных функций, состоящий из функций $f(z) \in \mathcal{N}$, удовлетворяющих условию

$$\operatorname{Re} \frac{f(z)}{g(z)} \geq 0, g(z) \in S^*, z \in E, \quad (12)$$

В дальнейшем в разных статьях вместо (12) рассматривались некоторые другие условия, связывающие $f(z)$ и $g(z)$, либо в качестве $g(z)$ рассматривались функции из некоторых подклассов класса S^* , либо конкретные звездообразные функции.

Определение 3. Будем считать, что функция $f(z)$ из $\mathcal{N}$ принадлежит классу $CS^*(a, \gamma, n, m)$ тогда и только тогда, когда $f(z)$ удовлетворяет условию

$$\left| \left((1 - z^n)^m \frac{f(z)}{z} \right)^{1/\gamma} - a \right| \leq a, a > \frac{1}{2}, 0 < \gamma \leq 1, m \geq 0, n \in \mathbb{N}. \quad (13)$$

Если $nm \leq 2$, то функция $g(z) = z/(1 - z^n)^m$ является звездообразной в круге E .

Действительно, для функции $g(z)$ выполняется неравенство

$$\operatorname{Re} \frac{zf'(z)}{f(z)} = 1 + nm \operatorname{Re} \frac{z^n}{1 - z^n} \geq 1 - \frac{nm}{2} \geq 0, z \in E,$$

при $nm \leq 2$. Поэтому функция $g(z)$ является звездообразной в E , то есть функции $f(z)$ из $CS^*(a, \gamma, n, m)$ являются почти звездообразными.

Частные случаи класса $CS^*(a, \gamma, n, m)$ исследовались в статьях [10, 11, 15], где найдены их радиусы звездообразности относительно различных подклассов класса S^* (например,

относительно S_β^* , S_γ^* и других). В качестве примера найдем радиусы звездообразности порядка α класса $CS^*(a, \gamma, n, m)$.

Теорема 3. Точный радиус $r^*(\alpha)$ звездообразности порядка α класса функций $f(z) \in CS^*(a, \gamma, n, m)$ определяется как единственный на $(0; 1)$ корень уравнения

$$1 - \frac{nmr^n}{1+r^n} - \frac{\gamma(2-1/a)r}{(1-r)(1+(1-1/a)r)} - \alpha = 0. \quad (14)$$

Доказательство. Обозначим $\varphi(z) = \frac{f(z)}{g(z)}$. Тогда

$$z \frac{f'(z)}{f(z)} = z \frac{g'(z)}{g(z)} + z \frac{\varphi'(z)}{\varphi(z)} = 1 + \frac{nmz^n}{1-z^n} + z \frac{\varphi'(z)}{\varphi(z)}. \quad (15)$$

В силу этого на основании теоремы 1 при $\mu = 0, \eta = 1, n = 1$ в круге $|z| \leq r$ получаем

$$\operatorname{Re} z \frac{f'(z)}{f(z)} \geq 1 - \frac{nmr^n}{1+r^n} - \frac{\gamma(2-1/a)r}{(1-r)(1+(1-1/a)r)} = \alpha.$$

Если $|z| \leq r$, где $r = r^*(\alpha)$ – корень уравнения (14), то $\operatorname{Re} z \frac{f'(z)}{f(z)} \geq \alpha$ и $f(z)$ является звездообразной порядка α в круге $|z| \leq r^*(\alpha)$.

Как и при доказательстве теоремы 2 нетрудно доказать, что уравнение (14) на $(0; 1)$ имеет единственный корень $r^*(\alpha)$. Покажем, что радиус звездообразности $r^*(\alpha)$ увеличить нельзя.

Если n является нечетным, то для функции

$$f_0(z) = \frac{z}{(1-z^n)^m} \left(\frac{1+z}{1-(1-1/a)z} \right)^\gamma \in CS^*(a, \gamma, n, m)$$

в точке $z = -r$, где $r = r^*(\alpha)$, получаем:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} z \frac{f'_0(z)}{f_0(z)} \Big|_{z=-r} &= 1 + \operatorname{Re} \left(\frac{nmz^n}{1-z^n} + \frac{\gamma(2-1/a)z}{(1+z)(1-(1-1/a)z)} \right) \Big|_{z=-r} = \\ &= 1 - \frac{nmr^n}{1+r^n} - \frac{\gamma(2-1/a)r}{(1-r)(1+(1-1/a)r)} = \alpha. \end{aligned}$$

Если n – четное, то рассмотрим два случая.

Пусть $n = 4k, k \in \mathbb{N}$. Тогда $i^n = 1$. Обозначим $\varepsilon = i^{\frac{m+2}{m}}$. Тогда для $z = -\varepsilon r$ имеем $z^n = -r^n, \varepsilon^{-1}z = -r$. Если же $n = 2(2k-1), k \in \mathbb{N}$, то $i^n = -1$ и, если обозначить $\varepsilon = -i$, то для $z = -\varepsilon r = ir$ опять получаем $z^n = -r^n, \varepsilon^{-1}z = -r$,

$$f_1(z) = \frac{z}{(1-z^n)^m} \left(\frac{1+\varepsilon^{-1}z}{1-(1-1/a)\varepsilon^{-1}z} \right)^\gamma \in CS^*(a, \gamma, n, m)$$

в точке $z = -\varepsilon r$ находим

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} z \frac{f_1'(z)}{f_1(z)} \Big|_{z=-\varepsilon r} &= 1 + \operatorname{Re} \left(\frac{nmz^n}{1-z^n} + \frac{\gamma(2-1/a)\varepsilon^{-1}z}{(1+\varepsilon^{-1}z)(1-(1-1/a)\varepsilon^{-1}z)} \right) \Big|_{z=-\varepsilon r} = \\ &= 1 - \frac{nmr^n}{1+r^n} - \frac{\gamma(2-1/a)r}{(1-r)(1+(1-1/a)r)} = \alpha. \end{aligned}$$

Во всех случаях в условии звездообразности порядка α достигается знак равенства.

Поэтому радиус звездообразности $r^*(\alpha)$ является точным. Теорема 3 доказана.

Класс $CS^*(a, \gamma, n, m)$ является обобщением классов $\mathcal{K}_1, \mathcal{F}_3, \mathcal{F}_4$ из [10–11], заданных соответственно условиями

$$\operatorname{Re}\{(1-z^2)f(z)/z\} \geq 0, \operatorname{Re}\{(1-z)^2f(z)/z\} \geq 0, \operatorname{Re}\{(1-z)f(z)/z\} \geq 0.$$

При $\gamma = 1, a \rightarrow \infty$ и соответствующем выборе n, m получаем радиусы звездообразности порядка α классов $\mathcal{K}_1, \mathcal{F}_3, \mathcal{F}_4$, полученные в [10–11].

При $m = 0, \alpha = 0$ из теоремы 3 получаем точный радиус звездообразности

$$r^* = \begin{cases} \frac{1 + \gamma(2a-1) - \sqrt{(1 + \gamma(2a-1))^2 + 4a(a-1)}}{2(1-a)}, & a \neq 1, \\ 1 + \gamma, & a = 1, \end{cases}$$

класса функций $f(z) \in \mathcal{N}$, удовлетворяющих условию

$\left| \left(\frac{f(z)}{z} \right)^{1/\gamma} - a \right| \leq a, a > \frac{1}{2}, 0 < \gamma \leq 1$. Для случая $\gamma = 1$ этот результат получен в [15], а при $\gamma = a = 1$ – в [14].

Заключение

В настоящей статье вводится класс $\mathcal{P}_n(a, \gamma)$ регулярных в круге E функций

$$\varphi(z) = 1 + c_n z^n + c_{n+1} z^{n+1} + \dots, n \geq 1, \text{ удовлетворяющих условию}$$

$\left| \left(\varphi(z) \right)^{1/\gamma} - a \right| \leq a, a > 1/2, 0 < \gamma \leq 1$, обобщающий известный класс Гоела и Шаффера. В классе $\mathcal{P}_n(a, \gamma)$ установлены точные оценки при $|z| = r, 0 < r < 1$, функционалов (1).

В качестве примеров применения данных оценок найдены точные радиусы выпуклости (или звездообразности) некоторых классов звездообразных или почти звездообразных функций. Все полученные результаты являются точными и обобщают ранее известные результаты.

Известно, что решение многих задач на подклассах однолистных функций может быть сведено к задачам минимизации или максимизации некоторых функционалов, связанных с исследуемыми классами функций. В этом плане применение полученных в статье оценок указанных выше функционалов является перспективным, так как позволяет в дальнейшем решить целый ряд экстремальных задач, связанных с различными подклассами однолистных функций.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 MacGregor T.H. A class of univalent functions // Trans. Amer. Math. Soc. – 1964. – № 15. – P. 311–317.
- 2 MacGregor T.H. Functions whose derivative has a positive real part // Trans. Amer. Math. Soc. – 1962. – № 104. – P. 532–537. doi: <https://doi.org/10.1090/s0002-9947-1962-0140674-7>
- 3 MacGregor T.H. The radius of univalence of certain analytic functions // Proc. Amer. Math. Soc. – 1963. – № 14. – P. 514–520.
- 4 Goel R.M. A class of close-to-convex functions // Czechoslovak Math. J. – 1968. – Vol. 18. – № 93. – P. 104–116. doi: <https://doi.org/10.21136/CMJ.1968.100815>
- 5 Shaffer D.B. Distortion theorems for a special class of analytic functions // Proc. Amer. Math. Soc. – 1973. – Vol. 39. – № 2. – P. 281–287. doi: <https://doi.org/10.2307/2039632>
- 6 Robertson M.S. Certain classes of starlike functions // Michigan Math. J. – 1985. – Vol. 32. – № 2. – P. 135–140.
- 7 Sokół J., Stankiewicz J. Radius of convexity of some subclasses of strongly starlike functions // Zeszyty Nauk. Politech. Rzeszowskiej Mat. – 1996. – № 19. – P. 101–105.
- 8 Janowski W. Extremal problems for a family of functions with positive real part and for some related families // Ann. Polon Math. – 1970. – Vol. 23. – P. 159–177.15.
- 9 Abolfathi M.A. New subclasses of Ozaka's convex functions // Int. J. Nonlinear Anal. Appl. – 2022. – P. 1–11. <http://dx.doi.org/10.22075/ijnaa.2022.28231.4081>
- 10 Khatter K., Lee S. K., Ravichandran V. Radius of starlikeness for classes of analytic functions // arXiv preprint arXiv:2006.11744. – 2020. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.11744>
- 11 Sebastianc A., Ravichandran V. Radius of starlikeness of certain analytic functions // Math. Slovaca 71. – 2021. – № 1. – P. 83–104. doi: [10.1515/ms-2017-0454](https://doi.org/10.1515/ms-2017-0454)
- 12 Singh V., Goel R.M. On radii of convexity and starlikeness of some classes of functions // J. Math. Soc. Japan. – 1971. – № 23. – P. 323–339. doi: <https://doi.org/10.2969/jmsj/02320323>
- 13 Reade M.O. On close-to-close univalent functions // Michigan Math. J. – 1955. – № 3. – P. 59–62.
- 14 MacGregor T.H. The radius of univalence of certain analytic functions, II // Proc. Am. Math. Soc. – 1963. – № 14. – P. 521–524. doi: <http://dx.doi.org/10.1090/s0002-9939-1963-0148892-5>
- 15 Chichra P. On the radii of starlikeness and convexity of certain classes of regular functions // J. of the Australian Math. Soc. – 1972. – Vol. 13. – № 2. – P. 208–218. doi: <https://doi.org/10.1017/S1446788700011290>
- 16 Майер Ф.Ф., Тастанов М.Г., Утемисова А.А., Байманкулов А.Т. Об обобщении некоторых классов почти выпуклых и типично вещественных функций // Вестник ТГУ, Серия «Математика и механика», Томск. – 2023. – № 84. – С. 147–156. doi: [10.17223/19988621/85/1](https://doi.org/10.17223/19988621/85/1)
- 17 Nunokawa M., Sokół J. On the order of strong starlikeness and the radii of starlikeness for of some close-to-convex functions // Analysis and Mathematical Physics. – 2019. – № 9. – P. 2367–2378. doi: <https://doi.org/10.1007/s13324-019-00340-8>
- 18 Ali R.M., Ravichandran V., Sharma K. Starlikeness of analytic functions with subordinate ratios // Hindawi J. of Math., 2021, Article ID 8373209. – P. 1–8. <https://doi.org/10.1155/2021/8373209>
- 19 Shah G.M. On the univalence of some analytic functions // Pacific J. Math. – 1972. – Vol. 43. – № 1. – P. 239–250. doi: <https://doi.org/10.2140/pjm.1972.43.239>
- 20 Shaffer D.B. On bounds for the derivative of analytic functions // Proc. Amer. Math. Soc. – 1973. – № 37. – P. 517–520. doi: <http://dx.doi.org/10.11568/kjm.2021.29.4.785>
- 21 Paprocki E., Sokol J. The extremal problems in some subclass of strongly starlike functions // Zeszyty Nauk. Politech. Rzeszowskiej Mat. – 1996. – № 20. – P. 89–94.

REFERENCES

- 1 MacGregor, T.H. A class of univalent functions. Trans. Amer. Math. Soc., 15, 311-317 (1964).
- 2 MacGregor, T.H. Functions whose derivative has a positive real part. Trans. Amer. Math. Soc., 104, 532–537 (1962). doi: <https://doi.org/10.1090/s0002-9947-1962-0140674-7>
- 3 MacGregor, T.H. The radius of univalence of certain analytic functions. Proc. Amer. Math. Soc., 14, 514–520 (1963).
- 4 Goel, R.M. A class of close-to-convex functions. Czechoslovak Math. J., 18(93), 104–116 (1968). doi: <https://doi.org/10.21136/CMJ.1968.100815>

- 5 Shaffer, D.B. Distortion theorems for a special class of analytic functions. *Proc. Amer. Math. Soc.*, 39(2), 281–287 (1973). doi: <https://doi.org/10.2307/2039632>
- 6 Robertson, M.S. Certain classes of starlike functions. *Michigan Math. J.*, 32(2), 135–140 (1985).
- 7 Sokół, J. and Stankiewicz, J. Radius of convexity of some subclasses of strongly starlike functions. *Zeszyty Nauk. Politech. Rzeszowskiej Mat.*, 19, 101–105 (1996)
- 8 Janowski, W. Extremal problems for a family of functions with positive real part and for some related families. *Ann. Polon Math.*, 23, 159–177. (1970)
- 9 Abolfathi, M.A. New subclasses of Ozaka's convex functions. *Int. J. Nonlinear Anal. Appl.*, 1–11 (2022). <http://dx.doi.org/10.22075/ijnaa.2022.28231.4081>
- 10 Khatter, K., Lee, S. K. and Ravichandran, V. Radius of starlikeness for classes of analytic functions // arXiv preprint arXiv:2006.11744, (2020) doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.11744>
- 11 Sebastianc, A. and Ravichandran V. Radius of starlikeness of certain analytic functions. *Math. Slovaca* 71, 1, 83–104 (2021). doi: 10.1515/ms-2017-0454
- 12 Singh, V. and Goel, R.M. On radii of convexity and starlikeness of some classes of functions. *J. Math. Soc. Japan*, 23, 323–339 (1971). doi: <https://doi.org/10.2969/jmsj/02320323>
- 13 Reade, M.O. On close-to-close univalent functions. *Michigan Math. J.*, 3, 59–62 (1955).
- 14 MacGregor, T.H. The radius of univalence of certain analytic functions, II. *Proc. Am. Math. Soc.*, 14, 521–524 (1963). doi: <http://dx.doi.org/10.1090/s0002-9939-1963-0148892-5>
- 15 Chichra, P. On the radii of starlikeness and convexity of certain classes of regular functions. *J. of the Australian Math. Soc.*, 13(2), 208–218 (1972). doi: <https://doi.org/10.1017/S1446788700011290>
- 16 Maiyer F.F., Tastanov M.G., Utemisova A.A. and Baimankulov A.T. Ob obobshhenii nekotorykh klassov pochti vypuklykh i tipichno veshhestvennykh funktsij [On the generalization of some classes of close-to-convex and typically real functions]. *Zhurnal «Vestnik TGU», seriya «Matematika. Mehanika»*, Tomsk, 80, 147–156 (2023). (in Russian) doi: 10.17223/19988621/85/1
- 17 Nunokawa, M. and Sokół, J. On the order of strong starlikeness and the radii of starlikeness for of some close-to-convex functions. *Analysis and Mathematical Physics*, 9, 2367–2378 (2019). doi: <https://doi.org/10.1007/s13324-019-00340-8>
- 18 Ali, R.M., Ravichandran, V. and Sharma, K. Starlikeness of analytic functions with subordinate ratios. *Hindawi J. of Math.*, Article ID 8373209, 1–8 (2021). <https://doi.org/10.1155/2021/8373209>
- 19 Shah, G.M. On the univalence of some analytic functions. *Pacific J. Math.*, 43(1), 239–250 (1972). doi: <https://doi.org/10.2140/pjm.1972.43.239>
- 20 Shaffer, D.B. On bounds for the derivative of analytic functions. *Proc. Amer. Math. Soc.*, 37, 517–520 (1973). doi: <http://dx.doi.org/10.11568/kjm.2021.29.4.785>
- 21 Paprocki, E. and Sokół, J. The extremal problems in some subclass of strongly starlike functions. *Zeszyty Nauk. Politech. Rzeszowskiej Mat.*, 20, 89–94 (1996).

¹Майер Ф.Ф.,

ф.-м.ф.к., профессор, ORCID ID 0000-0002-2278-2723, e-mail: maiyer@mail.ru

¹Тастанов М.Г.,

ф.-м.ф.к., профессор, ORCID ID 0000-0003-1926-8958, e-mail: tastao@mail.ru

¹Утемисова А.А.,

пед.ф.к., ORCID ID 0000-0001-5143-0260, e-mail: anar_utemisova@mail.ru

¹Ысмағұл Р.С.,

ф.-м.ф.к., профессор, ORCID ID 0009-0007-6594-7958, e-mail: ismagulr@mail.ru

¹«Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ,
Қостанай қ., 110000, Қазақстан

ЖҰЛДЫЗ ПІШІНДІ, ЖАРТЫЛАЙ ЖҰЛДЫЗ ПІШІНДІ ФУНКЦИЯЛАРДЫҢ КЕЙБІР СЫНЫПТАРЫНЫҢ ДӨҢЕС РАДИУСЫ МЕН ЖҰЛДЫЗ ПІШІНДІЛІГІН ЖӘНЕ ТҰРАҚТЫ ФУНКЦИЯНЫ НАҚТЫ БАҒАЛАУ

Аңдатпа

Бірпаракты функциялардың ішкі сыныптарына арналған көптеген есептерде зерттелетін бірпаракты функциялардың ішкі сыныптарына байланысты белгілі бір функционалдарды минимизациялау

немесе максимизациялау есептеріне айналдыруға болатыны белгілі. Көбінесе мұндай функционалдық тұрақты функциялардың логарифмдік туындысына тән. Мақалада Р.Гозль мен Д. Шаффердің тұрақты функциялардың атақты сыныбын жалпылайтын, мәндері шекарада 0 нүктесі бар нақты оське симметриялы шеңберде орналасқан, қатарларға ыдырауы n -ші дәрежеден басталатын, нақты бөлікті бірлік шеңберіндегі тұрақты функциялардың екі параметрлі ішкі сыныбы енгізілді. Функциялардың бұл сыныбында әртүрлі функциялардың, соның ішінде логарифмдік туындының нақты бағалары алынған. Осы бағалаулардың қосымшалары ретінде сынып арқылы берілген жұлдыз тәрізді және жартылай жұлдыз тәрізді функциялардың әртүрлі сыныптарының дөнес (немесе жұлдыз тәрізді) дәл радиустары табылды. Алынған барлық нәтижелер дәл және бұрын белгілі болған көптеген нәтижелерді қорытындылайды. Мақалада алынған бағаларды қолдану бірпарақты функциялардың әртүрлі ішкі сыныптарымен байланысты экстремалды есептер теориясына үлес қосқандықтан перспективаға ие.

Тірек сөздер: тұрақты функцияларды бағалау, бірпарақты функциялар, жұлдыз тәрізді функциялар, дөнес радиусы, жұлдыз тәрізді радиус

¹**Maiyer F.F.,**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, ORCID ID 0000-0002-2278-2723,
e-mail: maiyer@mail.ru

¹**Tastanov M.G.,**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, ORCID ID 0000-0003-1926-8958,
e-mail: tastao@mail.ru

¹**Utemissova A.A.,**

Candidate of Pedagogical Sciences, ORCID ID 0000-0001-5143-0260,
e-mail: anar_utemisova@mail.ru

¹**Ysmagul R.S.,**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, ORCID ID 0009-0007-6594-7958,
e-mail: ismagulr@mail.ru

¹Non-commercial joint-stock company «Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University»,
Kostanay 110000, Kazakhstan

EXACT ESTIMATES OF REGULAR FUNCTIONS AND RADII OF CONVEXITY AND STARLIKENESS OF SOME CLASSES OF STARLIKE AND CLOSE-TO-STARLIKE FUNCTIONS

Abstract

It is known that many problems for subclasses of univalent functions can be transformed into problems of minimizing or maximizing some functionals associated with the studied subclasses of univalent functions. Often, the logarithmic derivative of regular functions acts as such a functional. In this paper, we introduce a two-parameter subclass $\mathcal{P}_n(a, \gamma)$ of functions regular in the unit circle with a positive real part, the expansion into a series of which begins with the n th degree. This class generalizes the well-known R.Goel and D.Shaffer class of regular functions whose values are contained in a circle symmetric with respect to the real axis containing the point 0 on the boundary. In this class of functions, exact estimates of various functionals, including the logarithmic derivative, are obtained. As applications of these estimates, the exact radii of convexity (or starlikeness) of various classes of starlike and close-to-starlike functions given using the class $\mathcal{P}_n(a, \gamma)$ are found. All the results obtained are accurate and generalize many of the previously known results. The application of the estimates obtained in the article is promising, as it contributes to the theory of extreme problems associated with various subclasses of univalent functions.

Key words: estimates of regular functions, univalent functions, starlike functions, radius of convexity, radius of starlikeness.

UDC 519.62

IRSTI 27.35.21; 27.35.47; 27.41.19

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-139-151>

^{1*}**Shalymova A.E.,**

Master student, ORCID ID: 0009-0007-3888-6686, e-mail: shalymova.aigerim@gmail.com

¹**Issakhov A.A.,**

PhD, Professor, ORCID ID: 0000-0002-1937-8615, e-mail: alibek.issakhov@gmail.com

¹Kazakh British Technical University, 050000, Almaty, Kazakhstan

NUMERICAL MODELING OF OIL AND PETROLEUM PRODUCTS DISTRIBUTION IN CASE OF AN EMERGENCY SPILL ON THE WATER SURFACE

Abstract

Water pollution is an urgent problem today. The amount of water pollution with petroleum products is growing as oil production increases, oil transportation becomes globalized, and new fields are put into operation. This has a detrimental effect on the ecosystem. The aim of the work is to numerically simulate the spread of oil product on the water surface, which can help improve the efficiency of planning and operational management of measures for the localization and elimination of emergency spills. Different emission rates of the pollutant (gasoline) were considered in order to investigate how the pollution area varies for each speed. To model this problem, the Navier-Stokes equations for an incompressible fluid are used as a mathematical model. The numerical solution of the Navier-Stokes equations was achieved using a SIMPLE algorithm. A test problem was performed to verify the numerical method and the mathematical model. The calculation results were compared with the result of the experiment and showed an excellent match.

Key words: mathematical modelling, oil spill, water pollution.

Introduction

Water is the basis for human life and health and everyday functions. We have a lot of it on Earth. Nevertheless, water pollution is a pervasive problem with several sources consisting of industrial unwanted emissions, agriculture, and waste from urban lives. [1] The foremost hazard this is harmful petroleum products, which can have very bad effect on ecosystems, human health and economy. The instances of water poisoning can occur when petroleum products, such as gasoline, diesel, lubricants, and crude oil are dumped either intentionally or accidentally into a water body. Among the most characteristic types of pollution by petroleum in the water bodies is the oil spills.

Oil spills are a relatively common incident however, we may tend to underestimate how often they happen from diverse sources. Along with oil production and transportation, and especially during oil field operations, the annual number of oil spills continues to increase. Every year, around the world, oil spills happen up to 70,000 times. While most of them are relatively small in scale, take fuelling deep-sea ships, for example. On the other hand, when oil spills occur on the coasts, mangroves, and bogs which are very sensitive, they are deadly with long-lasting effects. Oil spills of larger amounts can cause ecological catastrophe with big consequences for our environment and economy. Therefore, we should take measures for oil spill prevention. This type of disaster is usually caused by pipeline cussing, crude oil spills from super tankers and booms occurring during drilling operations. These stories, which eventually occur in profusion and enormous volumes, have terrible and multiple effects simultaneously on the ecosystems and economies. Oil spillage potentially takes place throughout the course of its extraction, ranging from drilling to transportation and processing. The main danger, that occurs in the process, is of planetary character.

There is a wide variety of organisms that thrive in these spills in marine environments whether aquatic, land-based, or airborne. The same serves as the blocker of sunlight for the water with a reduction in the oxygen content in the water. On birds and mammals, the oil harms feather and fur, but it is not destructive to the structure which does not fall off (shedding), thus animals can die from hypothermia. The fish early in life are more sensitive to the oil effects as compared to adult fish thus in instances of significant exposure to a huge number of fish the initial stage of death occurs. Another danger is oil polluting the food chain it can be fatal to many species recovering the habitats even after the oil spill is eliminated is possible.

There are many studies which speak about this problem. [2] presents the finite element model and the COMSOL multi-physics software for 1st order differential leak detection in crude oil pipelines directly. The work [3, 4] encompasses a detailed and comprehensive mathematical model of the river pollution arising from the pipeline rupture. They research the role of different water body's characteristics as well how they affect hydrocarbons movement in the water system.

The model of the movement of an oil spill along the Bosphorus Strait, which is a very important port on Turkey, is also a responsibility of them [5]. The model serves as an informative illustration of the movement of the oil spill which reveals that in just four hours the oil spill can reach both banks of the street already, implying emergency response should be implemented after the accident about the oil spill. In [6] ADIOS and GNOME models are among the tools that AWI uses to simulate oil spill dynamics in New York Bay with the intention of assessing its environmental consequences. This part concentrates on the behaviour of oils of various types under different circumstances, at the same time highlighting the significance of environmental features, for example, wind, and currents in shaping spill paths and decomposition processes. The experiment says the light oils like gasoline are evaporating swiftly, the risk of contamination is less, and heavy oils are not. In [7] is a paper that shows how oil spill modelling can be done using adjoin-methods in an attempt to find the source of emissions and the time of their entry. It sorts out the advection-diffusion equation to convey how oil spill's function and offers a brand-new technique for locating the pollution origin by numerical simulation. The effectiveness of this method comes out of examples as shown in the case studies of the Vietnamese coast. [8] uses geospatial hydrodynamic and oil spill models to investigate the environmental effects of the oil spill at Tramandai Beach. The simulation takes place by simulating a spill and following wind and currents contributes to the oil movements and dispersion. Data are confirming that the oil hit the shoreline in 10 hours, where wind and currents were responsible for the right timing and destination of the spill ultimately.

Some studies that mean prediction of oil spills and assessment of risks are conducted. In [9] discusses the hazard of spilling oil into the Bohai sea focusing on the risk of shipping and offshore drilling catastrophic disasters. Coinciding spatially and historically important data, the research detects the areas of high spill risks and gives a probabilistic model for assessing their spill probabilities. Based on this detection, seven high-risk locations have been shown as strategic places where spill response equipment might be stored. In [10] aims to precisely reproduce the spread of oil spills as well as processes such as surface spreading, transport by advection, turbulent diffusion, evaporation and interaction with shorelines. It is completed with the 3-D hydrodynamics and a wave model in order to increase the hydro-environmental simulation precision. The case study, designed to imitate an oil leak in Dalian, is bound to portray the power of the model to predict the dispersion and fate of the oil. Considering [11] the model performing with local hydrological data and taking into consideration seasonal variations, the model successfully predicted the estimated movement of contaminants from various sources like Chernaya River and Gollandiya Bay. The season analysis of pollutant diffusion reveals that the local water circulation patterns and the wind conditions basically determine the fluctuations of pollutant spread. In [12], they are deepened taking advantage of 2D and 3D transfer-diffusion equations, estimating the behaviour of the pollutants and calculating risk level.

In [13] showcased the role of mathematical models as a primary tool in the management of environmental disasters, such as an oil spill, through the illustration of their efficiency by predicting

pollutant behaviour and provision of necessary information for mitigation and clean-up activities. Many authors have written papers to add to the existing knowledge base of oil spill behaviour in marine ecological systems and its effects. In [14] provide detailed information on how oil spills affect the flow paths and oil distribution in the immediate spill area and nearby flow domains, which in turn improve the understanding of the dynamics of oil spills and are an avenue for the development of the management or mitigation of oil-in-water spills. In [15], to construct a mathematical model that is based on the principle of linking ordinary differential equations to identify and predict the consequences of exposure to oil pollutants in the marine environment, the MATLAB software was used for the solution [16]. This work was concentrated on the creation of a coded model for oil spill drift modelling in coastal waters. In [17] researched the spreading of oil pollutants throughout the Rioni River and Black Sea. In [18] the dynamic when oil spills under different scenarios such as continuous low-intensity releases as well as high-intensity short-term accidents have been presented in detail with regard to oil emission at the sea surface and seabed. In [19], this case involved Deepwater Horizon oil leak modeling which included hydrodynamic, wave, and weather conditions in order to simulate oil spread. In [20] carried out the oil spill dynamics with the MOHID software used and assessed the São Sebastião area, which is thought to be the most important marine terminal in Brazil. In [21] constructed a computer model to model the temporal and spatial alterations of pollutants after water pollution incidents. In [22] examined the pollution in the Ganges River, especially in the urbanized areas of cities including Kanpur and Varanasi.

Main provisions

This study focuses on the mathematical and computational modelling of oil and petroleum product dispersion in the event of accidental spills on water surfaces. The primary aim of this research is to conduct numerical simulations of petroleum product spread on water surfaces, with the objective of enhancing the efficiency of planning and operational management of measures for the containment and remediation of spill incidents.

To achieve this objective, the Navier-Stokes equations were employed for modelling purposes. These equations are fundamental in fluid dynamics and are particularly suitable for simulating the behaviour of oil spills on water bodies. Furthermore, the SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) method was utilized for numerical solution, chosen for its effectiveness in addressing the complexities associated with fluid flow problems.

The findings of the simulations demonstrate a direct correlation between the extent of contamination and the rate of discharge. Specifically, an increase in discharge velocity by a factor of two resulted in a 17% increase in contamination area, while a decrease in velocity by the same factor led to a 12% reduction in contamination area. These results highlight the significance of considering discharge velocity as a critical parameter in the planning and execution of strategies for the localization and mitigation of spill incidents.

Research area

We are considering the area where the Ural River flows into the Caspian Sea. The Ural is a river that has its source in the west of Russia and runs through different regions, including those of the countries, Russia, and Kazakhstan. The length of the Ural River is 2,428 km and its watershed has 231 land area. The amount of annual runoff is around 12,6 km^3 , and the water at the mouth is 400 m^3/s .

The river gets back 94% of water resources from the melting of snow mass in the mountains and in lower elevations and 6% supply comes from groundwater and from underground water sources. The river's water resources are used for irrigation of the large city people of which the forming of the reservoirs along the Urals River has been done as well as communications of water utilities and

sewage treatment plants have been created to be seated on the dams. In the regions of oil and gas production, chemical raw materials processing, including competitive industries arise at the Ural River shores.



Figure 1 – Location of the research area.

Materials and Methods

Mathematical model

The mathematical model contains a non-stationary equation of continuity, momentum, heat transfer, and concentration transfer.

Continuity equation:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Momentum equations:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial(-\rho \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (2)$$

Heat transfer equation:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial(-\rho \overline{u'_j T'})}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

Concentration transfer equation:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j C)}{\partial x_j} = \frac{\partial(-\rho \overline{u'_j C'})}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

here, u_i – velocity, μ – viscosity, ρ is the density of the liquid, and P is the fluid pressure, T – temperature of the liquid, D – the diffusion coefficient, $\overline{u'_i u'_j}$ – turbulent fluxes of velocity, $\overline{u'_j T}$, $\overline{u'_j C}$ – turbulent fluxes of heat and concentration of pollutant (benzene).

The given set of equations is a representation of a physical system in the Cartesian coordinate system x_i , where i take the values 1, 2, and 3. The system consists of 3 velocity components, namely u_i .

Numerical modelling

Along the Zhaiyk River in the proximity of Atyrau city where the pollution is going to take place 2D models of the pollution made it possible to model the processes. Notably, even the most powerful computing clusters cannot feasibly execute full 3D modelling for many real-world scenarios. The area which is modeled with the aid of the 2D model can be seen in Figure 1. Using a two-dimensional model allows us to coarsely evaluate the profile of flow fields with temperature and pollutants as well as chemical reactions directed in different directions.

The SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) algorithm was used as a numerical algorithm. Complete SIMPLE algorithm includes following steps:

1. Guess the pressure field p^* and solve the momentum equations to obtain u^{**}, v^{**} .

$$\begin{aligned}\frac{u^{**} - u^n}{\Delta t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial x} + L_1 \Rightarrow u^{**} = u^n + \Delta t \left(-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial x} + L_1 \right) \\ \frac{v^{**} - v^n}{\Delta t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial y} + L_2 \Rightarrow v^{**} = v^n + \Delta t \left(-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial y} + L_2 \right)\end{aligned}$$

2. Solve the p' equation by substitute into the continuity equation and we get the Poisson equation

$$\begin{aligned}\frac{u^{n+1} - u^{**}}{\Delta t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x} \Rightarrow u^{n+1} = u^{**} - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x} \\ \frac{v^{n+1} - v^{**}}{\Delta t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial y} \Rightarrow v^{n+1} = v^{**} - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial y}\end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p'}{\partial y^2} = \frac{\rho}{\Delta t} \left(\frac{\partial u^{**}}{\partial x} + \frac{\partial v^{**}}{\partial y} \right)$$

3. Correct pressure field $p = p' + p^*$.
4. Correct velocity field $u = u' + u^*$; $v = v' + v^*$.

This algorithm is widely used to solve Navier-Stokes equations.

Model verification

To test the mathematical model and numerical algorithm, a test problem was performed. The problem was to develop an open channel and lateral tap model from [23]. The reactor comprised two channels and is shown in the Figure 2. It was assumed that the diameter of the pipe was 5 mm which is equal to D . In addition, the vertical channel was positioned exactly on the X-axis in the middle at 100 mm ($20D$) from the beginning of the horizontal channel. The width of the main section and the height of the pipe were 120 mm ($24D$), and its length was 505 mm ($101D$). At first, the temperature of the warm water was 25°C , and the temperature of the hot water was 81°C . Figure 2 shows a laminar jet that enters the channel in the frontal direction. The conditions for the pipe and crossflow were set using 2 distinct target velocities. For example, the velocity in the horizontal duct was set at 2,005 m/s, and in the vertical duct – 11,969 m/s. To model this problem numerically, the viscosity of the water was set to $0,001003 \text{ kg } m^2/s$ and the density to $998,2 \text{ kg}/m^3$.

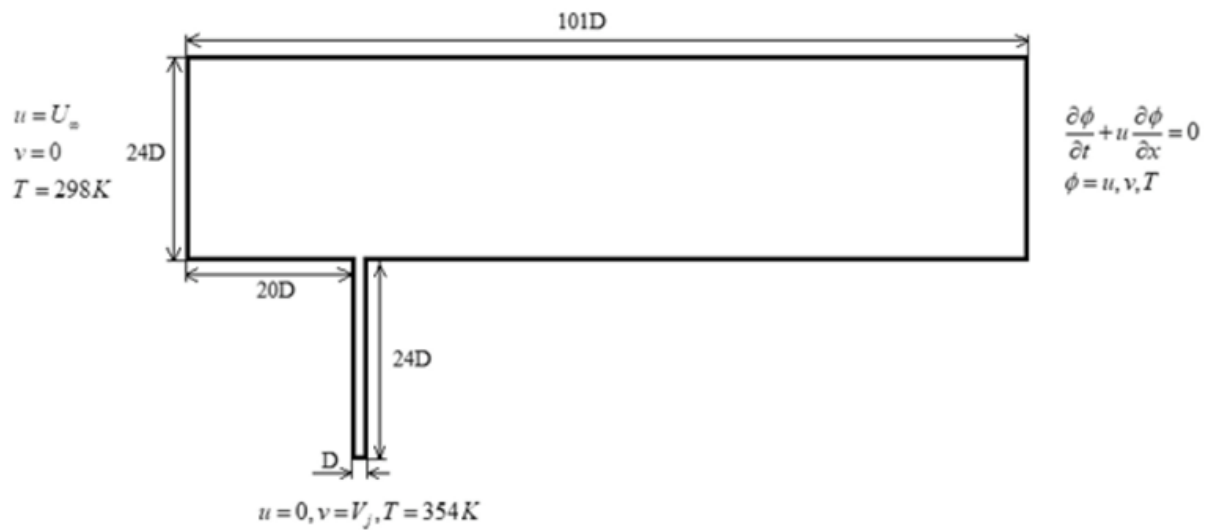


Figure 2 – Geometry and boundary conditions of the test problem.

$$Q = \frac{T - T_{\infty}}{T_j - T_{\infty}}$$

$$U = \frac{U - U_{\infty}}{U_{max} - U_{\infty}}$$

here, T_{∞} represents the ambient temperature, T_j denotes the pipe temperature, Velocity U indicates the velocity across the X-axis, and U_{max} signifies the highest value of the velocity across the X-axis.

Figure 3 (p. 145) represents a comparison of experimental data with numerical solutions from different grid sizes. To be more precise, the grid sizes of 2,5 mm, 3 mm, and 4 mm were used. It can be seen from the figure that the results with a grid size of 4 mm where 4034 nodes and 3848 elements coincide well with the experimental data. To completely match the algorithm with a test problem, the numerical results were compared with empirical results [24], as well as with computational results of other researchers [23] for different cross-section dimensions ($X/D = 2, 4, 6, 8, 10$).

Figure 4 (p. 146) represents dimensionless temperature profiles in the vertical direction. The outcomes of the numerical modeling exhibit favourable alignment with the empirical findings. It is evident from the collected data that the numerical results reasonably correspond to the experimental data. For the numerical solution of this problem, the SST k-w turbulent model was used.

Numerical results of pollution of the Caspian Sea

A computational framework was designed to numerically model the concentration transfer of oil product (benzene) in Zhaiyk River and then in the Caspian Sea. Figure 1 represents the satellite image of the area we are concerned, while Figure 4 shows the geometry of the region. The computational area includes a span of 6500000 x-axis and 4082500 y-axis, respectively. This equals 1062500 m x 648100 m. The area of the research area was 6886062500 m^2 . The casework included 3 ways of pollutant liberation with varied rate values. The computational grid of 466852 tetrahedral elements 10 m per cell, evenly spread over the total river region and sea surface extending toward 200 m constructed the design. Furthermore, the grid was refined in the direction of the product out flux partition along with the element size of 0,1 m for this particular zone. This refinement was thereby done to improve the precision of the mathematically based outcomes.

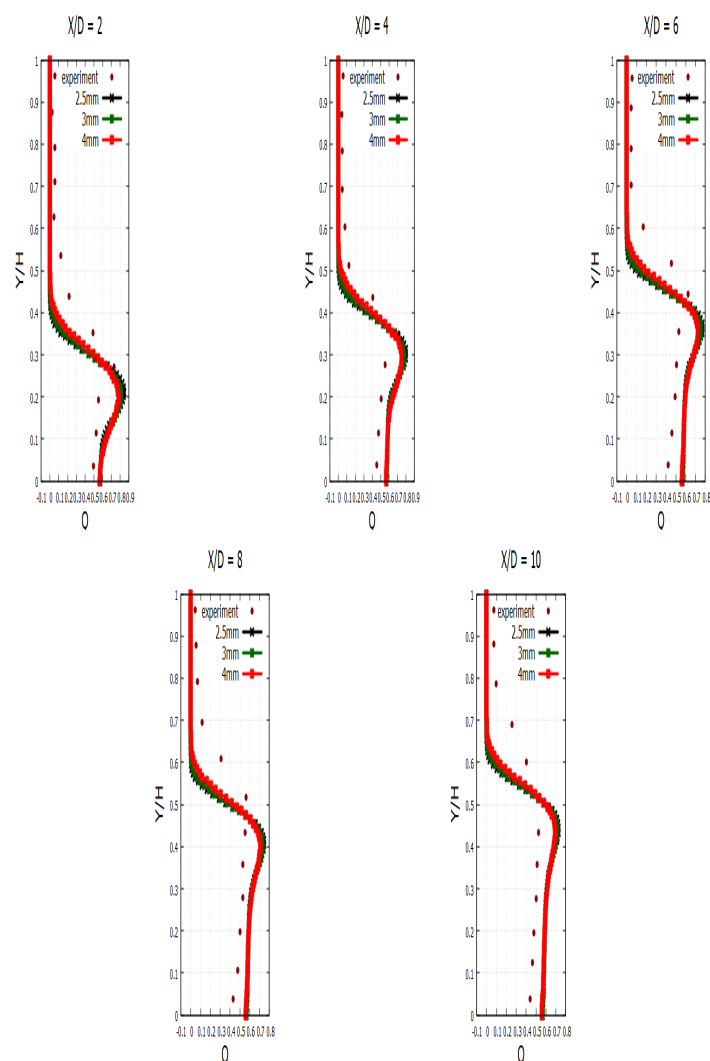


Figure 3 – Temperature profiles for different mesh sizes.

Results and Discussion

It was supposed that some spill of oil products into Zhaiyk River had to be over during the emergency refinery situation. Then the oil product spreads along the river and all this falls into the Caspian Sea, where the Zhaiyk River flows. For an accurate forecast of the spread of an oil slick, the real velocity of the river and wind are taken into account. According to Figure 5 at inlet 1, the average wind velocity over the sea is accounted for, at 5,49 m/s. At inlet 2, the velocity of the Ural River is considered, at 0,3 m/s. At inlet 3, the emission rate of the pollutant is taken into account, at 0,03 m/s. According to Table 1, the pollution area was 1126143218,94 m^2 as the pollutant level was 0,03 m/s. Nevertheless, the emission factor of 0,06 m/s got the water of 1318207280,65 m^2 polluted. Accordingly, when emission intensity is 0,015 m/s, the affected area is 987727620,15 m^2 . In fact, slashing the emission rate in half would lead to a 12,3% area reduction, and if we doubled the emission rate its contaminated area would grow by 17%. Figure 6 shows the direct dependence of the pollution area on the emission rate.

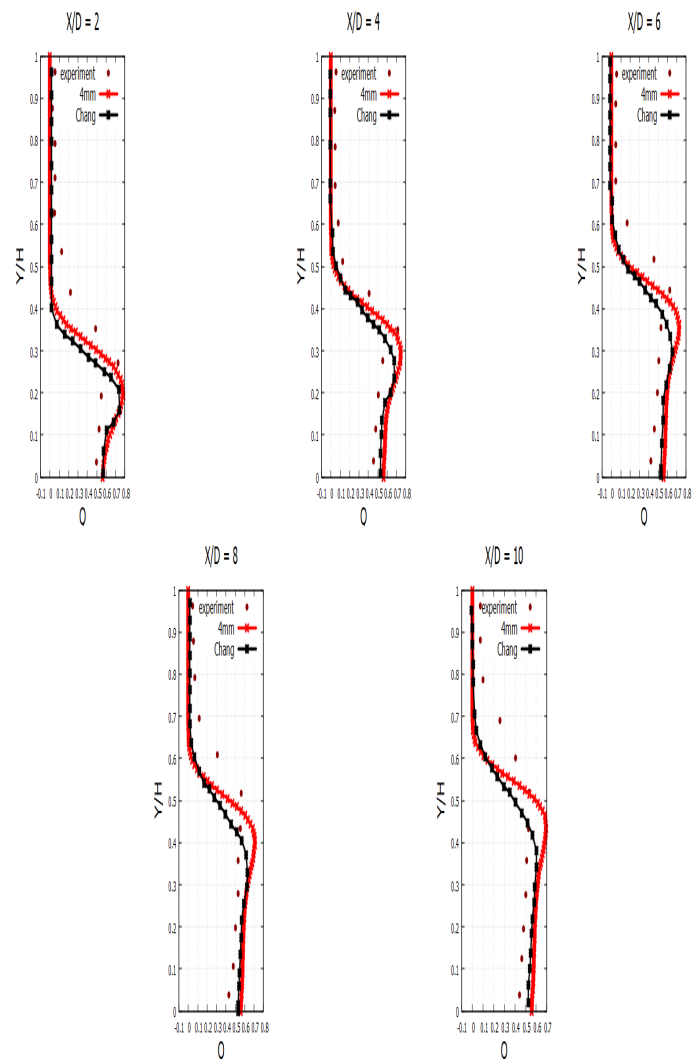


Figure 4 – Vertical profiles of temperature at the indicated points.



Figure 5 – Geometry of the main problem

Table 1 – The area of the pollution zone at different rates of release of the pollutant

u	the area of contamination
0,03 m/s	1 126 143 218,94 m^2
0,06 m/s	1 318 207 280,65 m^2
0,015 m/s	987 727 620,15 m^2

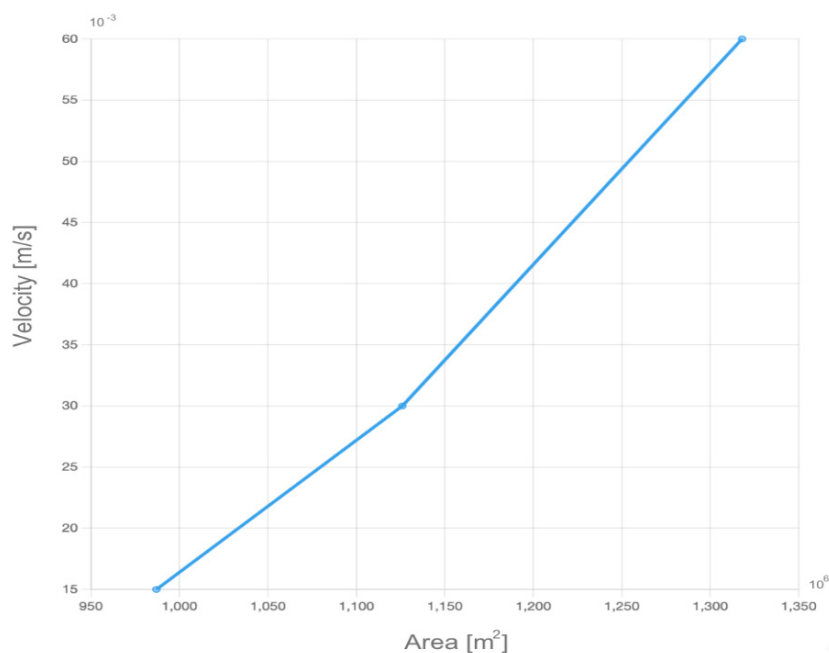


Figure 6 – Dependence of the pollution area on the emission rate.

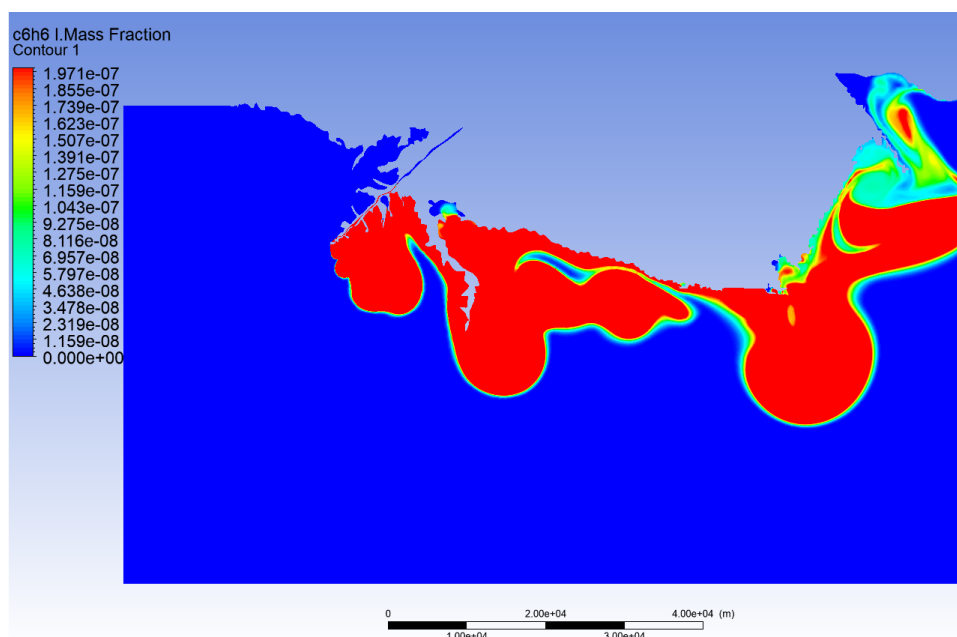
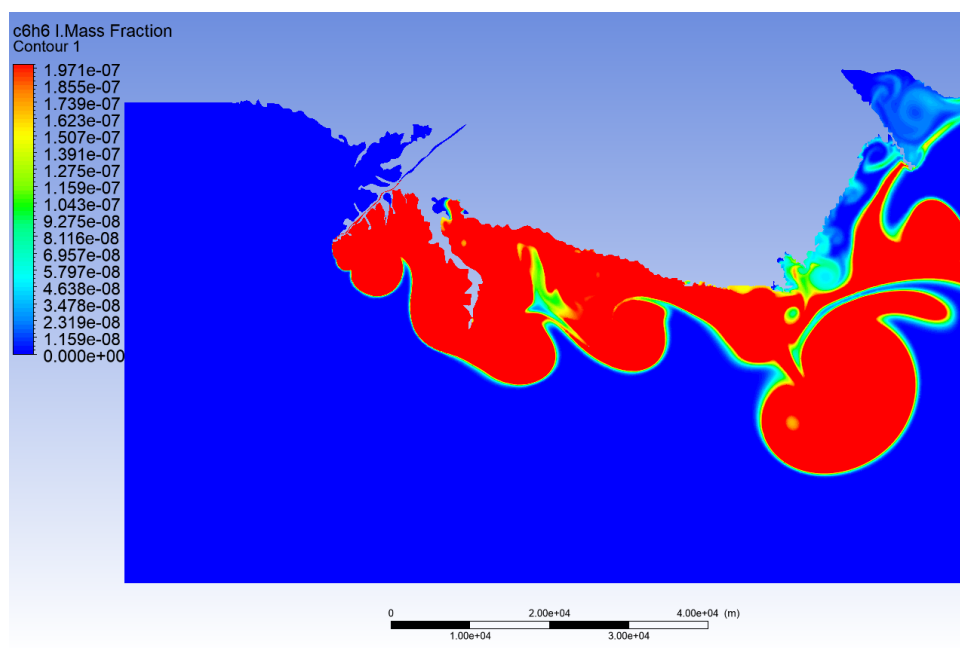
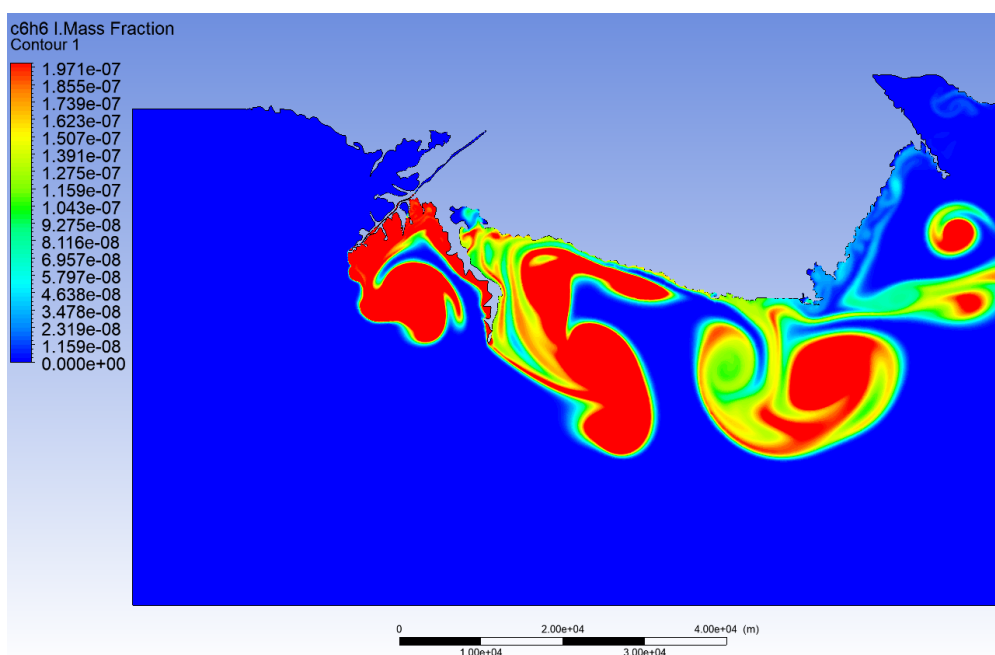


Figure 7 – Distribution of the contaminant for velocity $u = 0,03$ m/s

Figure 8 – Distribution of the contaminant for velocity $u = 0,06$ m/sFigure 9 – Distribution of the contaminant for velocity $u = 0,015$ m/s

Conclusion

The study aims to develop a model describing the spreading of oil products and petroleum in case of an emergency release on the water reservoir, taking into account wind velocity and water streaming velocity. The results of numerical modeling showed that the emissions directly influenced the pollution area. Considering 3 different emission rates ($u = 0.03$ m/s, $u = 0.06$ m/s, $u = 0.015$ m/s) from Table 1, it seems an increment in the emission rate will result in a larger pollution area, but an

emission rate reduction leads to a pollution area decrease. Figures 7, 8, and 9 depict the concentration of the maximum allowable amount of gasoline in 24 hours. This demonstrates the need to slow down and regulate the rate of release in case of overflowing of the spilled liquid. Doing so reduces the pollution area and lowers the negative impact on the environment. But in addition to these components, there are some others, for example, wind velocity and rivers are the determining factors of the spread of pollution. Consequently, a modeling for the transportation of oil and petroleum products shows not only the importance for predicting the spread of accidental spills, but also calls for the development of strategies and measures to prevent and respond to such spills with an aim of minimizing the negative impact.

Beyond, this research has provided opportunities for the dynamics and ways of possible events, and measures of their implementation as well. This is an advantage since it enables us to realistically see the effects of oil spills on water resources and to come up with the most effective rehabilitation and response procedures to mitigate further pollution. Moreover, likewise, the results of the simulation become indispensable not only for research purposes but also for the very applications in almost environmental management and mitigating catastrophic consequences of oil spills that are made because of accidents. The data and conclusions from this research can be important for developing and implementing plans to employ safety actions at underground oil and gas can corporations and for the training and training of the personnel to cope with emergencies. Besides, ecology and sustainable development research can be based on our work which is one of the key issues relating to our environment protection goals.

Acknowledgements

This work is supported by the grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (AP23489948).

REFERENCES

- 1 Siddiqua S., Chaturvedi A. and Gupt R. (2020) *Advances in Applied Mathematics*, pp. 835–842.
- 2 Oseni W.Y., Akangbe O.A. and Abbulimen K. (2023) *Heliyon*, vol. 9, no. 4, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15412>.
- 3 Agranat V., Romanenko S.V. and Perminov V. (2021) *Chemical Engineering Transactions*, vol. 88, pp. 481–486. <https://doi.org/10.3303/CET2188080>
4. Li X., Chen G. and Zhu H. (2017) *Marine Pollution Bulletin*, vol. 123, no. 1–2, pp. 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.09.004>.
- 5 Bozkurtoglu S.N.E. (2017) *Marine Pollution Bulletin*, vol. 123, no. 1–2, pp. 57–72. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.09.029>.
- 6 Toz A.C., Koseoglu B. and Sakar C. (2016) *Archives of Environmental Protection*, vol. 42, no. 4, pp. 22–31. <https://doi.org/10.1515/aep-2016-0037>.
- 7 Li D., Tang X., Li Y., Wang X. and Zhang H. (2018) *Discrete Dynamics in Nature and Society*, vol. 2018, pp. 1–22. <https://doi.org/10.1155/2018/2736102>.
- 8 Marques W.C., Stringari C.E., Kirinus E.P., Möller O.O., Toldo E.E. and Andrade M.M. (2017) *Applied Ocean Research*, vol. 65, pp. 178–191. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.04.007>.
- 9 Liu X., Meng R., Xing Q., Lou M., Chao H. and Bing L. (2015) *Ocean & Coastal Management*, vol. 108, pp. 140–146. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.08.016>.
- 10 Guo W.J. and Wang Y.X. (2009) *Marine Pollution Bulletin*, vol. 58, no.5, pp. 726–734. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.12.015>.
- 11 Belokopytov V.N., Kubryakov A.I. and Pryakhina S.F. (2019) *Physical Oceanography*, vol. 26, no.1, pp. 3–12. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2019-1-3-12>.

- 12 Kordzadze A.A. and Demetrashvili D.I. (2017) Journals of Georgian Geophysical Society, vol. 14, no. 2, pp. 53–74.
- 13 Dippner W. (2009) Hydrological systems modeling, vol. 2, pp. 204–246..
- 14 Xu J., Hao Z., Wang Y., Liu J., Liu G. and Zhang Y. (2019) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 649. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/649/1/012027>.
- 15 Alsudais N.S. (2016) Texas A&M University – Corpus Christi ProQuest Dissertations Publishing.
- 16 Juvinao B., Donaldo A. (2016) Diss. ETSI_Energia.
- 17 Begalishvili N.A., Tsintsadze T., Begalishvili N.N. and Tsintsadze N. (2012) Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, vol. 12, pp. 493–496. https://doi.org/10.4194/1303-2712-v12_2_41.
- 18 Guandalini R., Agate G. and Moia F. (2017) Energy Procedia, vol. 125, pp. 161–169. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.165>.
- 19 Contreras-Tereza V.K., Salas-de-León D.A., Monreal-Jiménez R. and Monreal-Gómez M.A. (2021) Arabian Journal of Geosciences, vol. 14, no.636. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06959-x>.
- 20 Rodrigues P.H.S. and Maiorino J.R. (2016) Brazilian Journal of petroleum and gas, vol. 10, no. 4. <http://dx.doi.org/10.5419/bjpg2016-0020>.
- 21 Guo G. and Cheng G. (2019) Process Safety and Environmental Protection, vol. 127, pp. 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.012>
- 22 Kaushik R. (2015) Advances in Applied Science Research, vol. 6, no.7, pp. 57–64.
- 23 Chang Y.R. and Chen K.S. (1995) International journal of heat and mass transfer, vol. 38, no. 9, pp. 1693–1703. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(94\)00277-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(94)00277-3).
- 24 Chen K.S. and Hwang J.Y.(1991) AIAA journal, vol. 29, no.3, pp. 353–360. <https://doi.org/10.2514/3.10586>.

^{1*}Шалымова А.Е.,

магистр, ORCID ID: 0009-0007-3888-6686, e-mail: shalymova.aigerim@gmail.com

¹Исахов А.А.,

PhD, профессор, ORCID ID: 0000-0002-1937-8615, e-mail: alibek.issakhov@gmail.com

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

АВАРИЯЛЫҚ ТӨГІЛУ КЕЗІНДЕ СУ БЕТІНЕ МҰНАЙ МЕН МҰНАЙ ӨНІМДЕРІНІҢ ТАРАЛУЫН САНДЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Аңдатпа

Судың ластануы бүгінгі күннің өзекті мәселесі. Мұнай өндірудің өсуіне, мұнай тасымалдаудың жаһандануына, жаңа кен орындарының қолданысқа берілуіне қарай судың мұнай өнімдерімен ластану көлемі өсіп келеді. Бұл экожүйеге зиянын тигізіп отыр. Жұмыстың мақсаты су бетіндегі мұнай өнімінің таралуын сандық модельдеу, апаттық төгілулерді оқшаулау және жою бойынша іс-шараларды жоспарлау мен жедел басқарудың тиімділігін арттыруға көмектеседі. Ластану аймағының әр жылдамдықта қалай өзгеретінін зерттеу үшін ластаушы (бензин) шығарындыларының әртүрлі деңгейлері қарастырылды. Бұл есепті модельдеу үшін математикалық модель ретінде сығылмайтын сұйықтық үшін Навье-Стокс теңдеулері қолданылды. Навье-Стокс теңдеулерінің сандық шешіміне қарапайым алгоритм арқылы қол жеткізілді. Сандық әдіс пен математикалық модельді тексеру үшін тест тапсырмасы орындалды. Есептеу нәтижелері эксперимент нәтижелерімен салыстырылып, тамаша сәйкестікті көрсетті.

Тірек сөздер: математикалық модель, мұнайдың төгілуі, судың ластануы.

^{1*}Шалымова А.Е.,

магистр, ORCID ID: 0009-0007-3888-6686, e-mail: shalymova.aigerim@gmail.com

¹Исахов А.А.,

PhD, профессор, ORCID ID: 0000-0002-1937-8615, e-mail: alibek.issakhov@gmail.com

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

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ АВАРИЙНОМ РАЗЛИВЕ НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Аннотация

Загрязнение воды является актуальной проблемой на сегодняшний день. Особенно растет количество загрязнений воды нефтепродуктами, так как растет добыча нефти, происходит глобализация нефтеперевозок и вводятся в эксплуатацию новые месторождения. Это пагубно влияет на экосистему. Целью работы является численное моделирование распространения нефтепродукта на водной поверхности, которое может помочь повысить эффективность планирования и оперативного управления мероприятиями по локализации и ликвидации аварийных разливов. Были рассмотрены различные скорости выбросов загрязняющего вещества (бензина), чтобы исследовать, как меняется зона загрязнения при каждой скорости. Для моделирования этой задачи в качестве математической модели использовались уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости. Численное решение уравнений Навье-Стокса было достигнуто с помощью простого алгоритма. Было выполнено тестовое задание для проверки численного метода и математической модели. Результаты расчетов были сопоставлены с результатами эксперимента и показали отличное соответствие.

Ключевые слова: математическая модель, разлив нефти, загрязнение воды.

УДК 519.62

МРНТИ 27.35.21; 27.35.47; 27.41.19

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-152-169>^{1*}**Нигметова А.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0004-5395-4569, e-mail: a.nygmetova@kbtu.kz

¹**Исахов А.,**

профессор, ORCID ID: 0000-0002-1937-8615, e-mail: alibek.issakhov@gmail.com

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

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВОГО ПОТОКА И ПЕРЕНОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ С ЦЕЛЮ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ НА СЕЛИТЕБНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Аннотация

Целью данного исследования является анализ турбулентного рассеивания загрязняющих веществ в г. Алматы, Казахстан, вызванного выбросами автотранспорта. Изучалось влияние окружающей среды и зданий на распространение концентрации загрязнения, в данном случае этилена. Была построена трехмерная модель, в точности описывающая существующую улицу в городе. Турбулентный поток воздуха и концентрации были исследованы с помощью математической модели конвекции в полости, и задача решена методом SST k-omega. Для решения связи скорости и концентрации применялся алгоритм SIMPLE. При сравнении полученных результатов и известных тестовых данных схожесть выявленных результатов показала правильность используемых методов и алгоритмов. По итогу были проанализированы результаты распространения загрязняющих веществ при наличии барьера различной высоты: 1 м, 2 м и 3 м. Результаты показывают, что наличие барьера положительно влияет на удержание загрязнений. Также высота данных барьеров играет важную роль, поэтому при планировании и строительстве надо отталкиваться от результатов моделирования и особенностей данной территории. Это доказывают выделяющиеся различия количества концентрации в один и тот же момент времени для всех случаев.

Ключевые слова: загрязнение воздуха, уличный каньон, SST k-omega, высокая концентрация, барьеры.

Введение

Загрязнение в городах – одна из серьезнейших экологических проблем по всему миру, которая каждый год уносит миллионы жизней. Казахстан входит в список топ-40 самых загрязненных стран на планете, а г. Алматы занимает второе место по уровню загрязнения в стране [1]. Из-за своего расположения у подножия гор и неблагоприятных климатических условий в городе накапливаются опасные частицы, образующие смог. Это негативно влияет на здоровье, вызывая хронические болезни, такие как астма и рак, и замедляет городские инновации, влияя на производство и предпринимательство [2].

Уровень загрязнения зависит от многочисленных факторов: выбросов от автомобилей, работы электрических станций и других. По статистике, 70% загрязнения воздуха происходит из-за выбросов вредных газов из выхлопных труб автомобилей. В частности, это зависит от вида используемого бензина или срока эксплуатации автомобиля. Недавние исследования подтверждают, что вещества, выбрасываемые автомобилями, оказывают крайне негативное воздействие на здоровье человека и экосистему [5–7]. Эти частицы проникают в легкие и ослабляют их защитные функции. Испарение и вытеснение топлива из бака выбрасывают углеводороды, включая бензол, толуол, этан, этилен и пентан.

Во многих странах урбанизация ведет к расширению городов. Из-за роста стоимости жилья в центре большинство людей переезжают на окраины, что вызывает значительную

дневную миграцию и автомобильные пробки. Это усиливает загрязнение окружающей среды из-за концентрированных автомобильных выбросов [8].

Борьба с загрязнением воздуха требует комплексных мер, таких как внедрение чистых технологий в промышленности и транспорте, улучшение системы общественного транспорта, а также контроля за выбросами вредных веществ. Градостроительство и дизайн строящегося города также влияют на условия вентиляции в городах [9]. В целях решения данной проблемы застройка должна быть спланирована и ориентирована так, чтобы расширить проникновение воздуха по максимуму [10]. Данная проблема привела ко множеству видов исследований, изучающих влияние городской структуры на распространение воздуха. В основном для этих исследований используются так называемые городские каньоны, где наименьший уровень проветривания и, следовательно, наиболее загрязненные районы. В 2021 г. в регионе Цзин-Цзинь-Цзи в Китае ученые Ze Liang et al. [11] провели исследование о взаимосвязи загрязнения воздуха и формы города, особенно в ночное время. Они предложили изменить форму города, уменьшив ее фрактальную размерность и правильно удлинив, что особенно важно для районов с высоким уровнем загрязнения, чтобы снизить его воздействие.

Из-за поступающей солнечной радиации внутри уличного каньона температура выше, чем наверху. Неправильная постройка зданий и жилых домов очень влияет на вентиляцию данных каньонов. В г. Тулуза были исследованы два варианта реконструкции города после сравнения с реальными данными. Увеличение высоты шумовых барьеров не сильно улучшает воздух, а удаление зданий ухудшает его в некоторых местах. Однако сохранение зданий и их способность переносить загрязнения на большую высоту могут улучшить качество воздуха [12]. А чтобы улучшить вентиляцию в городских районах с многоэтажными зданиями, нужно строить их разной высоты и не закрывать внутренние пространства [13]. Проводятся также исследования, использующие пористую среду для изучения влияния барьеров в виде зеленых инфраструктур, к примеру кроны деревьев, на распространение загрязнений. По результатам работы Shi et al. [14] увеличение связности и уменьшение фрагментации зеленых зон улучшит качество городской среды и сделает ее более экологически устойчивой. Но надо учитывать, что с увеличением глубины каньона влияние деревьев ограничивается. Дополнительно рекомендуется для наветренной стороны использовать деревья с большой кроной, в то время как для подветренной – с меньшей. И при сильном ветре лучше всего использовать высокие деревья с редкой листвой [15]. В другом исследовании Lu Zhang et al. [16] оценивали эффективность разных конфигураций растительности. Оказалось, что при ветре, идущем перпендикулярно улице, растения работают лучше, чем при косом ветре. Тип и расположение деревьев играют более важную роль, чем их общая площадь, в снижении уровня загрязнения воздуха. При этом самая экономичная и разумная плотность деревьев составляет 30%, а объем крон для уменьшения воздушных частиц в городских парках составляет $1.8 \text{ м}^3/\text{м}^2$ [17].

Для решения проблем загрязнения ученые проводят эксперименты, чтобы определить оптимальные конфигурации городской геометрии. В одном из таких исследований Craig et al. [18] использовались два метода математической оптимизации: первый метод максимизирует показатели поочередно, а второй определяет расположение точек минимума загрязнения, рассматривая городскую геометрию и направления ветра. Локально оптимальная точка предоставляет лучшую геометрию города для наихудшего метеорологического сценария. В другом исследовании Gergely Kristóf et al. [19] используют аппроксимацию городского навеса в виде бесконечной двумерной сетки с заданной структурой застройки, которая также учитывает источники загрязнений. Благодаря таким работам с помощью моделирования можно выявить численные результаты. Исследования, которые проводятся с помощью математической модели с использованием численного моделирования CFD, наиболее эффективны и экономичнее и именно по этой причине часто используются учеными из разных стран [20–24]. Для других видов исследований требуется много ресурсов и затрат. Например, Fusuo Xu et al. [21] использовали метод компьютерного моделирования (CFD) и динамическую сетку для изучения, как форма обочины и движение транспортных средств влияют на воздушный поток

и вентиляцию в уличных каньонах. В 2018 г. Francisco Toja-Silva et al. [22] использовали CFD для моделирования рассеивания выбросов CO₂ от тепловой электростанции, учитывая распределение зданий, плотность застройки в районах г. Мюнхена, Германия. Исследование предлагает новое уравнение для расчета вертикальной дисперсии газа в городской среде. Также CFD использовали Xiangwen Fu et al. [23] для того, чтобы вычислить, как геометрия уличных каньонов влияет на распределение загрязняющих веществ в г. Пекине. А в 2021 г. Li et al. [24] изучали оптимальные методы для проектирования зеленых зон в городских парках, где для исследования использовались модели CFD, включая стандартную k-ε модель, основанную на подходе RANS. При проведении исследований в области механики жидкости необходимо использовать набор фундаментальных уравнений для течения жидкости, таких как уравнение неразрывности и закон сохранения импульса. Кроме того, для эффективного решения этих уравнений исследователи должны выбрать вычислительные методы. В 2019 г. было проведено исследование, где Santiago et al. [25] оценивали эффективность зеленых барьеров в снижении концентрации загрязняющих частиц в воздухе города Испании Памполе с использованием моделей CFD. Они выяснили, что наилучшая конфигурация барьера зависит от расположения источника загрязнения, включая типичную структуру потока на этой улице. Похожее исследование было проведено в г. Аугсбурге, Германия. Работа Ioannidis et al. [26] посвящена разработке и применению CFD-модели для рассеивания твердых частиц, CO и NO_x в результате транспортной активности в оживленном районе. Nguyen et al. [27] создали модель, которая предназначена для изучения структуры потока и рассеивания загрязняющих веществ в каньонах городских улиц с различными геометрическими конфигурациями. Где также для моделирования переноса загрязняющих веществ используется скалярное уравнение переноса, связанное с уравнениями импульса воздушного потока, выводимыми из уравнений Рейнольдса, усредненных по Навье-Стоксу (RANS). Необходимо создать точную трехмерную геометрическую модель той территории, где мы проводим исследования на распространение загрязняющих веществ. Нужно отметить, что можно делать и двумерную модель. В исследовании Mei et al. [28] изучаются различия между двумерным и трехмерным моделированием RANS в определении вентиляции в уличном каньоне. Исследование показывает, что с увеличением длины улицы трехмерное моделирование становится ближе к результатам двумерного. Для того чтобы предсказывать и визуализировать скорость, давление, температуру и концентрацию примесей, CFD использует методы численного решения уравнений Навье-Стокса, описывающих движение жидкости или газа. Например, Lauriks et al. [29] для оценки уровня и распределения загрязнения на одной из главных дорожных артерий в г. Антверпене, Бельгия, использовалась вычислительная гидродинамика (CFD), использовавшая метод усреднения по Рейнольдсу и Навье-Стоксу (RANS), характерный для моделирования атмосферного пограничного слоя.

Основные положения

В данной статье представлены результаты исследования ветровых потоков и переноса загрязняющих веществ, проведенного с целью прогнозирования экологических условий в жилых кварталах. Мы представляем метод расчета турбулентности SST k-omega в компьютерных моделях численного анализа, а также обсуждаем влияние различных видов барьеров на рассеивание загрязнений в городе.

Использовались уравнения Навье-Стокса для достижения этой цели, так как данные уравнения являются основными для описания движения жидкости и газа. Они учитывают турбулентные потоки, нестационарные и неоднородные потоки и взаимодействие между выброшенными веществами. Для численного моделирования использовался метод SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations).

Результаты доказывают прямую связь между уровнем загрязнения и высотой барьеров. Наличие барьеров определенно уменьшает степень загрязнения, при этом улучшая качество воздуха.

Физическая постановка задачи

Геометрия улицы выглядит следующим образом. Ставятся различные условия, которые касаются непосредственно барьера, с целью определения его влияния на распределения загрязняющих веществ. Выбрав для него высоту $H = 1$ м, 2 м и 3 м, мы получили 3 разных результата.

На рисунке 1 представлена улица, на которой проходит исследование. Улица Казыбек би, пересечения от Калдаякова – Казыбек би до Тулебаева – Казыбек би. По правой стороне этой улицы расположен парк размером 18 га, а по правую сторону – жилые дома, комплексы, а также здания университета. Все здания разной высоты: максимальная высота – 42 м (14 этажей), а минимальная высота – 3 м (1 этаж). Данная улица выбрана именно из-за расположения парка с целью наглядно показать его преимущества. Длина улицы составляет 900 м. Другими словами, длина трехмерной модели $A = 900$ м, ширина $B = 450$ м, а высота $H = 100$ м. Концентрация проходит по всей улице Казыбек би, где ее скорость равна $v = 0.01$ м/с, в то время как поток воздуха двигается с запада на восток со средней скоростью $v = 5.5$ м/с.

С целью показать различие распространения загрязняющих частиц при разной высоте барьера ставим 10 линий внутри модели, в которых непосредственно и сравниваются результаты количества концентрации (рисунок 2). Первые 5 линий расположены со стороны зданий, в то время как остальные 5 линий находятся со стороны парка.



Рисунок 1 – Выбранный участок г. Алматы для исследования.
Изображение взято из электронного справочника с картами городов «2GIS»

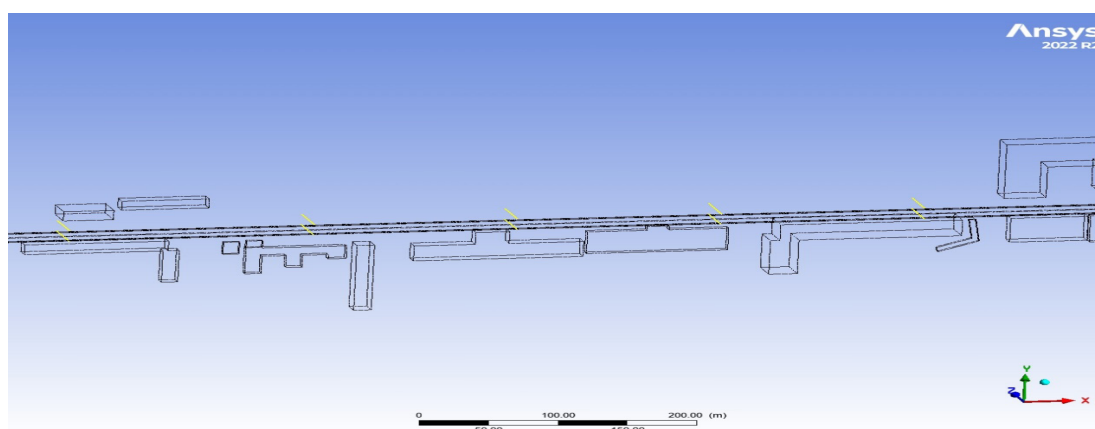


Рисунок 2 – Смоделированная улица г. Алматы

Материалы и методы**Математическая модель**

Для описания процесса концентрационной диффузии используется система уравнений, таких как уравнения Навье-Стокса и уравнения концентрации.

$$\nabla \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\nabla \mathbf{u})\mathbf{u} = \frac{1}{\rho} \mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla (\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{u}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = d_{\text{eff}} \frac{\partial^2 C}{\partial x_j^2} \quad (3)$$

В данной работе описывается процесс атмосферной диффузии, которая описывается системой уравнений, состоящей из уравнения неразрывности (1), уравнения движения (2) и уравнения концентрации (3). Таким образом, выходит система нелинейных дифференциальных уравнений, которая показана выше.

В компонентной форме уравнение (1) можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Где u_x, u_y, u_z — компоненты вектора скорости в направлениях x, y, z соответственно; $\mathbf{u}$ — вектор скорости, $(\nabla \mathbf{u})\mathbf{u}$ — конвективный член, описывающий изменение скорости из-за движения жидкости; ρ — плотность жидкости; $\mathbf{f}$ — внешняя сила; p — давление; μ_{eff} — эффективная динамическая вязкость; ∇p — градиент давления, описывающий влияние изменения давления на скорость жидкости. C — концентрация загрязняющих веществ, $u_j \frac{\partial C}{\partial x_j}$ — конвективный член, описывающий перенос загрязняющих веществ потоком жидкости (суммирование по индексу j — от 1 до 3). d_{eff} — эффективный коэффициент диффузии.

Турбулентная модель

Для замыкания системы уравнений Навье-Стокса с усреднением по Рейнольдсу (1) – (3) применяется турбулентная модель SST k- ω (Shear Stress Transport k- ω). SST k- ω модель является универсальной моделью, которая используется для описания широкого спектра турбулентных потоков жидкости. Турбулентная модель работает на основе двух уравнений, описывающих эволюцию двух параметров: усредненной кинетической энергии турбулентности k и поправки для интенсивности вихрей ω .

Уравнения для модели k- ω могут быть записаны следующим образом:

1. Уравнение для k (усредненной кинетической энергии турбулентности):

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + u \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \delta^* \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

k — турбулентная кинетическая энергия, u_j — компоненты вектора скорости, P_k — продукция турбулентной кинетической энергии, β^* — константа модели, ω — специ-

фическая диссипация турбулентной энергии, μ — динамическая вязкость жидкости, δ^* — константа модели, μ_t — турбулентная вязкость.

2. Уравнение для ω (поправки для интенсивности вихрей):

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \rho u_j \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \delta_{\omega} \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + 2(1 - f_1) \delta_{\omega_2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (5)$$

где:

$$\mu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega_1 S f_2)}$$

$$P_{k_1} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \left(3 \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k \right)$$

$$P_k = \min(P_{k_1}, 10 \beta^* k \omega)$$

$$f_2 = \tanh \left(\left(\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\mu}{y^2 \omega} \right) \right)^2 \right)$$

$$f_1 = \tanh \left(\left(\min \left(\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\mu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\delta_{\omega_2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right) \right)^4 \right)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \delta_{\omega_2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega_i}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) \quad \Phi = \Phi_1 f_1 + \Phi_2 (1 - f_1)$$

S — скорость деформации, f_1 — функция для переключения между различными режимами модели, $CD_{k\omega}$ — корректирующий член для ω , Φ — объединенная функция, зависящая от функции f_1 и f_2 . Φ_1 — значение функции в первой зоне, Φ_2 — значение функции во второй зоне.

Коэффициенты модели:

$$\alpha_1 = 1.0, \quad \alpha_2 = 0.52, \quad \delta_{k_1} = 1.178, \quad \delta_{k_1} = 1.0, \quad \delta_{\omega_1} = 2.0, \quad \delta_{\omega_2} = 1.168, \\ a_1 = 0.31, \quad \beta^* = 0.09, \quad \beta_1 = 0.075, \quad \beta_2 = 0.0828$$

Граничные условия

Для этой модели использовались такие виды расчетных областей, как:

- 1) вход 1
- 2) вход 2
- 3) твердая стенка
- 4) симметрические стены
- 5) выход

Граничные условия ставятся для таких переменных, как компоненты скорости, концентрации и давления. Рассмотрим различные граничные условия для каждой категории.

$$\text{Для входа 1: } \frac{\partial p}{\partial n} = 0, \frac{\partial C}{\partial n} = 0, u = u_0, v = w = 0$$

$$\text{Для входа 2: } \frac{\partial p}{\partial n} = 0, C_z = 1, v = v_0, u = w = 0$$

$$\text{Для твердой стенки: } \frac{\partial p}{\partial n} = 0, \frac{\partial C}{\partial n} = 0, u = v = w = 0$$

$$\text{Для симметрических стен: } \frac{\partial p}{\partial n} = 0, \frac{\partial C}{\partial n} = 0, \frac{\partial u}{\partial z} = 0, v = w = 0$$

$$\text{Для выхода: } p = 0, \frac{\partial C}{\partial n} = 0, \frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial v}{\partial n} = \frac{\partial w}{\partial n} = 0$$

$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$ — градиент давления в направлении нормали к твердой стенке равен нулю, то есть изменение давления перпендикулярно поверхности стенки отсутствует. $\frac{\partial C}{\partial n} = 0$ — накопление или поглощение загрязняющих веществ на стенке также отсутствует. $u = u_0, v = v_0$ — на границе рассматриваемой области компонента скорости u, v имеет постоянное значение u_0, v_0 . $C_z = 1$ — концентрация компонента Z равна 1 на данной границе. $u, v, w = 0$ — компоненты скорости вблизи заданной области равны нулю. $\frac{\partial u}{\partial z} = 0$ — градиент компонента скорости не изменяется вдоль оси Z , что означает, что скорость остается постоянной в этом направлении. $p = 0$ — на выходе давление равно нулю, $\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial v}{\partial n} = \frac{\partial w}{\partial n} = 0$ — градиент компоненты скорости u, v, w в направлении нормали к границе равны нулю, чтобы предотвратить искусственные ускорения или замедления потока на выходе, обеспечивая плавный выход.

Численный метод и валидация

В настоящей работе уравнение давления дискретизировалось схемой второго порядка, и к нему применялся метод SIMPLE, описывающий течение жидкости и газа. Основные действия данного алгоритма можно рассматривать в трех шагах. Первый шаг — вычисление промежуточных значений скорости, не учитывая поправки давления. Второй шаг — коррекция промежуточных значений скорости с учетом поправки давления. Третий шаг — коррекция скорости с учетом измененных значений давления. Этот алгоритм — один из самых популярных и часто используемых методов для решения уравнений Навье-Стокса благодаря его простоте, устойчивости, хорошей сходимости и применимости к различным задачам.

Для валидации результатов были взяты работа Kikumoto et al. [30], эксперимент которых был проведен с использованием физической модели каньона, которая имела пропорции 1:1 и высоту 1.0 м (рисунок 3, стр. 159).

Для ввода трассирующего газа использовалась линия источника, расположенная в нижней центральной части модели с параметрами 10 мм(х) × 260 мм(у). Трассирующий газ представлял собой смешанный газ, состоящий из синтетического воздуха и этилена (C₂H₄) в концентрации 1.2%. Скорость ветра измерялась при помощи анемометра, а концентрация газа — с помощью пламенно-ионизационного детектора. Эксперимент проводился в изотермических условиях при скорости притока 1.0 м/с, в то время как скорость концентраций была 1.923×10^{-2} м/с.

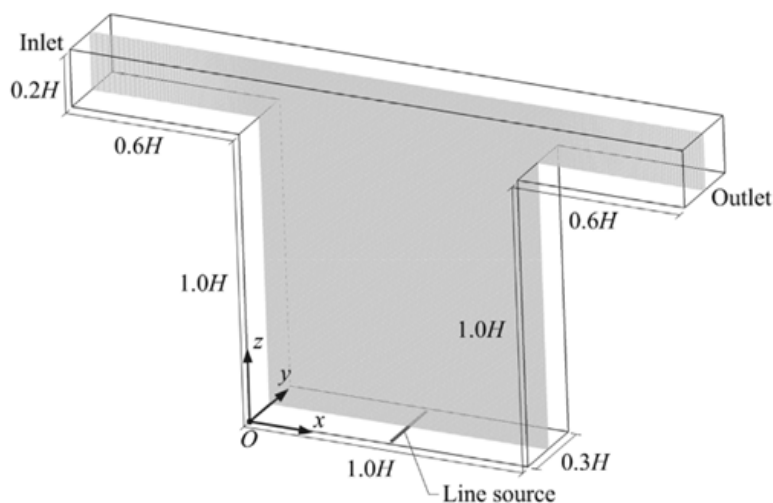


Рисунок 3 – Вычислительная область, используемая для моделирования испытательной камеры

Для оценки точности сетки было выполнено сравнение вертикальной скорости концентрации в трех различных точках (0.05 мм, 0.5 мм и 0.95 мм) в контексте тестовой задачи, которое вы можете увидеть на рисунке 4. Изображенные на рисунке 5 (a, b, c) результаты контура средней концентрации показали, что отличия между нашими результатами и данными прежде упомянутого исследования (exp, LES2 и LES4) оказались незначительными. Также сравнение контуров средней скорости показало незначительную разницу с экспериментальными результатами на рисунке 6. Получив удовлетворительные результаты, данный подход выполняется для основной задачи.

Для моделирования и получения таких результатов необходимо использовать определенные программные обеспечения. В данной работе использовался Ansys Fluent 2022. Ansys позволяет моделировать потоки жидкостей и газов, исследовать турбулентные течения, рассеивания тепла и массопереноса. Его применение помогает снизить затраты и ускорить процесс разработки.

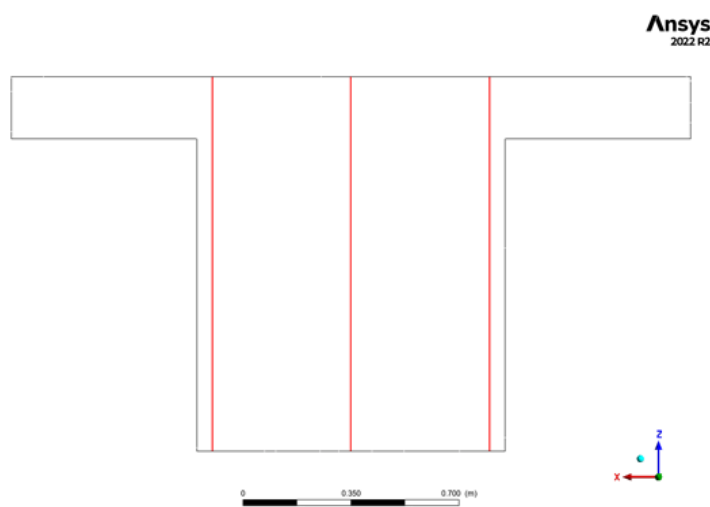


Рисунок 4 – Три контрольные точки в полости для более детального изучения

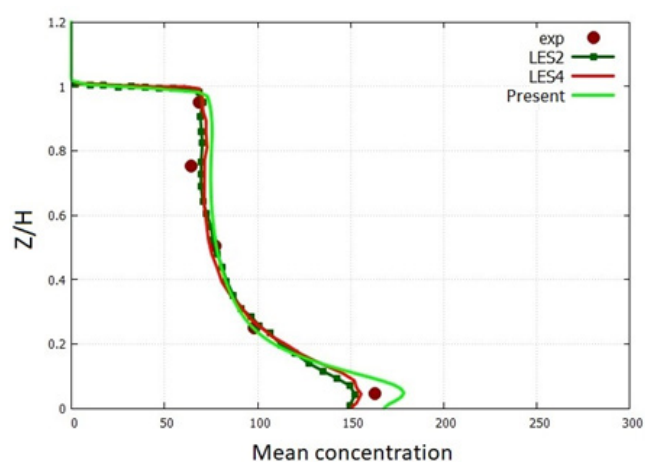


Рисунок 5(а) – Контур средней концентрации на линии 0.05 mm

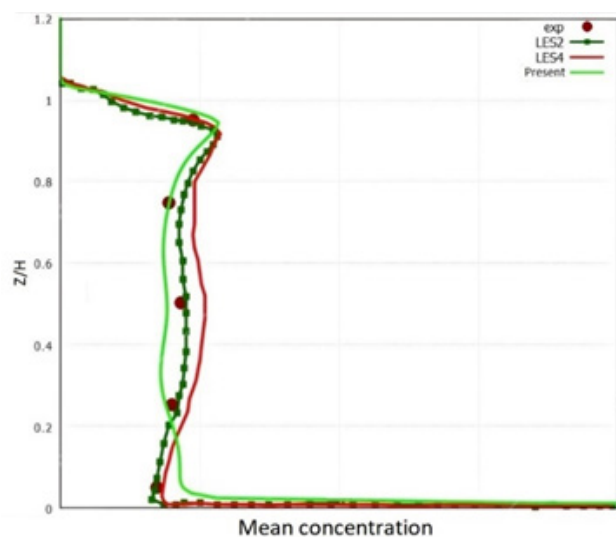


Рисунок 5(б) – Контур средней концентрации на линии 0.5 mm

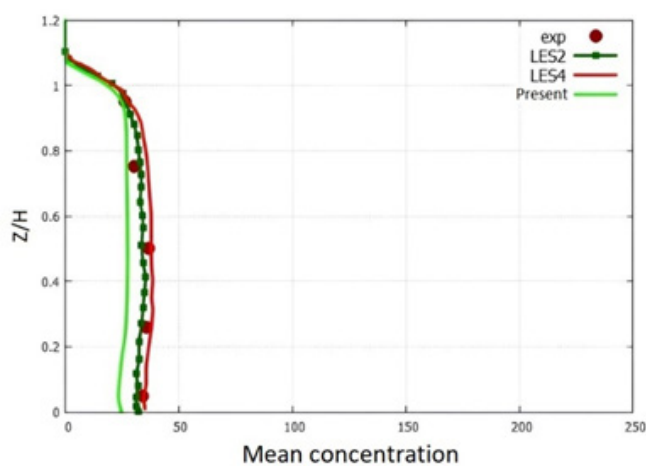


Рисунок 5(с) – Контур средней концентрации на линии 0.95 mm

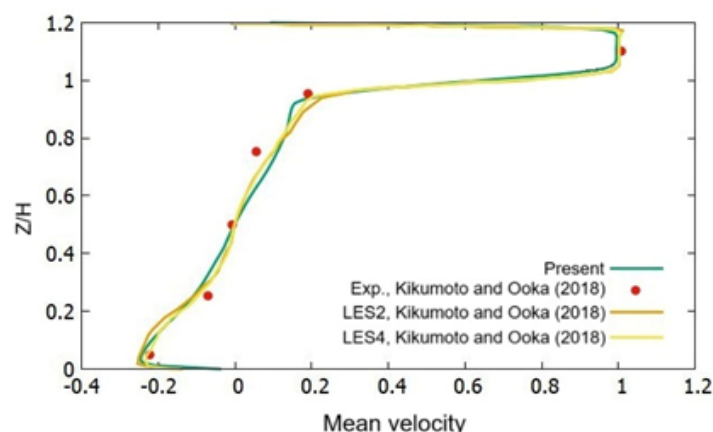


Рисунок 6 – Профили скорости

Результаты и обсуждения

При построении сетки получились результаты, которые показаны ниже. Можно заметить, что сетка построена плотнее в тех областях, где важно учитывать концентрацию. Самая мелкая сетка – на линии выброса концентрации и сетка для барьеров, благодаря которой определяется влияние их присутствия (рисунок 7). Размер сетки для зданий также важно учитывать, так как именно по ним определяется дальнейшее распределение загрязняющих веществ и их влияние на находящихся в них людей (рисунок 8). Сетка для остальной геометрии не обязательно должна быть слишком мелкой, поэтому она является самой крупной по сравнению с другими (рисунок 9).

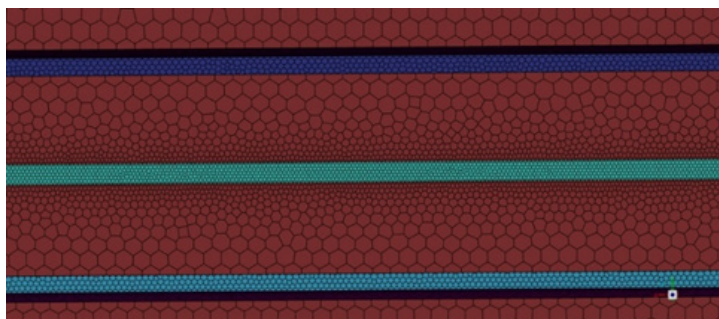


Рисунок 7 – Сетка для барьеров и дороги, откуда выбрасывается концентрация

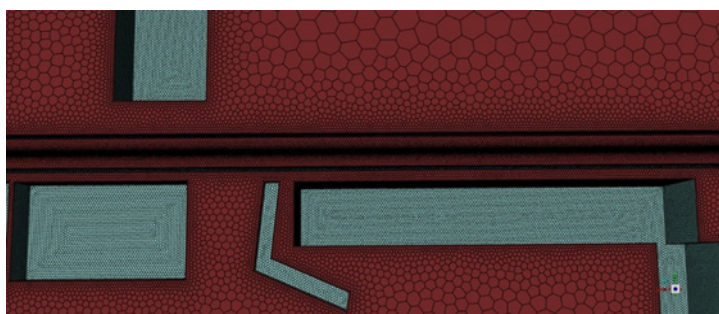


Рисунок 8 – Сетка вокруг зданий

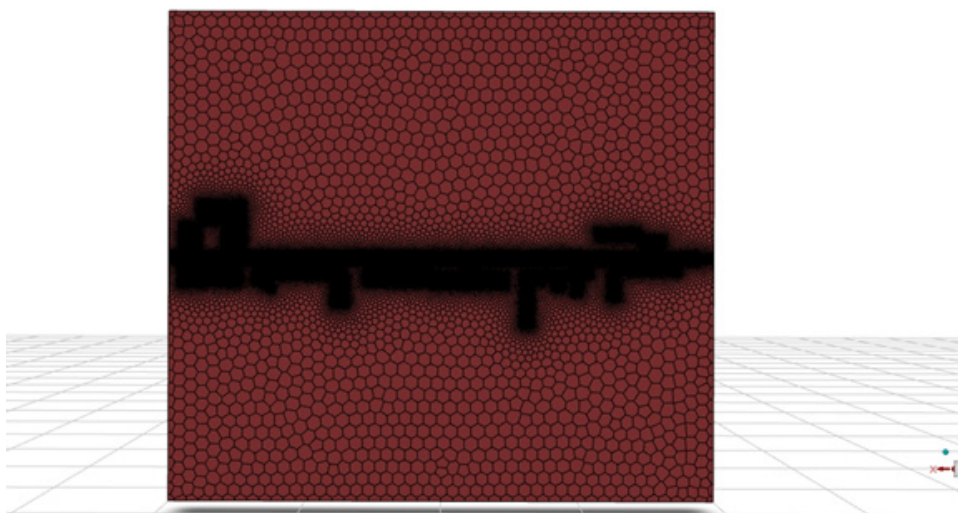


Рисунок 9 – Сетка для всей поверхности

Выбрав высоту барьера $H = 1$ м, 2 м и 3 м, мы получили три разных результата. По завершении задачи мы получили такие результаты контуров средней концентрации, что вы видите на рисунке 10 (a-j). На основании этих результатов можно сделать вывод о значительном влиянии высоты барьера на распространение загрязнения. В основном барьеры высотой 3 м показывают наилучшие результаты. На рисунках 10 (f), 10 (j) наблюдаются небольшие различия в распределении загрязнения на высотах 2 м и 3 м, что указывает на возможность использования барьеров высотой 2 м в этих местах. Это, в свою очередь, позволяет оптимизировать использование таких ресурсов, как время и бюджет. На рисунке 10 (g) наблюдается противоположный результат, где барьер высотой 3 м показывает самое высокое значение концентраций. Это может быть связано с тем, что данная линия находится со стороны парка. Парк сам по себе влияет на уменьшение распространения загрязнения, и, возможно, наличие барьеров перед ним негативно влияет на уменьшение распространения концентрации. Ведь барьеры могут изменять направление и скорость воздушного потока вокруг них, что может привести к созданию вихрей или областей низкого давления, что, в свою очередь, может способствовать задержанию загрязнений в определенных областях.

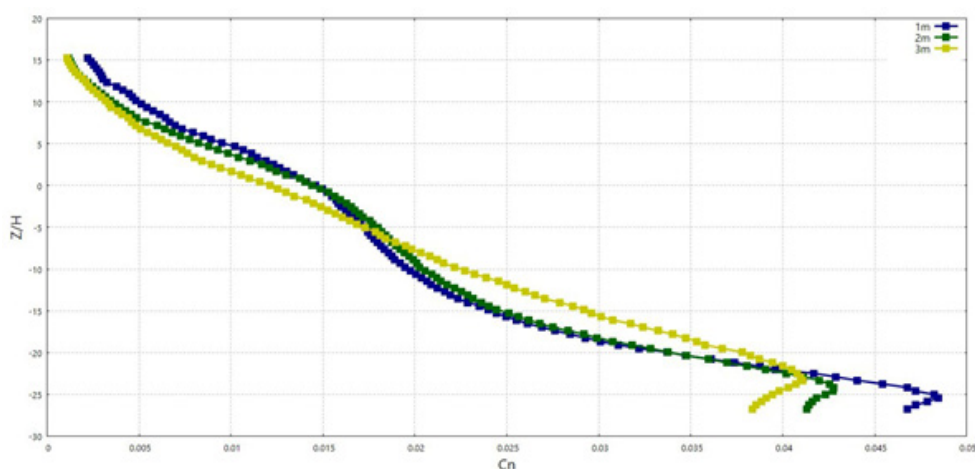


Рисунок 10 (a) – Контур средней концентрация для линий 1

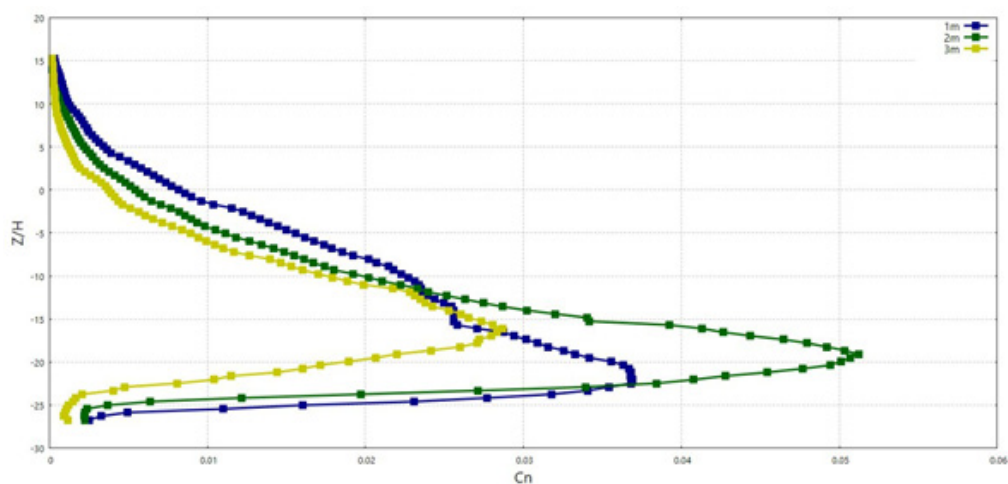


Рисунок 10 (b) – Контур средней концентрация для линий 2

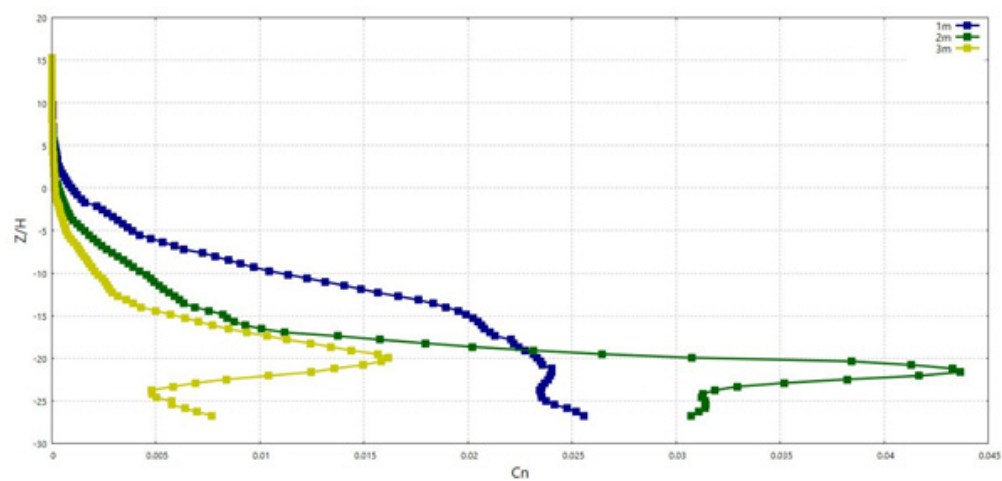


Рисунок 10 (c) – Контур средней концентрация для линий 3

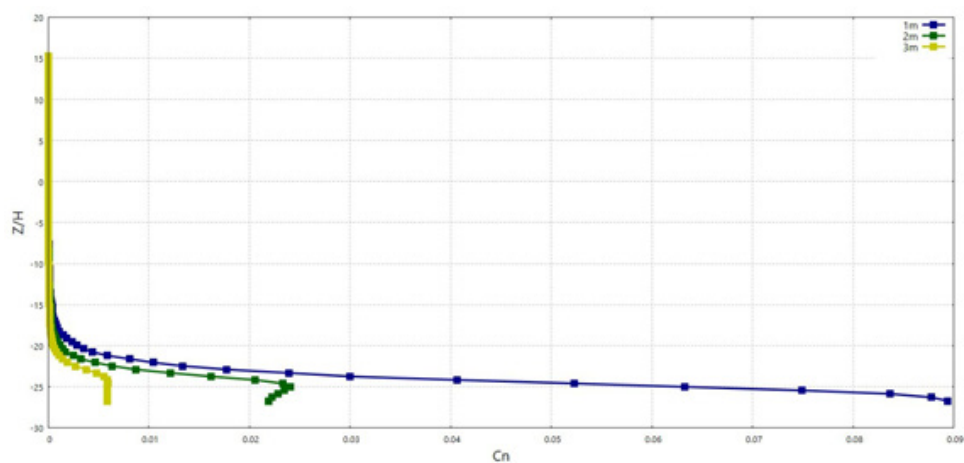


Рисунок 10 (d) – Контур средней концентрация для линий 4

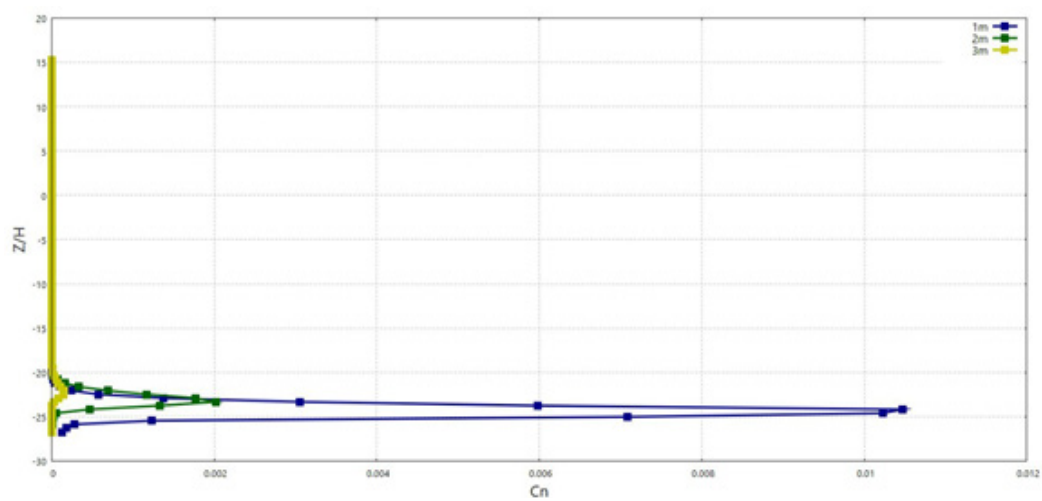


Рисунок 10 (е) – Контур средней концентрация для линий 5

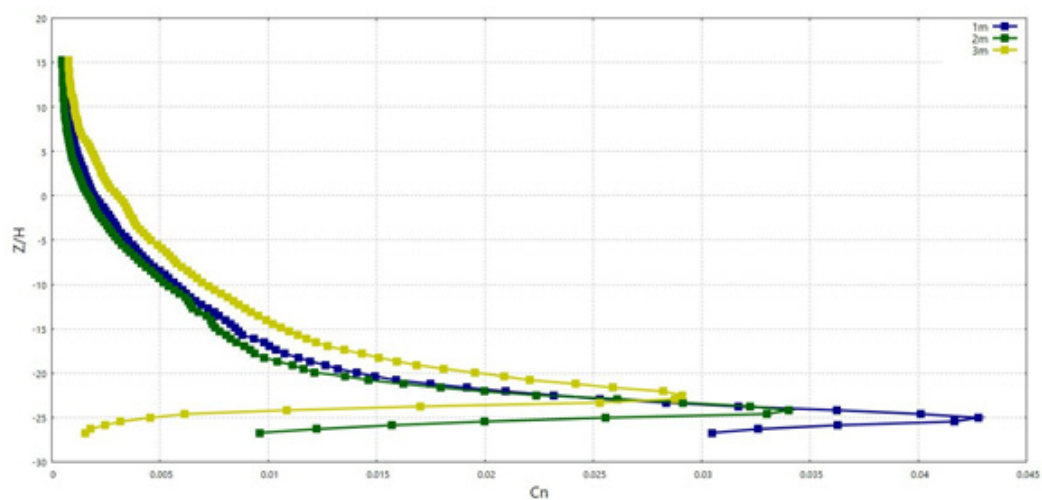


Рисунок 10(f) – Контур средней концентрация для линий 6

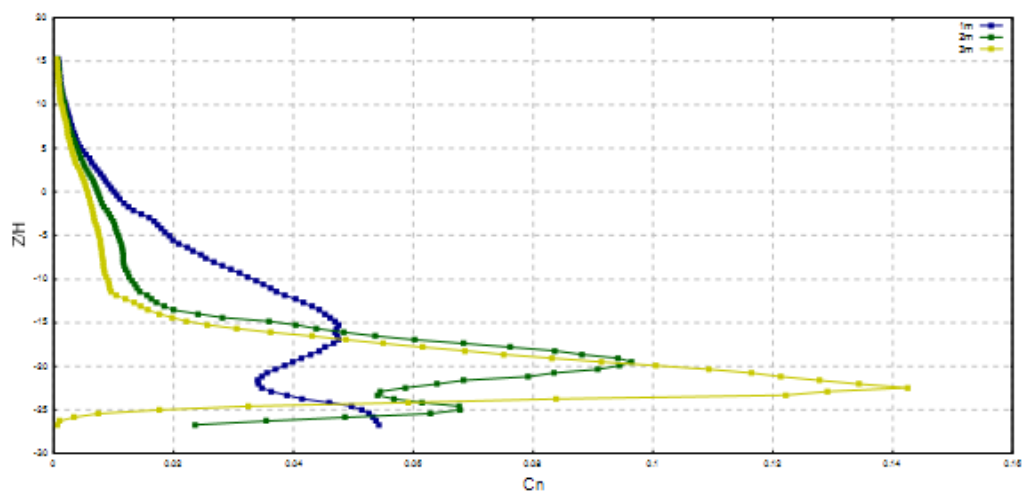


Рисунок 10 (g) – Контур средней концентрация для линий 7

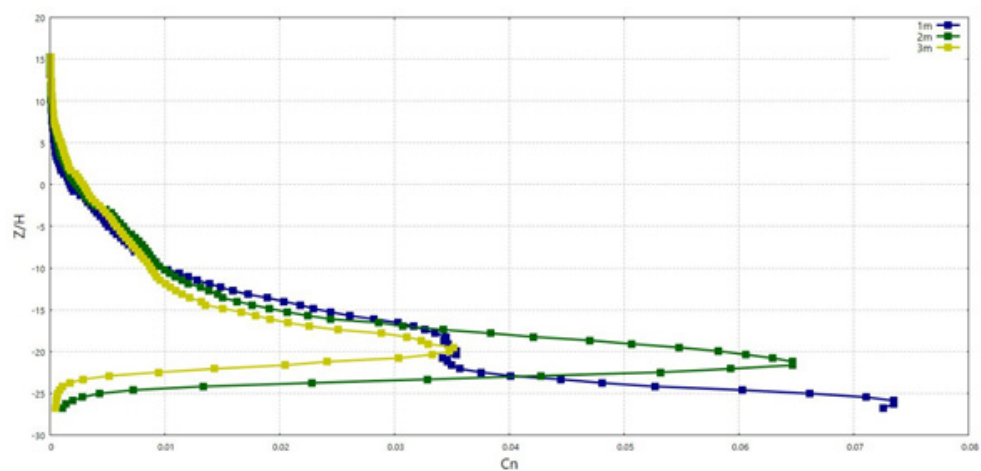


Рисунок 10 (h) – Контур средней концентрация для линий 8

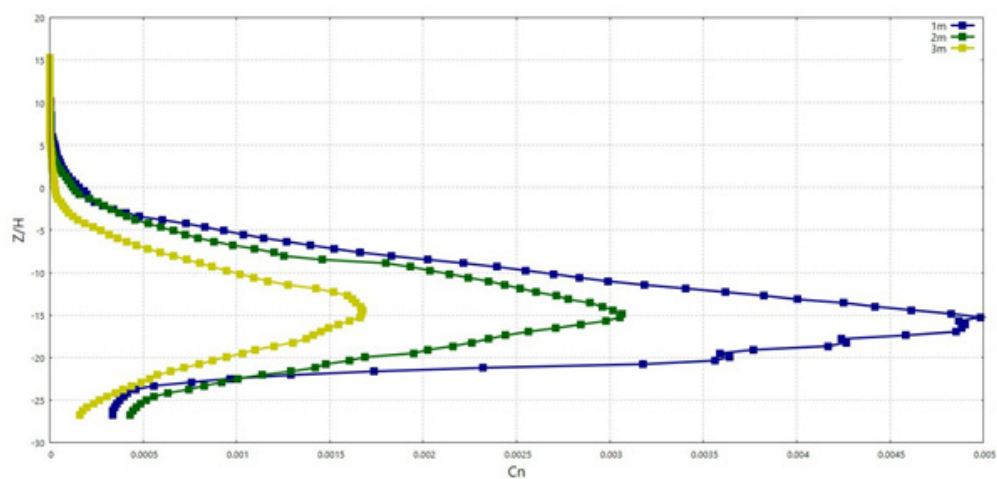


Рисунок 10 (i) – Контур средней концентрация для линий 9

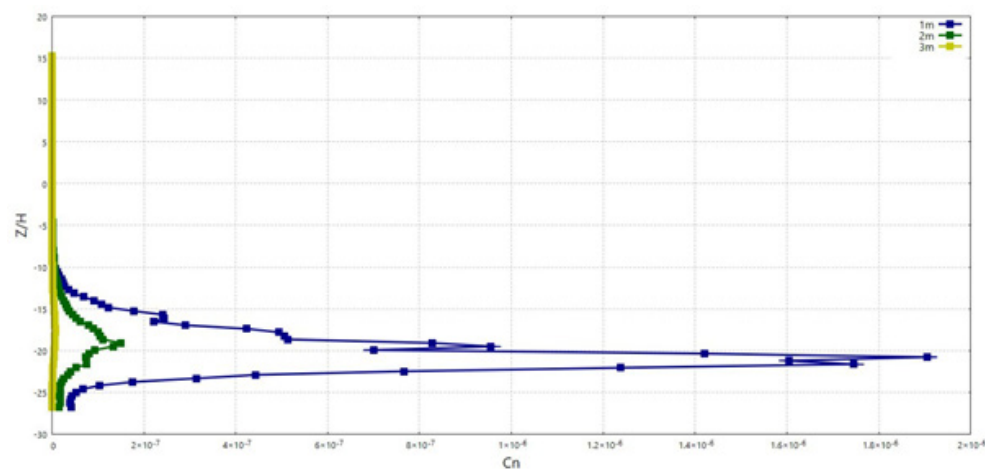


Рисунок 10 (j) – Контур средней концентрация для линий 10

Заключение

Данное исследование посвящено загрязнению воздуха в уличном каньоне в г. Алматы, Казахстан. Цель исследования – проанализировать уровень загрязнения воздуха для разработки стратегий и методов городского планирования. Полученные результаты послужат основой для принятия плановых и экологических решений, направленных на улучшение качества окружающей среды и здоровья населения.

Урбанизация создала серьезные проблемы для горожан: пробки на дорогах, смог и отсутствие ветра ухудшили условия жизни. Чтобы решить эти проблемы, необходимо соблюдать стандарты городского дизайна, такие как расположение и расстояние между зданиями, парками и зелеными зонами.

Была выявлена значимость выбросов этилена в результате движения транспорта в г. Алматы. Для этого была выбрана улица, расположенная вдоль городского парка и различных зданий. Такая улица была выбрана с целью выявить влияние парка на распространение загрязнений. Были продемонстрированы различные вариации барьера вдоль дороги, чтобы сравнить их влияние на проникновение концентрации на пешеходную зону. По полученным результатам можно сделать несколько выводов:

- ♦ высокие препятствия могут направлять поток воздуха в определенном направлении, вызывая изменения скорости и направления. Это может быть полезно для перенаправления загрязняющих веществ в направлении, где они будут менее вредны для окружающей среды или людей;

- ♦ барьеры с высотой 3 м дали наилучшие результаты в уменьшении распространения концентрации, но в некоторых районах барьеры высотой 2 м дают также неплохие результаты. Это значит, что для экономии ресурсов можно использовать и такую высоту.

Исследование показало, что при планировании и проектировании густонаселенных городских районов необходимо учитывать стратегии по снижению рассеивания загрязняющих веществ. В настоящее время транспортные выбросы в городах, как правило, концентрируются в уличных каньонах. Если не изменить существующие методы планирования и проектирования, то в будущем по мере роста города эта проблема будет усугубляться. Учитывая негативное влияние загрязнения воздуха на здоровье населения и высокую плотность населения в г. Алматы, важно разработать и внедрить стратегии по снижению этого негативного воздействия.

Благодарности

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (AP19677972).

ЛИТЕРАТУРА

1 <https://www.iqair.com/ru/kazakhstan>

2 Feng W. and Yuan H. (2022) The pain of breathing: how does haze pollution affect urban innovation, *Environmental science and pollution research international*, vol. 29(28), pp. 42664–42677. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18279-4>

3 Monitoring air pollution levels is key to adopting and implementing WHO's Global Air Quality Guidelines, <https://www.who.int/news/item/10-10-2023-monitoring-air-pollution-levels-is-key-to-adopting-and-implementing-who-s-global-air-quality-guidelines>

- 4 Wang Y., Zhou Y., Zuo J. and Rameezdeen R. (2018) A Computational Fluid Dynamic (CFD) Simulation of PM10 Dispersion Caused by Rail Transit Construction Activity: A Real Urban Street Canyon Model. *International journal of environmental research and public health*, vol. 15(3), p. 482. <https://doi.org/10.3390/ijerph15030482>
- 5 Hasunuma H., Ishimaru Y., Yoda Y. and Shima M. (2014) Decline of ambient air pollution levels due to measures to control automobile emissions and effects on the prevalence of respiratory and allergic disorders among children in Japan, *Environmental research*, vol. 131, pp. 111–118. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.03.007>
- 6 Yuan Chen, C.-Y. Cynthia Lin Lawell and Yunshi Wang (2020) The Chinese automobile industry and government policy, *Research in Transportation Economics*, 84, 100849. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.100849>
- 7 Parida S., Sahu K.C., Sahoo B.B., Pandey V.S., Thatoi D.N., Nayak N. and Nayak M.K. (2023) High performance supercapacitor electrodes from automobile soots: An effective approach to control environmental pollution, *Inorganic Chemistry Communications*, vol. 158, p.111671. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111671>
- 8 Issakhov A., Abylkassymova A. (2023) Numerical analysis of solid barrier heights and trees with porosity properties influence on the automobile's emission dispersion in the residential area, *Ecological Modelling*, vol. 484, p. 110395. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110395>
- 9 Badach J., Wojnowski W. and Gębicki J. (2023) Spatial aspects of urban air quality management: Estimating the impact of micro-scale urban form on pollution dispersion, *Comput. Environ. Urban Syst.*, vol. 99, p. 101890. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101890>
- 10 Arnab Jana, Ahana Sarkar and Ronita Bardhan (2020) Analysing outdoor airflow and pollution as a parameter to assess the compatibility of mass-scale low-cost residential development, *Land Use Policy*, vol. 99, p. 105052. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105052>
- 11 Ze Liang, Jiao Huang, Yueyao Wang, Feili Wei, Shuyao Wu, Hong Jiang, Xuliang Zhang and Shuangcheng Li (2021) The mediating effect of air pollution in the impacts of urban form on nighttime urban heat island intensity, *Sustainable Cities and Society*, vol. 74, p. 102985. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102985>
- 12 Zhenlan Gao, Raphaël Bresson, Yongfeng Qu, Maya Milliez, Cecile de Munck and Bertrand Carissimo. (2018) High resolution unsteady RANS simulation of wind, thermal effects and pollution dispersion for studying urban renewal scenarios in a neighborhood of Toulouse, *Urban Climate*, vol. 23, pp. 114–130. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.11.002>
- 13 Zhengtong Li, Tingzhen Ming, Shurong Liu, Chong Peng, Renaud de Richter, Wei Li, Hao Zhang and Chih-Yung Wen. (2021) Review on pollutant dispersion in urban areas-part A: Effects of mechanical factors and urban morphology, *Building and Environment*, vol. 190, p. 107534. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107534>
- 14 Shi J., Miao W., Si H. and Liu T. (2021) Urban Vitality Evaluation and Spatial Correlation Research: A Case Study from Shanghai, China. *Land*, vol. 10(11), p. 1195. <https://doi.org/10.3390/land10111195>
- 15 Zhengtong Li, Hao Zhang, Yu-Hsuan Juan, Yee-Ting Lee, Chih-Yung Wen and An-Shik Yang (2023) Effects of urban tree planting on thermal comfort and air quality in the street canyon in a subtropical climate, *Sustainable Cities and Society*, vol. 91, p. 104334. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104334>
- 16 Lu Zhang, Zhiqiang Zhang, Chaoyang Feng, Meirong Tian and Yanni Gao (2021) Impact of various vegetation configurations on traffic fine particle pollutants in a street canyon for different wind regimes, *Science of The Total Environment*, vol. 789, p. 147960. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147960>
- 17 Qin H., Hong B., Jiang R., Yan S. and Zhou Y. (2019) The Effect of Vegetation Enhancement on Particulate Pollution Reduction: CFD Simulations in an Urban Park, *Forests*, vol. 10(5), p. 373. <https://doi.org/10.3390/f10050373>
- 18 Craig K.J., de Kock D.J. and Snyman J.A. (2001) Minimizing the effect of automotive pollution in urban geometry using mathematical optimization, *Atmospheric Environment*, vol. 35, pp. 579–587. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00307-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00307-1)
- 19 Gergely Kristóf, Péter Füle (2017) Optimization of urban building patterns for pollution removal efficiency by assuming periodic dispersion, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 162, pp. 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.01.011>

20 Xavier Jurado, Nicolas Reiminger, José Vazquez and Cédric Wemmert (2021) On the minimal wind directions required to assess mean annual air pollution concentration based on CFD results, *Sustainable Cities and Society*, vol. 71, p. 102920. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102920>.

21 Fusuo Xu, Zhi Gao and Jianshun Zhang (2022) Effects of roadside morphologies and moving vehicles on street canyon ventilation, *Building and Environment*, vol. 218, p. 109138. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109138>.

22 Francisco Toja-Silva, Carla Pregel-Hoderlein and Jia Chen (2018) On the urban geometry generalization for CFD simulation of gas dispersion from chimneys: Comparison with Gaussian plume model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 177, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.04.003>.

23 Xiangwen Fu, Junfeng Liu, George A. Ban-Weiss, Jiachen Zhang, Xin Huang, Bin Ouyang, Olalekan Popoola and Shu Tao. (2017) Effects of canyon geometry on the distribution of traffic-related air pollution in a large urban area: Implications of a multi-canyon air pollution dispersion model, *Atmospheric Environment*, vol. 165, pp. 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.06.031>.

24 Li H., Chen W. and He W. (2015) Planning of Green Space Ecological Network in Urban Areas: An Example of Nanchang, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 12(10), pp. 12889–12904. <https://doi.org/10.3390/ijerph121012889>

25 Jose-Luis Santiago, Riccardo Buccolieri, Esther Rivas, Hector Calvete-Sogo, Beatriz Sanchez, Alberto Martilli, Rocio Alonso, David Elustondo, Jesús M. Santamaría and Fernando Martin (2019) CFD modelling of vegetation barrier effects on the reduction of traffic-related pollutant concentration in an avenue of Pamplona, Spain, *Sustainable Cities and Society*, vol. 48, pp. 101559. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101559>.

26 Ioannidis G., Li C., Tremper P., Riedel T and Ntziachristos L. (2024) Application of CFD Modelling for Pollutant Dispersion at an Urban Traffic Hotspot, *Atmosphere*, vol. 15(1), p.113. <https://doi.org/10.3390/atmos15010113>

27 Nguyen VT., Nguyen TC. and Nguyen J. (2019) Numerical Simulation of Turbulent Flow and Pollutant Dispersion in Urban Street Canyons. *Atmosphere*, 10, 683. <https://doi.org/10.3390/atmos10110683>

28 Shuo-Jun Mei, Zhiwen Luo, Fu-Yun Zhao and Han-Qing Wang (2019) Street canyon ventilation and airborne pollutant dispersion: 2-D versus 3-D CFD simulations, *Sustainable Cities and Society*, vol. 50, p. 101700. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101700>

29 Tom Lauriks, Riccardo Longo, Donja Baetens, Marco Derudi, Alessandro Parente, Aurélie Bellemans, Jeroen van Beeck and Siegfried Denys (2021) Application of Improved CFD Modeling for Prediction and Mitigation of Traffic-Related Air Pollution Hotspots in a Realistic Urban Street, *Atmospheric Environment*, vol. 246, p. 118127. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118127>

30 Hideki Kikumoto, Ryoza Ooka (2018) Large-eddy simulation of pollutant dispersion in a cavity at fine grid resolutions, *Building and Environment*, vol. 127, pp. 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.11.005>

^{1*}Нығметова Ә.,

магистрант, ORCID ID: 0009-0004-5395-4569, e-mail: a.nygmetova@kbtu.kz

¹Исahов А.,

профессор, ORCID ID: 0000-0002-1937-8615, e-mail: alibek.issakhov@gmail.com

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

ЕЛДІ МЕКЕНДЕРДІҢ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ЖАҒДАЙЫН БОЛЖАУ МАҚСАТЫНДА ЖЕЛ АҒЫНЫН ЖӘНЕ ЛАСТАУШЫ ЗАТТАРДЫҢ ТАСЫМАЛДАНУЫН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Аңдатпа

Бұл зерттеу көліктердің шығарындылары әсерінен Қазақстан, Алматы қаласында ластаушы заттардың турбулентті дисперсиясын талдауға бағытталған. Қоршаған ортаның және ғимараттың ластаушы заттардың, бұл жағдайда этиленнің концентрациясының дисперсиясына әсері зерттелді. Қаладағы бар көшені дәл сипаттау үшін үш өлшемді макет салынды. Турбулентті ауа ағыны мен концентрациясы қуыстағы конвекцияның математикалық моделі арқылы зерттелді және SST k-omega әдісімен шешілді. Жылдамдық-кон-

центрация қатынасын шешу үшін SIMPLE алгоритмі қолданылды. Алынған нәтижелер мен белгілі сынақ деректерін салыстыру кезінде анықталған нәтижелердің ұқсастығы қолданылатын әдістер мен алгоритмдердің дұрыстығын көрсетті. Қорытындылай келе, ластаушы заттардың таралу нәтижелері әртүрлі биіктіктегі бөгет болған жағдайда талданды: 1м, 2м және 3м. Нәтижелер тосқауылдың болуы ластаушы заттардың сақталуына оң әсер ететінін көрсетеді. Сондай-ақ бұл кедергілердің биіктігі маңызды рөл атқарады, сондықтан жоспарлау және салу модельдеу нәтижелеріне және берілген аумақтың ерекшеліктеріне негізделуі керек. Бұл барлық жағдайлар үшін бір және бір уақыттағы концентрация мөлшерінің айтарлықтай айырмашылығымен дәлелденеді.

Түйін сөздер: Ауаның ластануы, көше шатқалы, SST k-omega, жоғары концентрация, кедергілер.

¹*Nygmetova A.,

Master's student, ORCID ID: 0009-0004-5395-4569, e-mail: a.nygmetova@kbtu.kz

¹Issakhov A.A.,

Professor, ORCID ID: 0000-0002-1937-8615, e-mail: alibek.issakhov@gmail.com

¹Kazakh-British technical university, 050000, Almaty, Kazakhstan

MATHEMATICAL MODELING OF THE WIND FLOW AND THE TRANSFER OF POLLUTANTS IN ORDER TO PREDICT THE ENVIRONMENTAL SITUATION IN RESIDENTIAL AREAS

Abstract

This study aims to analyze the turbulent dispersion of pollutants in the city of Almaty, Kazakhstan, caused by vehicle emissions. The influence of the environment and building on the dispersion of pollutant concentration, in this case ethylene, was studied. A three-dimensional model was built to accurately describe an existing street in the city. Turbulent air flow and concentration was investigated using a mathematical model of convection in a cavity and was solved using the SST k-omega method. SIMPLE algorithm was applied to solve the velocity-concentration relationship. When comparing between the obtained results and known test data, the similarity of the identified results showed the correctness of the methods and algorithms used. In summary, the results of pollutant spreading were analyzed in the presence of a barrier of different heights: 1m, 2m and 3m. The findings indicate that the presence of barrier has a positive effect on the retention of pollutants. Also the height of these barriers plays an important role, so the planning and construction should be grounded on the outcomes of modeling and peculiarities of the given territory. This is proved by the marked differences in the amount of concentration at one and the same moment of time for all cases.

Key words: Air pollution, urban street canyon, SST k-omega, high concentration, barriers.

ӨОЖ 512.624
FTAXP 27.17.27

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-170-180>

^{1*}Турусбекова У.К.,

PhD, ORCID ID 0000-0002-0591-2143, e-mail: umut.t@mail.ru

²Алтынбек С.А.,

ORCID ID 0000-0002-8435-7773, e-mail: serik_aa@bk.ru

¹«Esil University» мекемесі, 010000, Астана қ., Қазақстан

²Қазақ технология және бизнес университеті, 010000, Астана қ., Қазақстан

КЕЗ КЕЛГЕН АҚЫРЛЫ ӨРІС АЛМАСТЫРУЛАРЫН ҚҰРУ ӘДІСТЕРІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ СЫЗЫҚТЫҚ СИПАТТАМАСЫ

Аңдатпа

Ақырлы өрістегі алмастырулар (биективті түрлендірулер) көптеген қосымшаларға байланысты, соның ішінде, ақпаратты қорғау теориясында белсенді зерттелуде. Алмастырулар көбінесе ақпаратты өңдеу тораптарын құру элементтері ретінде қолданылады. 20-шы ғасырдың ортасында К. Шеннон осындай тораптарда жүзеге асырылатын бейнелеулерге қойылатын басты талаптарды теориялық негіздеді. Қазіргі уақытта биективті түрлендірулерді құруда бұл талаптар GF(2) өрісінде кесте арқылы берілген сызықтық емес бейнелеулердің композициясымен қамтамсыз етіледі. Ұсынылған мақала тұрақты функционалды жүйелердің өлшемін ұлғайту әдістері туралы [1] жұмыс нәтижелерін жалпылайды. Дәлірек айтқанда, жұмыста ақырлы өрісте бастапқы алмастырулардан жаңа алмастырулар құру тәсілдері зерттелген. Құрылған алмастырулар үшін сызықтық сипаттама есептелді. Координаталық функциялармен берілген алмастыруларды құру есебі күрделі. Мақала тақырыбының өзектілігі талап етілетін комбинаторлы-алгебралық қасиеттерге ие үлкен өлшемді кеңістіктерде алмастыру кластарын құрудың жаңа, теориялық негізделген әдістерін іздеу қажеттіліктерімен анықталады. Жұмыста ақырлы өрістер алмастыруларын, кіші өлшемді векторларға әсер ететін, бастапқы алмастырулардан құрудың бірнеше әдістері қарастырылған. Екілік жағдайда, бұл алмастырулардың координаттық функцияларының сызықтық комбинацияларының барлық аффиндік функциялар класына жақындығын сипаттайтын қарастырылып отырған алмастырулардың бейсызықтығын табуға мүмкіндік береді. Ұсынылған мақаланың нәтижелері кез келген ақырлы өріс жағдайында алмастыруларды құру мүмкіндіктерін кеңейтеді.

Тірек сөздер: ақырлы өріс, алмастыру, логикалық функциялар, сызықтық сипаттама, биективті түрлендіру.

Кіріспе

[1] жұмыста бастапқы алмастырулардан ұзындығы артық екілік векторлардың алмастыруларын құру тәсілдері ұсынылған. Ұсынылған жұмыста осындай алмастыруларды q элементтен тұратын кез келген өрісте құру мәселесі зерттеледі. Құрылған бейнелеулер үшін олардың сызықтық сипаттамасы табылды. Екілік жағдайда қарастырылған алмастырулардың сызықтық еместігі көрсетіледі.

Айталық, $P = GF(q)$ – q элементтен тұратын ақырлы өріс болсын. Егер барлық $c \in P$ үшін $|f^{-1}(c)|$ түпбейне қуаты q^{n-1} -ге тең болса, $f: P^n \rightarrow P$ функциясын теңдестірілген деп атаймыз. Егер әрбір $(x_1, \dots, x_n) \in P^n$ үшін $\varphi(x_1, \dots, x_n) = [\varphi_1(x_1, \dots, x_n), \dots, \varphi_n(x_1, \dots, x_n)]$ болса, онда кез келген $\varphi: P^n \rightarrow P^n$ бейнелеуі үшін $\varphi_i: P^n \rightarrow P$ бейнелеулері, $i \in \overline{1, n}$, φ бейнелеуінің координаттық функциялары деп аталады. Бұл жағдайда $\varphi = (\varphi_1, \dots, \varphi_n)$ белгілеуін қолданамыз.

Негізгі ережелер

[2] жұмыста φ бейнелеуінің биективтілігінің оның координаттық функциялары терминінде келесі критерийі алынған.

Теорема 1. Айталық, $P = GF(q)$, онда $\varphi = (\varphi_1, \dots, \varphi_n): P^n \rightarrow P^n$ бейнелеуі биективті болуы үшін кез келген $(c_1, \dots, c_n) \in P^n \setminus \{0\}$ үшін $\sum_{i=1}^n c_i \varphi_i$ функциясы теңдестірілген болуы қажетті және жеткілікті.

Алдағы уақытта келесі тұжырым қажет болады.

Лемма 1. Айталық, $P = GF(q)$, $1 \leq m < n$ және $\varphi(x_1, \dots, x_n)$ функциясы мына түрде берілсін:

$$\varphi(x_1, \dots, x_n) = \varphi_1(x_1, \dots, x_m) + \varphi_2(x_{m+1}, \dots, x_n).$$

Егер $\varphi_1(x_1, \dots, x_m)$ немесе $\varphi_2(x_{m+1}, \dots, x_n)$ функцияларының ең болмағанда біреуі теңдестірілген болса, онда $\varphi(x_1, \dots, x_n)$ функциясы теңдестірілген болады.

Дәлелдеу. Айталық, $\varphi(x_1, \dots, x_n)$ функциясы теңдестірілген делік. Онда кез келген $c \in P$ элементі үшін оның толық түпбейнесінің қуаты

$$|\varphi^{-1}(c)| = \sum_{\substack{a, b \in P \\ a+b=c}} |\varphi_1^{-1}(a)| |\varphi_2^{-1}(b)| = \sum_{b \in P} |\varphi_1^{-1}(c-b)| |\varphi_2^{-1}(b)|$$

формуласымен табылады. $\varphi(x_1, \dots, x_m)$ функциясы теңдестірілген болғандықтан, алатынымыз:

$$|\varphi^{-1}(c)| = q^{m-1} \sum_{b \in P} |\varphi_2^{-1}(b)| = q^{m-1} q^{n-m} = q^{n-1}.$$

Айталық, $P = GF(q)$ – кез келген өріс, p – оның сипаттамасы, $\varphi = (\varphi_1, \dots, \varphi_n)$ – кез келген бейнелеу, χ_a , $a \in P \setminus \{0\}$ – P өрісінің аддитивті сипаттамасы болсын, ол келесі теңдікпен анықталады:

$$\chi_a(x) = e^{2\pi i (\text{tr}_p^q(ax)/p)}$$

мұндағы tr_p^q – P өрісінен жай ішкі өріске «із». Әрбір $a = (a_1, \dots, a_n)$, $c = (c_1, \dots, c_n) \in P^n$ векторлары үшін

$$C_a^\varphi(a, c) = \sum_{x \in P^n} \chi_a \left(\sum_{j=1}^n a_j x_j - \sum_{j=1}^n c_j \varphi_j(x) \right)$$

шамасын қарастырайық.

[3] жұмыста көрсетілгендей, φ бейнелеуінің сызықтық сипаттамасы деп келесі шаманы атаймыз:

$$\delta(\varphi) = \max_{a \neq 0} \max_{a \in P^n} \max_{c \in P^n \setminus \{0\}} |C_b^\varphi(a, c)|.$$

Әдебиетке шолу

[1] жұмыс бастапқы алмастырулардан ұзындығы артық екілік векторлардың алмастыруларын құру тәсілдеріне арналған. Жұмыста бейнелеудің биективтілігін оның координаттық функциялары арқылы өрнектеу ұсынылған [2]. [3] мақалада бейнелеудің сызықтық сипат-

[illegible]
$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = -c; \\ a_2 = -c; \\ \dots\dots\dots \\ a_n = -c; \\ b_1 = -nc; \\ b_2 = -nc; \\ \dots\dots\dots \\ b_n = -nc; \end{array} \right.$$
$$(a + nb)\varphi_1(x_1) + \cdots + (a + nb)\varphi_n(x_1) + \\ (b + na)\varphi_1(x_2) + \cdots + (b + na)\varphi_n(x_2).$$
$$\begin{cases} a + nb = 0 \\ b + na = 0; \end{cases}$$

173

$$(e - n^2 e)\varphi_1(x_1) + \cdots + (e - n^2 e)\varphi_n(x_1) + \\ + (-ne + ne)\varphi_1(x_2) + \cdots + (-ne + ne)\varphi_n(x_2).$$

P^{n+t} жиынын биективті түрлендіруді P^n жиынын биективті түрлендіру арқылы құру әдісін ұсынайық. Ол үшін $x_1 = (x_1, \dots, x_{n+t}) \in P^{n+t}$, $x_1 = (x_1, \dots, x_n) \in P^n$ белгілеулерін енгізейік.

[illegible]

Дәлелдеу. φ бейнелеуі биективті болмаса, Φ бейнелеуі де биективті болмайтынын көру қиын емес. Айталық, φ – биективті делік. Коэффициенттері P өрісінен алынған координаттық функциялардың келесі сызықтық комбинациясын қарастырайық:

$$\begin{aligned}
& a_1\Phi_1(x) + \cdots + a_n\Phi_n(x) + b_1\Phi_{n+t}(x) + \cdots + b_t\Phi_{n+t}(x) = \\
& a_1\varphi_1(x) + \cdots + a_n\varphi_n(x) + b_i[\varphi_{i_1}(x_1) + \tau_1(x_{n+t})] + \\
& + \cdots + b_t[\varphi_{i_t}(x_1) + \tau_t(x_{n+t})] = a_1\varphi_1(x_1) + \cdots + \\
& + (a_{i_1} + b_1)\varphi_{i_1}(x_1) + \cdots + (a_{i_t} + b_t)\varphi_{i_t}(x_1) + \cdots + \\
& + a_n\varphi_n(x_1) + b_1\tau_1(x_{n+t}) + \cdots + b_t\tau_t(x_{n+t})
\end{aligned} \tag{4}$$

174

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = 0; \\ \dots \dots \dots \\ a_{i_1} + b_1 = 0; \\ \dots \dots \dots \\ a_{i_t} + b_t = 0; \\ \dots \dots \dots \\ a_n = 0; \\ b_1 = 0; \\ \dots \dots \dots \\ b_t = 0 \end{array} \right.$$

жағдайын қарастыру қалды. Бұл жағдайда $a_1 = \dots = a_n = 0$ және Φ_i , $i = \overline{1, n+t}$ координаттық функциялардың сызықтық комбинациясы тривиалды болады.

Нәтижелер мен талқылау

(1) ереже бойынша құрылған ψ түрлендіруінің сызықтық сипаттамасының φ бейнелеуінің сызықтық сипаттамасымен байланысын табайық.

Теорема 4. Айталық, $n \in N$, $n^2 \not\equiv 1 \pmod{p}$, $\varphi = (\varphi_1, \dots, \varphi_n): P^n \rightarrow P^n$ – кез келген бейнелеу және $\psi = (\psi_1, \dots, \psi_{2n}): P^{2n} \rightarrow P^{2n}$ – (1) ереже бойынша құрылған бейнелеу болсын. Онда

$$\delta(\psi) = \delta(\varphi)q^n. \quad (5)$$

Дәлелдеу.
$$C_\delta^\psi(a, c) = \sum_{x \in P^n} \chi_b \left(\sum_{j=1}^{2n} a_j x_j - \sum_{j=1}^{2n} c_j \psi_j(x) \right)$$

өрнегін қарастырайық. Келесі теңдіктер орын алады:

$$C_\delta^\psi(a, c) = \sum_{x \in P^{2n}} \chi_b \left(\sum_{j=1}^{2n} a_j x_j - \sum_{j=1}^{2n} c_j \psi_j(x) \right) = \sum_{x \in P^{2n}} \chi_b \left(\sum_{j=1}^n a_j x_j - \sum_{j=1}^n c_j \psi_j(x) + \sum_{j=n+1}^{2n} a_j x_j - \sum_{j=n+1}^{2n} c_j \psi_j(x) \right).$$

(1) ережеден және аддитивті сипаттама қасиеттерінен алатынымыз

$$\begin{aligned} & \chi_b \left(\sum_{j=1}^n a_j x_j - \sum_{j=1}^n c_j \psi_j(x) + \sum_{j=n+1}^{2n} a_j x_j - \sum_{j=n+1}^{2n} c_j \psi_j(x) \right) = \\ & \chi_b \left(\sum_{j=1}^n a_j x_j - \sum_{j=1}^n c_j \psi_j(x) \right) \chi_b \left(\sum_{j=n+1}^{2n} a_j x_j - \sum_{j=n+1}^{2n} c_j \psi_j(x) \right) = \end{aligned}$$

$$= \chi_b \left(\sum_{j=1}^n a_j x_j - \sum_{j=1}^n c_j \psi_j(x) - \varphi_{n+1}(x_2) \sum_{j=1}^n c_j \right) \times \\ \times \chi_b \left(\sum_{j=n+1}^{2n} a_j x_j - \sum_{j=n+1}^{2n} c_j \varphi_{j-n}(x_2) - \varphi_{n+1}(x_1) \sum_{j=n+1}^{2n} c_j \right).$$

Айталық,

$$r_1 = \sum_{j=n+1}^{2n} c_j, \quad r_2 = \sum_{j=1}^n c_j,$$

онда

$$\chi_b \left(\sum_{j=1}^n a_j x_j - \sum_{j=1}^n c_j \psi_j(x) + \sum_{j=n+1}^{2n} a_j x_j - \sum_{j=n+1}^{2n} c_j \psi_j(x) \right) = \\ = \chi_b \left(\sum_{j=1}^n a_j x_j - \sum_{j=1}^n d_j \varphi_j(x_1) \right) \chi_b \left(\sum_{j=n+1}^{2n} a_j x_j - \sum_{j=n+1}^{2n} d_j \varphi_{j-n}(x_2) \right)$$

мұндағы кез келген $j \in \overline{1, n}$ үшін $d_j = c_j + r_1$ және $j \in \overline{n+1, 2n}$ үшін $d_j = c_j + r_2$.

Осылайша, алатынымыз

$$C_b^\psi(a, c) = C_b^\varphi(a_1, d_1) C_b^\varphi(a_2, d_2),$$

мұндағы $a = (a_1, a_2)$; $d = (d_1, d_2)$. Егер c барлық нөл емес векторлардың мәндерін жүгіріп өтсе, онда d_1 және d_2 мәндері де $\mathbb{R}^n$ өрісіндегі барлық нөл емес векторлар арқылы өтетінін ескерейік. Бұл жағдайда $d_1 \neq 0$ немесе $d_2 \neq 0$. Шынымен, егер $d_1 = d_2 = 0$ болса, онда $c = (-r_1, \dots, -r_1, -r_2, \dots, -r_2)$, $r_1 = -nr_2$, $r_2 = -nr_1$, демек, $r_2 \neq 0$, $r_2 = n^2 r_2$, бұлай болуы мүмкін емес. Сонымен қатар $c = (e, \dots, e, -ne, \dots, -ne)$, және $a_2 = 0$

$$C_b^\varphi(a, c) = C_b^\varphi(a_1, d_1) C_b^\varphi(0, 0) = C_b^\varphi(a_1, d_1) q^n.$$

Бұдан $\delta(\psi) = \delta(\varphi) q^n$ аламыз.

Салдар 1. Айталық, 4-теорема шартында $q = 2$ болсын, онда (1) ереже бойынша құрылған ψ бейнелеуінің сызықтық еместігі

$$NL(\psi) = 2^n NL(\varphi)$$

шартын қанағаттандырады.

Дәлелдеу. Келесі теңдіктерді [4] және 3-теореманы қолдану жеткілікті.

$$NL(\psi) = 2^{2n-1} - \frac{1}{2} \delta(\psi);$$

$$NL(\varphi) = 2^{2n-1} - \frac{1}{2} \delta(\varphi)$$

$NL(\psi)$ шамасы ψ бейнелеуінің координаттық функцияларының барлық тривиальды емес сызықтық комбинациялары мәндерінің бағандарынан $2n$ айнымалылы барлық аффиндік логикалық функциялары мәндерінің бағандарына дейінгі ең қысқа Хэмминг қашықтығына тең екенін айта кетейік.

1-кестеде $GF(2^{2n})$ өрісінде (1) ереже бойынша құрылған алмастырулардың сызықтық еместігінің максималды мүмкін мәндері көрсетілген, $n \in \{4, 6\}$.

Кесте 1 – $GF(2^{2n})$ өрісінде (1) ереже бойынша құрылған алмастырулардың максималды сызықтық еместігі

n	$NL(\varphi)$	$NL(\psi)$
4	4	64
6	24	1536

(3) ереже бойынша құрылған Φ түрлендіруінің сызықтық сипаттамасын қарастырайық.

Теорема 5. Айталық, $\varphi = (\varphi_1, \dots, \varphi_n): P^n \rightarrow P^n$ – кез келген бейнелеу, $\varphi = (x_1, \dots, x_n): P^n \rightarrow P, i \in \overline{1, n}, 1 \leq i_1 < \dots < i_t \leq n, \tau_j - P$ жиынында алмастыру, $j \in \overline{1, t}$ және $\Phi = (\Phi_1, \dots, \Phi_{n+t}): P^{n+t} \rightarrow P^{n+t}$ бейнелеуі (3) ереже бойынша құрылған болсын. Онда Φ бейнелеуінің сызықтық сипаттамасы үшін

$$\delta(\Phi) = \max\{\delta(\varphi)q^t, q^{n+t-1}m\}$$

қатынасы орындалады, мұндағы

$$m = \max_{s \in \overline{1, t}} \delta(\tau_s).$$

$$\begin{aligned} C_b^\Phi(a, c) &= \sum_{x \in P^{n+t}} \chi_b \left(\sum_{j=1}^n a_j x_j - \sum_{j=1}^n c_j \Phi_j(x) + \sum_{j=n+1}^{n+1} a_j x_j - \sum_{j=n+1}^{n+1} c_j \Phi_j(x) \right) = \\ &= \sum_{x \in P^{n+t}} \chi_b \left(\sum_{j=1}^n a_j x_j - \sum_{j=1}^n c_j \varphi_j(x_1) + \right. \\ &\quad \left. \sum_{j=n+1}^{n+1} c_j \varphi_{j-n}(x_1) \right) \sum_{(x_{n+1}, \dots, x_{n+t}) \in P^t} \chi_b \left(\sum_{j=n+1}^{n+1} c_j \tau_{j-n}(x_j) \right) \\ &= \sum_{j=1}^n c_j \varphi_j(x_1) + \sum_{j=n+1}^{n+1} c_j \varphi_{j-n}(x_1) \end{aligned}$$

қосындысын қарастырайық. Ол үшін мынадай теңдіктер орындалады:

$$\begin{aligned} S &= c_1 \varphi_1(x_1) + \dots + c_{i_1} \varphi_{i_1}(x_1) + \dots + c_n \varphi_n(x_1) + \\ &\quad + c_{n+1} \varphi_{i_1}(x_1) + \dots + c_{n+t} \varphi_{i_t}(x_1) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= d_1 \varphi_1(x_1) + \dots + d_{i_1} \varphi_{i_1}(x_1) + \dots + d_{i_t} \varphi_{i_t}(x_1) + d_n \varphi_n(x_1), \\ \text{мұндағы } (d_1, \dots, d_{i_1}, \dots, d_{i_t}, \dots, d_n) &= (c_1, \dots, c_{i_1} + c_{n+1}, \dots, c_{i_t} + c_{n+t}, \dots, c_n). \end{aligned}$$

Онда

$$C_b^\Phi(a, c) = \sum_{x_1 \in P^n} \chi_b \left(\sum_{j=1}^n a_j x_j - \sum_{j=1}^n c_j \varphi_j(x_1) \right) \prod_{j=1}^t \sum_{x_{n+j} \in P} \chi_b (a_{n+j} x_{n+j} - c_{n+j} \tau(x_{n+j})) =$$

$$C_b^\Phi(a_1, d) \prod_{j=1}^t C_b^{\tau_j}(a_{n+j}, c_{n+j}).$$

$c \in P^{n+t} \setminus \{0\}$ элементін еркін таңдаймыз. Егер $d \neq 0$ болса, онда

$$\max_{a \in P^{n+t}} \max_{c: d \neq 0} |C_b^\Phi(a, c)| \leq \delta(\varphi) q^t.$$

Егер $d \neq 0$ болса, онда $c = (0, \dots, -b, \dots, 0, \dots, b, \dots, 0)$ векторларын қарастыра отырып, мұндағы $b \neq 0$, $(-b)$ i_s -ші орында, ал b $n+s$ -ші орында тұрады, $s=1, \dots, t$, алатынымыз

$$\max_{a \in P^{n+t}} \max_{c: d \neq 0} |C_b^\Phi(a, c)| \leq \delta(\tau_s) q^{n+t-1}.$$

Бұдан

$$\delta(\Phi) = \max\{\delta(\varphi) q^t, q^{n+t-1} m\}.$$

Салдар 2. Айталық, 5-теорема шартында $q = 2$ болсын, онда $NL(\Phi) = 0$.

Дәлелдеу. $s=1, \dots, t$ үшін $\delta(\tau_s) = 2$ екенін ескеру жеткілікті.

Қорытынды

Жұмыста баяндалған нәтижелер кіші өлшемді векторларға әсер ететін бастапқы биективті түрлендірулер негізінде құрылған биективті түрлендірулердің екі класын сипаттауға мүмкіндік береді. Құрылған алмастырулардың сызықтық сипаттамаларын есептеу формулалары алынды. Екілік жағдайда бұл қарастырылып отырған бейнелеулердің сызықтық еместігін анықтауға мүмкіндік берді.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеу жұмысы Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің қолдауымен АР19677733 «Ғылыми мәтіндерді параллельді талдаудың зияткерлік үлестірілген жүйесін әзірлеу» жобасы шеңберінде орындалды. Авторлар зерттеу жұмысына көрсетілген қолдау үшін алғыстарын білдіреді.

ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Никонов В.Г., Саранцев А.В. Методы компактной реализации биективных отображений, заданных регулярными системами однотипных булевых функций // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Прикладная и компьютерная математика. – 2003. – Т. 2. – № 1. – С. 94–105.
- 2 Лидл Р., Нидеррайтер Г. Конечные поля. – М.: Мир, 1988. – 822 с.
- 3 Бугров А.Д. Кусочно-аффинные подстановки конечных полей // Прикладная дискретная математика. – 2015. – № 4 (30). – С. 5–23.
- 4 Логачев О.А., Сальников А.А., Яценко В.В. Булевы функции в теории кодирования и криптологии. – М.: Изд-во МЦНМО, 2012. – 584 с.
- 5 Abornev A.V. Recursively-generated permutations of a binary space // Математические основы криптографии. – 2014. – Т. 5. – № 2. – С. 7–20.
- 6 Рожков М.И. Биективные отображения, порождаемые фильтрующим генератором // Прикладная дискретная математика. – 2014. – Т. 1. – № 23. – С. 27–39.
- 7 Blondeau C., Nyberg K. Perfect Nonlinear Functions and Cryptography // Finite Fields Appl. – 2015. – Т. 32. – С. 120–147.
- 8 Li C.H. The finite primitive permutation groups containing an abelian regular subgroup // Proc. London Math. Soc., MR MR2005881 (2004i:20003) – 87. – 2003. – С. 725–747.

REFERENCES

- 1 Nikonov V.G. and Sarantsev A.V. (2003). Metody kompaktnoy realizatsii biyektivnykh otobrazheniy, zadannykh regul'yarnymi sistemami odnotipnykh bulevykh funktsiy, Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Prikladnaya i komp'yuternaya matematika, vol. 2, no. 1, pp. 94–105 [in Russian].
- 2 Lidl R. and Niderrayter G. (1988) Konechnyye polya, Moscow, 822 p. [in Russian].
- 3 Bugrov A.D. (2015) Kusochno-affinnyye podstanovki konechnykh poley, Prikladnaya diskretnaya matematika, no. 4 (30), pp. 5–23 [in Russian].
- 4 Logachev O.A., Sal'nikov A.A. and Yashchenko V.V. (2004) Bulevy funktsii v teorii kodirovaniya i kriptologii, Moscow, 584 p. [in Russian].
- 5 Abornev A.V. (2014) Recursively-generated permutations of a binary space, Matematicheskiye osnovy kriptografii, vol. 5, no. 2, pp. 7–20.
- 6 Rozhkov M.I. (2014) Biyektivnyye otobrazheniya, porozhdayemye fil'truyushchim generatorom, Prikladnaya diskretnaya matematika, no. 1(23), pp. 27–39 [in Russian].
- 7 Blondeau C. and Nyberg K. (2015) Perfect Nonlinear Functions and Cryptography, Finite Fields Appl, no. 32, pp. 120–147.
- 8 Li C.H. (2003) The finite primitive permutation groups containing an abelian regular subgroup, Proc. London Math. Soc., MR MR2005881 (2004i:20003) – 87, pp. 725–747.

^{1*}Турусбекова У.К.,

PhD, ORCID ID 0000-0002-0591-2143, e-mail: umut.t@mail.ru

²Алтынбек С.А.,

ORCID ID 0000-0002-8435-7773, e-mail: serik_aa@bk.ru

¹Учреждение «Esil University», 010000, г. Астана, Казахстан

²Казахский университет технологии и бизнеса, 010000, г. Астана, Казахстан,

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ПОДСТАНОВОК ПРОИЗВОЛЬНОГО КОНЕЧНОГО ПОЛЯ И ИХ ЛИНЕЙНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Аннотация

Подстановки в конечном поле (биективные преобразования) активно изучаются во многих приложениях, в том числе и в теории защиты информации. Подстановки часто используются в качестве элементов для построения узлов обработки информации. В середине XX века К. Шеннон теоретически обосновал основные требования к отображениям, осуществляемым на таких узлах. В настоящее время при построении биективных преобразований эти требования обеспечиваются композицией нелинейных представлений, заданных таблицей в поле $GF(2)$. Представленная статья обобщает результаты работы [1] о методах увеличения размерности стационарных функциональных систем. Именно в данной работе исследованы подходы к построению новых подстановок из исходных подстановок в конечном поле. Для построенных подстановок вычислена линейная характеристика. Задача построения подстановок, заданных координатными функциями, является сложной. Актуальность темы статьи определяется необходимостью поиска новых, теоретически обоснованных методов построения классов подстановок в многомерных пространствах, обладающих требуемыми комбинаторно-алгебраическими свойствами. В работе рассмотрено несколько методов построения подстановок конечных полей из исходных подстановок, действующих на векторы меньшей размерности. В бинарном случае это позволяет найти нелинейность рассматриваемых подстановок, характеризующих сродство линейных комбинаций координатных функций подстановок ко всему классу аффинных функций. Результаты представленной работы несколько расширяют возможности построения подстановок для произвольного конечного поля.

Ключевые слова: конечное поле, подстановка, логические функции, линейная характеристика, биективное преобразование.

^{1*}**Turusbekova U.K.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0591-2143, e-mail: umut.t@mail.ru

²**Altynbek S.A.,**

ORCID ID: 0000-0002-8435-7773, e-mail: serik_aa@bk.ru

¹Institution «Esil University», 010000, Astana, Kazakhstan²Kazakh University of Technology and Business, 010000, Astana, Kazakhstan**METHODS FOR CONSTRUCTING PERMUTATIONS
OF AN ARBITRARY FINITE FIELD AND THEIR
LINEAR CHARACTERISTICS****Abstract**

Permutations in a finite field (bijective transformations) are actively studied in many applications, including in information security theory. Permutations are often used as elements for building information processing nodes. In the middle of the 20th century, K. Shannon theoretically justified the basic requirements for mapping performed on such nodes. Currently, when constructing bijective transformations, these requirements are provided by the composition of nonlinear representations given by the table in the field $GF(2)$. The presented paper summarizes the results of work [1] on methods for increasing the dimension of stationary functional systems. Namely, in this paper, approaches to the construction of new permutations from the initial permutations in the finite field are investigated. The linear characteristic is calculated for the constructed permutations. The problem of constructing permutations given by coordinate functions is difficult. The relevance of the topic of the paper is determined by the need to search for new theoretically sound methods for constructing s permutation classes in multidimensional spaces with the required combinatorial-algebraic properties. The paper considers several methods for constructing substitutions of finite fields from initial permutations acting on vectors of smaller dimension. In the binary case, this allows us to find the nonlinearity of the substitutions under consideration, characterizing the proximity of linear combinations of coordinate functions of permutations to the entire class of affine functions. The results of the presented work somewhat expand the possibilities of constructing permutations for an arbitrary finite field.

Key words: finite field, permutation, Boolean functions, linear characteristic, bijective transformation.

УДК 517.958:536.2, 539.4.
МРНТИ 30.19.15

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-181-192>

^{1,2,3}**Айнакеева Н.Ж.,**

докторант, ORCID ID: 0000-0003-4643-6072, e-mail: nursaule_math@mail.ru

¹Институт механики и машиноведения им. академика У.А. Джолдасбекова,
050010, г. Алматы, Казахстан

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби,
050040, г. Алматы, Казахстан

³Университет Нархоз, 050035, г. Алматы, Казахстан

ДИНАМИКА ТЕРМОУПРУГОГО СТЕРЖНЯ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ И СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Аннотация

Стержневые элементы широко используются в самых разных областях техники. Временные изменения температурного поля вызывают в стержневых конструкциях временно изменяющееся поле напряжений, что влияет на их прочность и надежность в эксплуатации. Определение термонапряженного состояния стержневых конструкций с учетом их механических свойств, таких как упругость, является одной из актуальных научно-технических задач. Применение методов математического моделирования позволяет исследовать термодинамические процессы, происходящие в конструкции и ее элементах, и определять их динамические и прочностные характеристики на этапе проектирования. В данной работе рассматривается задача Коши для динамики термоупругого стержня при произвольных начальных условиях, а также при силовых и тепловых воздействиях. С помощью тензора Грина уравнений термоупругости было получено аналитическое решение задачи, позволяющее определить деформации, напряжения и температуру в любом сечении стержня и в любой момент времени, если известны его начальное состояние и действующие силовые и тепловые источники. Приведены численные расчеты температуры, перемещений при действии импульсных сосредоточенных силовых и тепловых источников. Проведены расчеты решения задач Коши при действии распределенных вдоль стержня силовых и тепловых источников регулярного вида. Разработанная программа позволяет исследовать термодинамические процессы в стержнях с различными физико-механическими параметрами при действии тепловых и силовых источников как распределенных, так и сосредоточенных и импульсных, описываемых сингулярными обобщенными функциями.

Ключевые слова: термоупругий стержень, температура, перемещение, напряжение, метод обобщенных функций, тензор Грина.

Введение

Развитие теории и методов решения задач термоупругости обусловлено потребностями множества отраслей техники и прикладных наук. Такие задачи возникают при разработке новых конструкций паровых и газовых турбин, реактивных и ракетных двигателей, высокоскоростных самолетов, ядерных реакторов и месторождений полезных ископаемых в горной промышленности. Элементы этих конструкций работают в условиях неравномерного и нестационарного нагрева, что приводит к изменению механических свойств материалов и появлению температурных градиентов, вызывающих неодинаковое тепловое расширение различных частей конструкций [1–8]. Некоторые материалы при быстром возникновении напряжений из-за резкого градиента нестационарного температурного поля становятся хрупкими и не выдерживают теплового удара. Повторное воздействие тепловых напряжений может привести к разрушению элементов конструкции, поэтому изучение влияния температурного поля на напряженно-деформированное состояние сооружений и конструкций является крайне актуальной задачей.

Стержневые элементы широко применяются в самых различных областях техники. Можно привести множество примеров нагруженных стержневых элементов конструкций, таких как опоры различных сооружений, зданий, мостов и т.д. В реальных условиях на стержни могут действовать динамические нагрузки, вызывающие колебания, которые могут значительно влиять на надежность стержневых элементов и, следовательно, на надежность всей конструкции. Неустановившееся температурное поле вызывает в стержневых конструкциях изменяющееся со временем поле деформаций, что влияет на их прочность и надежность в процессе эксплуатации.

Определение термонапряженного состояния стержневых конструкций с учетом их механических свойств (особенно упругости) является одной из актуальных научно-технических задач. Использование методов математического моделирования позволяет исследовать физические процессы, происходящие в конструкциях и их элементах, и определять их динамические характеристики на этапе проектирования. Эти характеристики, в свою очередь, служат основой для прогнозирования поведения изделия в заданных условиях эксплуатации.

Здесь разработана методика определения термодинамических характеристик термоупругого стержня при действии различных силовых и тепловых источников с учетом его физико-механических свойств и начального состояния.

Основные положения

1 Постановка задачи Коши для уравнений несвязанной термоупругости

Формулируется задача Коши для уравнений несвязанной термоупругости, применительно к термоупругому стержню. Уравнения состояния этого стержня выражаются следующим образом [9, 10]:

$$\begin{cases} \rho c^2 u_{,xx} - \rho u_{,tt} - \gamma \theta_{,x} + \rho F_1(x, t) = 0 \\ \theta_{,xx} - \kappa^{-1} \theta_{,t} + F_2(x, t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где $x \in R^1, t \geq 0$. Здесь ρ – плотность массы, c – скорость распространения упругих волн в стержне, γ – коэффициент теплопроводности, $\kappa = \frac{k}{\rho c}$ – коэффициент температуропроводности, $u(x, t)$ – продольные перемещения сечений стержня, $\theta(x, t)$ – относительная температура, $F_1(x, t)$ – продольная компонента внешней силы на единицу длины; $F_2(x, t)$ – величина, характеризующая мощность теплового источника. Здесь и далее частные производные обозначены: $u_1 = u$, $u_2 = \theta$, $u_{,x} = \partial_x u_i = \frac{\partial u_i}{\partial x}$, $u_{,t} = \partial_t u_i = \frac{\partial u_i}{\partial t}$ ($i = 1, 2$).

Термоупругое напряжение в стержне определяется соотношением Дюамеля-Неймана:

$$\sigma = \rho c^2 u_{,x} - \gamma \theta \quad (2)$$

Начальные условия известны:

$$\begin{aligned} u(x, 0) = u_0(x), \quad u_{,t}(x, 0) = v_0(x), \quad \theta(x, 0) = \theta_0(x), \\ u_0(x) \in C^2(R^1), \theta_0(x) \in C^2(R^1), v_0(x) \in C^2(R^1), \end{aligned} \quad (3)$$

где $C^n(R^1)$ пространство дифференцируемых до n -го порядка функций на R^1 .

Исследуется задача начальных значений, при решении которой можно определить состояние стержня в произвольный момент времени, если известны его начальное состояние и воздействующие силовые и тепловые источники.

Необходимо найти решения уравнений (1) с начальными условиями (3), которые соответствуют условиям излучения.

$$u(x, t) \rightarrow 0, \theta(x, t) \rightarrow 0 \text{ при } |x| \rightarrow \infty, \quad \forall t \quad (4)$$

при воздействии произвольных сил и тепловых источников: $F_j(x, t) = L_j(R^1)$, при $j = 1, 2$.

2 Постановка задачи Коши в пространстве обобщенных функций

Для решения задачи применяем метод, разработанный Владимировым В.С. для задачи Коши для волновых уравнений [11, 12]. Вводятся следующие регулярные обобщенные функции, определенные на R^2 :

$$\hat{u}(x, t) = u(x, t)H(t), \quad \hat{\theta}(x, t) = \theta(x, t)H(t), \quad \hat{F}_j(x, t) = F_j(x, t)H(t), \quad j = 1, 2. \quad (5)$$

где $u(x, t)$, $\theta(x, t)$ – решение задачи Коши, $H(t)$ – функция Хевисайда: $H(t)=1$ при $t>0$, $H(t)=0$ при $t<0$. То есть доопределяем нулем решение задачи Коши вне области определения (при $t<0$). И рассмотрим действие дифференциального оператора системы (1) на эти функции в пространстве обобщенных функций $D'(R^2)$ [11, 12].

Для этого вначале найдем обобщенные производные этих функций:

$$\frac{\partial \hat{u}}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial t} H(t) + u_0(x)\delta(t), \quad \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} H(t) + v_0(x)\delta(t) + u_0(x)\delta'(t),$$

$$\frac{\partial \hat{\theta}}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial t} H(t) + \theta_0(x)\delta(t),$$

$$\frac{\partial \hat{u}}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial x} H(t), \quad \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} H(t), \quad \frac{\partial \hat{\theta}}{\partial x} = \frac{\partial \theta}{\partial x} H(t), \quad \frac{\partial^2 \hat{\theta}}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} H(t),$$

Здесь $\delta(t)$ – сингулярная δ – функция. Тогда система (1) в $D'(R^2)$ примет вид:

$$c^2 \hat{u}_{,xx} - \hat{u}_{,tt} - \tilde{\gamma} \hat{\theta}_{,x} + F_1(x, t)H(t) = -v_0(x)\delta(t) - u_0(x)\delta'(t),$$

$$\hat{\theta}_{,xx} - \kappa^{-1} \hat{\theta}_{,t} + F_2(x, t)H(t) = \kappa^{-1} \theta_0(x)\delta(t), \quad (6)$$

$$\tilde{\gamma} = \frac{\gamma}{\rho}.$$

В эти уравнения начальные условия включены как сингулярные массовые силы и тепловые источники. Далее обозначим

$$\hat{F}_1(x, t) = F_1(x, t)H(t), \quad \hat{F}_2(x, t) = F_2(x, t)H(t). \quad (7)$$

$$\hat{G}_1(x, t) = \hat{F}_1(x, t) + v_0(x)\delta(t) + u_0(x)\delta'(t)$$

$$\hat{G}_2(x, t) = \hat{F}_2(x, t) - \kappa^{-1} \theta_0(x)\delta(t)$$

Решение этой задачи в пространстве обобщенных функций выражается через тензорно-функциональную свертку(*):

$$\begin{aligned}\hat{u}(x, t) &= u(x, t)H(t) = \hat{U}_1^k(x, t) * \hat{G}_k(x, t), \\ \hat{\theta}(x, t) &= \theta(x, t)H(t) = \hat{U}_2^k(x, t) * \hat{G}_k(x, t), \quad k = 1, 2.\end{aligned}\quad (8)$$

Где $\hat{U}_j^k(x, t)$ – тензор Грина уравнений (1), который описывает термоупругие волны, порождаемые сосредоточенными импульсными источниками. Всюду по одноименным индексам в произведении суммирование от 1 до 2 (тензорная свертка).

Как известно, в теории обобщенных функций решение дифференциальных уравнений единственно в алгебре свертки с тензором Грина этих уравнений.

3 Тензор Грина уравнений несвязанной термоупругости

Тензор Грина $U_i^j(x, t)$ – это матрица фундаментальных решений системы уравнений (1), возникающих при действии импульсной сосредоточенной силы и теплового источника определенного вида:

$$F_1 = \delta(x)\delta(t)\delta_1^j, \quad F_2 = \delta(x)\delta(t)\delta_2^j, \quad j = 1, 2 \quad (9)$$

где δ_i^j – символ Кронекера. При $j=1$ действует силовой источник. При $j=2$ действует тепловой источник. Тензор Грина удовлетворяет следующим условиям излучения:

$$\begin{aligned}U_i^j(x, t) &= 0, \quad t < 0, \\ U_i^j(x, t) &\rightarrow 0, \quad t \rightarrow \infty \text{ для } \forall x \in R^1, \\ U_i^j(x, t) &\rightarrow 0, \quad |x| \rightarrow \infty \text{ для } \forall t > 0\end{aligned}\quad (10)$$

Построен тензор Грина, который имеет следующий вид (вывод тензора см. [13, 14]) :

$$\begin{aligned}U_1^j(x, t) &= \delta_1^j k^{-1} \frac{\partial \Sigma_1}{\partial t} - \delta_1^j \frac{\partial^2 \Sigma_1}{\partial x^2} - \delta_2^j \tilde{\gamma} \frac{\partial \Sigma_1}{\partial x} - \delta_1^j \Sigma_3(t) \delta(x) + \delta_2^j \tilde{\gamma} \frac{\partial \Sigma_2}{\partial x}, \\ U_2^1 &= 0, \quad U_2^2 = c^2 \Sigma_3(x, t) + c^2 \frac{\partial^2 \Sigma_2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Sigma_2}{\partial t^2}, \quad j = 1; 2 \\ \Sigma_1(x, t) &= \frac{k}{c} H(ct - |x|) \left[\frac{k}{c^2} \left(1 - e^{\frac{c}{k}(|x| - ct)} \right) + t - \frac{|x|}{c} \right], \\ \Sigma_2(x, t) &= AH(t) \left\{ e^{-\frac{c^2}{k}t} \int_0^t \frac{e^{\frac{c^2}{k}\tau - \frac{x^2}{4k\tau}}}{\sqrt{\tau}} d\tau - \int_0^t \frac{e^{-\frac{x^2}{4k\tau}}}{\sqrt{\tau}} d\tau \right\}, \quad \Sigma_3(x, t) = -\frac{k}{c^2} H(t) \left(e^{-\frac{c^2}{k}t} - 1 \right), \\ \frac{\partial \Sigma_1}{\partial t} &= -\frac{k}{c} H(ct - |x|) \left[e^{\frac{c}{k}(|x| - ct)} - 1 \right], \quad \frac{\partial \Sigma_1}{\partial x} = \frac{k}{c^2} H(ct - |x|) \operatorname{sgn} x \left[e^{\frac{c}{k}(|x| - ct)} + 1 \right],\end{aligned}\quad (11)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Sigma_2}{\partial x} &= -\frac{AH(t)}{k} \left\{ e^{-\frac{c^2}{k}t} \int_0^t \frac{e^{\frac{c^2}{k}\tau - \frac{x^2}{4k\tau}}}{\sqrt{\tau}} \frac{x}{2\tau} d\tau - \int_0^t \frac{e^{-\frac{x^2}{4k\tau}}}{\sqrt{\tau}} \frac{x}{2\tau} d\tau \right\}, \\ \frac{\partial^2 \Sigma_1}{\partial x^2} &= \left(-\frac{k}{c^2} \delta(ct - |x|) + \frac{2k}{c^2} H(ct - |x|) \delta(x) \right) \left[e^{\frac{c}{k}(|x| - ct)} + 1 \right] + \frac{1}{c} H(ct - |x|) e^{\frac{c}{k}(|x| - ct)}, \\ \frac{\partial^2 \Sigma_2}{\partial t^2} &= AH(t) \left\{ \frac{c^4}{k^2} e^{-\frac{c^2}{k}t} \int_0^t \frac{e^{\frac{c^2}{k}\tau - \frac{x^2}{4k\tau}}}{\sqrt{\tau}} d\tau - \frac{c^2}{k} e^{-\frac{c^2}{k}t} \frac{e^{\frac{c^2}{k}\tau - \frac{x^2}{4k\tau}}}{\sqrt{\tau}} \right\} - \\ &\quad - AH(t) \left\{ e^{-\frac{c^2}{k}t} \frac{e^{\frac{c^2}{k}t - \frac{x^2}{4kt}}}{k\sqrt{t}} \left(c^2 - \frac{x^2}{4t^2} \right) + \frac{x^2}{4kt^2} \frac{e^{-\frac{x^2}{4kt}}}{\sqrt{t}} \right\}, \\ \frac{\partial^2 \Sigma_2}{\partial x^2} &= \frac{AH(t)}{2k} \left\{ e^{-\frac{c^2}{k}t} \left[\int_0^t \frac{e^{\frac{c^2}{k}\tau - \frac{x^2}{4k\tau}}}{\tau\sqrt{\tau}} \left(\frac{x^2}{2k\tau} - 1 \right) d\tau \right] - \int_0^t \frac{e^{-\frac{x^2}{4k\tau}}}{\tau\sqrt{\tau}} \left(\frac{x^2}{2k\tau} - 1 \right) d\tau \right\}.\end{aligned}$$

Зная тензор Грина, можно построить решение системы (7) для любых источников в виде тензорно-функциональной свертки (8).

В формулах (8) свертка по компонентам выполняется в соответствии с определением свертки в пространстве обобщенных функций [11, 12]. Для регулярных источников, описываемых локально интегрируемыми функциями, эту формулу можно представить в интегральном виде:

$$u_j(x, t) = \iint_{R^2} U_j^k(x - y, t - \tau) * F_k(y, \tau) dy d\tau \quad j, k = 1, 2. \quad (12)$$

4 Решение задачи Коши

Чтобы получить интегральное представление обобщенного решения, возьмем свертки (8) с учетом (7), используя свойства функций и ее производной (переменная x под знаком свертки означает неполную свертку только по x):

$$\begin{aligned}\hat{u}(x, t) = u(x, t)H(t) &= \hat{U}_1^1(x, t) * F_1(x, t)H(t) + \hat{U}_1^1(x, t) *_{\underset{x}{\nu_0}} \nu_0(x) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial t} \hat{U}_1^1(x, t) *_{\underset{x}{\nu_0}} \nu_0(x) + \hat{U}_1^2(x, t) *_{\underset{x}{F_2}} F_2(x, t)H(t) + \hat{U}_1^2(x, t) *_{\underset{x}{\kappa^{-1}\theta_0}} \kappa^{-1}\theta_0(x)\end{aligned} \quad (13)$$

$$\hat{\theta}(x, t) = \theta(x, t)H(t) = \hat{U}_2^2(x, t) *_{\underset{x}{F_2}} F_2(x, t)H(t) + \hat{U}_2^2(x, t) *_{\underset{x}{\kappa^{-1}\theta_0}} \kappa^{-1}\theta_0(x) \quad (14)$$

Отметим, что все начальные условия задачи Коши входят в правую часть соотношений (13), (14). Поскольку входящие в правую часть уравнений (13), (14) функции являются регулярными, эти представления решения можно записать в следующем интегральном виде.

Сформулируем следующую теорему.

Теорема. Если $F_1(x, t), F_2(x, t)$ интегрируемые на R^2 функции, а ν_0 непрерывны на R , то решение задачи Коши для уравнений несвязанной термоупругости имеет вид:

$$\begin{aligned}\hat{u}(x, t) = & H(t) \int_0^t d\tau \int_{-\infty}^{\infty} U_1^1(x-y, \tau) F_1(y, t-\tau) dy + H(t) \int_{-\infty}^{\infty} U_1^1(x-y, \tau) v_0(y) dy + \\ & + H(t) \frac{\partial}{\partial t} \int_{-\infty}^{\infty} U_1^1(x-y, \tau) u_0(y) dy + H(t) \int_{-\infty}^{\infty} U_1^2(x-y, \tau) F_2(y, t-\tau) dy + \\ & + \kappa^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} U_1^2(x-y, \tau) \theta_0(y) dy\end{aligned}\quad (15)$$

$$\hat{\theta}(x, t) = H(t) \int_0^t d\tau \int_{-\infty}^{\infty} U_2^2(x-y, \tau) F_2(y, t-\tau) dy + \kappa^{-1} H(t) \int_{-\infty}^{\infty} U_2^2(x-y, \tau) \theta_0(y) dy \quad (16)$$

где $t > 0$.

Используя представление тензора Грина (11) и $\hat{G}_1(x, t)$, $\hat{G}_2(x, t)$ (7), решение задачи Коши имеет вид:

$$\begin{aligned}u(x, t) &= \hat{U}_1^j * \hat{G}_j = \\ &= \delta_1^j \kappa^{-1} \frac{\partial \Sigma_1}{\partial t} * G_j - \delta_1^j \frac{\partial^2 \Sigma_1}{\partial x^2} * G_j - \delta_2^j \tilde{\gamma} \frac{\partial \Sigma_1}{\partial x} * G_j - \delta_1^j \Sigma_3(t) \delta(x) * G_j + \delta_2^j \tilde{\gamma} \frac{\partial \Sigma_2}{\partial x} * G_j = \\ &= \left\{ \left(\kappa^{-1} \frac{\partial \Sigma_1}{\partial t} - \frac{\partial^2 \Sigma_1}{\partial x^2} \right) - \Sigma_3(t) \right\} * G_1 + \tilde{\gamma} \left(\frac{\partial \Sigma_2}{\partial x} - \frac{\partial \Sigma_1}{\partial x} \right) * G_2 = \\ &= \left\{ \left(\kappa^{-1} \frac{\partial \Sigma_1}{\partial t} - \frac{\partial^2 \Sigma_1}{\partial x^2} \right) - \Sigma_3(t) \right\} * \hat{F}_1 + \tilde{\gamma} \left(\frac{\partial \Sigma_2}{\partial x} - \frac{\partial \Sigma_1}{\partial x} \right) * \hat{F}_2 + \\ &\quad \left\{ \left(\kappa^{-1} \frac{\partial \Sigma_1}{\partial t} - \frac{\partial^2 \Sigma_1}{\partial x^2} \right) - \Sigma_3(t) \right\}_x * v_0(x) - \kappa^{-1} \tilde{\gamma} \left(\frac{\partial \Sigma_2}{\partial x} - \frac{\partial \Sigma_1}{\partial x} \right)_x * \theta_0(x) + \\ &\quad + \partial_t \left\{ \left(\kappa^{-1} \frac{\partial \Sigma_1}{\partial t} - \frac{\partial^2 \Sigma_1}{\partial x^2} \right) - \Sigma_3(t) \right\}_x * u_0(x) \\ \theta(x, t) &= \hat{U}_2^j * \hat{G}_j = c^2 \Sigma_3(x, t) * G_2 + c^2 \frac{\partial^2 \Sigma_2}{\partial x^2} * G_2 - \frac{\partial^2 \Sigma_2}{\partial t^2} * G_2 = \\ &= \left(c^2 \Sigma_3(x, t) + c^2 \frac{\partial^2 \Sigma_2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Sigma_2}{\partial t^2} \right) * F_2(x, t) H(t) - \left(c^2 \Sigma_3(x, t) + c^2 \frac{\partial^2 \Sigma_2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Sigma_2}{\partial t^2} \right)_x * \kappa^{-1} \theta_0(x)\end{aligned}\quad (17)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned}f1(x, t) &= \kappa^{-1} \frac{\partial \Sigma_1}{\partial t} - \frac{\partial^2 \Sigma_1}{\partial x^2} - \Sigma_3(t), \quad f2(x, t) = \frac{\partial \Sigma_2}{\partial x} - \frac{\partial \Sigma_1}{\partial x}, \\ f3(x, t) &= c^2 \Sigma_3(x, t) + c^2 \frac{\partial^2 \Sigma_2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Sigma_2}{\partial t^2}\end{aligned}$$

Тогда интегральное представление (15, 16) имеет следующий вид:

$$u(x, t) = H(t) \int_0^t d\tau \int_{-\infty}^{\infty} \{f_1(x-y, t-\tau) F_1(y, \tau) + \tilde{\gamma} f_2(x-y, t-\tau) * F_2(y, \tau)\} dy +$$

$$+ H(t) \int_{-\infty}^{\infty} \{f_1(x-y, t) v_0(y) - \kappa^{-1} \tilde{\gamma} f_2(x-y, t) \theta_0(y) + \partial_t f_1(x-y, t) u_0(y)\} dy$$

$$\theta(x, t) = H(t) \int_0^t d\tau \int_{-\infty}^{\infty} f_3(x-y, t-\tau) F_2(y, \tau) dy - \kappa^{-1} H(t) \int_0^t f_3(x-y, t) \theta_0(y) dy$$

Заметим, что формулы (15), (16) можно использовать и при действии сингулярных источников $\hat{F}_1(x, t)$, $\hat{F}_2(x, t)$, только в этом случае свертки надо брать по правилам свертки в пространстве обобщенных функций [11, 12].

5 Численные расчеты тензора Грина

В системе MathCad-14 разработана программа для расчета тензора Грина $U_i^j(x, t)$. Здесь представлены расчеты компонент этой матрицы для следующих безразмерных условных термоупругих параметров: $\rho = 1$, $c = 1$, $\gamma = 1$, $\kappa = 2$.

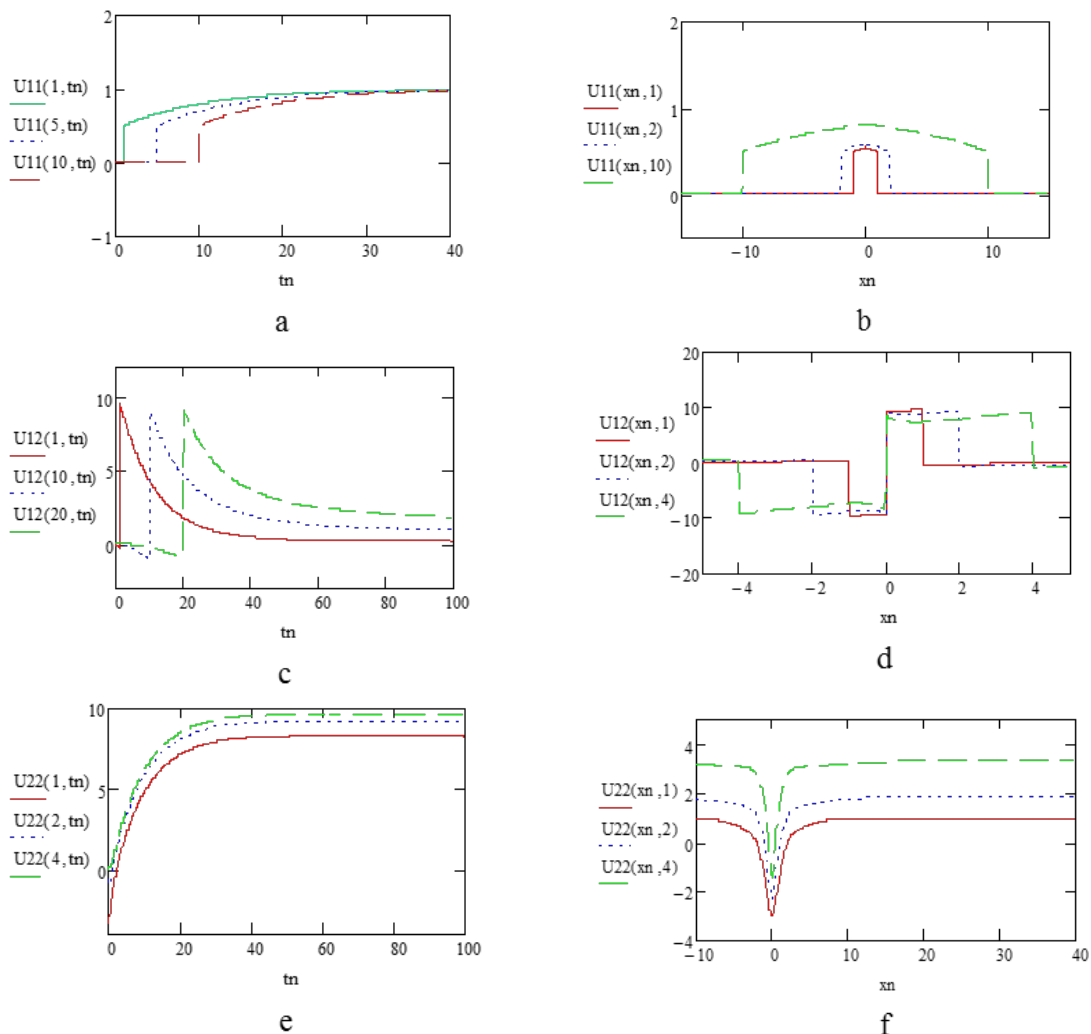


Рисунок 1 – Компоненты тензора Грина ($U_{ij}(xn, tn) = U_i^j(x, t)$) в фиксированной точке и в фиксированное время

На рисунке 1 (а–f) представлены изменения во времени соответствующих компонент тензора Грина в фиксированной точке среды ($x=x_n$) и в заданный момент времени ($t=t_n$). Перемещения, отображенные на графиках, имеют скачки, связанные с моментом прихода упругой ударной волны в точку x_n в момент времени $t_n=x_n/c$.

6 Решения задачи Коши при действии распределенных силовых и тепловых источников

Давайте рассмотрим решения задачи Коши при воздействии различных распределенных силовых и тепловых источников регулярного типа.

Задача Коши 1. Пусть на отрезке стержня приложена сила:

$$F_1(x, t) = A(x, t)H(L - |x|), F_2(x, t) = 0.$$

Начальные условия – нулевые. Тогда, используя формулы 15, 16, теоремы 1, получим перемещение:

$$u(x, t) = U_1^1(x, t) * A(x, t)H(L - |x|) = H(t) \int_0^t d\tau \int_{-L}^L U_1^1(x - y, \tau) A(y, t - \tau) d\tau$$

Из (2) следует

$$\begin{aligned} \sigma_1(x, t) &= \rho c^2 u_{,x} = \rho c^2 U_{1,x}^1(x, t) * F_1(x, t) = \rho c^2 U_1^1(x, t) * \frac{\partial F_1(x, t)}{\partial x} = \\ &= \rho c^2 U_1^1(x, t) * (A(x, t)H(L - |x|))_{,x} = \\ &= \rho c^2 U_1^1(x, t) * A(x, t) \{ \delta(L + x) - \delta(L - x) \} + \rho c^2 U_1^1(x, t) * (A_{,x} H(L - |x|)) = \\ &= \rho c^2 H(t) \int_0^t \{ U_1^1(x + L, \tau) A(-L, t - \tau) - U_1^1(x - L, \tau) A(L, t - \tau) \} d\tau \\ &\quad + \rho c^2 H(t) \int_{-L}^L dy \int_0^t U_1^1(x - y, \tau) A(y, t - \tau) d\tau \end{aligned}$$

Задача Коши 2. Пусть на отрезке действует тепловой источник:

$$F_1(x, t) = 0, F_2(x, t) = A(x, t)H(L - |x|)$$

Начальные условия – нулевые. Тогда

$$\begin{aligned} u(x, t) &= U_1^2(x, t) * A(x, t)H(L - |x|) = H(t) \int_0^t d\tau \int_{-L}^L U_1^2(x - y, \tau) A(y, t - \tau) dy \\ \theta(x, t) &= U_2^2(x, t) * A(x, t)H(L - |x|) = H(t) \int_0^t d\tau \int_{-L}^L U_2^2(x - y, \tau) A(y, t - \tau) dy \\ \sigma(x, t) &= \rho c^2 u_{,x} - \gamma \theta = \\ &= \rho c^2 H(t) \int_0^t \{ U_1^2(x + L, \tau) A(-L, t - \tau) - U_1^2(x - L, \tau) A(L, t - \tau) \} d\tau + \\ &\quad + \rho c^2 H(t) \int_{-L}^L dy \int_0^t \{ U_1^2(x - y, \tau) - \gamma U_2^2(x - y, \tau) \} A(y, t - \tau) d\tau \end{aligned}$$

Задача Коши 3. Пусть на отрезке стержня приложена сила. Начальные условия – нулевые.

$$F_1(x, t) = A(x)H(L - |x|)H(t), F_2(x, t) = 0$$

$$u(x, t) = U_1^1(x, t) * A(x, t)H(L - |x|) = H(t) \int_{-L}^L A(x - y)dy \int_0^t U_1^1(y, \tau)d\tau$$

$$\sigma(x, t) = \rho c^2 H(t) \int_0^t \{U_1^1(x + L, \tau)A(-L) - U_1^1(x - L, \tau)A(L)\}d\tau +$$

$$+ \rho c^2 H(t) \int_{-L}^L A(x - y)dy \int_0^t U_1^1(y, \tau)d\tau$$

Задача Коши 4. Пусть на отрезке действует тепловой источник:

$$F_1(x, t) = 0, F_2(x, t) = A(x)H(t)H(L - |x|)$$

Начальные условия – нулевые. В этом случае

$$u(x, t) = U_1^2(x, t) * A(x, t)H(L - |x|) = H(t) \int_0^t d\tau \int_{-L}^L U_1^2(x - y, \tau)A(y)dy$$

$$\theta(x, t) = U_2^2(x, t) * A(x, t)H(L - |x|) = H(t) \int_0^t d\tau \int_{-L}^L U_2^2(x - y, \tau)A(y)dy$$

$$\sigma(x, t) = \rho c^2 u_{,x} - \gamma \theta =$$

$$= \rho c^2 H(t) \int_0^t \{U_1^2(x + L, \tau)A(-L) - U_1^2(x - L, \tau)A(L)\}d\tau +$$

$$+ \rho c^2 H(t) \int_{-L}^L A(y)dy \int_0^t \{U_1^2(x - y, \tau) - \gamma U_2^2(x - y, \tau)\}d\tau$$

При совместном распределении силовых и тепловых источников подобного типа решение будет суммой соответствующих решений для каждого из них.

Материалы и методы

Решение задачи Коши для определения термонапряженного состояния термоупругого стержня при действии распределенных силовых и тепловых источников. Для исследования использовался метод обобщенных функций.

Результаты и обсуждение

Результатом проведенного исследования являются численные расчеты температуры и перемещений стержня при действии импульсных сосредоточенных силовых и тепловых источников.

Заключение

Полученные формулы и разработанная программа позволяют исследовать термодинамические процессы в стержнях при действии различных тепловых и силовых источников, как распределенных, так и импульсных и сосредоточенных, описываемых сингулярными обобщенными функциями.

Результаты исследования, а также разработанная компьютерная программа, могут быть использованы для оценки прочности и надежности при эксплуатации стержневых конструкций, используемых в машиностроении и строительстве наземных и подземных сооружений, таких как опоры зданий, колонны и другие элементы.

Информация о финансировании

Данные исследования поддержаны Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант BR20280990), а также проектом № AP19674789.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Li Y. Investigation of heat transfer characteristics on rod fastening rotor. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 677. – No. 3. – P. 032032.
- 2 Shibib K., Minshid M., Alattar N. Thermal and stress analysis in Nd: YAG laser rod with different double end pumping methods. Thermal Science. – 2011. – No. 15. – P. 399–407.
- 3 Andreev V., Turusov R. Nonlinear modeling of the kinetics of thermal stresses in polymer rods. Advanced Materials and Structural Engineering. – 2016. – P. 719–722.
- 4 Sukarno D.H. Analysis of nuclear fuel rod temperature distribution using CFD calculation and analytical solution. Proceedings of the 6th international symposium on current progress in mathematics and sciences. – 2021.
- 5 Mishchenko A. Spatially Structure Spatial Problem of the Stressed-Deformed State of a Structural Inhomogeneous Rod. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – 2020. – P. 953, 012004.
- 6 Hwang J.K. Thermal Behavior of a Rod during Hot Shape Rolling and Its Comparison with a Plate during Flat Rolling. Processes. – 2020. – Vol. 8. – No. 3. – 327 p.
- 7 Liu Q., He X. Thermal analysis of terfenol-d rods with different structures. Micromachines – 2023. – Vol. 14. – No. 1. – 216 p.
- 8 Arshidinova M., Tashev A., Kudaykulov A. Developing a method of accounting for the existence of local surface heat exchange in rods of variable cross-section. Applied mechanics. – 2023. – Vol. 3. – No. 7 (123).
- 9 Новацкий В. Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
- 10 Новацкий В. Динамические задачи термоупругости. – М.: Мир, 1970. – 256 с.
- 11 Владимиров В.С. Уравнения математической физики. – 1981. – 512 с.
- 12 Владимиров В.С. Обобщенные функции в математической физике. – М.: Наука, 1979.
- 13 Алексеева Л.А., Дадаева А.Н., Айнакеева Н.Ж. Фундаментальные и обобщенные решения уравнений нестационарной динамики термоупругих стержней // Вестник ЕНУ им. Л.Н.Гумилева. – 2018. – № 2 (123). – С. 56–64.
- 14 Alexeyeva L.A., Dadayeva A.N., Ainakeyeva N.Zh. Green tensor and regular solutions of equations of rods thermodynamics and their properties // Journal of theoretical and applied mechanics. – 2021. – Vol. 59. – No. 2. – P. 227–238.

REFERENCES

- 1 Li Y. (2019) Investigation of heat transfer characteristics on rod fastening rotor. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 677, no. 3, p. 032032.
- 2 Shibib K., Minshid M., Alattar N. (2011) Thermal and stress analysis in Nd: YAG laser rod with different double end pumping methods. Thermal Science, no. 15, pp. 399–407.

- 3 Andreev V., Turusov R. (2016) Nonlinear modeling of the kinetics of thermal stresses in polymer rods. *Advanced Materials and Structural Engineering*, pp. 719–722.
- 4 Sukarno D.H. (2021) Analysis of nuclear fuel rod temperature distribution using CFD calculation and analytical solution. *Proceedings of the 6th international symposium on current progress in mathematics and sciences*.
- 5 Mishchenko A. (2020) Spatially Structure Spatial Problem of the Stressed-Deformed State of a Structural Inhomogeneous Rod. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, no. 953, p. 012004.
- 6 Hwang J.K. (2020) Thermal Behavior of a Rod during Hot Shape Rolling and Its Comparison with a Plate during Flat Rolling. *Processes*, vol. 8, no. 3, 327 p.
- 7 Liu Q., He X. (2023) Thermal analysis of terfenol-d rods with different structures. *Micromachines*, vol. 14, no. 1, 216 p.
- 8 Arshidinova M., Tashev A., Kudaykulov A. (2023) Developing a method of accounting for the existence of local surface heat exchange in rods of variable cross-section. *Applied mechanics*, vol. 3, no. 7(123).
- 9 Novackii V. (1975) *Teoriya uprugosti*. Moscow, 872 p. [in Russian].
- 10 Novackii V. (1970) *Dinamicheskie dinamiki termouprugosti*. Moscow, 256 p. [in Russian].
- 11 Vladimirov V.S. (1981) *Uravneniya matematicheskoi fiziki*, 512 p. [in Russian].
- 12 Vladimirov V.S. (1979) *Obobsheniye funkzii v matematicheskoi fizike*. [in Russian].
- 13 Alexeyeva L.A., Dadayeva A.N., Ainakeyeva N.Zh. (2018) Fundamentalnye i obobshennyye resheniya uravnenii nestazionarnoi dinamiki termouprugih sterzhnei. *Vestnik ENU named L.N.Gumileva*, vol. 123, no. 2, pp. 56–64.
- 14 Alexeyeva L.A., Dadayeva A.N., Ainakeyeva N.Zh. (2021) Green tensor and regular solutions of equations of rods thermodynamics and their properties. *Journal of theoretical and applied mechanics*, vol. 59, no. 2, pp. 227–238.

^{1,2,3}**Айнакеева Н.Ж.,**

докторант, ORCID ID: 0000-0003-4643-6072, e-mail: nursaule_math@mail.ru

¹Академик У.А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институты,
050010, Алматы, Қазақстан

²Әл-Фараби атындағы қазақ ұлттық университеті, 050040, Алматы, Қазақстан

³Нархоз университеті, 050035, Алматы қ, Қазақстан

СТАЦИОНАРЛЫҚ ЕМЕС ЖЫЛУ МЕН КҮШ ӘСЕРІНДЕГІ ТЕРМОҚАТТЫ ӨЗЕК ДИНАМИКАСЫ

Аңдатпа

Өзек элементтері техниканың әртүрлі салаларында кеңінен қолданылады. Температура өрісінің уақытша өзгеруі штангалық құрылымдарда уақытша өзгеретін кернеу өрісін тудырады, бұл олардың беріктігі мен сенімділігіне әсер етеді. Серпімділік сияқты механикалық қасиеттерін ескере отырып, өзек конструкцияларының термиялық кернеулі күйін анықтау өзекті ғылыми-техникалық міндеттердің бірі. Математикалық модельдеу әдістерін қолдану құрылымда және оның элементтерінде болатын термодинамикалық процестерді зерттеуге және жобалау кезеңінде олардың динамикалық және беріктік сипаттамаларын анықтауға мүмкіндік береді. Бұл жұмыс ерікті бастапқы жағдайларда, сондай-ақ күш пен жылу әсерінен термоэластикалық штанганың динамикасы үшін Коши міндетін қарастырады. Грин тензорының көмегімен жылу-серпімділік теңдеулері, егер оның бастапқы күйі және белсенді күш пен жылу көздері белгілі болса, штанганың кез келген қимасындағы және кез келген уақытта деформацияларды, кернеулер мен температураны анықтауға мүмкіндік беретін есептің аналитикалық шешімі алынды. Импульстік шоғырланған күш пен жылу көздерінің әсерінен температураның, қозғалыстың сандық есептеулері ұсынылған. Тұрақты түрдегі қуат және жылу көздерінің өзегі бойымен бөлінген кезде Коши мәселелерін шешу есептеулері жүргізілді. Өзірленген бағдарлама оқшауланған жалпыланған функциялармен сипатталатын үлестірілген және шоғырланған және импульстік жылу және қуат көздерінің әсерінен әртүрлі физика-механикалық параметрлері бар өзектердегі термодинамикалық процестерді зерттеуге мүмкіндік береді.

Тірек сөздер: термоэластикалық өзек, температура, орын ауыстыру, кернеу, жалпыланған функция әдісі, Грин тензоры.

^{1,2,3}**Ainakeyeva N.Zh.,**

Doctoral student, ORCID ID: 0000-0003-4643-6072, e-mail: nursaule_math@mail.ru

¹Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, 050010, Almaty, Kazakhstan²Kazakh National University named al-Farabi, 050040, Almaty, Kazakhstan³Narxoz University, 050035, Almaty, Kazakhstan**DYNAMICS OF A THERMOELASTIC ROD UNDER UNSTEADY
THERMAL AND FORCE INFLUENCES****Abstract**

Rod elements are extensively utilized in various technological fields. An unsteady temperature field induces a time-varying stress field within the rod structure, impacting its strength and reliability during operation. Determining the thermally stressed state of rod structures, considering their mechanical properties (especially elasticity), is a significant scientific and technical challenge. The application of mathematical modeling methods enables the study of thermodynamic processes occurring within a structure and its elements, allowing for the determination of their dynamic and strength characteristics during the design phase. This paper addresses the Cauchy problem for the dynamics of a thermoelastic rod under arbitrary initial conditions and subjected to force and thermal influences. By employing the Green's tensor for thermoelasticity equations, an analytical solution is derived, which determines deformations, stresses, and temperatures at any point along the rod at any given time, provided the initial state and the acting force and heat sources are known. Numerical calculations of temperature and displacement are presented for cases involving pulsed concentrated force and heat sources. Additionally, solutions to Cauchy problems under the influence of regular force and heat sources distributed along the rod are computed. The developed program allows for the investigation of thermodynamic processes in rods with various physical and mechanical properties, under the influence of both distributed and concentrated pulsed thermal and force sources, described by singular generalized functions.

Key words: Cauchy problem, rod, uncouple thermoelasticity, method of generalized functions, temperature, displacement and stress.

UDC 517.958; 532.517.4; 533.7
IRSTI 27.35.17; 30.17.33; 30.17.53

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-193-206>

^{1*}**Manapova A.,**

Master of applied mathematics and computer science,
ORCID ID: 0000-0003-1548-7061, *e-mail: manapova.a.k.math@gmail.com

²**Beketaeva A.,**

Dr. Phys.-Math.Sc., ORCID ID: 0000-0003-4360-3728, e-mail: azimaras10@gmail.com

^{3,4}**Makarov V.,**

Can.Tech.Sc., ORCID ID:0000-0003-4874-5418, e-mail: makfone@mail.ru

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

PRE-CONDITIONING METHOD FOR SUBSTANTIALLY SUBSONIC FLOWS

Abstract

The proposed work is a detailed numerical simulation of three-dimensional subsonic turbulent flow in a channel, with the main focus on symmetric perpendicular jets arising from the walls. The solution of the Favre-averaged Navier-Stokes equations closed by the turbulence model is carried out using an algorithm based on the ENO scheme. To accelerate the convergence of the iterative process, a preconditioning method is used and a transition to a vector of primitive variables is performed. The results of the study are essential for a better understanding of subsonic turbulent flows and may find applications in various fields, including engineering and scientific research. The relevance of the work is highlighted by the development of efficient numerical algorithms capable of solving subsonic three-dimensional Navier-Stokes equations using high-order accuracy schemes, as well as the application of robust turbulence models to analyze supersonic multicomponent flow. The scientific novelty of the work is the successful use of the preconditioning method to accelerate the convergence of the iterative process.

Key words: numerical modelling, subsonic flow, perfect gas, boundary layer, Navier-Stokes equations.

Introduction

One of the peculiarities of modelling low-speed flows using the compressible form of the Euler or Navier-Stokes equations is the instability of the numerical solution and the slowing down of the convergence rate of the iterative process due to the small difference between the velocities of acoustic and convective waves [1-4]. The application of preconditioning allows us to modify the difference equations in such a way that the eigenvalues of the Jacobian (wave propagation velocity) of the modified system of equations have comparable orders of magnitude. The use of the preconditioning method [5-14] mainly leads to the improvement of convergence of stationary solutions of the establishment schemes.

When approximating spatial derivatives, central-difference methods or, as in the case of the scheme in [3], methods with special approximations are usually used. The main objective of this work is to develop a numerical algorithm for solving the problem of blowing subsonic jets from circular holes located symmetrically on the upper and lower walls of the channel perpendicular to

the flow of a low-velocity perfect gas using the preconditioning method. The solution of the original Favre averaged Navier-Stokes equations is performed using an algorithm based on the ENO scheme.

Based on the analysis, it can be noted that most authors studying flows at low Mach numbers and using the preconditioning procedure to solve the equations use Turkel matrices [7], which are suitable for preconditioning both the Euler and Navier-Stokes equations

The analysis of methods for solving the Navier-Stokes equations for flows with small Mach numbers shows that the most common way of eliminating computational difficulties is the application of the preconditioning method, which allows to solve in a unified way the problems characterized by the velocity change, mainly leads to acceleration of convergence of the stationary solution of the establishment schemes.

Main Provisions

The initial system is a system of three-dimensional Favre averaged Navier-Stokes equations for a compressible turbulent gas written in Cartesian coordinate system in conservative form:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(E-E_v)}{\partial x} + \frac{\partial(F-F_v)}{\partial y} + \frac{\partial(G-G_v)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$U = (\rho, \rho u, \rho v, \rho w, E_t)^T \quad (2)$$

Expressions for convective E , F , G and diffusive E_v , F_v , G_v flux vectors are given in [15]. The initial system (1) is written in dimensionless form. The input parameters are taken as defining parameters $u_\infty, \rho_\infty, T_\infty$ pressure and total energy are related to the value of $\rho_\infty u_\infty^2$, the characteristic length dimension is the diameter of the jet's circular orifice.

The flow parameters are given at the inlet and also as initial data:

$$u = 1, v = 0, w = 0, \rho = 1, T = 1 \quad x = 0, 0 \leq y \leq H_y, 0 \leq z \leq H_z$$

Initial data for the parameters k, ω are determined on the assumption of equality of turbulence generation and its dissipation

$$P_k = \beta^* \rho \omega k$$

Then

$$k = k_\infty, \text{ where } k_\infty = \frac{\mu_{tB-L}}{\rho Re \sqrt{\beta^*}} \sqrt{\frac{P_k}{\mu_{tB-L}}}, \omega = \omega_\infty,$$

$$\text{where } \omega_\infty = \frac{\rho k}{\mu_{tB-L} Re}, P_k = \frac{\mu_t}{Re} \left(\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \frac{4}{3} \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right).$$

Here, the algebraic Baldwin-Lomax model is used to determine the value of the turbulent viscosity coefficient. Near the wall ($0 \leq z \leq \delta_1$), the turbulent viscosity coefficient has the following form

$$\mu_t = \rho l^2 |\Omega|,$$

where $|\Omega|$ – vorticity, $l = kz|1 - e^{-z^+/A}|$ – mixing path length, $k = 0.41$ – Karman constant, $A = 26$. Away from the wall ($z > \delta_1$) is accepted

$$\mu_t = 0.0168\rho V_0 L_0,$$

where $V_0 = (F_{max}, 0.25q_{dif}^2/F_{max})$, $L_0 = 1.6z_{max}I^k$, $F_{max} = \max(|\Omega|lk)$, z_{max} consistent with F_{max} , $q_{dif} = \max(|\vec{V}|) - \min(|\vec{V}|)$, $\vec{V} = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$, $I^k = [1 + 5.5(0.3z/z_{max})^6]^{-1}$ – Klebanov's limiting multiplier [16]. This is the time during which turbulent flow is observed at a given point, related to the total measurement time. In almost all algebraic turbulence models, the Klebanov intermittency coefficient is used as a multiplier to the turbulent viscosity in the outer region.

on the bottom wall:

$$u = 0, v = 0, w = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \frac{\partial P}{\partial z} = 0, z = 0, 0 \leq x \leq H_x, 0 \leq y \leq H_y.$$

The following boundary conditions are specified for the parameters $k - \omega$ of the turbulence model on the wall

$$k = 0, \omega = \frac{6\mu}{0.075\rho(\Delta y_1)^2}.$$

There is a boundary layer near the wall, the thickness of which is determined by the formula $\delta_1 = 0.37x(Re)^{-0.2}$. A wall layer is also specified (10% of the boundary layer) $\delta_2 = 0.1\delta_1$. In this situation, the use of the percent boundary layer thickness does not lead to significant difficulties, since the calculation results are not sensitive to this parameter. Longitudinal velocity component u takes the following form:

$$u = 0.1\left(\frac{z}{\delta_2}\right) + 0.9\left(\frac{z}{\delta_2}\right)^2, \quad 0 \leq x \leq H_x, 0 \leq y \leq H_y, 0 \leq z \leq \delta_2$$

In a developed turbulent boundary layer, the longitudinal velocity profile is given by a power law:

$$u = \left(\frac{z}{\delta_1}\right)^{1/7}, \quad 0 \leq x \leq H_x, 0 \leq y \leq H_y, \delta_1 \leq z \leq \delta_2.$$

Depending on the velocity distribution, the temperature and density values will take the form of:

$$T = T_w + u(1 - T_w), \rho = \frac{1}{T},$$

где $T_w = \left(1 + r \frac{(\gamma-1)}{2} M_\infty^2\right)$ – temperature on the wall, $r = 0.88$;

on the stream:

$$u = 0, v = 0, T = 0.6, w = \sqrt{T}M_0/M_\infty, P_0 = nP_\infty, \quad z = 0, M_\infty|x^2 + y^2| \leq R,$$

the symmetry condition is set on the upper boundary:

$$w = 0, \frac{\partial u}{\partial z} = 0, \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \frac{\partial k}{\partial z} = 0, \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0, z = H_z, 0 \leq x \leq H_x, 0 \leq y \leq H_y$$

on the lateral borders:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial \omega}{\partial y} = 0 \quad y = 0, 0 \leq x \leq H_x, 0 \leq z \leq H_z$$

where H_x - length, H_z - height, H_y - design area width, R - radius of round hole; the non-reflection condition is set on the output boundary.

Materials and methods

In [15], an ENO scheme is constructed and the applicability of the scheme to the solution of the problem of supersonic flow of a multicomponent gas in a channel with blowing perpendicular jets is shown. In accordance with this, mesh densification is introduced in the boundary layer, near the wall and at the jet level, with the help of transformations [15] for a more accurate account of the flow:

$$\xi = \xi(x), \eta = \eta(z), \zeta = \zeta(y). \quad (3)$$

In this case the system of equations (1) in generalised coordinates is written in the form:

$$\frac{\partial \tilde{U}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \tilde{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \tilde{G}}{\partial \zeta} = \frac{\partial \tilde{E}_{v2}}{\partial \xi} + \frac{\partial \tilde{E}_{vm}}{\partial \xi} + \frac{\partial \tilde{F}_{v2}}{\partial \eta} + \frac{\partial \tilde{F}_{vm}}{\partial \eta} + \frac{\partial \tilde{G}_{v2}}{\partial \zeta} + \frac{\partial \tilde{G}_{vm}}{\partial \zeta} \quad (4)$$

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

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

where $J = \frac{\partial(\xi, \eta, \zeta)}{\partial(x, y, z)}$ - Jacobian transformation, $\tilde{E}_{vm}$, $\tilde{E}_{v2}$, - diffusion terms containing mixed and second derivatives.

In order to eliminate the problem associated with the system of equations (1), where $M \rightarrow 0$ the method of preconditioning is used. For this purpose, let us consider the system of equations for compressible fluid flow in linearised form in three-dimensional formulation

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + A \frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial Q}{\partial y} + C \frac{\partial Q}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

where $A = \frac{\partial E}{\partial x}$, $B = \frac{\partial F}{\partial y}$, $C = \frac{\partial G}{\partial z}$ - Jacobi matrix, and the vector of primitive variables has the form $Q = (\rho, u, v, w, S)$.

The Jacobi matrices are defined as:

$$A = \begin{pmatrix} u & \rho c^2 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\rho} & u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & u & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & u \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} v & 0 & \rho c^2 & 0 & 0 \\ 0 & v & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\rho} & 0 & v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & v \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} w & 0 & 0 & \rho c^2 & 0 \\ 0 & w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & w & 0 & 0 \\ \frac{1}{\rho} & 0 & 0 & w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & w \end{pmatrix}$$

The idea of the method is to modify the system of equations (5) by multiplying the terms with time derivative by the matrix P^{-1} :

$$P^{-1} \frac{\partial Q}{\partial t} + A \frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial Q}{\partial y} + C \frac{\partial Q}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

multiplied by P^{-1} , the system of equations (6) is rewritten in the form:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + PA \frac{\partial Q}{\partial x} + PB \frac{\partial Q}{\partial y} + PC \frac{\partial Q}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

The main purpose of building a preconditioning matrix P^{-1} is to make the eigenvalues of the matrices PA and PB , PC have the same order of magnitude. It is assumed that the matrix P^{-1} positive and as vector parameters different independent variables can be used (p, u, v, w, P, T, S). Selection of primitive vector parameters Q is dictated only by convenience in the construction of preconditioning matrices. Turkel's preconditioning matrix [7] was used in this work:

$$P^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{c^2}{\beta^2} & 0 & 0 & 0 & \delta \\ \frac{\alpha u}{\rho \beta^2} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\alpha v}{\rho \beta^2} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\alpha w}{\rho \beta^2} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

and correspondingly its inverse matrix:

$$P = \begin{pmatrix} \frac{\beta^2}{c^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{\beta^2}{c^2} \delta \\ -\frac{\alpha u}{\rho c^2} & 1 & 0 & 0 & \frac{\alpha u}{\rho c^2} \delta \\ -\frac{\alpha v}{\rho c^2} & 0 & 1 & 0 & \frac{\alpha v}{\rho c^2} \delta \\ -\frac{\alpha w}{\rho c^2} & 0 & 0 & 1 & \frac{\alpha w}{\rho c^2} \delta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

constructed for the vector of independent variables, $Q = (p, u, v, w, S)^T$, here $S = h(p / \tilde{n}^a)$ – entropy. Then products of matrices PA и PB , PC will take the form

$$PA = \begin{pmatrix} \beta^2 u & \rho \beta^2 & 0 & 0 & -\frac{\beta^2 u \delta}{c^2} \\ \frac{1}{\rho} \left(1 - \frac{\alpha u^2}{c^2} \right) & (1 - \alpha)u & 0 & 0 & \frac{\alpha u^2 \delta}{\rho c^2} \\ -\frac{\alpha v u}{\rho c^2} & -\alpha v & u & 0 & \frac{\alpha v u \delta}{\rho c^2} \\ -\frac{\alpha w u}{\rho c^2} & -\alpha w & 0 & u & \frac{\alpha w u \delta}{\rho c^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & u \end{pmatrix}$$

$$PB = \begin{pmatrix} \frac{\beta^2 v}{c^2} & 0 & \rho\beta^2 & 0 & -\frac{\beta^2 v\delta}{c^2} \\ -\frac{\alpha v u}{\rho c^2} & v & -\alpha u & 0 & \frac{\alpha v u\delta}{\rho c^2} \\ \frac{1}{\rho} \left(1 - \frac{\alpha v^2}{c^2} \right) & 0 & (1-\alpha)v & 0 & \frac{\alpha v^2 \delta}{\rho c^2} \\ -\frac{\alpha w v}{\rho c^2} & 0 & -\alpha w & v & \frac{\alpha w v\delta}{\rho c^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & v \end{pmatrix}$$

$$PC = \begin{pmatrix} \frac{\beta^2 w}{c^2} & 0 & 0 & \rho\beta^2 & -\frac{\beta^2 w\delta}{c^2} \\ -\frac{\alpha u w}{\rho c^2} & w & 0 & -\alpha u & \frac{\alpha u w\delta}{\rho c^2} \\ -\frac{\alpha v w}{\rho c^2} & 0 & w & -\alpha v & \frac{\alpha v w\delta}{\rho c^2} \\ \frac{1}{\rho} \left(1 - \frac{\alpha w^2}{c^2} \right) & 0 & 0 & (1-\alpha)w & \frac{\alpha w^2 \delta}{\rho c^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & w \end{pmatrix}$$

Let us calculate the eigenvalues of the matrix PA . For this purpose we solve the system of homogeneous equations of the form: $(PA - \lambda I) = 0$ with respect to the unknown variables λ_i $i = 1 \dots 4$.

$$\lambda = u,$$

$$\lambda_{\pm} = -\frac{1}{2c^2} \left[zu \mp \sqrt{z^2 u^2 + 4\beta^2 - \frac{u^2}{c^2}} \right],$$

where $z = 1 - \alpha + \frac{\beta^2}{c^2}$ (if $\alpha = 1 + \frac{\beta^2}{c^2}$, when $z = 0$, to $\lambda_{\pm} = \mp \sqrt{\beta^2(1 - M^2)}$).

Thus, as a result of preconditioning in the case of $M \ll 1$, in selecting $\beta \approx u^2 + v^2 + w^2$ all eigenvalues of the Jacobi matrix PA will have the same order u . Moreover or $\beta = c^2$ all λ_i become eigenvalues of the original Jacobi matrix A .

The eigenvalues of the matrices PB and PC are determined similarly. Then, according to the calculated eigenvalues of the matrices, the eigenvectors from the solution of the following system of homogeneous linear equations are determined:

$$(PA \cdot W_i - \lambda W_i) = 0,$$

where W_i $i = 1 \dots 5$ – components of eigenvectors corresponding to the eigenvalue λ_i $i = 1 \dots 5$. The matrices of eigenvectors (right eigenvectors) will take the form:

$$R_x = \begin{pmatrix} \rho\beta^2 & \rho\beta^2 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_+ - \frac{\beta^2 u}{c^2} & \lambda_- - \frac{\beta^2 u}{c^2} & 0 & 0 & \frac{\delta u}{\rho c^2} \\ \frac{\alpha v \lambda_+}{u - \lambda_+} & \frac{\alpha v \lambda_-}{u - \lambda_-} & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\alpha w \lambda_+}{u - \lambda_+} & \frac{\alpha w \lambda_-}{u - \lambda_-} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_y = \begin{pmatrix} \rho\beta^2 & 0 & \rho\beta^2 & 0 & 0 \\ \frac{\alpha u \lambda_+}{v - \lambda_+} & 1 & \frac{\alpha u \lambda_-}{v - \lambda_-} & 0 & 0 \\ \lambda_+ - \frac{\beta^2 v}{c^2} & 0 & \lambda_- - \frac{\beta^2 v}{c^2} & 0 & \frac{\delta v}{\rho c^2} \\ \frac{\alpha w \lambda_+}{v - \lambda_+} & 0 & \frac{\alpha w \lambda_-}{v - \lambda_-} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_z = \begin{pmatrix} \beta^2 & 0 & 0 & \beta^2 & 0 \\ \frac{\alpha u \lambda_+}{w - \lambda_+} & 1 & 0 & \frac{\alpha u \lambda_-}{w - \lambda_-} & 0 \\ \frac{\alpha v \lambda_+}{w - \lambda_+} & 0 & 1 & \frac{\alpha v \lambda_-}{w - \lambda_-} & 0 \\ \lambda_+ - \frac{\beta^2 w}{c^2} & 0 & 0 & \lambda_- - \frac{\beta^2 w}{c^2} & \frac{\delta w}{\rho c^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

The inverse matrices or left eigenvectors will be written in the following form:

$$R_x^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{-\gamma c^2 - \beta^2 u}{c^2 \beta \rho (-\gamma + \lambda)} & \frac{1}{-\gamma + \lambda} & 0 & 0 & -\frac{\delta u}{c^2 \rho (-\gamma + \lambda)} \\ -\frac{-\lambda c^2 + \beta^2 u}{c^2 \beta^2 \rho (-\gamma + \lambda)} & -\frac{1}{-\gamma + \lambda} & 0 & 0 & \frac{\delta u}{c^2 \rho (-\gamma + \lambda)} \\ \frac{(-\gamma c^2 \lambda + \beta^2 u^2) \alpha v}{c^2 \beta^2 \rho (u - \gamma)(u - \lambda)} & -\frac{\alpha v u}{(u - \gamma)(u - \lambda)} & 1 & 0 & \frac{\delta \alpha v u^2}{c^2 \rho (u - \gamma)(u - \lambda)} \\ -\frac{(-\gamma c^2 \lambda + \beta^2 u^2) \alpha w}{c^2 \beta^2 \rho (u - \gamma)(u - \lambda)} & -\frac{\alpha w u}{(u - \gamma)(u - \lambda)} & 0 & 1 & \frac{\delta \alpha w u^2}{c^2 \rho (u - \gamma)(u - \lambda)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_y^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{-\gamma^2 + \beta^2 v}{c^2 \beta^2 \rho(-\gamma + \lambda)} & 0 & \frac{1}{-\gamma + \lambda} 0 & 0 & -\frac{\delta v}{c^2 \rho(-\gamma + \lambda)} \\ \frac{(-\gamma^2 + \beta^2 v^2) \alpha u}{c^2 \beta^2 \rho(v - \gamma)(v - \lambda)} & 0 & -\frac{\alpha v u}{(v - \gamma)(v - \lambda)} & 0 & \frac{\delta \alpha v v^2}{c^2 \rho(v - \gamma)(v - \lambda)} \\ \frac{-\lambda c^2 + \beta^2 v}{c^2 \beta^2 \rho(-\gamma + \lambda)} & 1 & -\frac{1}{-\gamma + \lambda} & 0 & \frac{\delta v}{c^2 \rho(-\gamma + \lambda)} \\ \frac{(-\gamma^2 \lambda + \beta^2 v^2) \alpha w}{c^2 \beta^2 \rho(v - \gamma)(v - \lambda)} & 0 & -\frac{\alpha w \vartheta}{(v - \gamma)(v - \lambda)} & 0 & \frac{\delta \alpha w v^2}{c^2 \rho(v - \gamma)(v - \lambda)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_z^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{-\gamma^2 + \beta^2 w}{c^2 \beta^2 \rho(-\gamma + \lambda)} & 0 & 0 & \frac{1}{-\gamma + \lambda} & -\frac{\delta w}{c^2 \rho(-\gamma + \lambda)} \\ \frac{(-\gamma^2 \lambda + \beta^2 w^2) \alpha u}{c^2 \beta^2 \rho(w - \gamma)(w - \lambda)} & 1 & 0 & -\frac{\alpha u w}{(w - \gamma)(w - \lambda)} & \frac{\delta \alpha u w^2}{c^2 \rho(w - \gamma)(w - \lambda)} \\ \frac{(-\gamma^2 \lambda + \beta^2 w^2) \alpha v}{c^2 \beta^2 \rho(w - \gamma)(w - \lambda)} & 0 & 1 & -\frac{\alpha v w}{(w - \gamma)(w - \lambda)} & \frac{\delta \alpha v w^2}{c^2 \rho(w - \gamma)(w - \lambda)} \\ \frac{-\lambda c^2 + \beta^2 w}{c^2 \beta^2 \rho(-\gamma + \lambda)} & 0 & 0 & -\frac{1}{\gamma - \lambda} & \frac{\delta w}{c^2 \rho(-\gamma + \lambda)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

The following relations must be satisfied for the constructed matrices:

$$R_x \times R_x^{-1} = I, \quad R_y \times R_y^{-1} = I, \quad R_z \times R_z^{-1} = I \quad - \text{unit matrices.}$$

$$R_x A_x R_x^{-1} = P A, \quad R_y A_y R_y^{-1} = P B, \quad R_z A_z R_z^{-1} = P C \quad . \quad (8)$$

Let us make a transition from the system of equations (5) in primitive variables to the system of equations (1) in conservative variables. Then equation (1) is rewritten in the form:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial U} P A \frac{\partial U}{\partial Q} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial U} P B \frac{\partial U}{\partial Q} \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial Q}{\partial U} P C \frac{\partial U}{\partial Q} \frac{\partial U}{\partial z} \quad (9)$$

Moreover, the transition matrix has the form:

$$\frac{\partial Q}{\partial U} = \begin{pmatrix} \frac{1}{c^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{c^2} \\ \frac{u}{c^2} & \rho & 0 & 0 & -\frac{u}{c^2} \\ \frac{v}{c^2} & 0 & \rho & 0 & -\frac{v}{c^2} \\ \frac{w}{c^2} & 0 & 0 & \rho & -\frac{w}{c^2} \\ \frac{1}{\gamma - 1} + \frac{M^2}{2} & \rho u & \rho v & \rho w & \frac{M^2}{2} \end{pmatrix}$$

The inverse of it will be written as follows:

The matrix of preconditioning in conservative variables in the x direction taking into account (5) is as follows:

According to the principle of ENO scheme construction, the original system of equations is formally represented as follows:

$$\frac{\partial U}{\partial Q} = \begin{pmatrix} \frac{\gamma-1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) & -(\gamma-1)u & -(\gamma-1)v & -(\gamma-1)w & \gamma-1 \\ -\frac{u}{\rho} & \frac{1}{\rho} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v}{\rho} & 0 & \frac{1}{\rho} & 0 & 0 \\ -\frac{w}{\rho} & 0 & 0 & \frac{1}{\rho} & 0 \\ \frac{\gamma-1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) - c^2 & -(\gamma-1)u & -(\gamma-1)v & -(\gamma-1)w & \gamma-1 \end{pmatrix}$$

The matrix of preconditioning in conservative variables in the x direction taking into account (5) is as follows:

$$\frac{\partial Q}{\partial U} P A \frac{\partial U}{\partial Q} = \frac{\partial Q}{\partial U} R_x^{-1} A_x R_x \frac{\partial U}{\partial Q} \quad (10)$$

According to the principle of ENO scheme construction, the original system of equations is formally represented as follows:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial t} + (\hat{A}^+ + \hat{A}^-) A_{pr} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial \xi} + (\hat{B}^+ + \hat{B}^-) B_{pr} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial \eta} + (\hat{C}^+ + \hat{C}^-) C_{pr} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial \zeta} = \\ = \left[\frac{\partial(\tilde{E}_{v2} + \tilde{E}_{vm})}{\partial \xi} + \frac{\partial(\tilde{F}_{v2} + \tilde{F}_{vm})}{\partial \eta} + \frac{\partial(\tilde{G}_{v2} + \tilde{G}_{vm})}{\partial \zeta} \right] - \\ (\hat{A}^+ + \hat{A}^-) \frac{\partial(\vec{E}_\xi + \vec{D}_\xi)}{\partial \xi} - (\hat{B}^+ + \hat{B}^-) \frac{\partial(\vec{E}_\eta + \vec{D}_\eta)}{\partial \eta} - (\hat{C}^+ + \hat{C}^-) \frac{\partial(\vec{E}_\zeta + \vec{D}_\zeta)}{\partial \zeta} \end{aligned}$$

here $A_{pr} = \frac{\partial Q}{\partial U} P A \frac{\partial U}{\partial Q}$ $B_{pr} = \frac{\partial Q}{\partial U} P B \frac{\partial U}{\partial Q}$ $C_{pr} = \frac{\partial Q}{\partial U} P C \frac{\partial U}{\partial Q}$ – Jacobi matrices,

$$\hat{A}^\pm = R_x \hat{A}_\xi R_x^{-1} = R_x \left(\frac{1 \pm \text{sign}(\Lambda_\xi)}{2} \right) R_x^{-1} \quad \hat{B}^\pm = R_y \hat{A}_\eta R_y^{-1} = R_y \left(\frac{1 \pm \text{sign}(\Lambda_\eta)}{2} \right) R_y^{-1}$$

$$\hat{C}^\pm = R_z \hat{A}_\zeta R_z^{-1} = R_z \left(\frac{1 \pm \text{sign}(\Lambda_\zeta)}{2} \right) R_z^{-1} \quad E^m = \tilde{E} + \vec{E}_\xi + \vec{D}_\xi \quad F^m = \tilde{F} + \vec{E}_\eta + \vec{D}_\eta$$

$$G^m = \tilde{G} + \vec{E}_\zeta + \vec{D}_\zeta$$

modified flows at nodal points (i,j,k), consisting of initial convective vectors ($\tilde{E}$, $\tilde{F}$, $\tilde{G}$) and high-order precision additive terms ($\vec{E}_\xi$, $\vec{D}_\xi$, $\vec{E}_\eta$, $\vec{D}_\eta$, $\vec{E}_\zeta$, $\vec{D}_\zeta$), described in detail in [17].

After factorisation of the one-step finite-difference scheme for time integration of equation (11), the following equality is obtained:

$$\begin{aligned}
& \left\{ I + \Delta t \left[(\hat{A}^+ + \hat{A}^-)^n \frac{\partial}{\partial \xi} A_\xi^n \cdot - \frac{\partial}{\partial \xi} \tilde{\mu}_\xi \frac{\partial}{\partial \xi} \frac{1}{\tilde{U}_1} \cdot \right] \right\} \times \\
& \left\{ I + \Delta t \left[(\hat{B}^+ + \hat{B}^-)^n \frac{\partial}{\partial \eta} B_\eta^n \cdot - \frac{\partial}{\partial \eta} \tilde{\mu}_\eta \frac{\partial}{\partial \eta} \frac{1}{\tilde{U}_1} \cdot \right] \right\} \times \\
& \times \left\{ I + \Delta t \left[(\hat{Q}^+ + \hat{Q}^-)^n \frac{\partial}{\partial \zeta} Q_\zeta^n \cdot - \frac{\partial}{\partial \zeta} \tilde{\mu}_\zeta \frac{\partial}{\partial \zeta} \frac{1}{\tilde{U}_1} \cdot \right] \right\} \tilde{U}^{n+1} = \\
& = \tilde{U}^n + \Delta t \left[\frac{\partial \tilde{E}_{v2}^n}{\partial \xi} + \frac{\partial \tilde{F}_{v2}^n}{\partial \eta} + \frac{\partial \tilde{G}_{v2}^n}{\partial \zeta} + \frac{\partial}{\partial \xi} (2\tilde{E}_{vm}^n - \tilde{E}_{vm}^{n-1}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (2\tilde{F}_{vm}^n - \tilde{F}_{vm}^{n-1}) + \right. \\
& \left. \frac{\partial}{\partial \zeta} (2\tilde{G}_{vm}^n - \tilde{G}_{vm}^{n-1}) \right] - \Delta t \left[(\hat{A}^+ + \hat{A}^-) \frac{\partial}{\partial \xi} (E_\xi + D_\xi) + (\hat{B}^+ + \hat{B}^-) \frac{\partial}{\partial \eta} (E_\eta + D_\eta) + \right. \\
& \left. (\hat{Q}^+ + \hat{Q}^-) \frac{\partial}{\partial \zeta} (E_\zeta + D_\zeta) \right]^n \quad (12)
\end{aligned}$$

where $A_\xi = \xi_x A$, $B_\eta = \eta_z B$, $Q_\zeta = \zeta_y Q$, moreover $\hat{A}^+ + \hat{A}^- = I$, I - unit matrix $\tilde{\mu}_\xi = \frac{\mu \xi_x^2}{Re J}$, $\tilde{\mu}_\eta = \frac{\mu \eta_z^2}{Re J}$, $\tilde{\mu}_\zeta = \frac{\mu \zeta_y^2}{Re J}$.

The following operator is used to approximate the derivatives in the convective terms:

$$(\hat{A}^- + \hat{A}^+) \frac{\partial}{\partial \xi} f|_{ij} = \frac{\hat{A}_{i+1/2}^-(f_{i+1j} - f_{ij}) + \hat{A}_{i-1/2}^+(f_{ij} - f_{i-1j})}{\Delta \xi}$$

The approximation of the terms containing additive vectors of high order is performed as in [18].

Results and discussion

A splitting method is applied to solve the system of equations (11), using matrix run vector. A turbulence model is introduced to equilibrate the system of equations (1), and a precondition method $k - \omega$ is implemented to overcome the stiffness of the original system.

Figure 1 shows a comparison of the exact and numerical solutions for the profile of the longitudinal component of velocity in the section at $x=6.6$. The velocity profile converges to the exact solution.

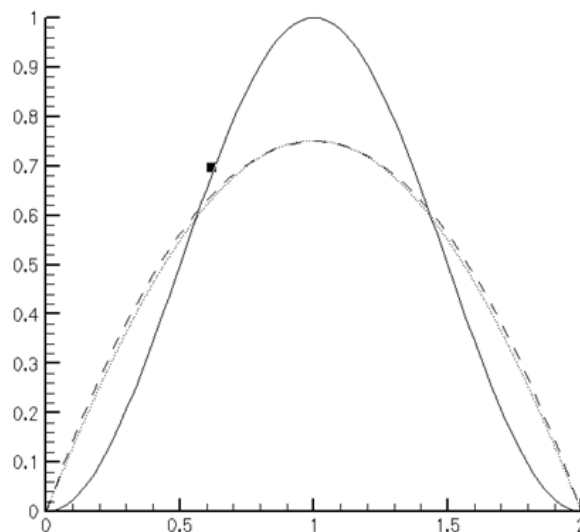


Figure 1 – Comparison of numerical results with exact solution for Poiseuille flow calculation: velocity profiles " " - initial velocity; "- - - -" - exact solution; "....." - numerical solution

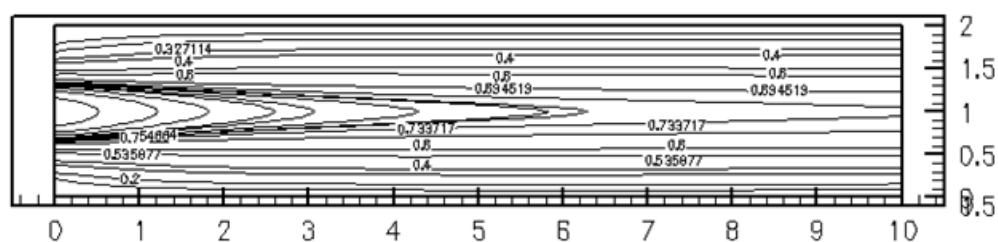


Figure 2 – Velocity component u in section xz

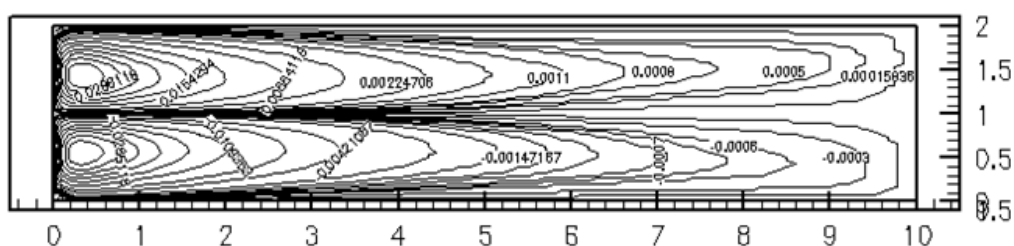


Figure 3 – Velocity component w in section xz

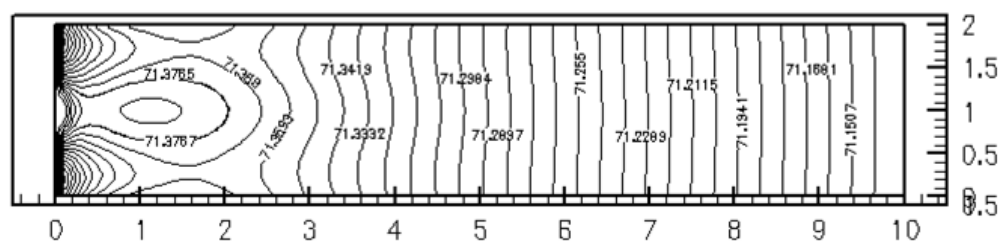


Figure 4 – Pressure in section xz

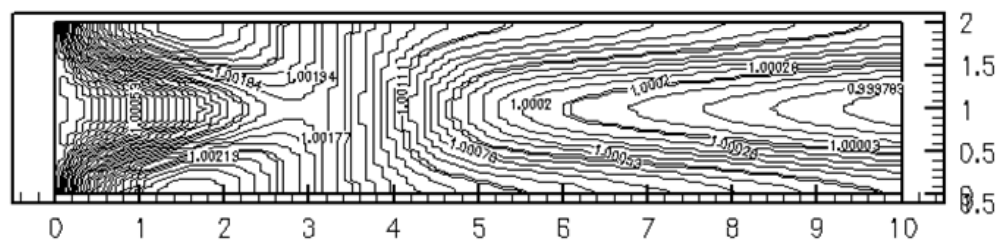


Figure 5 – temperature in section xz

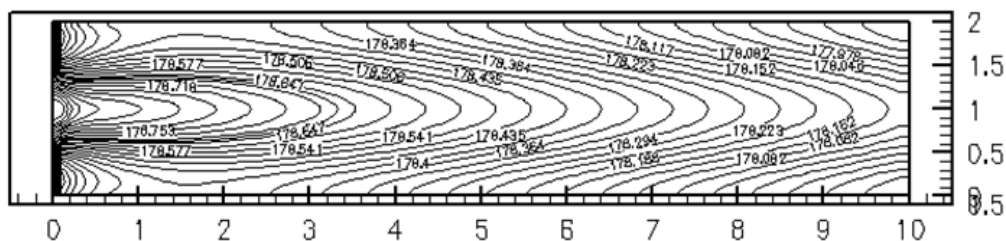


Figure 6 – total energy in section xz

The velocity profiles (Figures 2-3) quickly approach the exact solution as shown in Figure 1 [19]. Accurate results are ensured by the boundary conditions. The pressure plot (Figure 4) shows a constant pressure gradient (Figure 4) in most channels, which is $0.998(\partial p^{exact}/\partial x_1)$. The boundary layer behaviour is not evident in the longitudinal velocity profiles (Figure 2) or in the temperature regime (Figure 5).

It can be concluded that, the convergence rate of the solution is high enough, strong pressure and temperature gradients are formed near the outflow, and a boundary layer appears in the temperature contours.

Conclusion

Based on the analysis of the existing literature, the state of the problem of numerical solution of the full Navier-Stokes equations for compressible turbulent viscous gas at small Mach numbers is studied. It is known that the main problem in solving finite-difference equations is numerical instability leading to the problem of convergence of the iterative process. The main ways of eliminating the arising problems are studied. It is obtained that, to date, there are two main approaches in solving the initial equations. The Density-based method, where the full Navier-Stokes equations are used and pressure, temperature and entropy are solved directly using the basic parameters. It was found that within the Density-based method, the most common way to eliminate computational difficulties at small Mach numbers is to apply preconditioning of the initial equations, which allows the difference equations to be modified in such a way that the eigenvalues of the Jacobi matrix (wave propagation velocity) of the modified system of equations are of the same order. It is revealed that the main advantage of the preconditioning method is that it allows to solve flow problems with both small and moderate Mach numbers in a unified way.

The mathematical formulation of the problem of turbulent air flow with transverse jet induction in a substantially subsonic regime with the use of the preconditioning method has been formulated. The main advantage of using the procedure of preconditioning when solving the original Favre-averaged Navier-Stokes equations is the possibility of modifying the difference equations in such a way that the eigenvalues of the Jacobian (wave propagation velocity) of the modified system of equations have the same order. A numerical method for solving the problem is developed, in which the Turkel preconditioning matrix for primitive variables is used. The transition to conservative variables is performed using transition matrices, and the right and left eigenvectors are calculated for the system of three-dimensional preconditioning matrices.

REFERENCES

- 1 Volkov K.N. (2009) Pre-conditioning of the Euler and Navier-Stokes equations in modeling of low-speed flows on unreconstructed meshes. *Computational Mathematics and Mathematical Physics.*, vol. 49, no. 10, pp. 1868–1884.
- 2 Geiser G., Wellner J., Kußgeler E., Weber A., Moors A. (2019) On the simulation and spectral analysis of unsteady turbulence and transition effects in a multistage low pressure turbine.
- 3 Chen S., Cai F., Xiang X., Gao Z., Yan C. (2021) A low-diffusion robust flux splitting scheme towards wide-ranging Mach number flows. *Chinese J Aeronaut*, no. 34(5), pp. 628–41.
- 4 Redchys D., Fernandez-Gamiz U., Polevoy O., Moiseienko S., Portal-Porras K. (2023) Numerical simulation of subsonic flow around oscillating airfoil based on the Navier-Stokes equations. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 45, pp. 9993–10009.
- 5 Choi D., Merkle C.L. (1986) Application of the establishment method for the calculation of low-speed flows. *Aerospace Engineering*, no. 7, pp. 29–37.

- 6 Strelets M. X., Shur M. (1988) A method of compressibility scaling for calculation of stationary viscous gas flows at arbitrary Mach numbers. ZhVM and MF, vol. 28, pp. 254–266.
- 7 Turkel E. (1987) Preconditioned Method for Solving the Incompressible and Low Speed Compressible Equations. J.of Comp.Physics., vol. 72, pp. 277–298.
- 8 Tomboulides A.G. and Orzag S.A. (1998) A quasi-two-dimensional benchmark problem for low Mach number compressible codes. J.Comp. Phys., vol. 146, no. 2, pp. 691–706.
- 9 Maia A., Silva J.F., Tomita J.T., Brighenti C. Applying a Preconditioning Technique to the Euler Equations to Accelerate the Convergence Rate for Low-Speed Flows. Proceedings of the 5th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM'19), 2019.
- 10 Dong H., Liu F. (2022) A new accelerating technique for low speed flow: pseudo high speed method. Chinese Journal of Aeronautics, no. 35 (8), pp. 45–64.
- 11 Nguyen V., Park W. (2023) A Review of Preconditioning and Artificial Compressibility Dual-Time Navier–Stokes Solvers for Multiphase Flows. Fluids, no. 8, 100.
- 12 Pierre S., Christian F., Edmund K., Markus K. Low Mach preconditioning for turbomachinery flow simulations with cavities and variable gas compositions. Proceedings of ASME Turbo Expo, 2022.
- 13 Maia A., Kapat J. Tomita J.T., Silva J.F., Brighenti C., Cavalca D. Preconditioning methods for compressible flow CFD codes: Revisited. International Journal of Mechanical Sciences, 2020.
- 14 Hongyuan L., Chongwen J., Shuyao H., Zhenxuan G., Chun-Hian L. (2023) Disturbance region update method with preconditioning for steady compressible and incompressible flows. Computer Physics Communications, vol. 285.
- 15 Beketaeva A.O. (2007) Application of eno-scheme (essentially nonoscillatory) for modeling the flow of multicomponent gas mixture. Computational Technologies, Novosibirsk, vol. 12, no. S4, pp. 17–25.
- 16 Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD: DCW Industries Inc., 1993, p. 460.
- 17 Thompson K.W. (1987) Time dependent boundary conditions for hyperbolic systems. J.Comp. Phys., no. 2, pp. 1–24.
- 18 Manapova A., Beketaeva A., Makarov V. (2023) Numerical modeling of essentially subsonic flows of compressible gas. Herald of the Kazakh-British technical university, no.20(4), pp. 85–96 (In Russ.).
- 19 Poinot T.J., Lele S.K. (1992) Boundary Conditions for Direct Simulations of Compressible Viscous Flows. Journal of Computational Physics, vol. 101, pp. 104–129.

^{1*}**Манапова А.Қ.,**

қолданбалы математика және информатика магистрі, ORCID ID: 0000-0003-1548-7061,
e-mail: manapova.a.k.math@gmail.com

²**Бекетаева А.О.,**

ф.-м.ғ.к., ORCID ID: 0000-0003-4360-3728, e-mail: azimaras10@gmail.com

^{3,4}**Макаров В.В.,**

т.ғ.к., ORCID ID:0000-0003-4874-5418, e-mail: makfone@mail.ru

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

ЖЫЛДАМДЫҒЫ ДЫБЫС ЖЫЛДАМДЫҒАНАН ТӨМЕН АҒЫНДАР ҮШІН ШАРТТЫ ТҮРЛЕНДІРУ ӘДІСІ

Аңдатпа

Ұсынылып отырған жұмыс қабырғада пайда болған симметриялық перпендикуляр ағындарға назар аударып, арнадағы үш өлшемді жылдамдығы дыбыс жылдамдығынан төмен турбулентті ағынды МҰҚИЯТ сандық модельдеуге арналған. Турбуленттілік моделімен тұйықталған Фавр-орташаланған Навье-Стокс теңдеулері ENO схемасына негізделген алгоритм арқылы шешіледі. Итерациялық үрдістің конвергенциясын жылдамдату үшін шартты түрлендіру әдісі қолданылады және қарабайыр айнымалылар векторына көшу жүзеге асырылады. Зерттеу нәтижелері дыбыстық турбулентті ағындарды жақсырақ түсіну

үшін маңызды және әртүрлі салаларда, соның ішінде инженерлік және ғылыми зерттеулерде қолданылуы мүмкін. Жұмыстың өзектілігі жоғары ретті дәлдік схемаларын пайдалана отырып, үш өлшемді Навье-Стокс теңдеулерін шешуге мүмкіндік беретін тиімді сандық алгоритмдерді әзірлеумен, сондай-ақ дыбыстан жоғары көп компонентті ағынды талдау үшін сенімді турбуленттілік модельдерін қолданумен ерекшеленді. Жұмыстың ғылыми жаңалығы итерациялық процестің конвергенциясын жеделдету үшін шартты түрлендіру әдісін сәтті қолдануында жатыр.

Тірек сөздер: сандық модельдеу, жылдамдығы дыбыс жылдамдығынан төмен ағындар, идеал газ, шекаралық қабат, Навье-Стокс теңдеулері.

^{1*}Манапова А.К.

магистр прикладной математики и информатики, ORCID ID: 0000-0003-1548-7061,
e-mail: manapova.a.k.math@gmail.com

²Бекетаева А.О.,

д-р.физ.-мат.наук, ORCID ID: 0000-0003-4360-3728, e-mail: azimaras10@gmail.com

^{3,4}Макаров В.В.,

канд.техн.наук., ORCID ID:0000-0003-4874-5418, e-mail: makfone@mail.ru

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

МЕТОД ПРЕДОБУСЛАВЛИВАНИЯ ДЛЯ СУЩЕСТВЕННО ДОЗВУКОВЫХ ПОТОКОВ

Аннотация

Предлагаемая работа представляет собой детальное численное моделирование трехмерного дозвукового турбулентного течения в канале с основным упором на симметричные перпендикулярные струи, возникающие у стенок. Решение осредненных по Фавру уравнений Навье-Стокса, замкнутых моделью турбулентности, осуществляется с помощью алгоритма, основанного на схеме ENO. Для ускорения сходимости итерационного процесса используется метод предобуславливания и осуществляется переход к вектору примитивных переменных. Результаты исследования важны для лучшего понимания дозвуковых турбулентных потоков и могут найти применение в различных областях, включая инженерные и научные исследования. Актуальность работы подчеркивается разработкой эффективных численных алгоритмов, позволяющих решать дозвуковые трехмерные уравнения Навье-Стокса с использованием схем высокого порядка точности, а также с применением робастных моделей турбулентности для анализа сверхзвукового многокомпонентного течения. Научная новизна работы заключается в успешном использовании метода предобуславливания для ускорения сходимости итерационного процесса.

Ключевые слова: численное моделирование, дозвуковое течение, идеальный газ, пограничный слой, уравнения Навье-Стокса.

**ФИЗИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР
PHYSICAL SCIENCES
ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ**

UDC 621.396.67
IRSTI 47.45.29

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-207-216>

¹***Meirambekuly N.,**

ORCID ID: 0000-0003-2250-4763, e-mail: nurs.kaznu@gmail.com

¹**Bagdatuly B.,**

student, ORCID ID: 0009-0001-2422-0695, e-mail: berikbagdatuly@mail.ru

¹**Tolegen A.,**

master's student, ORCID ID: 0009-0009-6032-5214, e-mail: a.tolegen801@gmail.com

¹**Kadyrkhan D.,**

master's student, ORCID ID: 0009-0002-4783-0979, e-mail: dikadyrkhan@gmail.com

¹**Rakhmetbayeva A.,**

master's student, ORCID ID: 0009-0007-4854-4882, e-mail: aydana_ret03@mail.ru

¹**Askarbekov I.,**

student, ORCID ID: 0009-0007-9104-0313, e-mail: I.askarbekov@bk.ru

¹**Geroyeva Zh.,**

student, ORCID ID: 0009-0008-8785-9171, e-mail: geroevazh@gmail.com

¹**Serik A.,**

student, ORCID ID: 0009-0005-0278-3752, e-mail: azat.serik.2003@mail.ru

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

**COMPUTER MODELING OF ANTENNAS
FOR SMALL SPACECRAFTS**

Abstract

Antenna systems used in small spacecraft are a very important element of the spacecraft. The limited size and operating features of these devices adjust the development processes of subsystems for them. In this work, wire and microstrip antennas for small spacecraft will be modeled and studied. The software environment chosen for modeling was CST Microwave Studio, which allows modeling antennas and ultra-high-frequency devices as close to reality as possible. In this work, a wire dipole antenna operating at a frequency of 433 MHz and a microstrip antenna operating at a frequency of 2200 MHz will be simulated. The dimensions of the antenna will be selected according to calculations, materials will be selected as close as possible to those available to the authors. The results of the study will be useful for further prototyping and research of these antennas.

Key words: antenna, CubeSat, modeling, dipole, microstrip antenna.

Introduction

Currently, one of the trends in the development of science and technology is the use of small spacecraft to carry out various missions, including scientific research, education, remote sensing and imaging of the Earth's surface, etc. The relatively low cost of small spacecraft makes it possible to attract small businesses and enterprises for their creation higher technical educational institutions, that is, contributes to the creation of a “border zone” development/education [1].

Limited size and communication resources require advanced solutions in this area. Efficient use of space on board the small spacecraft is very important in this case. Therefore, optimization of the physical dimensions of small spacecraft components, including antenna devices, is an urgent task.

To transmit and receive data (tracking, telemetry and control (TT&C), imagery, etc.) many CubeSats in service or in service use different types of antennas, depending on the mission, spacecraft capabilities, and frequency range. design. Most CubeSat missions used VHF and UHF radio frequency (RF) communications with typical data rates of 1.2 and 9.6 Kbps for both telemetry and payload data transmission. Typically, wire, ribbon monopole and dipole antennas are widely used in the VHF and UHF bands due to the ease of their manufacture [2, 3]. Patch antennas, which primarily operate in the L- and S-bands, are the second most popular due to their low profile, light weight, and lack of additional deployment mechanisms [4, 5, 6, 7]. Review papers [8–10] list and describe modern antennas of various types used in small spacecraft. In practice, depending on the mission, deployable and protruding antennas are most often used [11–15]. The work [16] presents the concept of a tunable antenna, implemented using polyamide tape for operation in the S band. A feature of this antenna is the ability to change the configuration of the diagram. At the same time, for full operation, the authors propose to use a servomotor, which has a certain mass and occupies a certain place. The antennas studied and proposed in these works have fairly good characteristics, but the need for additional mechanical, software actions and resources increase the likelihood of failure of the small spacecraft mission. As is known, small spacecraft usually use several separate communication channels to transmit signals in the Earth-to-space and space-to-Earth directions, where antenna systems are used that cover and operate in several frequency ranges. Studies [17–20] proposed antennas for operation in multi-band and wideband frequency ranges. In [17], a star-shaped fractal antenna structure for operation in two bands was developed, modeled and manufactured. The geometric shape of this antenna starts with two conductive squares forming an octagonal star, which makes this antenna multi-band. [18] describes a multi-band miniature fractal microstrip antenna with high gain for modern communication systems. In the proposed design, a hexagonal Sierpinski pad is loaded onto a square microstrip antenna, which allows the spot area to be reduced by 68.4% and the perimeter to be increased by 168.8% by loading multiple triangular slots of different sizes in different iterations. [19] used dual fractal techniques to design a fractal Koch-Sierpinski microstrip antenna (KSFM) for wireless applications. The Koch fractal concept is applied to the outer periphery of the rectangular region, and the Sierpinski gasket concept is applied to the inner segment of the square region to reduce the influence of surface currents. The frequency characteristics of these antennas are achieved by fractal geometry, cutouts of different shapes and lengths. It should be noted that when developing these antennas, classical fractals were mainly used, in which large changes occur in all directions as the iteration number increases. This feature can degrade the basic characteristics of antenna systems.

Main provisions

This article performs computer modeling and research of wire and microstrip antennas for small spacecraft. The results of the study will be useful for understanding methods for modeling antenna systems for this type of device and for further research and development of effective antenna systems taking into account the limitations and requirements of this technology.

Methodology

CST Microwave Studio (CST MWS) is a program designed for fast and accurate numerical simulation of high-frequency devices (antennas, filters, power couplers, planar and multilayer structures), as well as analysis of signal integrity and electromagnetic compatibility problems in the time and frequency domains using rectangular or tetrahedral partition meshes.

A whip dipole antenna, also called a Hertz vibrator, consists of two identical arms made of metal pins. Most often, the total length of the antenna is half the wavelength of the 0.95λ radio signal. The full wave is calculated using the formula:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (1)$$

where c – is the speed of propagation of an electromagnetic wave in vacuum, f – is the frequency of the signal.

For a frequency of 433 MHz, the wavelength is 693 mm, respectively, the length of the half-wave dipole will be 329 mm.

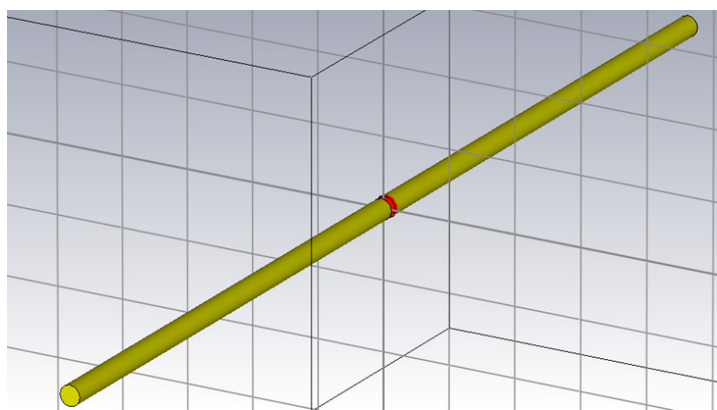


Figure 1 – Modeling of a half-wave dipole antenna

The distance between the two shoulders is 1–2 mm. Wire thickness 3 mm, material – copper. All antenna characteristics are defined in the software environment, which makes it possible.

Microstrip antennas, along with monopoles and dipoles, are probably the easiest to design. These antennas are also so easy to integrate on a printed circuit board that they are widely used in advanced systems such as 5G antenna arrays and radars. These antenna arrays are described by a simple set of design equations for the fundamental and higher order modes, so they can be designed without even using a simulation tool.

A microstrip antenna is essentially an open resonator. The antenna is located above the ground plane and the field limitation between the strip antenna and the ground plane determines the set of eigenmodes on which the antenna can operate (similar to longitudinal wave transmission lines). The eigenmodes correspond to certain modal field distributions within the resonant cavity created by the antenna, although such antennas usually operate on the fundamental mode. A microstrip antenna consists of an emitter, a dielectric substrate and a ground plane (figure 2, p. 210).

The main dimensions of a microstrip antenna are calculated using formulas (2) and (3), where c is the speed of propagation of the electromagnetic wave, f_0 is the signal frequency, ϵ_R is the dielectric constant of the substrate, h is the thickness of the dielectric substrate.

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_R + 1}{2}}} \quad (2)$$

$$L = \frac{c}{2f_0\sqrt{\varepsilon_{eff}}} - 0.824h \left(\frac{(\varepsilon_{eff}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\varepsilon_{eff}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.8\right)} \right) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_R+1}{2} + \frac{\varepsilon_R-1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1+12\left(\frac{h}{W}\right)}} \right] \quad (4)$$

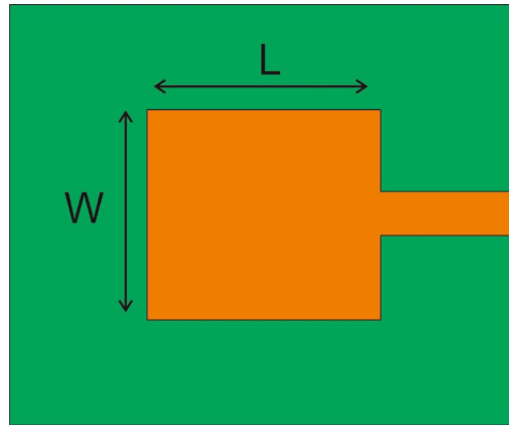


Figure 2 – Microstrip antenna structure

In the CST MWS software environment, a patch antenna was simulated to operate at a frequency of $f_0=2200\text{MHz}$ (figure 3).

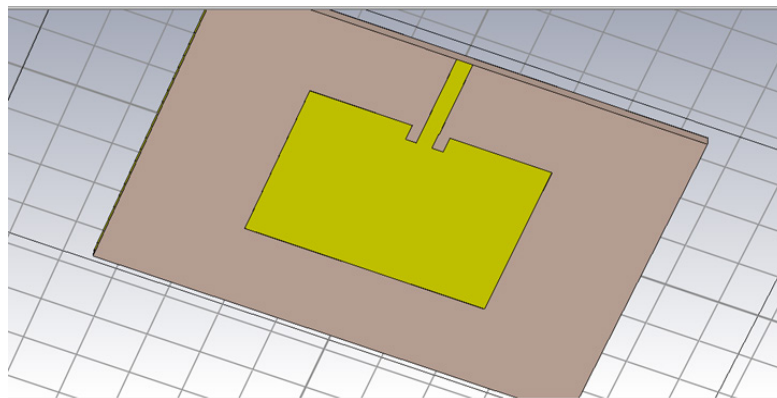


Figure 3 – Modeling a microstrip antenna

According to calculations for an antenna with substrate material FR-4 with a substrate thickness of 3 mm, the radiator size is $W=82\text{ mm}$ and $L=62\text{ mm}$. In addition, matching cutouts were made at the junction of the emitter and the power line.

Results and discussion

This section shows and describes the results of modeling antenna systems. One of the most important characteristics of antennas is parameter S_{11} , shown in Figure 4 (p. 218), where the working area is taken as the area where the reflection coefficient is below -10. According to the graph, the dipole antenna operates in the range 390-442 MHz, maximum resonance 420 MHz.

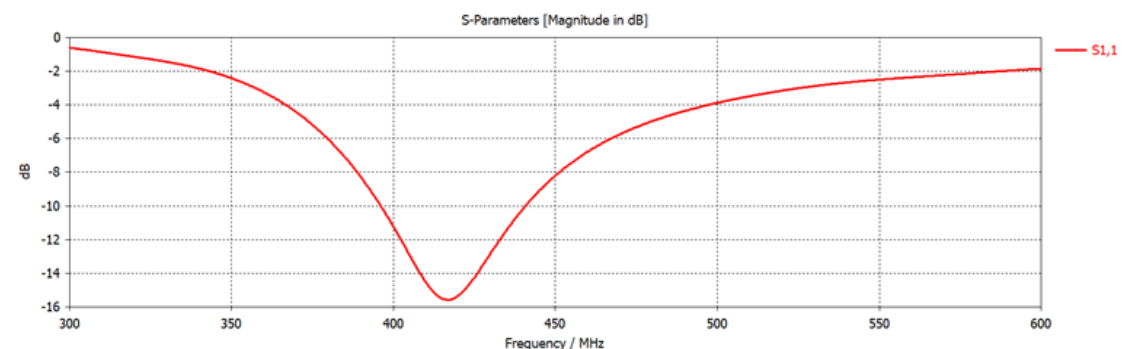


Figure 4 – S_{11} of a half-wave dipole antenna

Figure 5 shows the radiation pattern of a dipole antenna, showing the antenna's ability to direct the main energy in the desired direction. According to the figure, the dipole antenna directs the main beam of the signal along the arm, while in the transverse direction the signal shows minimal radiation. This means that this antenna is close to omnidirectional in directional characteristics. The maximum gain is 2.26 dB, which corresponds to the performance of a dipole antenna (figure 5).

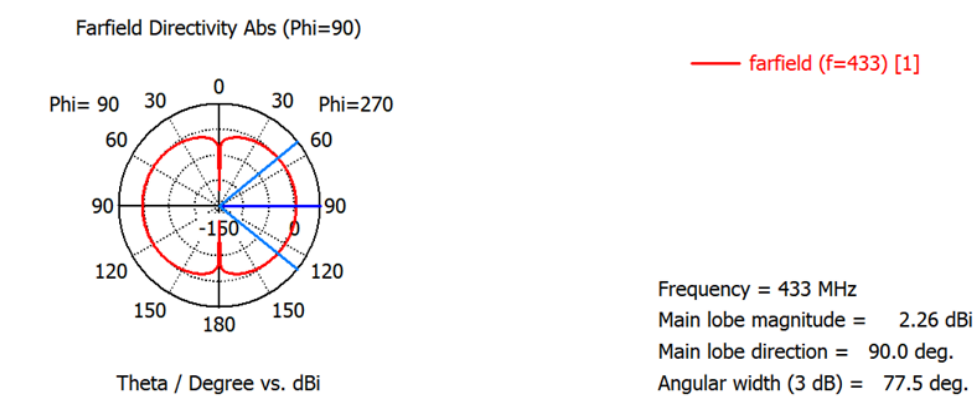


Figure 5 – Radiation pattern of a half-wave dipole antenna at a frequency of 433 MHz

Figure 6 shows parameter S_{11} of a microstrip antenna, according to which this antenna operates in the range of 2150-2260 MHz with a maximum reflection coefficient of -34 dB. In addition, there is a second resonance with a central frequency of 3450 MHz.

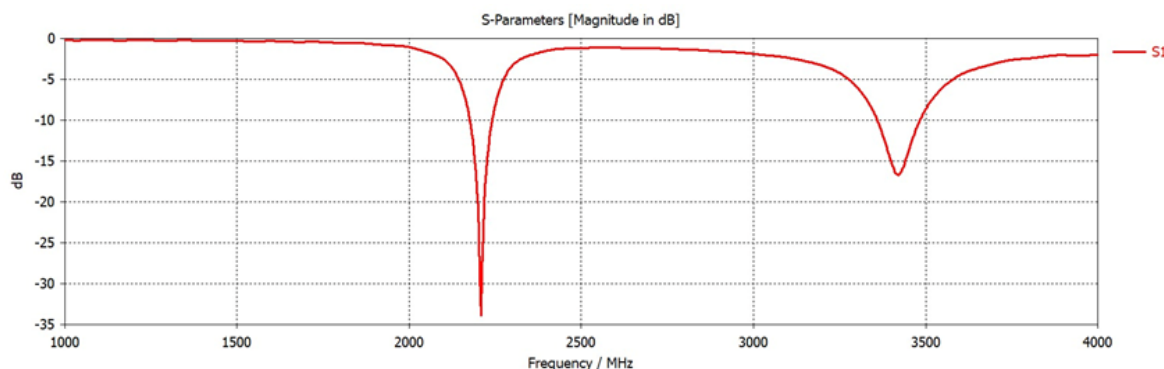


Figure 6 – S_{11} of microstrip antenna

Figure 7 shows the radiation pattern of a micropolka antenna at the fundamental frequency of 2200 MHz, according to which the antenna has more directional characteristics at this frequency.

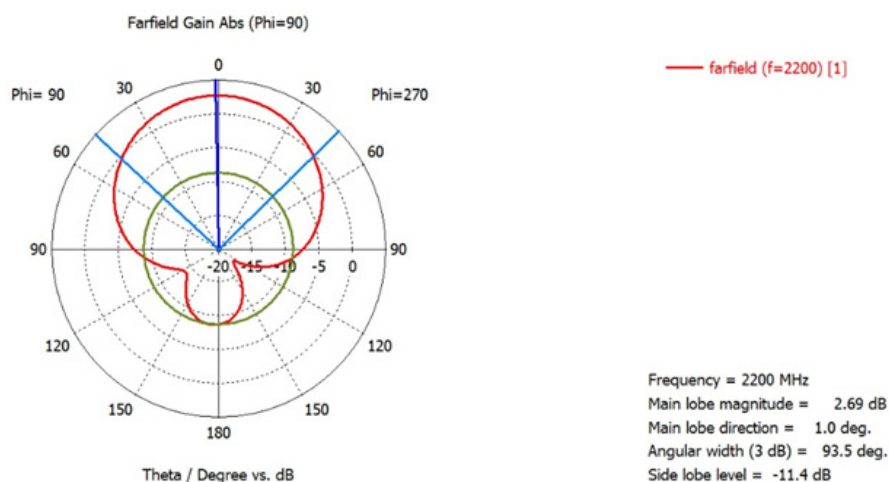


Figure 7 – Radiation pattern of a microstrip antenna at a frequency of 2200 MHz.

The main beam of the diagram corresponds to the direction of the antenna, the maximum gain at the frequency in question is 2.69 dB. The data obtained correspond to the calculations and show the performance of the antenna in this range.

Conclusion

In this work, antenna systems for small spacecraft of the wire and microstrip types were produced and studied. The research method chosen was computer modeling in compliance with the requirements of boundary conditions. A simulated wire dipole antenna for operation at 433 MHz shows performance at this frequency and has a maximum gain of 2.26 dB. Also, a simulated microstrip antenna for operation at a frequency of 2200 MHz shows performance at the required frequency with a maximum gain of 2.69 dB. In general, the characteristics of the antenna systems modeled for small spacecraft correspond to the calculations and are suitable for prototyping for further research.

REFERENCES

- 1 Севастьянов Н.Н., Бранец В.Н., Панченко В.А., Казинский Н.В., Кондранин Т.В., Негодяев С.С. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли // Труды МФТИ. – 2009. – № 3. <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sovremennyh-vozmozhnostey-sozdaniya-malyh-kosmicheskikh-apparatov-dlya-distantsionnogo-zondirovaniya-zemli> (дата обращения: 16.02.2024).
- 2 Leao T.F.C., Mooney-Chopin V., Trueman C.W. and S. Gleason. Design and implementation of a diplexer and a dual-band VHF/UHF antenna for nanosatellites // IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. – 2013. – Vol. 12. – P. 1098–1101.
- 3 Rahmat-Samii Y., Manohar V. and Kovitz J.M. For satellites think small dream big: A review of recent antenna developments for CubeSats // IEEE Antennas Propag. Mag. – 2017. – Vol. 59. – No. 2. – P. 22–30.
- 4 Abdullah H.H., Elboushi A., Gohar A.E. and Abdallah E.A. An improved S-band CubeSat communication subsystem design and implementation // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 45123–45136.
- 5 Veljovic M.J. and Skrivervik A.K. Aperture-coupled low-profile wideband patch antennas for CubeSat // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2019. – Vol. 67. – No. 5. – P. 3439–3444.

- 6 Pittella E., Pisa S. and Nascetti A. Reconfigurable S-band patch antenna radiation patterns for satellite missions / Proc. 5th IEEE Int. Workshop Metrol. Aerosp. (MetroAeroSpace). – 2018. – P. 651–656.
- 7 Johnson A.D., Manohar V., Venkatakrishnan S.B. and Volakis J.L. Low-cost S-band reconfigurable monopole/patch antenna for CubeSats // IEEE Open J. Antennas Propag. – 2020. – Vol. 1. – P. 598–603.
- 8 Abulgasem S., Tubbal F., Raad R., Theoharis P.I., Lu S., Iranmanesh S. Antenna Designs for CubeSats: A Review. IEEE Access. – 2021. – 9,9380228. – P. 45289–45324.
- 9 Rahmat-Samii Y., Manohar V., Kovitz J.M. For Satellites, Think Small, Dream Big: A review of recent antenna developments for CubeSats // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2017. – No. 59(2),7862180. – P. 22–30.
- 10 Chahat N., Decrossas E., Gonzalez-Ovejero D., Yurduseven O., Radway M., Hodges R., Estabrook P., Baker J., Bell D., Cwik T., Chattopadhyay G. Advanced CubeSat Antennas for Deep Space and Earth Science Missions: A review // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2019. – No. 61(5). – P. 37–46. <https://doi.org/10.1109/MAP.2019.2932608>.
- 11 Decrossas E., Chahat N., Walkemeyer P.E., Velasco B.S. Deployable circularly polarized UHF printed loop antenna for mars cube one (MarCO) cubesat // IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, APSURSI 2019 – Proceedings. 2019, 8888027. – P. 1719–1720.
- 12 Rahmat-Samii Y., Densmore A.C. Technology trends and challenges of antennas for satellite communication systems // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2015. – Vol. 63. – No.4. – P. 1191–1204. 6945379.
- 13 Costantine J., Tawk Y., Maqueda I., Sakovsky M., Olson G., Pellegrino S., Christodoulou C.G. UHF Deployable Helical Antennas for CubeSats // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2016. – No. 64(9). – P. 3752–3759. 7496961
- 14 Costantine J., Tawk Y., Christodoulou C.G. Deployable antenna concepts for CubeSats. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, APSURSI 2016 – Proceedings. – 2016, 7696477. – P. 1541–1542.
- 15 Babuscia A. Inflatable antenna for cubesat: Design, fabrication, deployment and tests. 73rd Annual Conference of the Society of Allied Weight Engineers, Inc., SAWE 2014. – 2014.
- 16 Johnson A.D., Manohar V., Venkatakrishnan S.B., Volakis J.L. Low-Cost S-Band Reconfigurable Monopole/Patch Antenna for CubeSats // IEEE Open Journal of Antennas and Propagation. – 2020. – No. 1. – P. 598–603.
- 17 Malallah R., Shaaban R.M., Al-Tumah W.A.G. A dual band star-shaped fractal slot antenna: Design and measurement // AEU – International Journal of Electronics and Communications. – 2020. – No. 127. – P. 153473.
- 18 Tiwari D., Ansari J.A., Saroj A.K., Kumar M. Analysis of a Miniaturized Hexagonal Sierpinski Gasket fractal microstrip antenna for modern wireless communications // AEU – International Journal of Electronics and Communications. – 2020. – Vol. 123. – P. 153288.
- 19 Siddiqui M.G., Saroj A.K., Tiwari D., Sayeed S.S. Koch–Sierpinski Fractal Microstrip antenna for C/X/Ku-band applications // Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering. – 2019. – Vol. 16(4). – P. 369–377.
- 20 Awaludin A., Sumantyo J.T.S., Gao S., Santosa C.E., Baharuddin M.Z. Wideband circularly polarized triangular-ring slot antenna for GAIA-I microsatellite. 11th European Conference on Antennas and Propagation, EUCAP 2017. – 2017. 7928040. – P.2277–2280.

REFERENCES

- 1 Sevast'janov N.N., Branec V.N., Panchenko V.A., Kazinskij N.V., Kondranin T.V., Negodjaev S.S. (2009) Analiz sovremennyh vozmozhnostej sozdaniya malyh kosmicheskikh apparatov dlja distancionnogo zondirovaniya Zemli. Trudy MFTI, no. 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sovremennyh-vozmozhnostey-sozdaniya-malyh-kosmicheskikh-apparatov-dlya-distantsionnogo-zondirovaniya-zemli> (data obrashheniya: 16.02.2024).[in Russian]

- 2 Leao T.F.C., Mooney-Chopin V., Trueman C.W. and Gleason S. (2013) Design and implementation of a diplexer and a dual-band VHF/UHF antenna for nanosatellites. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 12, pp. 1098–1101.
- 3 Rahmat-Samii Y., Manohar V. and Kovitz J.M. (2017) For satellites think small dream big: A review of recent antenna developments for CubeSats, *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 59, no. 2, pp. 22–30.
- 4 Abdullah H.H., Elboushi A., Gohar A.E. and Abdallah E.A. (2021) An improved S-band CubeSat communication subsystem design and implementation, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 45123–45136.
- 5 Veljovic M.J. and Skrivervik A.K. (2019) Aperture-coupled low-profile wideband patch antennas for CubeSat, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 5, pp. 3439–3444.
- 6 Pittella E., Pisa S. and Nascetti A. (2018) Reconfigurable S-band patch antenna radiation patterns for satellite missions, *Proc. 5th IEEE Int. Workshop Metrol. Aerosp. (MetroAeroSpace)*, pp. 651–656.
- 7 Johnson A.D., Manohar V., Venkatakrishnan S.B. and Volakis J.L. (2020) Low-cost S-band reconfigurable monopole/patch antenna for CubeSats, *IEEE Open J. Antennas Propag.*, vol. 1, pp. 598–603.
- 8 Abulgasem S., Tubbal F., Raad R., Theoharis P.I., Lu S., Iranmanesh S. (2021) Antenna Designs for CubeSats: A Review. *IEEE Access.*, 9,9380228, pp. 45289–45324.
- 9 Rahmat-Samii Y., Manohar V., Kovitz J.M. (2017) For Satellites, Think Small, Dream Big: A review of recent antenna developments for CubeSats, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, no. 59(2), 7862180, pp. 22–30.
- 10 Chahat N., Decrossas E., Gonzalez-Ovejero D., Yurduseven O., Radway M., Hodges R., Estabrook P., Baker J., Bell D., Cwik T., Chattopadhyay G. (2019) Advanced CubeSat Antennas for Deep Space and Earth Science Missions: A review. *IEEE Antennas and Propagation Magazine.*, no. 61(5), pp. 37–46. <https://doi.org/10.1109/MAP.2019.2932608>.
- 11 Decrossas E., Chahat N., Walkemeyer P.E., Velasco B.S. (2019) Deployable circularly polarized UHF printed loop antenna for mars cube one (MarCO) cubesat, *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, APSURSI 2019 – Proceedings*, 8888027, pp. 1719–1720.
- 12 Rahmat-Samii Y., Densmore A.C. (2015) Technology trends and challenges of antennas for satellite communication systems, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation.*, no. 63(4), 6945379, pp. 1191–1204.
- 13 Costantine J., Tawk Y., Maqueda I., Sakovsky M., Olson G., Pellegrino S., Christodoulou C.G. (2016) UHF Deployable Helical Antennas for CubeSats. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, no. 64(9), 7496961, pp. 3752–3759.
- 14 Costantine J., Tawk Y., Christodoulou C.G. (2016) Deployable antenna concepts for CubeSats. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, APSURSI 2016 – Proceedings.*, 7696477, pp. 1541–1542.
- 15 Babuscia A. (2014) Inflatable antenna for cubesat: Design, fabrication, deployment and tests. 73rd Annual Conference of the Society of Allied Weight Engineers, Inc., SAWE 2014.
- 16 Johnson A.D., Manohar V., Venkatakrishnan S.B., Volakis J.L. (2020) Low-Cost S-Band Reconfigurable Monopole/Patch Antenna for CubeSats. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, no. 1, pp. 598–603.
- 17 Malallah R., Shaaban R.M., Al-Tumah W.A.G. (2020) A dual band star-shaped fractal slot antenna: Design and measurement. *AEU – International Journal of Electronics and Communications*, no. 127, p. 153473.
- 18 Tiwari D., Ansari J.A., Saroj A.K., Kumar M. (2020) Analysis of a Miniaturized Hexagonal Sierpinski Gasket fractal microstrip antenna for modern wireless communications. *AEU – International Journal of Electronics and Communications*, vol. 123, p. 153288.
- 19 Siddiqui M.G., Saroj A.K., Tiwari D., Sayeed S.S. (2019) Koch–Sierpinski Fractal Microstrip antenna for C/X/Ku-band applications, *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 16(4), pp. 369–377.
- 20 Awaludin A., Sumantyo J.T.S., Gao S., Santosa C.E., Baharuddin M.Z. (2017) Wideband circularly polarized triangular-ring slot antenna for GAIA-I microsatellite. 11th European Conference on Antennas and Propagation, *EUCAP 2017*, 7928040, pp. 2277–2280.

^{1*}**Мейрамбекұлы Н.,**

ORCID ID: 0000-0003-2250-4763, e-mail: nurs.kaznu@gmail.com

¹**Бағдатұлы Б.,**

студент, ORCID ID: 0009-0001-2422-0695, e-mail: berikbagdatuly@mail.ru

¹**Төлеген А.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0009-6032-5214, e-mail: a.tolegen801@gmail.com

¹**Қадырхан Д.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0002-4783-0979, e-mail: dikadyrkhan@gmail.com

¹**Рахметбаева А.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0007-4854-4882, e-mail: aydana_ret03@mail.ru

¹**Асқарбеков И.,**

студент, ORCID ID: 0009-0007-9104-0313, e-mail: I.askarbekov@bk.ru

¹**Героева Ж.,**

студент, ORCID ID: 0009-0008-8785-9171, e-mail: geroevazh@gmail.com

¹**Серік А.,**

студент, ORCID ID: 0009-0005-0278-3752, e-mail: azat.serik.2003@mail.ru

¹әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, 050040, Алматы к., Қазақстан

ШАҒЫН ҒАРЫШ АППАРАТТАРЫНА АРНАЛҒАН АНТЕННАЛАРДЫ КОМПЬЮТЕРЛІК ЖОБАЛАУ

Аңдатпа

Шағын ғарыш аппараттарында қолданылатын антенналық жүйелер ғарыш аппаратының өте маңызды элементі. Бұл құрылғылардың шектеулі мөлшері мен жұмыс мүмкіндіктері олар үшін ішкі жүйелерді әзірлеу процестеріне түзетулер енгізеді. Бұл жұмыста шағын ғарыш аппараттарына арналған сымды және микрожолқты антенналар модельделеді және зерттеледі. Модельдеу үшін таңдалған бағдарламалық орта – CST Microwave Studio. Ол антенналар мен ультра жоғары жиілікті құрылғыларды барынша шынайы модельдеуге мүмкіндік береді. Бұл жұмыста 433 МГц жиілікте жұмыс істейтін сымды дипольді антенна және 2200 МГц жиілікте жұмыс істейтін микрожолқты антенна имитацияланады. Антеннаның өлшемдері есептеулерге сәйкес таңдалады, ал материалдар авторлардың қолындағы материалдармен ұқсастырылып таңдалады. Зерттеу нәтижелері осы антенналарды одан әрі прототиптеу мен зерттеуде пайдалы.

Тірек сөздер: антенна, CubeSat, жобалау, диполь, микрожолқты антенна.

^{1*}**Мейрамбекұлы Н.,**

ORCID ID: 0000-0003-2250-4763, e-mail: nurs.kaznu@gmail.com

¹**Бағдатұлы Б.,**

студент, ORCID ID: 0009-0001-2422-0695, e-mail: berikbagdatuly@mail.ru

¹**Төлеген А.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0009-6032-5214, e-mail: a.tolegen801@gmail.com

¹**Қадырхан Д.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0002-4783-0979, e-mail: dikadyrkhan@gmail.com

¹**Рахметбаева А.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0007-4854-4882, e-mail: aydana_ret03@mail.ru

¹**Аскарбеков И.,**

студент, ORCID ID: 0009-0007-9104-0313, e-mail: I.askarbekov@bk.ru

¹**Героева Ж.,**

студент, ORCID ID: 0009-0008-8785-9171, e-mail: geroevazh@gmail.com

¹**Серік А.,**

студент, ORCID ID: 0009-0005-0278-3752, e-mail: azat.serik.2003@mail.ru

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

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕНН ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Аннотация

Антенные системы, используемые в малых космических аппаратах, являются очень важным элементом космического аппарата. Ограниченность размеров и особенности работы данных аппаратов вносят коррективы в процессы разработки подсистем для них. В данной работе будут смоделированы и исследованы проволочная и микрополосковые антенны для малых космических аппаратов. Программной средой для моделирования выбрана CST Microwave Studio, позволяющая моделировать антенны и сверхвысокочастотные устройства максимально приближенными к реальности. В данной работе будут смоделированы проволочная дипольная антенна, работающая на частоте 433 МГц, и микрополосковая антенна, работающая на частоте 2200 МГц. Размеры антенны будут подобраны согласно расчетам, материалы будут выбраны максимально приближенными к имеющимся у авторов. Результаты исследования будут полезны для дальнейшего прототипирования и исследования данных антенн.

Ключевые слова: антенна, CubeSat, моделирование, диполь, микрополосковая антенна.

ӘОЖ 661.183.2
ҒТАХР 81.09.03

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-217-228>

^{1*}**Жасасынов Е.**,
студент, ORCID ID: 0000-0003-4149-3879, *e-mail: ezasasynov@gmail.com
¹**Қуанышбеков Т.**,
PhD, ORCID ID: 0000-0002-2336-3678, e-mail: kuanyshebekov_17@mail.ru
¹**Сағдоллин Ж.**,
ORCID ID: 0000-0001-6389-6826, e-mail: zhandossagdollin@gmail.com
¹**Ақатан Қ.**,
PhD, ORCID ID: 0000-0002-3172-623X, e-mail: ahnur.hj@mail.ru
²**Түлегенова М.**,
PhD, ORCID ID: 0000-0002-6413-4302, e-mail: malika.tulegenova@bk.ru
²**Төлепов Ж.**,
PhD, ORCID ID: 0000-0001-7895-0434, e-mail: mr.tolepov@mail.ru

¹С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университет, ҰҚ ҰҒЗ,
070020, Өскемен қ., Қазақстан
²әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Алматы қ., Қазақстан

БЕЛСЕНДІРІЛГЕН КӨМІРДЕН ХАММЕРС ӘДІСІ АРҚЫЛЫ ГРАФЕН ОКСИДІН (ГО) АЛУ ЖӘНЕ ОНЫ ЗЕРТТЕУ

Андатпа

Көміртекті материалдар электроникада, медицинада, сорбциялық материалдар дайындауда жиі қолданылады. Бұндай материалдарға графит, графен, графиттен алынған графен оксиді (ГО) және белсендірілген көмірден синтезделген графен оксиді (БК-ГО) тәрізді материалдар кең қолданысқа түсуде. Бұл мақалада белсендірілген көмірден синтезделген графен оксидінің (БК-ГО) графиттен алынған ГО-дан айырмашылығы, кемшілігі, артықшылығы аталып өтеді. Зерттеу барысында белсендірілген көмірді Хаммерс әдісімен тотықтырып, биополимер карбоксиметилцеллюлозамен (КМЦ) 1/1, 1/3, 3/1 қатынастарында алынған композитті материалдар инфра қызыл, ультракүлгін-спектроскопия және оптикалық әдістер арқылы зерттелді. Зерттеу нәтижелері негізінде алынған композитті материалдардың инфра қызыл спектрі 724 см⁻¹ жұтылу аймағында -СО-ОН топтары және 944 см⁻¹ аймағында С-Н топтары анықталды. Физикалық және механикалық қасиеттеріне байланысты оптималды қатынас алынды. Ультракүлгін спектріне сәйкес С=О эфирлік байланысы 226 нм толық ұзындықтағы жұтылуын көрсетті. Синтезделген материалдардың (БК, БК-ГО, БК-ГО/КМЦ) беттік морфологиясы оптикалық және сканерлеуші электронды микроскоптар (СЭМ) көмегімен зерттелді. Нәтижесінде БК-ГО материалының шашыраңқы орналасқан тастар тәрізді екені анықталды. Сканерлеуші электронды микроскопта зерттелетін материалдардың хаосты структураға ие екені және байланыстырғыш КМЦ-ны БК-ГО қосу барысында оптималды БК-ГО/КМЦ 1/1 қатынасында алынған материал бойындағы кеуектердің оттекті функционалды топтармен қапталғаны байқалды. Зерттеу нәтижелері бойынша БК-ГО материалының қасиеттері жағынан графиттен алынған ГО ұқсас екені анықталды. Экономикалық жағынан бұл материалдардың басқа көміртекті композиттерден артықшылығы синтез қарапайымдылығы және шикізат көзінің қолжетімділігінде.

Тірек сөздер: белсендірілген көмір (БК), белсендірілген көмірден синтезделген графен оксиді (БК-ГО), графен оксиді (ГО), Хаммерс әдісі.

Кіріспе

Қазіргі уақытта көміртегі негізінде алынған материалдар ерекше қасиеттеріне, атап айтқанда электр және жылу өткізгіштік, механикалық беріктігімен, сондай-ақ сорбциялық

және физико-химиялық ерекшеліктеріне байланысты өзекті ғылыми бағыттарды және өндіріс орындарын қамти бастады. Графен оксиді (ГО) негізінен көміртегі ұяшықтарына орналасқан оттекті функционалды топтардан тұратын, екі өлшемді материал [1]. Көміртекті материалдардың, әсіресе белсендірілген көмір материалдары ауадағы әртүрлі газдарды және су тазартуда өзінің сорбциялық ерекше қасиетін көрсетеді [2, 3].

Графиттен алынған графен оксиді (Г-ГО) және белсендірілген көмірден синтезделген графен оксиді (БК-ГО) тәріздес материалдарды электроникада [4], су тазартатын фильтр және адсорбент ретінде [5], энергия сақтау құрылғыларын және биосенсорлар жасауда, биомедицина саласында, композитті және қағаз тәріздес [6] және адсорбциялық материалдар [7] алуға, сонымен қатар сорбциялық және каталитикалық қасиеттеріне байланысты катализ үшін әмбебап материал [8].

Белсендірілген көмірден (БК) алынған ГО өзінің физикалық және химиялық қасиеттеріне, құрылымдық формасына байланысты, графиттен алынған ГО салыстырғанда өздігінен мембрана түзе алмайды. Сол себептен белсендірілген көмірден алынған ГО байланыстырушы биополимерлермен қосу арқылы мембрана түзілетіні анықталды. ГО және биополимерлердің құрамында оттекті функционалды топтардың болуына байланысты композиттік материалдар түзілуіне әсер етеді. ГО және биополимер композиттік материалдар алу үшін целлюлоза, наноцеллюлоза, гидрогель және карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) қолданылады [9, 10]. Нәтижесінде беттік қабаты тегіс, қатпарлы мембрана тәрізді материал түзілетіндігі зерттеуші ғалымдардың жұмыстарымен анықталды [11]. Жоғарыда ұсынылған ерекше физико-химиялық, беттік құрылымдық қасиеттеріне байланысты бұл жұмыстың өзектілігі, ГО/КМЦ биокомпозитін электроникада, сезімтал сенсорларда, ауылшаруашылық саласында, су тазартқыш фильтр ретінде қолдану өрісін кеңейтуге әсерін тигізеді.

ГО алуға шикізат көзі ретінде қолданылатын белсендірілген көмірдің жоғарыда аталып өткен өзіндік кемшіліктерімен артықшылықтарына байланысты графитпен салыстырғанда экономикалық тиімді, себебі қайың ағашының қалдығы және әртүрлі органикалық қалдықтар сияқты қолжетімді материалдардан алынады.

Негізгі ережелер. Материалдар мен әдістер

Қолданылған реактивтер мен құралдар:

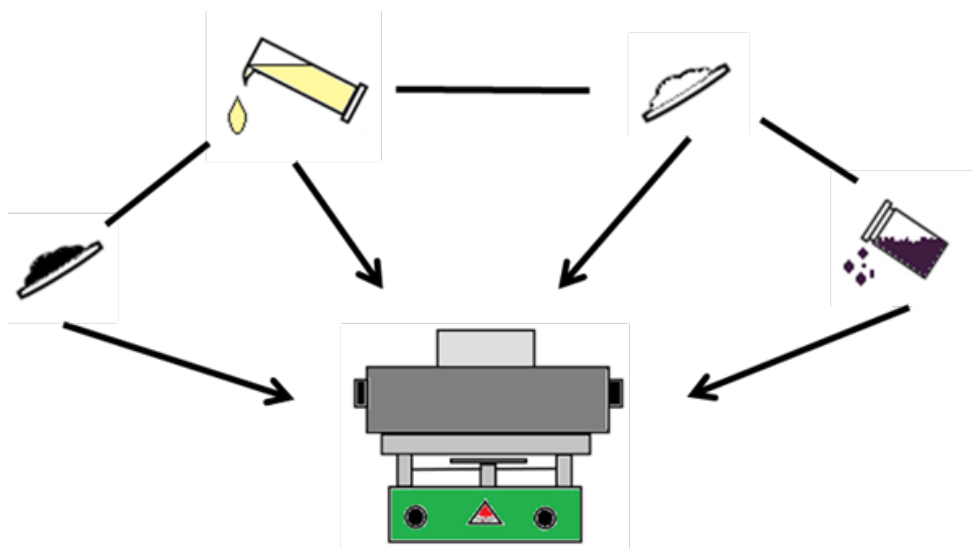
Зерттеу жұмысына белсендірілген көмір БАУ-А бренді (ГОСТ 6217-74), күкірт қышқылы (H_2SO_4) (ГОСТ 4204-77), азот қышқылы (HNO_3) 75% (ГОСТ 11125-84), натрий нитраты ($NaNO_3$) (ГОСТ 4168-79), калий перманганаты ($KMnO_4$) (ГОСТ 5777-84), сутегінің асқын тотығы (H_2O_2) (ГОСТ 50632-93), тұз қышқылы (HCl) (ГОСТ 3118-77), карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) (ТЖ2231-002-50277563-00), деионизацияланған су (ГОСТ 52501-2005), химиялық стакан 250 мл (ГОСТ 25336-82), магнитті араластырғыш (ТЖ 25-11-834), ультрадыбыстық ванна (ГОСТ 15150-69), кептіргіш шкаф (ТЖ 92-00243346-01-92), таразы (ГОСТ 24104), өлшегіш цилиндр (ГОСТ 1770-74), өлшегіш колба (ГОСТ 1770-74), петри табақшасы (ГОСТ 23932-90) қолданылды.

Синтездеу және зерттеу әдістерінің сипаттамасы:

Белсендірілген көмірден ГО синтездеу.

Графен оксидін (ГО) белсендірілген көмірден алу барысында Хаммерс әдісі қолданылды. 1-суретте ұсынылғандай бұл әдістің синтез барысында 250 мл химиялық стаканға 1 г белсендірілген көмір (БАУ-А) өлшеніп, мұз ваннасына орналастырылды. Өлшендіге 23 мл 94% күкірт қышқылы (H_2SO_4) қосылып, 15 мин. бойы $0^\circ C$ -та магниттік араластырғышта үздіксіз араластырылды. 15 мин. өткеннен кейін алынған ерітіндіге 0,5 г натрий нитратын ($NaNO_3$) қосып, тағы 15 мин. араластырдық. Араласып болған соң 3 г калий перманганаты ($KMnO_4$) біртіндеп салынып, $20^\circ C$ -тан төмен температурада 2 сағат бойы араластырылды. Берілген уақыт өткеннен кейін $35^\circ C$ -та 30 мин. араластыру арқылы сақталды. Одан кейін

температураны 90°C -қа дейін көтеру үшін деионизацияланған су құйылып, 30 мин. араластыру үрдісінде, температураны бақылауда ұстадық. Кейіннен араласып болған соң 30%-дық H_2O_2 сутегінің асқын тотығын қостық. Алынған ерітінді суып, газ бөліну аяқталған соң, дайын болған ерітіндіні металл иондарынан тазарту үшін 5%-дық тұз қышқылының HCl ерітіндісімен жуылды.



Сурет 1 – Графен оксидін (ГО) алу схемасы.

Бейтараптау кезінде белсендірілген көмірден алынған қышқыл графен оксиді (ГО) ерітіндісіне 1000 мл деионсызданған су құйылды. 15–20 минут ультрадыбыстық ваннада өңделінді, кейін магниттік араластырғышта 4–5 сағат араластырылды. Белгіленген уақыт аяқталған соң, тыныштық күйге қойылды. Өзінің массасына байланысты графен оксиді (ГО) ыдыс түбіне шөгеді. Бейтараптау мақсатында, ерітіндідегі қышқыл сұйықтығын $\text{pH} \sim 7$ болғанға дейін бөліп алып отырып, үрдіс бірнеше рет қайталанылады.



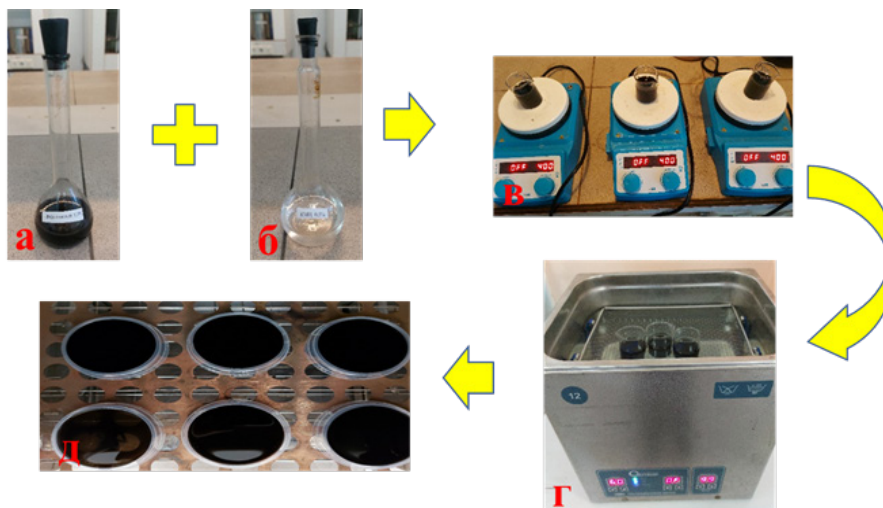
Сурет 2 – Графен оксидін (ГО) бейтараптау реті:
а) деионсызданған су құю; б) ультрадыбыстық ваннаға салу;
в) магниттік араластырғышқа қою;

Бейтарапталған графен оксиді (ГО) петри табақшасына құйылып, кептіргіш шкафта 50°C -та кептірілді. Кепкен графен оксидінің массасын техникалық таразыда өлшеп алып, 0,5%-дық ерітінді дайындалды (сурет 3 (а)).

ГО-ны КМЦ мен әрекеттестіру арқылы композитті материал алу.

Белсендірілген көмірден синтезделген ГО өзінің морфологиялық қасиеттеріне байланысты өздігінен мембрана түзе алмайды. Сондықтан композитті мембрана алу мақсатында байланыс түздіруші материалдардың бірі ретінде КМЦ (карбоксиметилцеллюлоза) қолданылды.

Композитті материал алу барысында келесідегідей 3 түрлі қатынас алынды: 1/1; 3/1; 1/3. Аталған әр қатынастардың жалпы көлемі 40 мл тең ерітінді әзірленді. 100 мл өлшегіш колбаға 0,5%-дық КМЦ (карбоксиметилцеллюлоза) ерітіндісі алдын-ала әзірленді (сурет 3).



Сурет 3 – Белсендірілген көмірден алынған ГО мен КМЦ (карбоксиметилцеллюлоза) арқылы композитті материал алу барысы

ИҚ-спектроскопиялық талдау.

1 см⁻¹ ажыратымдылықпен FT-801 спектрометрінде (Simex, Ресей) БК алынған ГО және ГО/КМЦ мембраналарының химиялық құрылымына ИҚ-спектроскопиялық талдау жүргізілді. Өлшемдер стандартты әдіске сәйкес 450–4700 см⁻¹ диапазонында модельдің жоғарғы позициясында, 25°C температурада толық ішкі және айна шашыраңқы шағылыстыратын бір реттік әмбебап құрылғыны қолдану арқылы жүргізілді.

УК-спектроскопиялық талдау.

БК-ден алынған ГО және КМЦ-мен әр түрлі қатынаста синтезделген композитті материалдарды спектрофотометр ПЭ-5400УФ қондырғысында 1 см⁻¹ ажыратымдылықпен жүргізілді. Өлшеу стандартты әдістемеге сәйкес 190–1000 см⁻¹ спектралды диапазонында, дейтерий және гологенді лампа қатысында жүргізілді.

Беттік морфологиялық талдау.

БК-ден синтезделген ГО беттік морфологиясы XSZ-146T маркалы оптикалық микроскопта зерттелді. Зерттеу жұмысы қалыпты бөлме температурасында, алдын-ала заттық шыныға үлгіні дайындау арқылы жүргізілді.

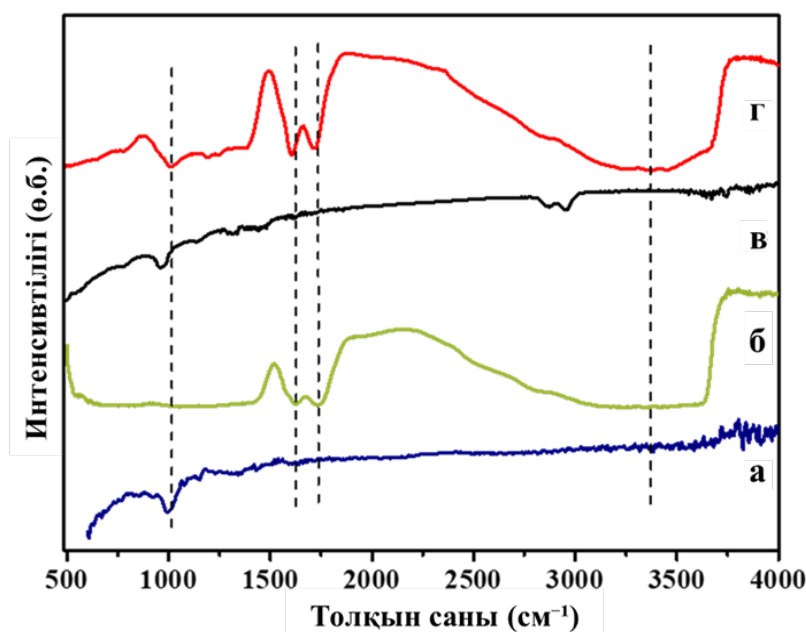
СЭМ.

БК-ден алынған ГО және ГО/КМЦ мембраналарының беттік морфологиясы JSM-6390LV (Джеол, Жапония) сканерлеуші электронды микроскоптың көмегімен зерттелді. Өлшемдер жоғары вакуум режимінде 15 кВ үдеткіш кернеуде екіншілік электронды детекторды қолдану арқылы жүргізілді.

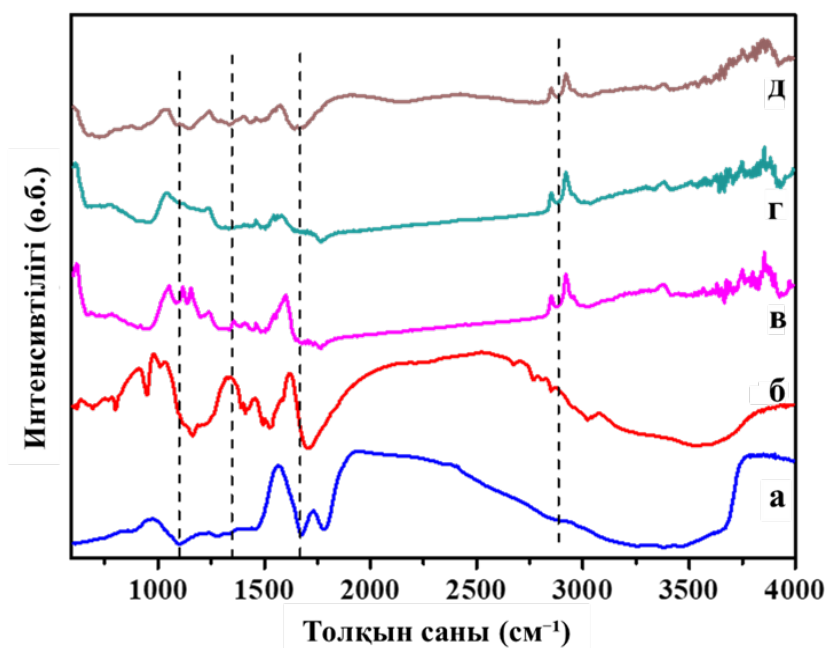
Нәтижелер және талқылау

ИҚ-спектроскопиялық талдау.

Хаммерс әдісі арқылы БК алынған ГО тәріздес және графиттен синтезделген ГО материалдардың химиялық құрылымдары ИҚ-спектроскопиялық әдіс арқылы зерттелді. Зерттеу барысында алынған нәтижелер төменде 4-суретте (221 б.) ұсынылған.



Сурет 4 – а) графит ИҚ-спектрі; б) графиттен Хаммерс әдісі арқылы алынған ГО ИҚ-спектрі;
в) белсендірілген көмір ИҚ-спектрі; г) белсендірілген көмірден Хаммерс әдісі арқылы
синтезделген ГО ИҚ-спектрі



Сурет 5 – а) белсендірілген көмірден Хаммерс әдісі арқылы синтезделген ГО;
б) карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ); в) белсендірілген көмірден алынған ГО мен КМЦ 1/1;
г) 3/1; д) 1/3 қатынаста алынған композитті материалдардың ИҚ-спектрі

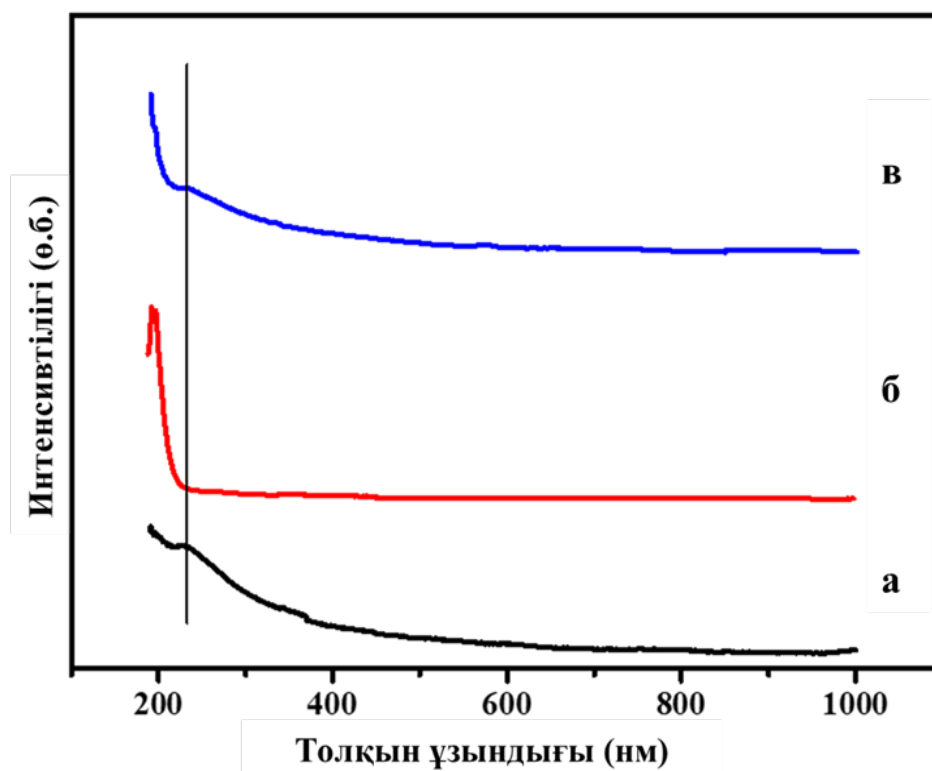
Жоғарыда аталғандай графиттен алынған ГО мен белсендірілген көмірден Хаммерс әдісі арқылы синтезделген ГО-ның ұқсастығы ИҚ-спектротрлік зерттеу әдісі арқылы зерттелді. Нәтижесінде бастапқы өнім графитпен белсендірілген көмірді күшті тотықтырғыштар көмегімен синтездеу барысында ГО және ГО тәріздес материалдар алынды. Құрамында оттекті

функционалды топтардың ұқсас толқын ұзындықтарында орналасқаны ИҚ-спектрларында (сурет 4) бейнеленген. ГО алудағы негізгі шикізаты графитті ИҚ-спектрометрлік (сурет 4 (а)) анализдеу барысында 1528 см^{-1} жұтылу аймағында жоғары ковалентті байланыс пен кристалды қабаттардың болуы $\text{C}=\text{C}$ топтарының бар екендігін көрсетеді [12]. Графитті тотықтыру нәтижесінде алынған ГО зерттеуде (сурет 4 (б)) 1075 см^{-1} жұтылу аймағында $\text{C}-\text{O}$ карбоксилді топтар, 1443 см^{-1} $\text{C}-\text{C}$ ароматты топтар, 1732 см^{-1} $\text{C}=\text{O}$ карбонилді топтар, 3336 см^{-1} OH гидроксо топтары анықталды [13]. Графитті күшті тотықтырғыштармен Хаммерс әдісі арқылы синтезделгеннен кейін алынған ГО бастапқы өнім графитпен салыстырғанда оттекті функционалды топтар, атап айтқанда карбоксилді $\text{C}-\text{O}$, карбонилді $\text{C}=\text{O}$, гидроксо топтардың OH пайда болуын байқауға болады (сурет 4 (а, б)). ГО тәрізді материал алуда шикізат көзі ретінде белсендірілген көмір қолданылды. Белсендірілген көмірді ИҚ-спектроскопиялық зерттеу барысында (сурет 4 (в)) 1518 см^{-1} жұтылу аймағында ароматты $\text{C}=\text{C}$ топтары, 1054 см^{-1} аймағында карбоксилді $\text{C}-\text{O}$ топтары, 2902 және 2986 см^{-1} жұтылу аймағында димерлі гидроксо топтары OH анықталды [14]. Белсендірілген көмірден (БК) синтезделген ГО (сурет 4 (г)) зерттеуде $\text{C}-\text{O}$ карбоксилді топтар 1097 см^{-1} жұтылу аймағында, $\text{C}-\text{C}$ ароматты топтар 1470 см^{-1} , $\text{C}=\text{O}$ карбонилді топтар 1782 см^{-1} , OH гидроксо топтар 3325 см^{-1} жұтылу аймақтарында байқалды [15]. БК-ні Хаммерс әдісімен синтездеу нәтижесінде алынған ГО-ның бастапқы үлгіден айырмашылығы материал құрамында ароматты $\text{C}=\text{C}$ және карбоксилді $\text{C}-\text{O}$ топтарынан басқа ароматты $\text{C}-\text{C}$, карбонилді $\text{C}=\text{O}$ сондай ақ гидроксо топтарының OH пайда болуымен ерекшеленеді. Сараптау кезінде графиттен алынған ГО және БК-ден синтезделген ГО тәріздес материалдың құрамында анықталған оттекті функционалды топтарында ұқсастық бары анықталды.

БК-ден синтезделген ГО-ның өзіндік физикалық қасиетіне байланысты өздігінен мембрана түзе алмайтындықтан, байланыс түздіруші биополимер КМЦ мен $1/1$, $1/3$, $3/1$ қатынастарында композитті материалдар ИҚ-спектроскопия әдісімен зерттелді. БК-ден синтезделген ГО-ға қосылатын биополимерді (КМЦ) (сурет 5 (б)) сараптау барысында 800 см^{-1} $\text{C}-\text{H}$ ароматты, 948 см^{-1} $-\text{CO}-\text{OH}$ карбоксил, 1164 см^{-1} $\text{C}-\text{O}$ карбоксилді, 1412 , 1496 см^{-1} $\text{C}-\text{C}$ ароматты, 1704 см^{-1} $\text{C}=\text{O}$ альдегид, 3024 см^{-1} жұтылу аймағында OH ароматты функционалды топтар анықталды. Ал БК-ден синтезделген ГО-ның (сурет 5 (а)) ИҚ анализі жоғарыда жазылып өткендей (сурет 4 (г)) сипатталды. Бастапқы БК-ден алынған ОГ материалдарын $1/1$, $1/3$, $3/1$ қатынастарында КМЦ мен қосу барысында: $1/1$ қатынаста (сурет 5 (в)) анализінде 740 см^{-1} жұтылу аймағында ароматты $\text{C}-\text{H}$ топтары анықталды, 941 см^{-1} аймағында $-\text{CO}-\text{OH}$ карбоксил топтары, 1552 см^{-1} аймағында $\text{C}-\text{O}$ карбоксил топтары, 1444 см^{-1} $\text{C}-\text{C}$ ароматты топтар, 1696 , 1728 см^{-1} аймақтарында $\text{C}=\text{O}$ альдегид топтары, 3032 см^{-1} жұтылу аймағында карбоксилді топтары OH байқалды. $3/1$ қатынаста (сурет 5 (г)) алынған материалды анализдеу нәтижесінде, 736 см^{-1} жұтылу аймағында ароматты $\text{C}-\text{H}$ топтары, 944 см^{-1} аймағында $-\text{CO}-\text{OH}$ карбоксил тобы, 1484 см^{-1} аймағында $\text{C}-\text{C}$ ароматты топтар, 1552 см^{-1} аймағында $\text{C}-\text{O}$ карбоксил топтары, 1680 , 1696 см^{-1} аймақтарында $\text{C}=\text{O}$ альдегид топтары, 3036 см^{-1} жұтылу аймағында карбоксилді OH топтары анықталды. Ал $1/3$ қатынаста (сурет 5 (д)) алынған материалда 724 см^{-1} жұтылу аймағында ароматты $\text{C}-\text{H}$ тобы, 920 см^{-1} аймағында $-\text{CO}-\text{OH}$ карбоксил топтары, 1444 см^{-1} $\text{C}-\text{C}$ ароматты топтар, 1552 см^{-1} аймағында $\text{C}-\text{O}$ карбоксил топтары, 1686 , 1692 см^{-1} аймақтарында $\text{C}=\text{O}$ альдегид топтары, 3032 см^{-1} жұтылу аймағында карбоксилді OH топтары анықталды. БК-ден синтезделген ГО-ны биополимер КМЦ қосу нәтижесінде алынған материалдарда $724\text{--}740\text{ см}^{-1}$ аралығында ароматты $\text{C}-\text{H}$ топтары, $920\text{--}944\text{ см}^{-1}$ аралығында карбоксилді $-\text{CO}-\text{OH}$ топтар анықталды. Сонымен қатар ГО-ға тән карбонилді $\text{C}=\text{O}$ 1782 см^{-1} аралығынан альдегидті топтарына яғни $1686\text{--}1728\text{ см}^{-1}$ аралығына дейін жылжуы байқалды. БК-ден синтезделген ОГ мен КМЦ композитті материалдардың ішінде ең тиімдісі ретінде $1/1$ қатынаста алынған үлгі анықталды. $3/1$ және $1/3$ қатынастарында алынған материалдардың физикалық ерекшеліктеріне қарағанда $1/1$ қатынасы иілгіш және берік материал екендігі және мембрана түзетін ерекшелігі анықталып, оптималды қатынас болып алынды.

УК-спектроскопиялық талдау.

Белсендірілген көмірден Хаммерс әдісі арқылы синтезделген ГО тәріздес материалдың, карбоксиметилцеллюлозаның (КМЦ) және ГО мен КМЦ оптималды 1/1 қатынаста алынған композиттің УК-спектроскопиялық зерттеу нәтижесі төменде көрсетілген (сурет 6).

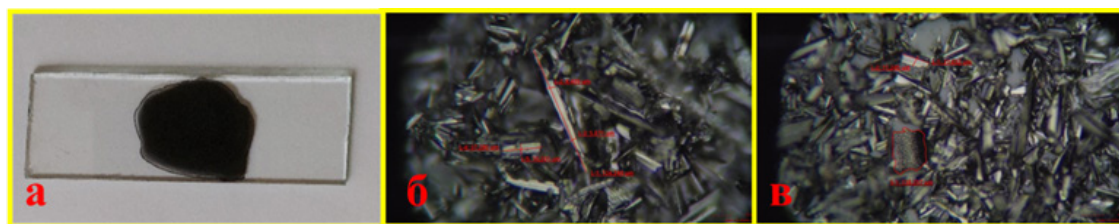


Сурет 6 – а) белсендірілген көмірден алынған ГО; б) карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ);
в) белсендірілген көмірден алынған ГО мен КМЦ оптималды 1/1 қатынаста алынған
композитті материалдың УК-спектрі

Белсендірілген көмірден алынған ГО-ның УК-спектроскопиясын талдау барысында (сурет 6 (а)) химиялық құрылымындағы ароматты сақиналардың π - π^* байланыс әсерінен 223 нм жұтылу аймағы пайда болды. Келесі спектрде (сурет 6 (б)) КМЦ-ның өзіндік физико-химиялық құрылымына байланысты УК сараптамасында жұтылу аймағы байқалмады [16]. Белсендірілген көмірден алынған ГО мен КМЦ-ны оптималды 1/1 қатынаста (сурет 6 (в)) қосу арқылы алынған композитті материалдың УК зерттеу нәтижесінде 226 нм аралығында жұтылу байқалды. Бастапқы белсендірілген көмірден алынған ГО-мен ГО/КМЦ комозиттік материалмен салыстырғанда УК спектрінде 223 нм–226 нм дейін жылжу байқалды. Бұл материалдың құрамында функционалды оттектері (C-O, C-O-H, C=O) топтардың π - π^* байланыс әсерінен түзілуімен түсіндіріледі. Бастапқы материалды тотықтырғаннан кейінгі оттектері функционалды топтардың қонуын ИҚ-спектроскопиялық зерттеу нәтижесінен дәлел ретінде көруге болады.

Оптикалық микроскоптағы зерттеулер.

Белсендірілген көмірден алынған ГО-ны металлургиялық микроскопта зерттелді. Заттық шыныға ГО тамызылып (сурет 6 (а)), бөлме температурасында кептірілгеннен кейін оптикалық микроскопта беттік морфологиясы сарапталынды. Нәтижесінде белсендірілген көмірден синтезделген ГО-ның беттік морфологиясы қатпарлы екені байқалды (сурет 6 (б)).

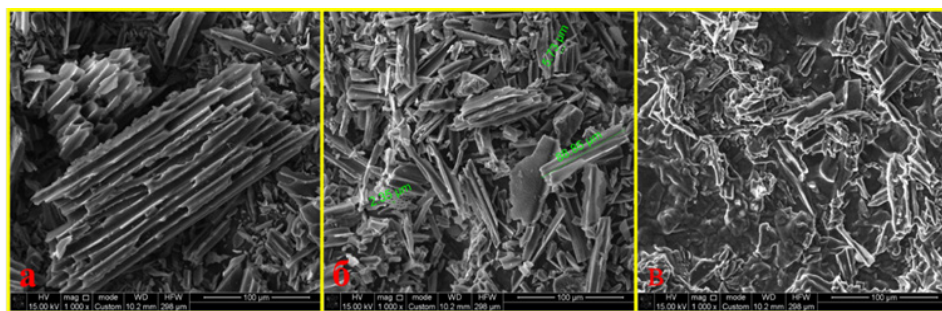


Сурет 7 – а) заттық шыныға тамызылған белсендірілген көмірден синтезделген ГО;
б) үлгіні 50 есе ұлғайтқандағы көрінісі және ұзындығы мен ені; в) үлгіні 25 есе
ұлғайтқандағы көрінісі және ауданы

Өлшем барысында белсендірілген көмірден синтезделген ГО тәріздес материалдың ұзындығы $124,249 \mu\text{m}$, ені шамамен $7,1845 \mu\text{m}$ (Сурет 7 (б)) құрады, ал ауданы $138,257 \mu\text{m}^2$ (Сурет 7 (в)) тең болды. Сонымен қатар материалдың ретсіз, хаосты орналасуы анықталды.

СЭМ

Бастапқы үлгіні яғни белсендірілген көмір, белсендірілген көмірден синтезделген ГО және ГО мен КМЦ оптималды 1/1 қатынаста алынған композитті материалдың беттік морфологиясы сканерлеуші электрондық микроскоппен (СЭМ) зерттелді. Нәтижелері төменде ұсынылған суреттерде көрсетілген (сурет 8).



Сурет 8 – а) белсендірілген көмір; б) белсендірілген көмірден Хаммерс әдісі арқылы синтезделген ГО; в) белсендірілген көмірден синтезделген ГО мен КМЦ оптималды 1/1 қатынаста алынған композитті материалдың СЭМ кескіні

Белсендірілген көмірден Хаммерс әдісі арқылы синтезделген графен оксиді және оны КМЦ мен оптималды 1/1 қатынаста қосу арқылы алынған композитті материалдардың СЭМ кескіндері (сурет 8) бейнеленген. Бастапқы үлгінің (сурет 8 (а)) яғни белсендірілген көмірдің беттік морфологиялық сараптауы бойынша хаосты кеукеті, ұяшықты құрылымға ие екені көрінеді. Ал белсендірілген көмірді Хаммерс әдісі арқылы синтездеу нәтижесінде алынған ГО-ның беттік құрылымы (сурет 8 (б)) хаосты және күшті тотықтырғыштар көмегімен тотықтыру нәтижесінде белсендірілген көмір кеукетерінде оттекті функционалды топтардың енуінің әсерінен кеук қуыстарының оттекті функционалды топтармен жабын тәрізді қапталғанын байқауға болады. Сараптау барысында материалдардың ұзындығы және кеукетердің қуыс өлшемдері анықталды. Белсендірілген көмірден синтезделген ГО-ның орташа ұзындығы $88,85 \mu\text{m}$, ал кеук саңылауының орташа өлшемі $\sim 4,04 \mu\text{m}$ шамасын құрайды. Белсендірілген көмірден синтезделген ГО мен КМЦ оптималды 1/1 қатынаста қосу арқылы алынған композитті материалдың (сурет 8 (в)) беттік морфологиясын зерттеу барысында ГО биополимермен әрекеттестіру нәтижесінде кедір-бұдырлы жерлердің, ұяшықтардың азайып біркелкі тегістеу беттік қыртыстардың пайда болғаны байқалды. СЭМ кескінінде көрсетілгендей белсендірілген көмірден алынған ГО байланыстырушы материал КМЦ қосу нәтижесінде бір-бірімен жабысқан композитті материал алынды. Сондай-ақ, белсендірілген көмірден синтезделген ГО-ға биополимер КМЦ қосу нәтижесінде ГО бетіндегі кеукеті саңылаулар оттекті

функционалды топтармен жабылғанын байқауға болады. Оттекті функционалды топтардың отырғанының дәлелі ретінде және ГО сәтті синтезделуі ИҚ және УК спектроскопиялық талдау нәтижелерімен анықталды.

Қорытынды

Белсендірілген көмірді күшті тотықтырғыштармен Хаммерс әдісі арқылы тотықтыру нәтижесінде синтезделген графен оксиді (ГО) тәрізді материалдың алынғаны зерттеу жұмыстарының талдау нәтижелері арқылы дәлелденді. Талдау нәтижелері бойынша ИҚ-спектроскопиялық анализдеу барысында белсендірілген көмірден синтезделген ГО графиттен Хаммерс әдісі арқылы алынған ГО оның құрамында анықталған карбоксилді С-О, ароматты С-С, карбонилді С=О және гидроксо ОН топтарының жұтылу аймақтары бір-біріне ұқсастығы анықталды. Белсендірілген көмірден синтезделген ГО өзіндік физикалық қасиеттеріне байланысты өздігінен мембрана түзе алмайтындығы анықталды, осы кемшілігінен арылу үшін ГО 1/1; 1/3; 3/1 қатынастарында биополимер КМЦ мен қосу арқылы композитті материал алынды. ИҚ-спектроскопиялық талдауға сәйкес ГО-ны биополимер КМЦ қосу нәтижесінде ГО-да карбоксилді -СО-ОН және ароматты С-Н топтары түзілгені және алынған материалдардың өзіндік физикалық, механикалық қасиеттеріне байланысты 1/1 қатынаста қосылып алынған композитті материал оптималды екені анықталды. УК-спектроскопиялық талдау нәтижесінде π - π^* байланыстың болуы алынған композитті материалдың құрамында оттекті функционалды топтардың түзілуін көрсетті. Белсендірілген көмірден синтезделген ГО беткі бөлігін оптикалық микроскопта зерттеу нәтижесінде алынған ГО тәрізді материалдың кеуекті екені анықталды. Беттік морфологиясын СЭМ талдау нәтижесінде бастапқы материал БК тотықтыру нәтижесінде оттекті функционалды топтардың кеуек қуыстарына енуі және БК синтезделген ГО тәріздес материалды биополимер КМЦ мен оптималды 1/1 қатынаста алынған композитті материалды зерттеу барысында кеуек саңылаулары жабылғаны байқалды. Осы алынған нәтижелерді қорытындылай келе белсендірілген көмірден синтезделген ГО тәріздес материалды және ГО/КМЦ-ны электроникада, газға және ылғалға сезімтал датчиктер жасауда және сорбциялық қасиетін ескере отырып су тазалаушы фильтр ретінде қолдануға болады.

ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Syakir N., Saragi N., Fitrilawati F., Maryati Y., Widayiswari U., Puspitasari D., Risdiana R. (2021) Magnetic Characteristics of Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide. *Materials Science Forum*, 1028:296–301. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1028.296>.
- 2 Bilal M., Li J., Landskron K. (2022) Activated Carbon Electrodes Improved Sorption Capacity for Supercapacitive Swing Adsorption of Carbon Dioxide. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2022-26fbs-v2>.
- 3 Kuanyshbekov T., Sagdollin Z., Zhasasynov E., Kaiyrbekov N., Akatan K., Kabdrakhmanova S., Kantay N., Tolepov Z., Tulegenova M., Beisebekov M. (2022) SYNTHESIS OF COMPOSITE MEMBRANE BASED ON GRAPHENE OXIDE AND NANOSTARCH, *NNC RK Bulletin*. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-3-94-99>.
- 4 Wang R., Ma Q., Zhang H., Ma Z., Yang R., Zhu J.Y. (2019) Producing Conductive Graphene – Nanocellulose Paper in One – pot, *Journal of Polymers and the Environment*, no. 27, pp. 148–157. <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1330-4>.
- 5 Nayak J., Vashishtha A. (2018) Synthesis, Characterization and Preparation of Nanocellulose and different Cellulose/Nanocellulose/Graphene Composites from Cassava root and it's Potential Application for Pesticide Adsorption from water, vol. 5, Issue 4. <https://doi.org/10.1729/Journal.18989>.
- 6 Ray S. (2015) Application and Uses of Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide. *Applications of Graphene and Graphene-Oxide Based Nanomaterials*, pp. 39–55. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-37521-4.00002-9>.
- 7 Yang Z., Ju X., Liao H., Meng Z., Ning H., Li Y., Chen Z., Long J. (2021) Preparation of Activated Carbon Doped with Graphene Oxide Porous Materials and Their High Gas Adsorption Performance. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02416>.

8 Matos I., Bernardo M., Fonseca I. (2017) Porous carbon: a versatile material for catalysis. *Catal Today*, no. 285, pp. 194–203. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2017.01.039>.

9 Nayak J., Vashishtha A. (2018) Synthesis, Characterization and Preparation of Nanocellulose and different Cellulose/Nanocellulose/Graphene Composites from Cassava root and its Potential Application for Pesticide Adsorption from water. <https://doi.org/10.1729/Journal.18989>.

10 Kuanyshbekov T., Sagdollin Z., Zhasasynov E., Akatan K., Kurbanova B., Guseinov N., Tolepov Z., Kantay N., Beisebekov M. (2023) Composite Membrane Based on Graphene Oxide and Carboxymethylcellulose from Local Kazakh Raw Materials for Possible Applications in Electronic Devices. *J. Compos. Sci.*, no. 7, 342. <https://doi.org/10.3390/jcs7080342> Academic Editor: Jian Zhang Chen Received: 3 August 2023 Revised: 11 August 2023 Accepted: 15 August 2023 Published: 21 August 2023.

11 Sahu K., Dhonde M., Murty V. (2021) Preparation of copper/TiO₂/ graphene oxide ternary nanocomposites and their structural, surface morphology, and optical properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06148-2>.

12 Shivananda C.S., Madhu S., Poojitha G., Sudarshan A.R., Jeethendra S., Reddy K.N. (2023) Structural, chemical and morphological properties of graphite powder, graphene oxide and reduced graphene oxide. *Materials Today Proceedings*, 89(9). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.608>.

13 Kuanyshbekov T., Guseinov N., Tolepov Z., Kurbanova B., Tulegenova M., Akatan K., Kantay N., Zhasasynov E. (2023) Thermally Reduced Graphene Oxide Membranes From Local Kazakhstan Graphite “Ognevsky”. *ChemistrySelect*, 8(42). <https://doi.org/10.1002/slct.202301746>.

14 Wang Z., Nie E., Li J., Yang M., Zhao Y., Luo X., Zheng Z. (2012) Equilibrium and kinetics of adsorption of phosphate onto iron-doped activated carbon *Environ Sci Pollut Res*, 19:2908–2917. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0799-y>.

15 Chafidz A., Astuti W., Augustia V., Novira D.T., Rofiah N. (2018) Removal of methyl violet dye via adsorption using activated carbon prepared from Randu sawdust (Ceiba pentandra). *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 167(1):012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/167/1/012013>.

16 Mansouri L., Benganem S., Elkolli M., Mahmoud B. (2020) Chemical and biological behaviours of hydrogels based on oxidized carboxymethylcellulose coupled to chitosan. *Polymer Bulletin*, 77(1). <https://doi.org/10.1007/s00289-019-02712-3>.

^{1*}**Zhasasynov E.,**

student, ORCID ID: 0000-0003-4149-3879, *e-mail: ezasasynov@gmail.com

¹**Kuanyshbekov T.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-2336-3678, e-mail: kuanyshbekov_17@mail.ru,

¹**Sagdollin Zh.,**

ORCID ID: 0000-0001-6389-6826, e-mail: zhandossagdollin@gmail.com

¹**Akatan K.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-3172-623X, e-mail: ahnur.hj@mail.ru,

²**Tulegenova M.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-6413-4302, e-mail: malika.tulegenova@bk.ru

²**Zhandos T.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7895-0434, e-mail: mr.tolepov@mail.ru

¹S. Amanzholov East Kazakhstan State University, 070020, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, 050040, Almaty, Kazakhstan

PRODUCTION OF GRAPHENE OXIDE (GO) FROM ACTIVATED CARBON BY THE HAMMERS METHOD AND ITS STUDY

Abstract

Carbon materials are frequently utilized in electronics, medicine, and the production of sorption materials. Such materials, including graphite, graphene, graphene oxide (GO) derived from graphite, and graphene oxide synthesized from activated carbon (GO-AC), are widely employed. This article delineates the differences, disadvantages, and

advantages of graphene oxide synthesized from activated carbon (GO-AC) in comparison to GO obtained from graphite. During the research, composite materials obtained by oxidizing activated carbon using the Hammers method and biopolymer carboxymethyl cellulose (CMC) in ratios of 1/1, 1/3, and 3/1 were studied using infrared, ultraviolet spectroscopy, and optical methods. Based on the research results, the infrared spectrum of the obtained composite materials revealed absorption peaks of -CO-OH groups at 724 cm^{-1} and C-H groups at 944 cm^{-1} . The 1/1 optimal ratio was obtained due to the unique surface morphology and physical-chemical and mechanical properties of the synthesized composite materials. According to the UV spectrum of the GO-AC/KMC, the C=O ether bond exhibited complete absorption at 226 nm. The surface morphology of the synthesized materials (AC, GO-AC, GO-AC/CMC) was studied using optical and scanning electron microscopes (SEM). As a result, it was observed that the BK-GO material exhibited a scattered stone-like shape. It was observed that the materials studied by SEM exhibited a chaotic structure, and the pores along the material, resulting from adding the binder CMC to GO-AC in the optimal GO-AC/CMC ratio of 1/1, were covered with oxygen functional groups. Based on the research findings, it was determined that the properties of the GO-AC material are similar to those of graphene oxide (GO) obtained from graphite. According to the study results, it was discovered that the GO-AC material exhibits similar properties to graphene oxide (GO) obtained from graphite. The advantage of these materials over other carbon composites in terms of economic efficiency lies in the simplicity of synthesis and the availability of raw material sources.

Key words: activated carbon (AC), graphene oxide synthesized from activated carbon (GO-AC), graphene oxide (GO), the Hammers method.

^{1*}**Жасасынов Е.,**

студент, ORCID ID: 0000-0003-4149-3879, *e-mail: ezasasynov@gmail.com

¹**Қуанышбеков Т.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-2336-3678, e-mail: kuanyshebekov_17@mail.ru

¹**Сағдоллин Ж.,**

ORCID ID: 0000-0001-6389-6826, e-mail: zhandossagdollin@gmail.com

¹**Ақатан Қ.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-3172-623X, e-mail: ahnur.hj@mail.ru,

²**Түлегенова М.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-6413-4302, e-mail: malika.tulegenova@bk.ru

²**Төлепов Ж.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7895-0434, e-mail: mr.tolepov@mail.ru

¹Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова, ННЛКП,
070020, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби,
050040, г. Алматы, Казахстан

ПОЛУЧЕНИЕ ОКСИДА ГРАФЕНА (ГО) ИЗ АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ МЕТОДОМ ХАММЕРСА И ЕГО ИЗУЧЕНИЕ

Аннотация

Углеродные материалы часто используются в электронике, медицине, производстве сорбционных материалов. Такие материалы, в том числе графит, графен, оксид графена (ОГ) полученный из графита, и оксид графена, синтезированный из активированного угля (ОГ-АУ), широко используются. В данной статье рассмотрены различия, недостатки и преимущества оксида графена, синтезированного из активированного угля (ОГ-АУ), по сравнению с ОГ, полученным из графита. В ходе исследований с помощью инфракрасной, ультрафиолетовой спектроскопии и оптических методов были изучены композиционные материалы, полученные окислением активированного угля методом Хаммерса и биополимера карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) в соотношениях 1/1, 1/3 и 3/1. По результатам исследований в инфракрасном спектре полученных композиционных материалов обнаружены пики поглощения групп -CO-OH при 724 cm^{-1} и групп C-H при 944 cm^{-1} . Оптимальное соотношение 1/1 получено благодаря уникальной морфологии поверхности и физи-

ко-химическим и механическим свойствам синтезированных композиционных материалов. По данным УФ-спектра ОГ-АУ/КМЦ 1/1 эфирная связь C=O имела полное поглощение при 226 нм. Морфологию поверхности синтезированных материалов (АУ, ОГ-АУ, ОГ-АУ/КМЦ) изучали с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопов (СЭМ). В результате было замечено, что материал БК-ГО имел форму рассеянного камня. Было замечено, что исследованные методом СЭМ материалы имели хаотичную структуру, а поры вдоль материала, образовавшиеся в результате добавления связующего КМЦ к ОГ-АУ в оптимальном соотношении ОГ-АУ/КМЦ 1/1, были покрыты кислородно-функциональными группами. По результатам исследований установлено, что свойства материала ОГ-АУ аналогичны свойствам оксида графена (ОГ), полученного из графита. Преимущество этих материалов перед другими углеродными композитами с точки зрения экономической эффективности заключается в простоте синтеза и доступности источников сырья.

Ключевые слова: активированный уголь (АУ), оксид графена синтезированный из активированного угля (ОГ-АУ), оксид графена (ОГ), метод Хаммерса.

ӨОЖ 537.523.527.662.111.1
FTAMP 29.19.22

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-229-237>

^{1*} **Аймашева Ж.,**

PhD студент, ORCID ID: 0000-0002-6789-4876, e-mail: zhadyra_aimasheva@mail.ru

^{1,2,3} **Исмаилов Д.В.,**

т.ғ.к., PhD, ORCID ID: 0000-0002-6384-1478, e-mail: Ismailov_daniyar_v@bk.ru

⁴ **Грищенко В.Ф.,**

ф.-м.ғ.к., доцент, ORCID ID: 0000-0003-2244-5599, e-mail: labreab@mail.ru

⁵ **Stefano Bellucci,**

ORCID ID: 0000-0003-0326-6368, e-mail: bellucci@lnf.infn.it

¹ **Партизан Г.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7001-2654, e-mail: gulmayra.partyzan@kaznu.kz

⁶ **Коштыбаев Т.Б.,**

ф.-м.ғ.к., ORCID ID: 0009-0004-7344-6801, e-mail: koshtybayev.t@qyzpu.edu.kz

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

² «KazAlfaTech LTD» Зерттеу Орталығы, 050000, Алматы қ., Қазақстан;

³ Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
050000, Алматы қ., Қазақстан

⁴ «Ионосфера институты» ЖШС, 050000, Алматы қ., Қазақстан

⁵ Laboratori Nazionali di Frascati, Via E. Fermi 54, 00044 Frascati, Italy

⁶ Қазақ ұлттыққыздар педагогикалық университеті, 050000, Алматы қ., Қазақстан

МИКРО ЖӘНЕ НАНО МИКРО МАТЕРИАЛДАРДЫҢ ПИРОТЕХНИКАДА ҚОЛДАНЫЛУЫ

Аңдатпа

Соңғы жылдары бірегей физикалық және химиялық қасиеттеріне байланысты пиротехникалық заттардың өнімділігі мен қауіпсіздігін арттыруда таптырмас рөл атқаратын көміртекті наноматериалдар зерттеушілердің қызығушылығын тудыруда. Бұл мақалада электрдоғалық синтез әдісімен алынған көміртекті наноқұрылымдардың C60 және C70 фуллерен күйелері екені анықталды. Синтезделген фуллерен күйе бөлшектерінің морфологиясы кеуекті және кедір-бұдырлы, ал ондағы күйе кеуектерінің өлшемі 32–190 нм аралығында болатыны анықталды. Тәжірибелердің нәтижесі бойынша синтезделген фуллерен күйелерін пиротехникалық композит құрамның құраушы компоненті ретінде пайдалану мүмкіндігі ұсынылды. Матрица ретінде калий нитраты, наноөлшемді фуллерен құрамды күйе, ағаш көмір мен алюминий толтырғыш таңдалып, пиротехникалық композиттік құрамдардың жану уақытына тәуелділігі анықталды. Нәтиже бойынша фуллерен құрамды күйе мөлшері пиротехникалық композиттік құрамда көбейген сайын, композиттік құрамның жану уақытының артатындығы анықталды.

Тірек сөздер: фуллерен, пиротехника, композит, газ фазасындағы доғалық разряд.

Кіріспе

Фуллерендерді қолдану молекулалық электроникадан биомедицинаға дейін кең таралған, магниттік қасиеттеріне байланысты резонанстық зерттеулерде сигналдарды күшейтетін гадолиний атомдарының орналасуы мен өріске қатысуына байланысты түзеткіштер ретінде қызықты қасиетке ие [1–2]. Қолдану аясы өте перспективалы болып көрінгенімен, молекулалық өңдеу кезінде өзекті мәселелер туындайды. Қазіргі уақытта фуллерендер ішінде атомдарды қалай қоршау және оларды қалпына келтіру жұмысын атқаратын организмнің белгілі бір нүктеге қалай бағыттау керек сияқты деген тәсілдер белгілі [3–4].

Фуллерендер ашылғаннан бері ғылымның әртүрлі салаларында қызығушылық тудыруда. Ерекше қасиеттері мен физикалық сипаттамалары – оларды ерекше бағаланатын материалға айналдырған фактор [5]. Фуллерен өнеркәсіпте әртүрлі тәсілдермен қолданылған, мысалы, Bardahl компаниясы бұл материалды оны майларға, атап айтқанда, үш қабатты қорғаныс қабатын қамтамасыз ететін Technos C60 майын өндіруге қосу үшін пайдаланды [6]. Оның әртүрлі қаптамалар, өткізгіш құрылғылар және молекулалық желілерді құру сияқты әртүрлі қолданбалары бар. Сонымен қатар медицина саласында суда еритін фуллерен адамның иммун талшығында пайда болуы мүмкін ЖИТС (СПИД) вирустарына қарсы белсенділік көрсетті, оны тіпті антиоксидант ретінде де қолдануға болады [7].

Көміртекті наноқұрылымның бұл модификациясының ерекше құрылымы, термиялық тұрақтылығы, жоғары беріктігі сияқты бірегей қасиеттерінің болуында екені белгілі. Және мұндай қасиеттер оларды әртүрлі салаларда, соның ішінде пиротехникада қолдануға мүмкіндік береді.

Пиротехника жанғыш агенттен, тотықтырғыштан, байланыстырғыштан және функционалдық қоспадан тұрады, олар тез әрекеттеседі және дыбыс, жарық, түтін және жылу сияқты көптеген әсерлерді береді [8–9]. Ол азаматтық және әскери салаларда кеңінен қолданылады, бірақ ресурстардың ысырап болуы, артық әсер ету, пайдалану және сақтау кезіндегі қауіпсіздік коэффициентінің төмендігі сияқты реагенттер реакциясының жеткіліксіздігінен туындайтын кейбір мәселелер бар. Сондықтан бұл пиротехникалық заттарды әзірлеу мен қолдануда үлкен қиындықтар туғызады. Соңғы жылдары ғылыми-зерттеу және тәжірибелік-конструкторлық жұмыстар мен жаңа наноматериалдарды дайындау технологиясының қарқынды дамуы бұл мәселелерді біртіндеп шешті.

Негізгі ережелер. Әдебиетке шолу. Материалдар мен әдістер

Қазіргі таңда көміртекті наноқұрылымдарды, соның ішінде фуллерендердің синтезі үшін бірнеше әдістер қолданылады. Фуллерендерді синтездеудің айтарлықтай өте қарапайым және қолдануға оңай әдістердің бірі – газдық фазадағы доғалық разряд әдісі.

Бұл жұмыста газдық фазадағы доғалық разряд әдісімен алынған көміртекті наноматериалдардың пиротехникалық құрылымдардың толтырғыш компоненті ретінде пайдалану арқылы олардың жану параметрлеріне әсерін анықтау қарастырылды және бұл олардың мақсатты қолданылу аясын кеңейтуге мүмкіндік береді.

1-суретте (231 б.) микро және наноқұрылымдарды синтездеуге арналған газ фазасындағы доғалық разряд әдісі қондырғысының құрылымы ұсынылған. Қондырғы құрылымы қарапайым емес, ол газ қысымын басқару жүйесінен, доғалық разряд реакторынан, электродтарды салқындатуға арналған су ағынынан, генератордағы тұрақты тоқ пен реактор осінің бойындағы электродтардың араласу механизмінен және плазмадағы тұрақты тоқты бақылау сервоқозғалтқышынан тұрады. Бұл шаралар фуллерендерді сапалы синтездеу үшін және фуллерендер мен олардың туындыларының синтезінің плазмохимиялық процесінің оңтайлы шарттарын анықтау үшін қажет.

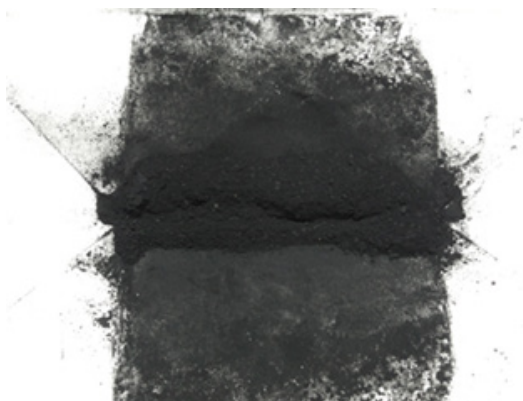
Графит электродтары ұстағышқа орнатылды. Содан кейін жинақпен және электродпен бірге реактор камерасы тығыз жабылды. Ары қарай реактор камерасы сорғымен 0,7 Па=(0.005 Торр) мәніне дейін вакуумдалды. Реакторды ағынды сумен 19–21°C температураға дейін салқындатуға арналған су қосылды.

Қажетті вакуум мәніне жеткенде электродтар қосылып, кернеу біртіндеп берілді, электродтарда резистивті жылу пайда болды және вакуум өзгерді. Қыздырылған кезде графит кеуектерінен газдар шығарылып, процесс вакуум тұрақты болғанға дейін жалғасты. Процесс барысында камера бірнеше рет инертті газ – гелиймен үрленеді. Ары қарай камера гелиймен 30,7 кПа қысым мәніне дейін толтырылды. Осыдан кейін синтез процесі басталды, ол графит электродтары арасындағы электр доғалық разрядқа негізделген.



Сурет 1 – Газ фазасындағы доғалық разряд әдісі қондырғысының құрылымы

Наноқұрылымды материалдарды синтездеу үшін доғалық әдіс әмбебап болып табылады. Электродтардың химиялық құрамын (электродтарды металдармен легирлеу) және жұмыс газының құрамын өзгерту арқылы әртүрлі құрылымға және морфологияға ие наноматериалдарды синтездеуге болады. Бұл әдіспен синтездеу барысында түзілген құрылымдар реактордың қабырғаларында және плазма түзетін электродтарда тұндырылады. 2-суретте доғалық разряд әдісімен синтезделген фуллерен күйесі мен катод материалына жиналған фуллерен күйесінің микросуреті бейнеленген.

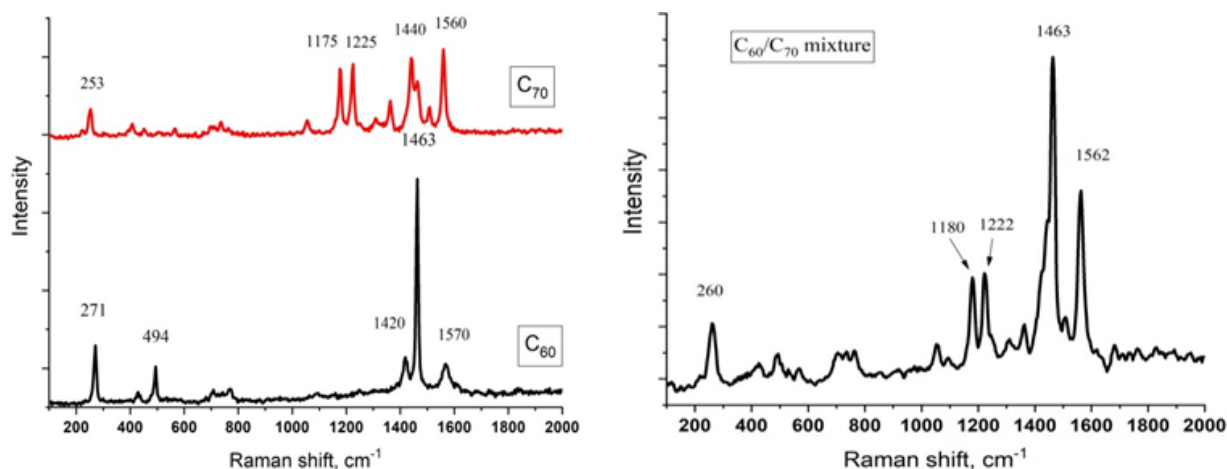


Сурет 2 – Синтезделген фуллерен күйесі (а) мен катод материалына жиналған фуллерен күйесінің (б) суреті

Нәтижелер мен талқылау

Алынған үлгілер Quanta 3D 200i микроскобында расторлы электронды микроскопия (СЭМ) арқылы және NT-MDT NTegra Spectra спектрометрін (лазерлік толқын ұзындығы $\lambda = 473$ нм) пайдалана отырып, Ашық түрдегі ұлттық нанотехнологиялық зертханада (Алматы, Қазақстан) Раман спектроскопиясы (RS) арқылы зерттелді. Сонымен қатар Hitachi TM4000 Plus Quantax 75 Bruker электрондық микроскобы арқылы композиттердің морфологиясы зерттелінді.

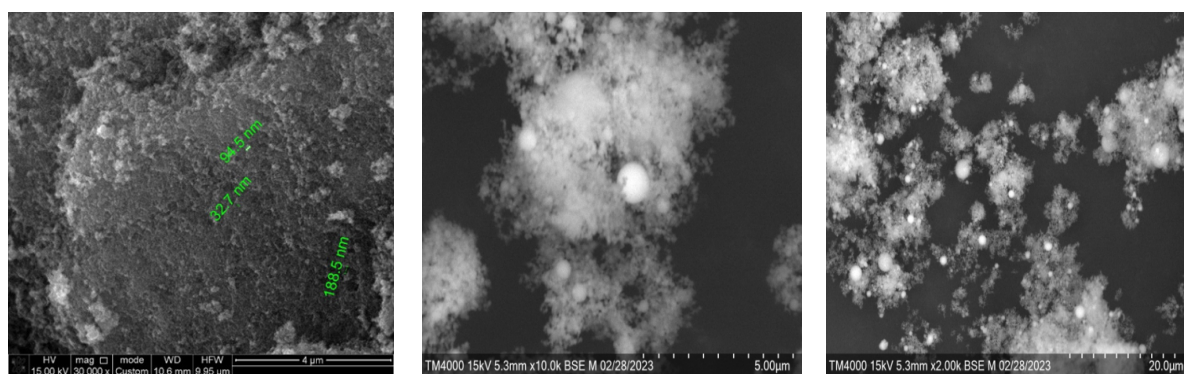
Келесі суретте фуллерен күйесінің Раман спектрлері бейнеленген.



Сурет 3 – Доғалық разрядта синтезделген фуллерен күйесінің жарықтың комбинациялық шашырау спектрлері

3а-суреттен (астыңғы спектр) спектрдің 271, 494, және 770 cm^{-1} аймақтарында C_{60} молекуласының Рамандық ығысуларына сай келетін шыңдарды көруге болады. D шыңы 1463 cm^{-1} аймағында орналасса, G шыңы 1570 cm^{-1} аймағында байқалады. Өз кезегінде 4а (үстінгі спектр) суретінен C_{70} молекуласына тән ығысу шықтарын 253, 488 және 770 cm^{-1} аймақтарында байқауға болады. Бұл спектр үшін D және G шыңдары сәйкесінше 1440 және 1560 cm^{-1} аймағында байқалады. 4б-суретінен синтезделген нанокұрылымның C_{60} және C_{70} молекулаларының қоспасынан тұратынын байқауға болады. Алайда спектрлердің ең қарқынды шыңдарын талдау үлгідегі C_{70} молекуласының басым екенін көрсетеді.

4-суретте фуллеренқұрамды күйенің СЭМ арқылы алынған бейнелері ұсынылған.



Сурет 4 – Фуллеренқұрамды күйенің СЭМ арқылы алынған бейнелері

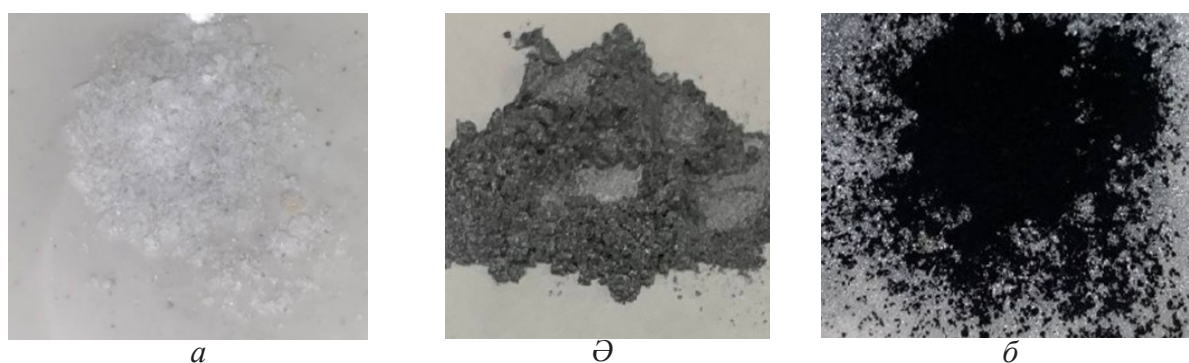
СЭМ бейнесінен байқалғандай күйе бөлшектерінің морфологиясы кеуекті және кедір-бұдырлы. Күйе кеуектерінің өлшемі 32–190 нм аралығында.

Пиротехникалық құрамдар – бұл өздігінен жануға қабілетті және жанған кезде жарық, түтін, жылу, дыбыс және басқа да әсерлер беретін гетерогенді қоспалар. Электрдоғалық синтез әдісімен алынған фуллерен күйелері пиротехникалық құрамның құраушы компоненті ретінде пайданылды. Пиротехникалық құрамның жануын жеңілдету және оның жану мүмкіндігін қамтамасыз ету үшін әдетте ауадағы оттегін пайдаланбайды, оның орнына меншікті тотықтырғыш – термиялық ыдырау кезінде оттегін құрайтын күрделі зат қолданылады. Біздің

жағдайымызда, жұмыста тотықтырғыш ретінде калий нитраты қолданылды. Бұл оның сақтау және танымалдау тиімділігіне байланысты, яғни, калий нитраты өзге тотықтырғыш материалдармен салыстырғанда жеке алынған калий нитраты жарылғыш қасиетке ие емес, өйткені оның ыдырауы өте аз жылу шығарумен жүреді.

Пиротехникалық құрамдардың екінші құрамдас бөлігі – жанғыш зат. Жанғыш заттар үлкен қосымша оттегі бөлуі немесе белгілі бір жану температурасын беруі тиіс. Жұмыста алюминий жанғыш зат ретінде пайданылды. Себебі ол жер қыртысында көп мөлшерде кездесетін қолжетімді кезінде жоғары қысымды қолдану арқылы композиттің жоғары беріктігіне қол жеткізу әрдайым мүмкін емес. Өнімдердің беріктігін арттыру үшін қосылыстарға байланыстырғыштар енгізіледі (кейде цементаторлар деп аталады).

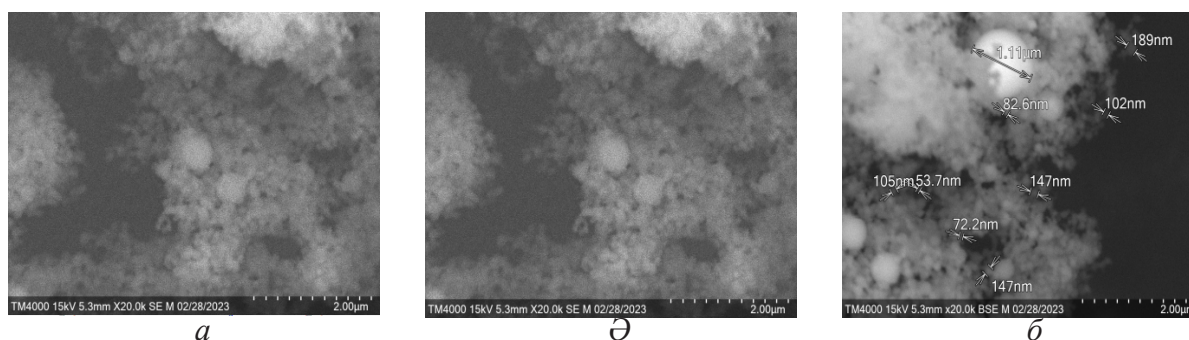
Пиротехникалық композиттің құрам компоненттері ретінде пайдаланылған калий нитраты, алюминий және синтезделген фуллерен күйесінің бейнесі келесі суретте ұсынылған.



а – калий нитраты, б – алюминий, в – синтезделген фуллерен құрамды күйе

Сурет 5 – Пиротехникалық композиттің құрам компоненттері

Келесі суретте пиротехникалық композиттің құрам компоненттері ретінде пайдаланылған калий нитраты, алюминий және синтезделген фуллерен күйесінің микросуреті ұсынылған. Таңдап алынған компоненттер, атап айтқанда калий нитраты матрица рөлін атқарды және наноөлшемді фуллерен құрамды күйе, ағаш көмір мен алюминий толтырғыш рөлін атқарды.

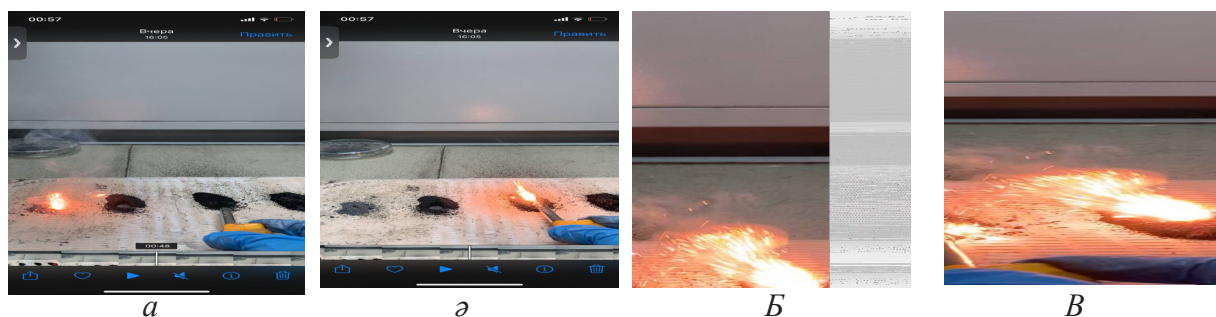


а – калий нитраты, б – алюминий, в – синтезделген фуллерен құрамды күйе

Сурет 6 – Пиротехникалық композиттің құрам компоненттері

Таңдалған компоненттер 1-кестеде көрсетілген массалық қатынас бойынша аналитикалық таразыда өлшеніп алынды. Өлшенген компонент ұнтақтары керамикалық ыдысқа салынып, ступканың көмегімен біркелкі мөлшерге дейін ұнтақталды. Компоненттердің әртүрлі массалық қатынасына ие төрт түрлі құрам дайындалды. Дайындалған құрамдардың жануын қадағалау

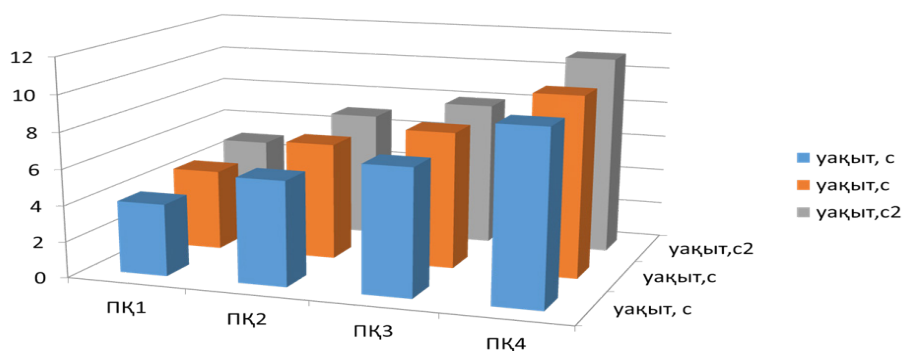
үшін пиротехникалық құрам лабораториясындағы тартқыш шкафтың астына орналастырылды және жағу жұмысы жүргізілді. Жану басталған уақытта секундамер қосылып, құрамның жану уақыты белгіленді. Фуллерен құрамды күйе массасы артқан сайын толықтырылған пиротехникалық құрамның жарықтық эффектісі жоғары екендігі анықталды.



а – ПҚ №1, б – ПҚ №2, Б – ПҚ №3, в – ПҚ №4

Сурет 7 – Пиротехникалық композиттік құрамның жану процесі

Келесі суретте пиротехникалық композиттік құрамдардың жану уақытынан тәуелді диаграммасы ұсынылды. Көріп тұрғанымыздай, фуллерен құрамды күйе мөлшері пиротехникалық композиттік құрамда көбейген сайын, композиттік құрамның жану уақытының артатындығын байқауға болады.



Сурет 8 – Пиротехникалық композиттік құрамдардың жану уақытына тәуелділік диаграммасы

Кесте 1 – Пиротехникалық құрамдардың жану жылдамдығы

	Пиротехникалық құрам	Пиротехникалық құрамның компоненттері, %				Жану уақыты, с.
		Калий нитраты (KNO ₃)	Алюминий	Ағаш көмірі(C)	Фуллерен күйесі	
1	ПҚ № 1	65	10	15	0	5
2	ПҚ № 2	65	10	10	5	7
3	ПҚ № 3	65	10	5	10	8
4	ПҚ № 4	65	10	0	15	11

Кестеден байқағанымыздай, фуллерен құрамды күйе композитте ингибитор рөлін атқаратыны анықталды.

Қорытынды

Электрдоғалық синтез әдісімен алынған көміртекті наноқұрылымдардың C60 және C70 фуллерен күйелері екені анықталды. Синтезделген фуллерен күйе бөлшектерінің морфологиясы кеуекті және кедір-бұдырлы, күйе кеуектерінің өлшемі 32–190 нм аралығында болатыны анықталды.

Тәжірибелердің нәтижесі бойынша синтезделген фуллерен күйелерін пиротехникалық композит құрамның құраушы компоненті ретінде пайдалану мүмкіндігі ұсынылды.

Таңдап алынған компоненттер, атап айтқанда калий нитраты матрица рөлін атқарды және наноөлшемді фуллерен құрамды күйе, ағаш көмір мен алюминий толтырғыш рөлін атқарды. Жұмыстың нәтижесі бойынша пиротехникалық композиттік құрамдардың процесс барысында жарылмайтыны анықталды. Пиротехникалық композиттік құрамдарды сақтау және тасымалдау барысында олардың қауіпсіздік шарттарына сай келетініне көз жеткізілді.

Фуллерен құрамды күйе негізінде пиротехникалық композиттік құрамның жану уақытына тәуелділігі анықталды. Нәтиже бойынша фуллерен құрамды күйе мөлшері пиротехникалық композиттік құрамда көбейген сайын, композиттік құрамның жану уақытының артатыны анықталды.

Бұл мақала ИРН BR21882375 «Жер және ғарыш сегменттерінің беріктігін арттыру және ионосфераны зерттеу арқылы ғарыштық технологиялар өнімдерін жасау және жаңғырту» бағдарламалық мақсатты қаржыландыру аясында жүргізілді.

ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Baati T., Bourasset F., Gharbi N., Njim L., Abderrabba M., Kerkeni A., Szwarc H. & Moussa F. (2012) The prolongation of the lifespan of rats by repeated oral administration of [60]fullerene. *Biomaterials*, vol. 33, no. 19, pp. 4936–4946.
- 2 Loutfy R.O., Wexler E.M. (2002) Gas-phase hydrogenation of fullerenes. *Perspectives of Fullerene Nanotechnology*, pp. 281–287.
- 3 Fullerene Applications in Biomedicine: A Comprehensive Review – Nanografi –Nanografi Nano Technology. (n.d.). Retrieved January 29, 2024, from <https://nanografi.com/blog/fullerene-applications-in-biomedicine-a-comprehensive-review-nanografi/>
- 4 Nikolay O. (2013) Mchedlov-Petrosyan. Fullerenes in Liquid Media: An Unsettling Intrusion into the Solution Chemistry. *Chemical Reviews*, vol. 113, no. 7, pp. 5149–5193. <https://doi.org/10.1021/cr3005026>.
- 5 Jungah Kim, Chibeom Park, Ji Eun Park, Kwangho Chu and Hee Cheul Choi (2013) Vertical Crystallization of C60 Nanowires by Solvent Vapor Annealing Process. *ACS Nano*, vol. 7, no. 10, pp. 9122–9128. <https://doi.org/10.1021/nn403729g>.
- 6 Lin Wang, Bingbing Liu, Shidan Yu, Mingguang Yao, Dedi Liu, Yuanyuan Hou, Tian Cui and Guangtian Zou, Bertil Sundqvist, Han You, Dingke Zhang and Dongge Ma (2006) Highly Enhanced Luminescence from Single-Crystalline C60·1m-xylene Nanorods. *Chemistry of Materials*, vol. 18, no. 17, pp. 4190–4194. <https://doi.org/10.1021/cm060997q>.
- 7 Zhihao Zeng, Xiangping Li, Haiwei Wang, Changsheng Xie (2023) Optical patterning fullerene nanostructures with high purity and high surface quality. *APL Photonics*, vol. 8, no. 7. <https://doi.org/10.1063/5.0152366>.
- 8 Pan G.P., Yang S. (1997) *Pyrotechnics*. Beijing Institute of Technology Press, Beijing.
- 9 Pan G.P., Yang S. (2005) *Advanced Pyrotechnics*. Beijing Institute of Technology Press, Beijing.

^{1*}**Aimasheva Zh.,**

PhD, student, ORCID ID: 0000-0002-6789-4876, e-mail: zhadyra_aimasheva@mail.ru

^{1,2,3}**Ismailov D.V.,**

Candidate of technical sciences, PhD, ORCID ID: 0000-0002-6384-1478,

e-mail: Ismailov_daniyar_v@bk.ru

⁴**Grishenko V.F.,**

Candidate of physical-mathematic science, docent, ORCID ID: 0000-0003-2244-5599,

e-mail: labreab@mail.ru

⁵**Stefano Bellucci,**

ORCID ID: 0000-0003-0326-6368, e-mail: bellucci@lnf.infn.it

¹**Partizan G.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7001-2654, e-mail: gulmayra.partyzan@kaznu.kz

⁶**Koshtibayev T.B.,**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, ORCID ID: 0009-0004-7344-6801,

e-mail: koshtybayev.t@qyzpu.edu.kz

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

²Research Center «KazAlfaTech LTD», 050000, Almaty, Kazakhstan

³Kazakh National Research Technical University K.I. Satbaev, 050000, Almaty, Kazakhstan

⁴LLP «Institute of Ionosphere», 050000, Almaty, Kazakhstan

⁵INFN-Laboratori Nazionali di Frascati, Via E. Fermi 54, 00044 Frascati, Italy

⁶Kazakh National Women's Teacher Training University, Institute of Physics,
Mathematics and Digital Technologies, 050000, Almaty, Kazakhstan

MICRO- AND NANOMICROMATERIALS IN PYROTECHNICS

Abstract

Due to their unique physical and chemical properties, which play an unrivaled role in enhancing the performance and safety of pyrotechnic substances, carbon nanomaterials have garnered significant interest from researchers in recent years. In this paper, carbon nanostructures prepared by electric arc synthesis are identified as C60 and C70 fullerene carbon blacks. The carbon black particles derived from the synthesized fullerenes exhibit a porous and rough morphology, with sizes ranging from 32 to 190 nm. The experimental results indicate the potential use of synthesized fullerene soot as a constituent component of pyrotechnic composites. The dependence of pyrotechnic composite compositions on combustion time has been determined by selecting potassium nitrate, nanoscale fullerenes, composite carbon blacks, wood coals, and aluminum fillers as matrix materials. According to the findings, the combustion time of the composite composition increases as the content of fullerene soot in the pyrotechnic composite composition increases.

Key words: Fullerene, pyrotechnics, composite, gas-phase arc discharge.

^{1*}**Аймашева Ж.,**

PhD студент, ORCID ID: 0000-0002-6789-4876, e-mail: zhadyra_aimasheva@mail.ru.

^{1,2,3}**Исмаилов Д.В.,**

канд. техн. наук, PhD, ORCID ID: 0000-0002-6384-1478,

e-mail: Ismailov_daniyar_v@bk.ru

⁴**Грищенко В.Ф.,**

канд. физ.-мат. наук, доцент, ORCID ID: 0000-0003-2244-5599,

e-mail: labreab@mail.ru

⁵**Stefano Bellucci,**

ORCID ID: 0000-0003-0326-6368, e-mail: bellucci@lnf.infn.it

¹**Партизан Г.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7001-2654, e-mail: gulmayra.partyzan@kaznu.kz

⁶**Коштыбаев Т.Б.,**

канд. физ.-мат. наук, ORCID ID: 0009-0004-7344-6801,

e-mail: koshtybayev.t@qyzpu.edu.kz

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

²Исследовательский центр «KazAlfaTech LTD», 050000, г. Алматы, Казахстан;

³Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева, 050000, г. Алматы, Казахстан

⁴ТОО «Институт ионосферы», 050000, г. Алматы, Казахстан

⁵Laboratori Nazionali di Frascati, Via E. Fermi 54, 00044 Frascati, Italy

⁶Казахский национальный женский педагогический университет,
050000, г. Алматы, Казахстан

МИКРО- И НАНОМИКРОМАТЕРИАЛЫ В ПИРОТЕХНИКЕ

Аннотация

В связи с уникальными физическими и химическими свойствами, играющими непревзойденную роль в повышении производительности и безопасности пиротехнических веществ, углеродные наноматериалы в последние годы вызывают интерес исследователей. В этой статье установлено, что углеродные наноструктуры, полученные методом электродугового синтеза, представляют собой сажи из C₆₀ и C₇₀ фуллерена. Установлено, что частицы сажи из синтезированных фуллеренов имеют пористую и шероховатую морфологию и размер сажи составляет от 32 до 190 нм. По результатам экспериментов показана возможность использования синтезированных сажи фуллерена в качестве составляющего компонента пиротехнического композита. Определена зависимость пиротехнических композитных составов от времени горения, выбирая в качестве матрицы нитрат калия, наноразмерные фуллерены, составные сажи, деревянные угли и алюминиевые наполнители. По результатам увеличивается время горения композитного состава по мере увеличения содержания фуллереновой сажи в пиротехническом композитном составе.

Ключевые слова: фуллерен, пиротехника, композит, дуговой разряд в газовой фазе.

УДК 69.07
МРНТИ 67.11.35

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-238-254>

¹**Жаңабай Н.Ж.,**

канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-8153-1449, e-mail: nurlan.zhanabay777@mail.ru

¹**Ибраимова Ү.Б.,**

магистр, докторант, ORCID ID: 0000-0004-9786-1348, e-mail: ibraimova_uljan@mail.ru

¹**Сулейменов У.С.,**

канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0001-7798-1044, e-mail: ulanbator@inbox.ru

²**Буганова С.Н.,**

канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0003-2005-3305, e-mail: Svetlanabuganova7@gmail.com

¹**Утелбаева А.Б.,**

д-р. хим. наук, ORCID ID: 0000-0002-4771-9835, e-mail: mako_01-777@mail.ru

¹Южно-Казахстанский исследовательский университет им. М. Ауэзова,
160012, г. Шымкент, Казахстан

²Международная образовательная корпорация (КазГАСА),
050043, г. Алматы, Казахстан

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГАЗОПРОВОДОВ, И МЕТОДЫ ИХ АНАЛИЗА

Аннотация

Рассматривается процесс динамического разрушения типового участка стального магистрального газопровода с трещиной под действием газодинамического давления. Исследуется высокоскоростное развитие трещины, которая растет под действием истекающего большого количества газа под высоким давлением. Моделируется процесс движения магистральной трещины, которое индуцируется движением газа. Математическая модель этого процесса включает модель газодинамических процессов в трубе и модель высокоскоростного деформирования и разрушения участка трубы с трещиной. Предложена приближенная аналитическая модель газодинамических процессов, которая позволяет моделировать динамическое убывание давления на внутреннюю поверхность трубы и берега трещины. Динамическое изменение давления базируется на декомпрессии газа в локализованной части трубы в окрестности трещины. Модель учитывает изменение давления газа в трубопроводе вдоль продольной координаты части трубы с трещиной. Рассмотрена численная процедура для расчета газодинамического давления при истечении газа через трещину. Она позволяет определять давление на берега трещины как функцию времени. Результаты этой численной процедуры используются для численного моделирования высокоскоростного деформирования и лавинного разрушения типового участка магистрального газопровода с трещиной. Предложена аналитическая модель, которая использует методы механики разрушения для предсказания критического давления, при котором наблюдается рост трещины в трубе. Модель верифицирована по экспериментальным данным и служит для быстрой оценки целостности трубы. Этот аналитический подход используется для предсказания возможности разрушения трубы на основе свойств материала, геометрии трещины и размеров трубы. Он может использоваться для предварительных оценочных расчетов. Рассмотрен численно-аналитический метод для анализа неупругого динамического разрушения трубы. Он основывается на анализе величины угла раскрытия вершины трещины. Также рассмотрен численный метод анализа напряженного состояния в области трещины, учитывающий пластическое деформирование. Представленные модели позволяют численными методами исследовать динамику развития трещин и, как следствие, разрушение типовых участков магистральных газопроводов под давлением. Использование результатов этих исследований позволит принять превентивные меры для предотвращения случаев лавинного разрушения аварийных участков магистральных трубопроводов.

Ключевые слова: газопровод, разрушение, газодинамический процесс, методы оценки, кончик трещины, анализ.

Введение

Ежегодный рост добычи газа и увеличение его удельного веса в топливно-энергетическом балансе страны и в экспортных поставках на международные рынки предопределили высокие темпы роста строительства сети магистральных газопроводов [1]. Согласно данным национального оператора Qazaqgas в сфере газа и газоснабжения Республики Казахстан, магистральные газопроводы в настоящее время являются основным способом транспортировки больших объемов газа от месторождений к местам потребления. Однако анализ зарубежных и отечественных источников показывает [2–5], что в магистральных газопроводах по разным причинам происходят аварии различного характера. Увеличение пропускной способности газопроводов за счет увеличения диаметров труб и рабочих скоростей перекачки, а также повышения рабочего давления приводит к высокой повреждаемости и разрушаемости участков магистральных газопроводов. Такие разрушения сопровождаются быстрым ростом трещин. Скорость такого роста трещины соизмерима со скоростью распространения звука в соответствующем металле. Такой рост трещины индуцируется истечением большого количества газа под большим давлением. Учитывая вышеизложенное, появляется необходимость анализа методов оценки разрушения в магистральных газопроводах, что является весьма актуальной задачей в национальном и международном масштабе, тем более что общий износ существующих газопроводов Республики Казахстан составляет 70% [6].

Обзор литературы

Методы анализа динамического разрушения конструкций и технологии останковки быстрого движения трещин являются ключевыми для обеспечения целостности инженерных конструкций, подверженным значительным динамическим воздействиям. Эти методы интенсивно развиваются в механике разрушения [7, 8]. Эти технологии чрезвычайно важны в случаях, когда рост неустойчивости трещин нельзя предотвратить и масштабного разрушения газопроводов [9]. Подобные исследования финансировались как частными компаниями, так и научными организациями в Евросоюзе, США, Канаде, Китае [10–12]. Поэтому некоторые усилия предприняты для решения этих задач. В статье [9] ставится задача движения магистральной трещины, которая индуцируется движением газа. Указывается, что задача движения магистральной трещины состоит из трех подзадач (анализа напряженного состояния конструкции, движения газа по трубе и через трещину и механики разрушения). Описывается разработка программы расчета, которая состоит из трех модулей: анализа напряженного состояния, газодинамики и моделирования разрушения. Рассматриваются подходы для предотвращения быстрого движения трещины. В работе [13] предложен вычислительный подход к расчету движения магистральной трещины. Для расчета напряженного состояния и движения трещины применяется коммерческая программа LS-DYNA, а для решения задачи газодинамики была разработана своя программа расчета. Подчеркнем, что при анализе разрушения конструкции учитывается зависимость от скорости деформирования. Рядом с вершиной трещины учитывается пластическое деформирование материала. Благодаря развитию пластических деформаций происходит рост трещин. С другой стороны, пластическое деформирование индуцируется действием газа на берега трещины. Как следует из численного моделирования, движение газа происходит со скоростью $100\text{--}300\text{ м/с}$. В работах [14–17] используется расширенный метод конечных элементов, который применяется для моделирования напряженного состояния около трещины. С помощью пакета программ Abacus моделируется рост трещин в трубопроводе. В статье [18] рассматриваются несколько существующих аналитических методов расчета разрушения трубопровода. Результаты аналитических расчетов сравниваются с результатами экспериментального анализа разрушения трубопровода. Среди аналитических методов выбираются те, которые адекватно описывают имеющиеся аналитические результаты. В статье [19]

делается обзор аналитических методов расчета разрушения газопроводов под действием давления газа. Предлагаются методы остановки развития магистральных трещин в газопроводах. В [20] описывается исследовательский опыт Европейской исследовательской группы по прочности газопроводов. Описываются подходы к анализу сопротивления пластическому разрушению. Построена пластическая модель разрушения на основании численного анализа напряженного состояния. В работе [21] метод конечных элементов применялся для моделирования разрушения трубопроводов. По результатам расчета определяется угол раскрытия вершины трещины, который обозначается через $(СТОА)_c$. Этот параметр экспериментально определяется для каждого материала. При критическом значении $(СТОА)_c$ происходит рост трещины. Связанная система газ – оболочка численно исследуется в [22]. Развитие трещины моделируется методом конечных элементов с использованием локального критерия разрушения. Метод конечных объемов используется для моделирования газодинамики. Предложенный метод будет использоваться для проектирования газопроводов. В статье [23–24] рассматриваются методы остановки развития трещины и обзор причин возникновения. Обсуждается использование проволоки и композитных намоток для остановки движения трещины. В работе [25] конечно-элементные расчеты применяются совместно с экспериментальными исследованиями для моделирования развития трещины. Численное моделирование газодинамических процессов, которые наблюдаются при истечении газа из трубы, представлено в [26]. В этой статье описана численная процедура для такого моделирования.

Проведенный научный обзор существующих методов анализа разрушений газопроводов требует дополнительных исследований в части сопоставления и консолидации в единую методику расчета, что впоследствии будет применен авторами в численных исследованиях напряженно-деформированных состояний магистральных газопроводов в современном программном комплексе [27].

Материалы и методы

Приближенная аналитическая модель газодинамических процессов

Разрушение трубопроводов происходит вследствие наличия начальных малых повреждений, которые развиваются вследствие действия интенсивного внутреннего давления. В этом подразделе рассмотрим приближенную простую модель газодинамического давления, которое действует на берега трещины и внутреннюю сторону трубы. Такая модель применяется для расчета динамического развития трещины [21].

Развитие трещины сопровождается декомпрессией газа, то есть затуханием давления со временем. Это происходит в трубе в окрестности трещины. При значительном открытии трещины газ начинает быстро выходить из трубы. Этот поток, выходящий наружу, инициирует волны декомпрессии (расширения) в газе. Как следует из теоретического анализа, закон для идеального газ неадекватно описывает декомпрессию газа. Локальное давление, действующее на берега трещины, описывается соотношением:

$$p_1 = p_0 \left[\frac{2}{\gamma + 1} + \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) \frac{v}{v_a} \right]^{2\gamma/(\gamma-1)}, \quad (1)$$

где p_1 — давление у вершины трещины;

p_0 — величина давления до начала процесса разрушения;

v — скорость распространения трещины;

v_a — скорость волн декомпрессии;

γ — показатель адиабаты.



Рисунок 1 – Кривые, описывающие декомпрессию газа

Известные уравнения Benedict, Webb, Rubin [28] используются для описания декомпресии газа в следующем виде:

$$p = RT\rho + \left(B_0RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2}\right)\rho^2 + (bRT - a)\rho^3 + a\alpha\rho^6 + c\frac{\rho^3}{T^2}(1 + \gamma\rho^2)\exp(-\gamma\rho^2). \quad (2)$$

Starling [29] предложил параметрическое уравнение состояния в следующем виде:

$$p = RT\rho + \left(B_0RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2} + \frac{D_0}{T^3} - \frac{E_0}{T^4}\right)\rho^2 + \left(bRT - a - \frac{d}{T}\right)\rho^3 + \left(a + \frac{d}{T}\right)\alpha\rho^6 + c\frac{\rho^3}{T^2}(1 + \gamma\rho^2)\exp(-\gamma\rho^2), \quad (3)$$

где p – давление;

R – газовая постоянная;

ρ – плотность газа;

$A_0, B_0, C_0, D_0, E_0, a, b, c, d, \alpha, \gamma$ – параметры уравнения (3).



Рисунок 2 – Зависимость давления от продольной координаты трубопровода

На рисунке 1 показывается зависимость давления газа от параметра относительной скорости $\frac{v}{v_a}$. На рисунке 1b показывается кусочно-линейная зависимость от скорости. Используя рисунок 1 и экспериментальные данные, построим три линейный режим декомпозиции, который представлен на рисунке 2. Такая зависимость давления от продольной координаты описывает приближенное распределение давления, которое наблюдается в трубопроводе. Три линейный режим декомпозиции представим так (рисунок 3) [30]:

$$\begin{aligned} p_a(z) &= (p_0 - p) \left(1 - \frac{z}{L}\right) + p; l + l_{pb} + l_{pa} < z < l + l_{pb} + l_{pa} + L; \\ p(z) &= p; l < z < l + l_{pb} + l_{pa}; \\ p_a(z) &= p \left(1 - \frac{z}{L}\right) + p; 0 < z < l, \end{aligned} \quad (4)$$

где l_{pa} — длина постоянного значения давления до вершины трещины;
 l_{pb} — длина постоянного значения давления за вершиной трещины;
 l — длина участка декомпрессии до постоянного давления;
 p — постоянное значение давления около трещины.

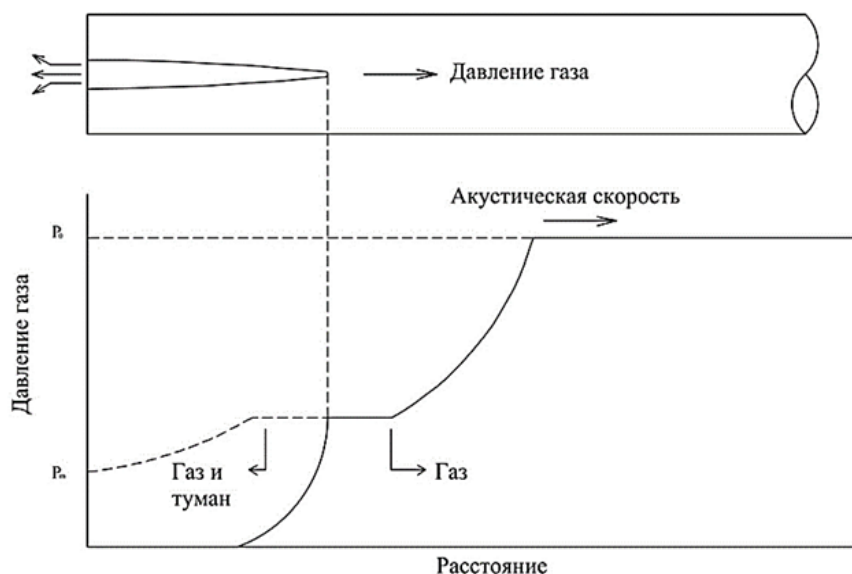


Рисунок 3 – Качественное поведение газа при его декомпрессии

Вследствие диссипации энергии в быстро движущемся процессе разрушения скорость движения трещины затухает. Мгновенная скорость движения трещины выражается через обобщенную длину трещины:

$$v = v_0(1 - \sqrt{z/L_r}), \quad (5)$$

где v_0 — начальная скорость движения трещины;
 z — расстояние от начала трещины до ее текущего положения;
 L_r — обобщенная длина трещины равная 1.5–2.0 диаметра трубы.

Численная процедура для расчета газодинамического давления

Модель декомпрессии газа

Рассмотрим три предположения, на основании которых строится рассматриваемая одномерная модель изоэнтропического потока газа.

- (1) Поток считается одномерным, несмотря на течение газа через трещину. Эта гипотеза выполняется при движении трещины, за исключением времени ее образования.
- (2) Поток является адиабатическим, поэтому нагревом газа и трением пренебрегаем.
- (3) Термодинамическое равновесие наблюдается во всем потоке газа.

Воспользуемся тремя дифференциальными уравнениями в частных производных, которые описывают постоянство массы, закон сохранения энергии и изменение количества движения. Эти уравнения выглядят в следующем виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) = 0;$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} \rho u + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u^2) + \frac{\partial p}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} \rho (h + 0.5u^2) + \frac{\partial}{\partial x} \rho u (h + 0.5u^2) - \frac{\partial p}{\partial x} &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где ρ — плотность газа;

u — скорость движения газа;

h — энтальпия;

p — давление.

Скорость движения возмущений в газе определяется следующим соотношением:

$$a^2 = \frac{dp}{d\rho}. \quad (7)$$

Это соотношение может быть представлено так:

$$\frac{du}{dp} = \pm \frac{1}{\rho a}. \quad (8)$$

Уравнения (7, 8) используются для расчета скорости газа в зависимости от давления. Воспользуемся такими граничными условиями:

$$u = 0; a = a_0 \text{ при } p = p_0.$$

Пусть p_n, ρ_n и p_{n+1}, ρ_{n+1} ($p_n > p_{n+1}$) являются двумя последовательными точками линии постоянной энтропии, проходящей через начальную точку. Для численных расчетов используются такие конечно-разностные соотношения:

$$\begin{aligned} a_{n+1}^2 &= \frac{p_n - p_{n+1}}{\rho_n - \rho_{n+1}}; \\ u_{n+1} &= u_n + 0.5 \frac{p_n - p_{n+1}}{a_n} \left(\frac{1}{\rho_n} + \frac{1}{\rho_{n+1}} \right). \end{aligned}$$

Когда труба разрывается, газ выходит через трещину (рисунок 4, стр. 244). Декомпрессионное возмущение движется обратно в трубу. Тогда волна давления распространяется обратно со скоростью w , которая является разницей между скоростью возмущений в газе a и скоростью газа u .

$$w_{n+1} = a_{n+1} - u_{n+1}.$$

Для расчета кривой декомпозиции используется параметрическое уравнение состояния (3).

Декомпрессия газа через раскрытую трещину

Трещина в трубе движется со скоростью, близкой к скорости распространения продольных волн в трубе. Вследствие этого возникают участки трубы с большим разломом (рисунок 4, стр. 244). Через эти разломы вытекает газ. Модель такого истечения рассматривается в этом разделе. Происходит естественная декомпозиция газа (рисунок 4), численное моделирование которой рассмотрено в этом разделе. Движение газа описывается следующей системой уравнений в частных производных:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + H = 0, \quad (9)$$

где

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ e \end{bmatrix} \frac{A}{A_0}; \quad E = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ (e + p)u \end{bmatrix} \frac{A}{A_0};$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\rho \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{A_0} \right) \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Общая энергия газа определяется так:

$$e = \rho h + 0.5 \rho u^2 - p.$$

Величина A/A_0 определяет отношение локального поперечного сечения к основному поперечному сечению.

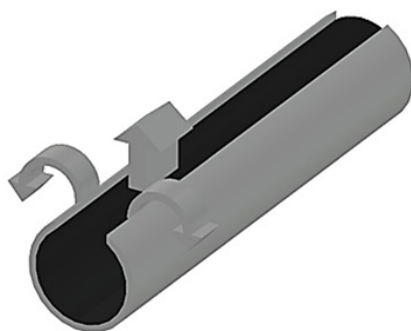


Рисунок 4 – Истечение газа через трещину

Результаты и обсуждения

Аналитические методы анализа разрушения трубопроводов

Аналитическая модель использует методы механики разрушения для предсказания критического давления, при котором наблюдается рост трещины в трубе. Эта модель верифицирована по экспериментальным данным и является очень удобной для быстрой оценки целостности конструкции. Свойства материала, геометрия трещины, размеры трубы используются для предсказания возможности разрушения трубы.

Мы используем комбинацию следующих аналитических методов: модифицированные NG-18 уравнения [31], подход CorLAS [32], диаграмма оценки разрушения [33, 34]. Модифицированные NG-18 уравнения используют полуэмпирическую модель для предсказания давления, при котором наблюдается разрушение. Модифицированная версия этого подхода состоит из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \sigma_{fs} &= \frac{\bar{\sigma} \arccos(e^{-x})}{M_T \arccos(e^{-y})}; \\ x &= \frac{3 \cdot CVN \cdot E \pi}{2 A_0 c \bar{\sigma}^2}; \\ y &= x \left[1 - \left(\frac{d}{t} \right)^{0.8} \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (10)$$

где σ_{fs} — величина напряжений при разрушении;

$\bar{\sigma}$ — поток напряжений;

M_T — коэффициент Folias; CVN — верхняя оценка энергии удара;

A_0 — площадь рассматриваемой трещины;

E — модуль Юнга; d — глубина трещины;

t – толщина трубы;

$2c$ – длина трещины.

Поток напряжений определяется так: $\bar{\sigma} = \sigma_y + 68.95 \text{ MPa}$. Коэффициент Folias M_T рассчитывается по формуле:

$$M_T = \frac{1 - \frac{a}{tM_t}}{1 - \frac{a}{t}};$$

$$M_t = \sqrt{1 + 1.255 \frac{c_{eq}^2}{Rt} - 0.0135 \frac{c_{eq}^4}{R^2 t^2}}.$$

Уравнение (10) используются для расчета напряжений при разрушении. Результаты расчета используются для предсказания разрушающего давления P_f

$$P_f = \sigma_{fs} \frac{2t}{D} \frac{\left(1 - \frac{A}{A_0}\right)}{\left(1 - \frac{A}{A_0 M_T}\right)},$$

где A – область трещины.

Коэффициент интенсивности напряжений считается так:

$$K_c^2 = \frac{8a\bar{\sigma}^2}{\pi} \ln \sec \left(\frac{\pi \sigma M_T}{2\bar{\sigma}} \right).$$

Скорость распространения трещины V_f определяется так:

$$V_f = C \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{c_v/A}} \left(\frac{P}{P_a} - 1 \right)^{1/6},$$

где c_v/A – сопротивление разрушению;

P – давление газа на берега трещины;

$$P_a = \frac{2t\sigma}{D};$$

C – постоянная засыпки канавы, которая равна 0.648 (или 2.75) для незасыпанной трубы. Для полностью засыпанной трубы постоянная C равна 0.47 (или 2.34).

Подход CorLAS [32] использует I интеграл, расчет которого использует вязкость разрушения. Эта вязкость для каждого материала находится экспериментально. Этот параметр используется для анализа роста трещины и разрушающего давления. I интеграл итерационно считается с использованием формулы:

$$I = Q_f F_{sf} \left[\frac{\sigma^2 \pi a}{E} + f_3(n) a \varepsilon_p \sigma \right],$$

где Q_f – коэффициент эллиптической формы;

F_{sf} – коэффициент свободной поверхности;

σ – локальные напряжения;

a – глубина трещины;

$f_3(n)$ – коэффициент упрочнения деформаций;

n — показатель упрочнения деформаций;
 ε_p — пластические деформации.

Значение J интеграла сравнивается с вязкостью разрушения материала J_{cr} , которое определяется экспериментально. Разрушение конструкции наблюдается, когда $J = J_{cr}$.

Предложенный аналитический метод расчета не может заменить сложный конечно-элементный расчет разрушения трубопровода. Этот аналитический расчет может быть проверочным расчетом для конечно-элементного моделирования. Кроме того, этот аналитический подход может использоваться для простых предварительных оценочных расчетов.

Численно-аналитический метод

Быстрое пластичное разрушение в стальном газопроводе — это чрезвычайно сложный процесс, состоящий из трех взаимодействующих явлений. (1) Многомасштабное упругопластическое динамическое деформирование стенок трубы. (2) Трехмерные неустойчивые газодинамики процессы. (3) Неупругое распространение трещины. Последний этап схематично представлен на рисунке 5.

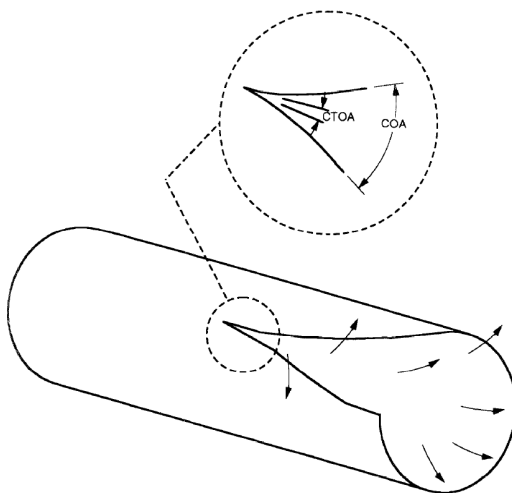


Рисунок 5 — Эскиз развития трещины

Для анализа неупругого динамического разрушения трубы угол раскрытия вершины трещины CTOA считается наиболее приемлемым параметром (рисунок 5). Параметр CTOA зависит от геометрии конструкции и нагрузок. Критическое значение этого параметра обозначается $(CTOA)_c$.

Параметр $(CTOA)_{max}$ используется для описания наиболее опасного напряженного состояния около трещины. Явление разрушения не наблюдается, если выполняется соотношение:

$$(CTOA)_c > (CTOA)_{max}.$$

Для исследования чувствительности трубы к пластическому разрушению необходимо определить обе части последнего уравнения для заданных рабочих условий трубы. Конечно-элементный метод применяется для моделирования CTOA в случае установившегося движения трещины.

Величина $(CTOA)_c$ определяется из следующего соотношения:

$$(CTOA)_c = 2571 \frac{180 S_c}{\pi \sigma_{od}},$$

где S_c — энергия, необходимая для пластического деформирования области возле разрушения, отнесенная к площади области;

$$\sigma_{od} = 0.65(\sigma_y + \sigma_u);$$

σ_y – предел упругости;

σ_u – предел прочности.

4.3. Численные методы анализа разрушения трубопровода

Для анализа напряженного состояния в области трещины применяется расширенный метод конечных элементов. Сущность этого метода заключается в том, что вектор узловых перемещений $\mathbf{u}$ в области трещины представляется так [7–11]:

$$\mathbf{u} = \sum_{I=1}^N N_I(x) \left[\mathbf{u}_I + H(x) \mathbf{a}_I + \sum_{a=1}^4 F_a(x) b_I^a \right],$$

где $N_I(x)$ – функция форм;

$\mathbf{u}_I$ – вектор узловых перемещений, характеризующий непрерывную часть решения;

$H(x)$ – разрывная функция, описывающая скачок;

$\mathbf{a}_I$ – расширенные степени свободы над внутренней частью трещины;

b_I^a – узловые расширенные степени свободы около вершины трещины;

$F_a(x)$ – упругая асимптотическая функция вершины трещины.

Произведения $H(x) \mathbf{a}_I$ и $F_a(x) b_I^a$ представляют дополнительные решения, которые вырезают внутреннюю часть трещины и вырезают узлы около вершины трещины. Расширенный метод конечных элементов использует внутренние элементы, чтобы свободно разместить трещину с сеткой и не связывать ее с границей элемента. Это дает возможность не перестраивать сетку при расчете движения трещины [35]. В процессе расчета области развития магистральной трещины действительные узлы трещины вместе с конечным элементом удаляются, если напряжения или деформации превосходят критические значения.

Применяемый критерий инициации дефекта может выглядеть так, что максимальные главные напряжения ($Maxp$) или деформации ($Maxs$) достигли критического значения. Может использоваться другой критерий инициации дефекта, который заключается в квадратичности напряжений, или квадратичности деформаций.

Критерий эволюции дефекта может выражаться в критическом значении энергии разрушения, или критическом значении перемещений вершины трещины. В статье [36] предлагают использовать критическое значение когезионной прочности как критерия инициализации разрушения. Поток энергии в вершину трещины $G_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E}$ принимается равным когезионной энергии для хрупкого материала, а J интеграл используется для пластичного материала. В статье [30] предлагается брать значения когезионной прочности и когезионной энергии в виде $3\sigma_y$ и $\Gamma_0 = \frac{K_{IC}^2}{E}$ соответственно. Здесь σ_y – предел упругости.

В [37, 38] показано, что $Maxp > 1.5\sigma_y$ требуется для развития пластических деформаций в вершине трещины в конструкции из сплава алюминия. В этом случае сопротивление развитию трещины наблюдается вследствие пластической диссипации энергии. При $Maxp < 1.5\sigma_y$ сопротивление развитию трещины оказывает энергия разрушения.

Предположим, что для моделирования роста трещины вокруг нее построена конечно-элементная модель. Для расчета движения трещины используется удаление конечных элементов. Для удаления предлагается использовать Cockcroft и Latham критерий пластичности [6], который описывается так.

$$W = \int \sigma_1 d\varepsilon_e \geq W_c, \quad (11)$$

где σ_1 — максимальная величина из главных напряжений;

ε_e — эквивалентные пластические деформации;

W_c — параметр материала, который определяется из эксперимента.

Этот критерий имеет размерность работы единицы объема. Отметим, что конечный элемент не удаляется, если выполняется условие: $W = \int \sigma_1 d\varepsilon_e \leq W_c$. Величина W_c определялась из интегрирования кривой напряжения — деформации до разрушения материала. Используя Cockcroft и Latham критерий пластичности, получаем $W_c = 1200(\pm 80) \text{ МПа}$.

Выводы

Рассмотрен процесс динамического разрушения типового участка стального магистрального газопровода с трещиной под действием газодинамического давления. Исследуется высокоскоростное развитие трещины, которая растет под действием истекающего большого количества газа под высоким давлением. Моделируется процесс движения магистральной трещины, которое индуцируется движением газа. Математическая модель этого процесса включает модель газодинамических процессов в трубе и модель высокоскоростного деформирования и разрушения участка трубы с трещиной.

Предложена приближенная аналитическая модель газодинамических процессов, которая позволяет моделировать динамическое убывание давления на внутреннюю поверхность трубы и берега трещины. Динамическое изменение давления базируется на декомпрессии газа в локализованной части трубы в окрестности трещины. Модель учитывает изменение давления газа в трубопроводе вдоль продольной координаты части трубы с трещиной.

Рассмотрена численная процедура для расчета газодинамического давления при истечении газа через трещину. Она позволяет определять давление на берега трещины как функцию времени. Результаты этой численной процедуры используются для численного моделирования высокоскоростного деформирования и лавинного разрушения типового участка магистрального газопровода с трещиной.

Предложена аналитическая модель, которая использует методы механики разрушения для предсказания критического давления, при котором наблюдается рост трещины в трубе. Модель верифицирована по экспериментальным данным и служит для быстрой оценки целостности трубы. Этот аналитический подход используется для предсказания возможности разрушения трубы на основе свойств материала, геометрии трещины и размеров трубы. Он может использоваться для предварительных оценочных расчетов.

Рассмотрен численно-аналитический метод для анализа неупругого динамического разрушения трубы. Он основывается на анализе величины угла раскрытия вершины трещины. Также рассмотрен численный метод анализа напряженного состояния в области трещины, учитывающий пластическое деформирование.

Представленные модели позволяют численными методами исследовать динамику развития трещин и, как следствие, разрушение типовых участков магистральных газопроводов под давлением. Использование результатов этих исследований позволит принять превентивные меры для предотвращения случаев лавинного разрушения аварийных участков магистральных трубопроводов.

Полученные результаты планируется использовать для численного анализа динамического напряженно-деформированного состояния и разрушения типового участка магистрального газопровода с трещинами.

Благодарности/источник финансирования

Исследование проводилось в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан ИРН AP19680589 «Разработка

научных основ сопротивляемости магистральных газопроводов протяженному лавинному разрушению».

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Отчет национального оператора АО Qazaqgaz за 2021 г. URL: <https://qazaqgaz.kz/ru/otchety>
- 2 11th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970–2019) December 2020. URL: <https://www.egig.eu/reports>
- 3 UKOPA Pipeline Product Loss Incidents and Faults Report (1962–2020). ReportReference: February 2020. URL: <https://www.ukopa.co.uk/published-documents/ukopa-reports/>
- 4 PHMSA. Pipelines and Hazardous Materials Safety Administration. Pipeline Incident 20 Year Trends. URL: <https://www.phmsa.dot.gov/data-and-statistics/pipeline/pipeline-incident-20-year-trends>
- 5 Годовой отчет АО «ИнтергазЦентральнаяАзия» за 2019 г. – Нур-Султан. – 2020. – 78 с. URL: <https://intergas.kz/ru/reports/88>
- 6 URL: <https://zonakz.net/2021/03/12/iznos-kazaxstanskix-gazoprovodov-sostavlyayet-bolee-70/>
- 7 Пестриков В.М., Морозов Е.М. Механика разрушения. – 2002. – Санкт-Петербург. [PDF file]. Retrieved from: <https://studfile.net/preview/2264467/>
- 8 Ibrahimova U. et al. Development of method for calculation of pre-strained steel cylindrical sheaths in view of the winding angle, pitch and thickness // Case Studies in Construction Materials. – 2023. – Vol. 19, e02233. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02233>
- 9 O'Donoghue. P.E., Green S.T., Kanninen M.F., Bowles P.K. The development of a fluid/structure interaction model for flawed fluid containment boundaries with applications to gas transmission and distribution piping // Computers and Structures. – 1991. – Vol. 38. – P. 501–513. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(91\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0045-7949(91)90002-4).
- 10 O'Donoghue P.E., Kanninen M.F., Leung C.P., Demofonti G., Venzi S. The development and validation of a dynamic fracture propagation model for gas transmission pipelines // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 1997. – Vol. 70. – P. 11–25. [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(96\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(96)00012-9).
- 11 Berardo G., Salvini P. On longitudinal propagation of a ductile fracture in a buried gas pipeline: numerical and experimental analysis. In: Proceedings of the 2000 3rd international pipeline conference, Calgary, Canada. – 2000. https://www.researchgate.net/publication/313743175_On_longitudinal_propagation_of_a_ductile_fracture_in_a_buried_gas_pipeline_numerical_and_experimental_analysis
- 12 Shuai J., Zhang H., Wang Y.G., Dai S.L. Research advance of dynamic crack propagation and arrest techniques for gas transmission pipeline. Journal of the university of petroleum, China. – 2004. – Vol. 28(3). – P. 129–135. [PDF file]. https://www.researchgate.net/publication/287616844_Research_advance_of_dynamic_crack_propagation_and_arrest_techniques_for_gas_transmission_pipeline.
- 13 Nordhagen H.O., Kragset S., Berstad T., Morin A., Dørum S.T. A new coupled fluid–structure modeling methodology for running ductile fracture // Computers & Structures. – 2012. – Vol. 94–95. – P. 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.01.004>.
- 14 Okodi A., Lin M., Yoosef-Ghodsi N., Kainat M., Hassanien S., Adeeb S. Crack propagation and burst pressure of longitudinally cracked pipelines using extended finite element method // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2020. – Vol. 184. – P. 104115. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104115>.
- 15 Fries T.P., Belytschko T. The extended/generalised finite element method: an overview of the method and its applications // Int. J. Numer. Methods Eng. – 2010. – Vol. 84. – Issue 3. – P. 253 – 304. <https://doi.org/10.1002/nme.2914>.
- 16 Melenk J.M., Babuska I. The Partition of Unity Finite Element Method: Basic Theory and Applications // Computer methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1996. – Vol. 139. – P. 289–314. [PDF file]. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(96\)01087-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(96)01087-0).
- 17 Moes N., Dolbow J., Belytschko T. A finite element method for crack growth without remeshing // Int. J. Numer. Methods Eng. – 1999. – Vol. 46. – P. 131–150. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0207\(19990910\)46:13.O.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(19990910)46:13.O.CO;2-J).
- 18 Yan Z., Zhang S., Zhou W. Model error assessment of burst capacity models for energy pipelines containing surface cracks. International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2014. – P. 80–93. [PDF

file]. https://www.academia.edu/29425274/Model_error_assessment_of_burst_capacity_models_for_energy_pipelines_containing_surface_cracks.

19 Zhu X.K. Review of fracture control technology for gas transmission pipelines. Proceedings of the 10th International Pipeline Conference. <https://doi.org/10.1115/IPC2014-33121>

20 Di Biagio M., Demofonti G., Mannucci G., Iob F., Spinelli C.M., Schmidt T. Development of a reliable model for evaluating the ductile fracture propagation resistance for high grade steel pipelines. Proceedings of the 2012 9th International Pipeline Conference, IPC2012, September 24-28, Calgary, Alberta, Canada. – 2012. <https://doi.org/10.1115/IPC2012-90614>.

21 Yang X.B., Zhuang Z., You X.C., Feng Y.R., Huo C.Y., Zhuang C.J. Dynamic fracture study by an experiment/simulation method for rich gas transmission X80 steel pipelines. Engineering Fracture Mechanics. – 2008. – Vol. 75. – P. 5018–5028. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.06.032>.

22 Berstad T., Dorum C., Jakoben J.P., Kragset S., Li H. et.al. CO₂ pipeline integrity: A new evaluation methodology / Energy Procedia. – 2010. – Vol. 4. – P. 3000–3007. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.210>

23 Zhuang Z., O'donoghue P.E. The recent development of analysis methodology for rapid crack propagation and arrest in gas pipelines // International Journal of Fracture. – 2000. – Vol. 101. – P. 269–290. <https://doi.org/10.1023/A:1007614308834>

24 Zhangabay N. et al. Factor affecting extended avalanche destructions on long-distance gas pipe lines: Review / Case Studies in Construction Materials. – 2023. – Vol. 19. – P. e02376. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02376>.

25 Fengping Y., Chunyong H., Jinheng L., He L.I., Yang L.I. Crack Propagation and Arrest Simulation of X90 Gas Pipe // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2017. – Vol. 149. – P. 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.12.005>.

26 Makino H., Sugie T., Watanabe H., Kubo T., Shiwaku, T., End, S. Inoue T., Kawaguchi, Y., Matsumoto Y., Machida S. Natural Gas Decompression Behavior in High Pressure Pipelines. ISIJ International. – 2001. – Vol. 4. – P. 389–395. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.389>.

27 ANSYS Learning–Thermal Convection in Heat Transfer–Assess Mode. Available online: <https://courses.ansys.com/index.php/courses/thermal-convection-in-heat-transfer/>

28 Jingshan T., Guanghua G., Yuping L. Chemical engineering thermodynamics. Beijing: Tsinghua University Press. – 1995. <https://chemicalpdf.com/category/chemical-engineering-thermodynamics/>.

29 Starling K. Fluid thermodynamic properties for light petroleum system. Houston. Gulf Publishing Company. – 1973. [Cited November 25, 2023]. https://books.google.ru/books/about/Fluid_Thermodynamic_Properties_for_Light.html?hl=ru&id=YXMvAQAAIAAJ&redir_esc=y.

30 Oikonomidis F., Shterenlikht A., Truman C.E. Prediction of crack propagation and arrest in X100 natural gas transmission pipelines with a strain rate dependent damage model (SRDD). Part 2: Large scale pipe models with gas depressurization // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2014. – Vol.105. – P. 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2013.03.003>

31 Kiefner J.F., Maxey W.A., Eiber R.J., Duffy A.R. Failure Stress Levels of Flaws in Pressurized Cylinders. American Society of Testing and Materials Report. – 1973. – P. 536, 461–481. <https://doi.org/10.1520/STP49657S>.

32 Zhang X., Lin M., Okodi A., Tan L., Leung J.Y. & Adeeb S. Numerical Analysis of API 5 L X42 and X52 Vintage Pipes With Cracks in Corrosion Defects Using Extended Finite Element Method // Journal of Pressure Vessel Technology. – 2021. – Vol. 143(6). – P. 061302. <https://doi.org/10.1115/1.4050988>

33 ASME Fitness-For-Service, API Recommended Practice 579-1/ASME FFS-1 2007, second ed. The American Society of Mechanical Engineers, New York, USA. – 2007. <https://www.yumpu.com/en/document/view/26949457/fitness-for-service/1025>.

34 B.S.I. BS7910. Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structure, British standards institution, London, UK. – 2005. https://www.academia.edu/33758342/Guide_to_methods_for_assessing_the_acceptability_of_flaws_in_metallic_structures.

35 Zhang Z., Xu J., Nyhus B., Østby E. SENT (single edge notch tension) methodology for pipeline applications, in: Proceedings of the 18th European Conference on Fracture, Dresden, Germany. – 2010. <https://folk.ntnu.no/zhiliang/Zhiliangs-Papers-in-PDF-format/ZZ-C070-2010-ECF18-SENT%20Methodology%20for%20pipeline%20applications.pdf>.

36 Schwalbe K.H., Scheider I., Cornec A. The SIAM Method for Applying Cohesive Models to the Damage Behavior of Engineering Materials and Structures, GKSS 2009/1, ISSN 0344-9629. https://www.hereon.de/imperia/md/content/hzg/zentrale_einrichtungen/bibliothek/berichte/2009/gkss_2009_1.pdf

37 Li H., Chandra N. Analysis of crack growth and crack-tip plasticity in ductile materials using cohesive zone models // *Int. J. Plast.* – 2003. – Vol. 19. – 849–882. [Cited November 25, 2023] URL: <https://researchwith.njit.edu/en/publications/analysis-of-crack-growth-and-crack-tip-plasticity-in-ductile-mate>.

38 Hallquist J.O. LS-DYNA Theory manual. Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Livermore, California 94551. – 2006. – P. 680 [Cited November 25, 2023] URL: https://www.academia.edu/23076592/LS_DYNA_Theory_Manual_LIVERMORE_SOFTWARE_TECHNOLOGY_CORPORATION_LSTC

REFERENCES

1 Otchet nacional'nogo operatora AO Qazaqgaz za 2021 g. [in Russian] URL: <https://qazaqgaz.kz/ru/otchet>

2 11th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970–2019) December 2020. URL: <https://www.egig.eu/reports>.

3 UKOPA Pipeline Product Loss Incidents and Faults Report (1962–2020). ReportReference: February 2020. URL: <https://www.ukopa.co.uk/published-documents/ukopa-reports/>

4 PHMSA. Pipelines and Hazardous Materials Safety Administration. Pipeline Incident 20 Year Trends. URL: <https://www.phmsa.dot.gov/data-and-statistics/pipeline/pipeline-incident-20-year-trends>

5 Godovoj otchet AO «IntergazCentral'najaAzija» za 2019 g. – Nur-Sultan. – 2020. – 78 c. URL: <https://intergas.kz/ru/reports/88>.

6 URL: <https://zonakz.net/2021/03/12/iznos-kazaxstanskix-gazoprovodov-sostavlyaet-bolee-70/>

7 Pestrikov V.M., Morozov E.M. (2002). *Mehanika razrusheniya*. Sankt-Peterburg [PDF file] [in Russian]. Retrieved from: <https://studfile.net/preview/2264467/>.

8 Ibraimova U. et al. Development of method for calculation of pre-strained steel cylindrical sheaths in view of the winding angle, pitch and thickness. *Case Studies in Construction Materials*. 2023, vol.19, e02233. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02233>

9 O'Donoghue. P.E., Green S.T., Kanninen M.F., Bowles P.K. (1991) The development of a fluid/structure interaction model for flawed fluid containment boundaries with applications to gas transmission and distribution piping. *Computers and Structures*, vol.38, pp. 501–513. .

10 O'Donoghue P.E., Kanninen M.F., Leung C.P., Demofonti G., Venzi S. (1997) The development and validation of a dynamic fracture propagation model for gas transmission pipelines. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 70, pp. 11–25.

11 Berardo G., Salvini P. (2000) On longitudinal propagation of a ductile fracture in a buried gas pipeline: numerical and experimental analysis. In: *Proceedings of the 2000 3rd international pipeline conference*, Calgary, Canada. https://www.researchgate.net/publication/313743175_On_longitudinal_propagation_of_a_ductile_fracture_in_a_buried_gas_pipeline_numerical_and_experimental_analysis

12 Shuai J., Zhang H., Wang Y.G., Dai S.L. (2004). Research advance of dynamic crack propagation and arrest techniques for gas transmission pipeline. *Journal of the university of petroleum, China*, vol. 28(3), pp. 129–135. https://www.researchgate.net/publication/287616844_Research_advance_of_dynamic_crack_propagation_and_arrest_techniques_for_gas_transmission_pipeline.

13 Nordhagen H.O., Kragset S., Berstad T., Morin A., Dørum S.T. (2012) A new coupled fluid–structure modeling methodology for running ductile fracture. *Computers & Structures*, vol. 94–95, pp. 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.01.004>.

14 Okodi A., Lin M., Yoosef-Ghodsi N., Kainat M., Hassanien S., Adeeb S. (2020) Crack propagation and burst pressure of longitudinally cracked pipelines using extended finite element method. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 184, p. 104115. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104115>.

15 Fries T.P., Belytschko T. (2010). The extended/generalised finite element method: an overview of the method and its applications, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 84, issue 3, pp. 253 – 304. <https://doi.org/10.1002/nme.2914>.

16 Melenk J.M., Babuska I. (1996) The Partition of Unity Finite Element Method: Basic Theory and Applications, *Computer methods in Applied mechanics and Engineering*. [PDF file]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 139, pp. 289–314. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(96\)01087-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(96)01087-0).

17 Moes N., Dolbow J., Belytschko T. (1999) A finite element method for crack growth without remeshing. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 46, pp. 131–150. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0207\(19990910\)46:13.O.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(19990910)46:13.O.CO;2-J)

18 Yan Z., Zhang S., Zhou W. (2014) Model error assessment of burst capacity models for energy pipelines containing surface cracks. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, pp. 80–93. https://www.academia.edu/29425274/Model_error_assessment_of_burst_capacity_models_for_energy_pipelines_containing_surface_cracks

19 Zhu X.K. (2014) Review of fracture control technology for gas transmission pipelines. *Proceedings of the 10th International Pipeline Conference*. <https://doi.org/10.1115/IPC2014-33121>.

20 Di Biagio M., Demofonti G., Mannucci G., Iob F., Spinelli C.M., Schmidt T. (2012) Development of a reliable model for evaluating the ductile fracture propagation resistance for high grade steel pipelines. *Proceedings of the 2012 9th International Pipeline Conference, IPC2012*, September 24–28, Calgary, Alberta, Canada. <https://doi.org/10.1115/IPC2012-90614>

21 Yang X.B., Zhuang Z., You X.C., Feng Y.R., Huo C.Y., Zhuang C.J. (2008) Dynamic fracture study by an experiment/simulation method for rich gas transmission X80 steel pipelines. *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 75, pp. 5018–5028. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.06.032>

22 Berstad T., Dorum C., Jakoben, J.P., Kragset S., Li H., et.al. (2010) CO₂ pipeline integrity: A new evaluation methodology. *Energy Procedia*, vol. 4, pp. 3000–3007. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.210>.

23 Zhuang Z., O'donoghue P.E. (2000) The recent development of analysis methodology for rapid crack propagation and arrest in gas pipelines. *International Journal of Fracture*, vol. 101, pp. 269–290. <https://doi.org/10.1023/A:1007614308834>.

24 Zhangabay N. et al. (2023) Factor affecting extended avalanche destructions on long-distance gas pipe lines: Review. *Case Studies in Construction Materials*, vol.19, p. e02376. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02376>.

25 Fengping Y., Chunyong H., Jinheng L., He L.I., Yang L.I. (2017) Crack Propagation and Arrest Simulation of X90 Gas Pipe. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 149, pp. 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.12.005>.

26 Makino H., Sugie T., Watanabe H., Kubo T., Shiwaku T., Endo S. Inoue T., Kawaguchi Y., Matsumoto Y., Machida S. (2001) Natural Gas Decompression Behavior in High Pressure Pipelines. *ISIJ International*, vol. 4, pp. 389–395. <https://10.2355/isijinternational.41.389>.

27 ANSYS Learning–Thermal Convection in Heat Transfer–Assess Mode. Available online: <https://courses.ansys.com/index.php/courses/thermal-convection-in-heat-transfer/>

28 Jingshan T., Guanghua G., Yuping L. (1995) *Chemical engineering thermodynamics*. Beijing: Tsinghua University Press. [Cited November 25, 2021]. <https://chemicalpdf.com/category/chemical-engineering-thermodynamics/>

29 Starling K. (1973). *Fluid thermodynamic properties for light petroleum system*. Houston. Gulf Publishing Company. [Cited November 25, 2023]. https://books.google.ru/books/about/Fluid_Thermodynamic_Properties_for_Light.html?hl=ru&id=YXMvAQAAIAAJ&redir_esc=y.

30 Oikonomidis F., Shterenlikht A., Truman C.E. (2014) Prediction of crack propagation and arrest in X100 natural gas transmission pipelines with a strain rate dependent damage model (SRDD). Part 2: Large scale pipe models with gas depressurization. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 105, pp. 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2013.03.003>.

31 Kiefner J.F., Maxey W.A., Eiber R.J., Duffy A.R. (1973) Failure Stress Levels of Flaws in Pressurized Cylinders. *American Society of Testing and Materials Report*, pp. 536, 461–481 <https://10.1520/STP49657S>.

32 Zhang X., Lin M., Okodi A., Tan L., Leung J. Y. & Adeeb S. (2021) Numerical Analysis of API 5 L X42 and X52 Vintage Pipes With Cracks in Corrosion Defects Using Extended Finite Element Method. *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 143(6), p. 061302. <https://doi.org/10.1115/1.4050988>.

33 ASME (2007) *Fitness-For-Service, API Recommended Practice 579-1/ASME FFS-1 2007*, second ed. The American Society of Mechanical Engineers, New York, USA. <https://www.yumpu.com/en/document/view/26949457/fitness-for-service/1025>.

34 B.S.I. BS7910 (2005). *Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structure*, British standards institution, London, UK. https://www.academia.edu/33758342/Guide_to_methods_for_assessing_the_acceptability_of_flaws_in_metallic_structures.

35 Zhang Z., Xu J., Nyhus B., Østby E. (2010) SENT (single edge notch tension) methodology for pipeline applications, in: Proceedings of the 18th European Conference on Fracture, Dresden, Germany. <https://folk.ntnu.no/zhiliang/Zhiliangs-Papers-in-PDF-format/ZZ-C070-2010-ECF18-SENT%20Methodology%20for%20pipeline%20applications.pdf>

36 Schwalbe K.H., Scheider I., Cornec A. (2009) The SIAM Method for Applying Cohesive Models to the Damage Behavior of Engineering Materials and Structures, GKSS 2009/1, ISSN 0344–9629. https://www.hereon.de/imperia/md/content/hzg/zentrale_einrichtungen/bibliothek/berichte/2009/gkss_2009_1.pdf.

37 Li H., Chandra N. (2003) Analysis of crack growth and crack-tip plasticity in ductile materials using cohesive zone models, Int. J. Plast, vol. 19, pp. 849–882. [Cited November 25, 2023]. <https://researchwith.njit.edu/en/publications/analysis-of-crack-growth-and-crack-tip-plasticity-in-ductile-mate>.

38 Hallquist J.O. 2006 LS-DYNA Theory manual. Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Livermore, California 94551, p. 680 [Cited November 25, 2023]. https://www.academia.edu/23076592/LS_DYNA_Theory_Manual_LIVERMORE_SOFTWARE_TECHNOLOGY_CORPORATION_LSTC.

¹Жаңабай Н.Ж.,

т.ғ.к., ORCID ID: 0000-0002-8153-1449, e-mail: nurlan.zhanabay777@mail.ru

¹Ибраимова Ұ.Б.,

магистр, докторант, ORCID ID: 0000-0004-9786-1348, e-mail: ibraimova_uljan@mail.ru

¹Сулейменов У.С.,

т.ғ.к., ORCID ID: 0000-0001-7798-1044, e-mail: ulanbator@inbox.ru

²Буганова С.Н.,

т.ғ.к., ORCID ID: 0000-0003-2005-3305, e-mail: Svetlanabuganova7@gmail.com

¹Утелбаева А.Б.,

х.ғ.д., ORCID ID: 0000-0002-4771-9835, e-mail: mako_01-777@mail.ru

¹М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, 160012, Шымкент қ., Қазақстан

²Халықаралық білім беру корпорациясы, 050043, Алматы қ., Қазақстан

ГАЗ ҚҰБЫРЛАРЫ ҚИРАҒАН ЖАҒДАЙДА ПАЙДА БОЛАТЫН ГАЗДИНАМИКАЛЫҚ ҮРДІСТЕР МЕН ОЛАРДЫ ТАЛДАУ ӘДІСТЕРІ

Аңдатпа

Газдинамикалық қысымның әсерінен жарылған магистральдық болат газ құбырының белгілі бір аймақтарындағы динамикалық қирау үрдісі қарастырылды. Қысымның әсерінен газ ағыны күшейіп, көп мөлшерде болуына байланысты жарықшаның жылдам таралатыны зерттелді. Газдың қозғалысынан туындаған магистральдық жарықшаның қозғалыс үрдісі модельденді. Бұл үрдістің математикалық моделі құбырдағы газдинамикалық үрдістердің моделін және құбырдың жарылған бөлігінің жоғары жылдамдықты деформациясы мен бұзылуының моделін қамтиды. Газдинамикалық үрдістердің аналитикалық моделі ұсынылып, бұл құбырдың ішкі бетіне және жарықша жағалауына қысым динамикасын төмендетуді модельдеуге мүмкіндік береді. Қысымның динамикалық өзгеруі құбырдың локализацияланған бөлігіндегі жарықша маңындағы газдың декомпрессиясына негізделген. Модель құбырдың жарылған бөлігінің бойлық координатасы бойынша құбырдағы газ қысымының өзгеруін ескереді. Жарықша арқылы газ ағып жатқан кезде газдинамикалық қысымды есептеудің сандық процедурасы қарастырылады. Жарықша арқылы газ ағу кезіндегі газдинамикалық қысымды есептеудің сандық процедурасы зерттелді. Бұл сандық процедураның нәтижесі жарылған жиектердегі қысымды анықтауға мүмкіндік береді. Құбырдағы жарықшаның тара луына әсер ететін критикалық қысымды болжау үшін қирау механикасының әдістерін қолданатын аналитикалық модель ұсынылды. Модель тәжірибелік деректермен тексерілген және құбырдың тұтастығын жылдам бағалауға қызмет етеді. Бұл аналитикалық тәсіл материалдың қасиеттеріне, жарықша геометриясына және құбыр өлшемдеріне негізделген құбырдың қирау мүмкіндігін болжау үшін қолданылады. Оны алдын ала бағалау есептеулері үшін пайдалануға болады. Құбырдың серпімді емес динамикалық қирауын талдаудың сандық-аналитикалық әдісі қарастырылған. Ол жарықша шыңының ашылу бұрышының ша масын талдауға негізделген. Пластикалық деформацияны ескере отырып, жарықша аймағындағы кернеу жағдайын талдаудың сандық әдісі де қарастырылады. Ұсынылған модельдер сандық әдістермен жарықшалардың даму динамикасын және қысымның магистральдық газ құбырларына әсерін талдау нәтижесі жиі қирайтын.

Тірек сөздер: газ құбыры, қирау, газдинамикалық үрдістер, бағалау әдістері, жарықшаның ұшы, талдау.

¹Zhangabay N.Zh.,

candidate of technical sciences, ORCID ID: 0000-0002-8153-1449,

e-mail: nurlan.zhanabay777@mail.ru

¹Ibraimova U.B.,

Master, Doctoral Student, ORCID ID: 0000-0004-9786-1348, e-mail: ibraimova_uljan@mail.ru

¹Suleimenov U.S.,

doctor of technical sciences, ORCID ID: 0000-0001-7798-1044,

e-mail: ulanbator@inbox.ru

²Buganova S.H.,

candidate of technical sciences, ORCID ID: 0000-0003-2005-3305,

e-mail: Svetlanabuganova7@gmail.com

¹Utelbayeva A.B.,

doctor of Chemical Sciences, ORCID ID: 0000-0002-4771-9835,

e-mail: mako_01-777@mail.ru

¹Auezov University, 160012, Shymkent

²International Educational Corporation, 050043, Almaty

GAS-DYNAMIC PROCESSES OCCURRING DURING THE DESTRUCTION OF GAS PIPELINES AND METHODS OF THEIR ANALYSIS

Abstract

The process of dynamic destruction of a typical section of a steel main gas pipeline with a crack under the action of gas dynamic pressure is considered. The high-speed development of a crack, which grows under the action of a large amount of gas flowing out under high pressure, is investigated. The process of the main crack movement, which is induced by the gas movement, is modeled. The mathematical model of this process includes a model of gas-dynamic processes in a pipe and a model of high-speed deformation and fracture of a pipe section with a crack. An approximate analytical model of gas-dynamic processes is proposed, which makes it possible to simulate the dynamic decrease in pressure on the inner surface of the pipe and the crack bank. The dynamic pressure change is based on decompression of gas in the localized part of the pipe in the vicinity of the crack. The model takes into account the change in gas pressure in the pipeline along the longitudinal coordinate of the part of the pipe with a crack. A numerical procedure for calculating the gas dynamic pressure when gas flows through a crack is considered. It allows you to determine the pressure on the crack banks as a function of time. The results of this numerical procedure are used for numerical simulation of high-speed deformation and avalanche destruction of a typical section of a main gas pipeline with a crack. An analytical model is proposed that uses the methods of fracture mechanics to predict the critical pressure at which crack growth in the pipe is observed. The model is verified according to experimental data and serves for a quick assessment of the integrity of the pipe. This analytical approach is used to predict the possibility of pipe failure based on material properties, crack geometry and pipe dimensions. It can be used for preliminary estimation calculations. A numerical-analytical method for the analysis of inelastic dynamic destruction of a pipe is considered. It is based on the analysis of the magnitude of the crack tip opening angle. A numerical method for analyzing the stress state in the crack region, taking into account plastic deformation, is also considered. The presented models allow numerical methods to investigate the dynamics of crack development and, as a consequence, the destruction of typical sections of main gas pipelines under pressure. Using the results of these studies will make it possible to take preventive measures to prevent cases of avalanche destruction of emergency sections of main pipelines.

Key words: gas pipeline, destruction, gas dynamic processes, assessment methods, crack tip, analysis.

УДК 621.341.572
МРНТИ 47.41.37

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-255-265>

¹Оразбаев С.А.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-7286-9990, e-mail: sagi.oralbayev@gmail.com

^{2*}Джунусбеков Е.Ж.,

ORCID ID: 0000-0002-7413-6360, e-mail: erlan555dj@yahoo.com

²Евлоев А.А.,

бакалавр, ORCID ID: 0009-0005-2645-2309, e-mail: abdulvogopovich@mail.ru

²Курмашева А.К.,

бакалавр, ORCID ID: 0009-0008-9570-0021, e-mail: kurmasheva-2002@mail.ru

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

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

НОВЫЙ ГИБРИДНЫЙ СВЕТОДИОДНЫЙ ДРАЙВЕР

Аннотация

В работе предлагается новый гибридный светодиодный драйвер (hybrid LED driver). Гибридный светодиодный драйвер совмещает в себе принцип импульсного преобразования мощности, как в традиционном светодиодном драйвере (LED driver), с идеей переключения светодиодных линеек синхронно с входным напряжением, как в светодиодном модуле непосредственного включения в сеть (Direct ACLED module). Этот синтез обещает повысить эффективность и уменьшить электромагнитные помехи. Благодаря низким потерям мощности гибридный светодиодный драйвер привлекателен для интеграции в микросхему, что позволяет уменьшить размер и стоимость по сравнению с традиционными светодиодными драйверами, используемыми в настоящий момент. В гибридных светодиодных драйверах предшествующего уровня техники светодиоды работают в импульсном режиме переключения, что ограничивает эффективность из-за медленной работы светодиодов. Одновременно с этим интенсивность излучения таких светодиодов уменьшается в импульсном режиме. В предлагаемом новом драйвере исключен жесткий режим работы светодиодов, что повышает эффективность и уменьшает электромагнитные помехи. В статье дан анализ нового гибридного драйвера. Для подтверждения полученных результатов было проведено компьютерное моделирование с использованием специализированного программного обеспечения.

Ключевые слова: гибридный светодиодный модуль, светодиодный модуль непосредственного включения в сеть (Direct ACLED module), бесконденсаторный светодиодный драйвер, высоковольтный светодиодный драйвер, светодиодное уличное освещение, надежность.

Введение

Рынок освещения совершил революционный переход на светодиодные источники освещения, что обусловлено резким снижением цен на эффективные и долговечные светодиоды. В светодиодных лампах используются специализированные светодиодные драйверы для сопряжения светодиодных кристаллов с переменным напряжением в сети и защиты их от переходных процессов в сети. Стоимость традиционного светодиодного драйвера в составе осветительного прибора выше, чем стоимость высокотехнологичных светодиодов, в результате продолжающегося снижения цен на светодиодные кристаллы. Драйвер является сложным электрическим устройством, и его цена не может быть существенно снижена по объективным причинам [1–7]. Из-за сложности надежность драйвера ограничена и не соответствует времени наработки до отказа светодиодов [9–14]. Давно назревшей задачей является поиск новых типов управления светодиодами, которые будут недорогими и надежными, но сохраняющими большую часть функциональных характеристик, которые обеспечивают светодиодные драйверы.

Проводятся исследования по избавлению от электролитических конденсаторов для увеличения срока службы светодиодных драйверов [15–21]. Однако сложность и стоимость таких решений существенно не уменьшаются, так как в большинстве исследований рассматривается замена конденсатора на сложные схемы.

Трендом последнего десятилетия в светодиодном освещении являются светодиодные модули прямого включения в сеть переменного тока [22–25]. Это бездрайверное решение, идея которого заключается в динамическом переключении и выстраивании светодиодных линеек под уровень мгновенного значения напряжения сети.

Основная часть

Светодиодный модуль включает в себя логику низкочастотной коммутации, синхронизированную с частотой сети. Светодиодный модуль включает в себя логику низкочастотного переключения, синхронизированную с частотой сети. Для примера рассмотрим типичную схему светодиодного модуля, показанную на рисунке 1. В зависимости от входного напряжения линейки LED_1 - LED_N настраиваются с помощью переключателей Q_1 - Q_N по мере увеличения входного напряжения. Линейки LED_1 - LED_K включаются последовательно в соответствии с входным напряжением, так что $V_{LED1} + \dots + V_{LED(K)} \leq V_m(t)$, для $1 < K < N$. Активированный переключатель Q_K работает как линейный стабилизатор тока, устраняя разрыв между падением напряжения на последовательно подключенных светодиодах LED_1 - LED_K и постоянно изменяющимся напряжением сети. Одновременно ток модуля можно регулировать в зависимости от входного напряжения для получения хорошего коэффициента мощности. Пока переключатель Q_K активирован, он шунтирует и выключает остальные светодиодные линейки LED_{K+1} - LED_N . Модуль переменного тока прост и недорог и не содержит быстродействующих силовых ключей, трансформатора, других магнитных компонентов, ненадежного электролитического конденсатора или высокочастотных фильтров. Несмотря на то, что он не обеспечивает гальваническую развязку, простота и доступность этой схемы обуславливают ее присутствие на рынке. Увеличенное время наработки на отказ также снижает стоимость эксплуатации. К сожалению, наличие линейных стабилизаторов тока приводит к потерям мощности и тепловыделению. Традиционный светодиодный модуль переменного тока в настоящее время используется для приложений с низким энергопотреблением.

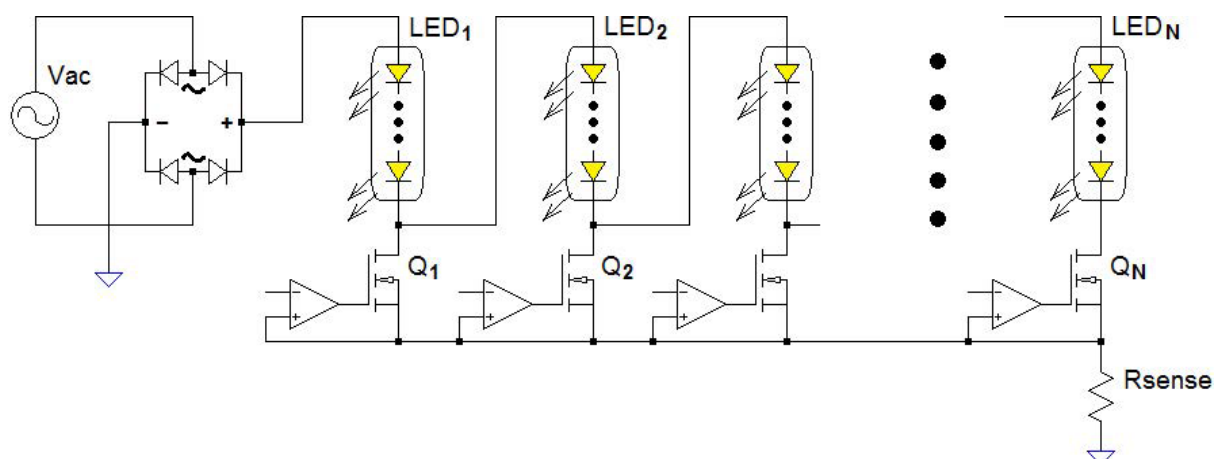


Рисунок 1 – Традиционный светодиодный модуль прямого переменного тока

Для повышения эффективности предложен гибридный светодиодный драйвер [26–28]. В этой конструкции настраиваемые светодиодные линейки синхронно настраиваются на напряжение сети, как в модуле Direct AC LED. Для компенсации разрыва сетевого напряжения над

падением напряжения в светодиодных линейках используется импульсный преобразователь малой мощности. На рисунке 2 гибридного драйвера видно, что это есть импульсный преобразователь с нагрузкой из конфигурируемых светодиодных линеек. Пусть V_1-V_N – падения напряжения линеек LED_1-LED_N соответственно. Когда входное напряжение находится в диапазоне $V_1+...+V_K < V_{in} < V_1+...+V_K+V_{K+1}$, переключатели Q_1-Q_{K-1} открыты, следовательно, катушка индуктивности L и линейки LED_1-LED_K подключены последовательно. Переключатель Q_{K+1} замкнут, шунтируя оставшиеся линейки $LED_{K+2}-LED_N$. Переключатель Q_K работает в импульсном режиме для управления входным током гибридного драйвера при заданном входном мгновенном напряжении V_{in} . Таким образом, преобразователь эффективно компенсирует избыточное напряжение в сети, катушка индуктивности L контролирует пульсации входного тока, связанные с преобразованием мощности переключателя. Этот преобразователь контролирует лишь небольшую часть общей выходной мощности, что приводит к меньшим потерям, чем в традиционном драйвере. Возможна схемная интеграция драйвера гибридного светодиода в микросхему.

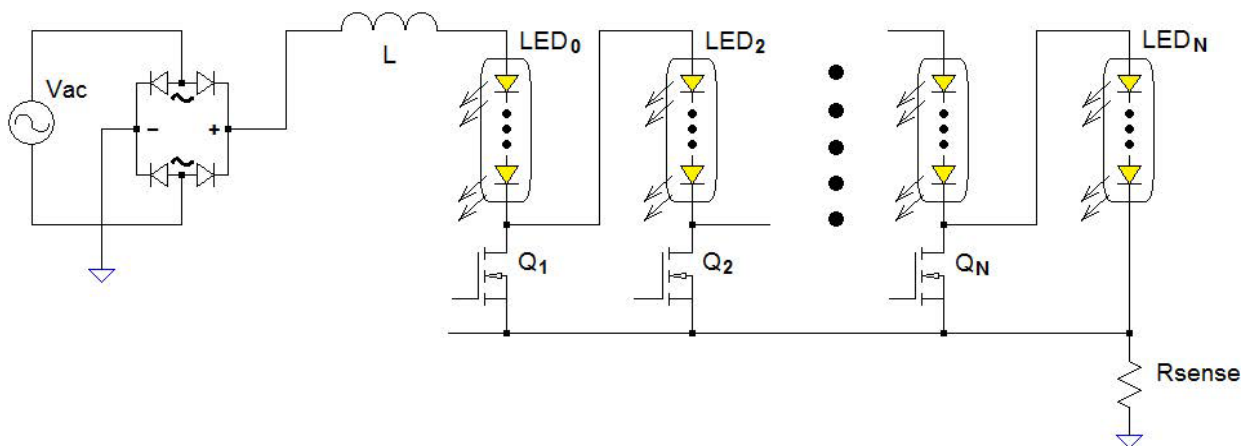


Рисунок 2 – Гибридный светодиодный драйвер предыдущего уровня техники

К сожалению, в топологии медленные светодиоды переведены в импульсный режим переключения, что ограничивает эффективность. Силовые транзисторы Q_1-Q_N и светодиоды работают в режиме жесткого переключения из-за медленных светодиодов и генерируют электромагнитный шум. Кроме того, интенсивность света светодиодов уменьшается в импульсном режиме. Чтобы смягчить эти неблагоприятные эффекты, необходимо либо уменьшить частоту, что приведет к увеличению размера катушки индуктивности, либо уменьшить импульсное напряжение. Снижение импульсного напряжения требует раздробления светодиодных линеек, в то же время увеличения количества линеек и силовых транзисторов, а это усложняет схему.

Одним из способов улучшения гибридного светодиодного драйвера может быть последовательное размещение быстро переключающихся диодов D_1-D_N со светодиодными линейками, как показано на рисунке 3 (стр. 258). Это предотвратит сильные обратные токи восстановления медленных светодиодов. Но недостаток заключается в том, что добавленные диоды генерируют высокие потери проводимости, если количество N светодиодных линеек достаточно велико. Для снижения потерь мощности могут быть применены диоды Шоттки. Конденсаторы C_1-C_N могут быть подключены параллельно к светодиодным линейкам для повышения эффективности генерации света.

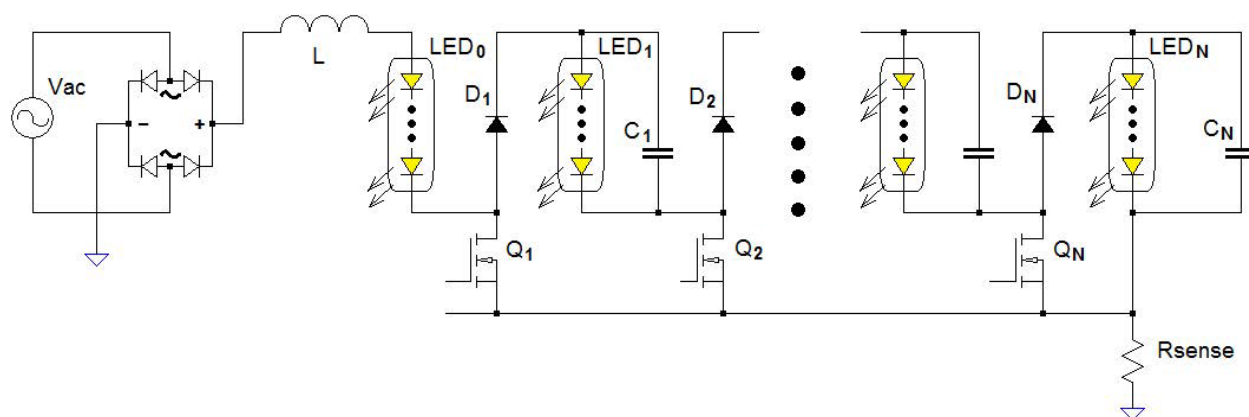


Рисунок 3 – Гибридный светодиодный драйвер

Для уменьшения потерь проводимости диодов на рисунке 3 предложен следующий вариант гибридного светодиодного драйвера, показанный на рисунке 4. Как и на рисунке 3, диоды D_1 - D_N применены для улучшения коммутации светодиодных линеек, но в отличие от рисунка 3 диоды не соединены последовательно со светодиодными линейками. Таким образом, в каждый момент времени проводит только один диод и только два диода работают в импульсном режиме, комплементарно друг другу.

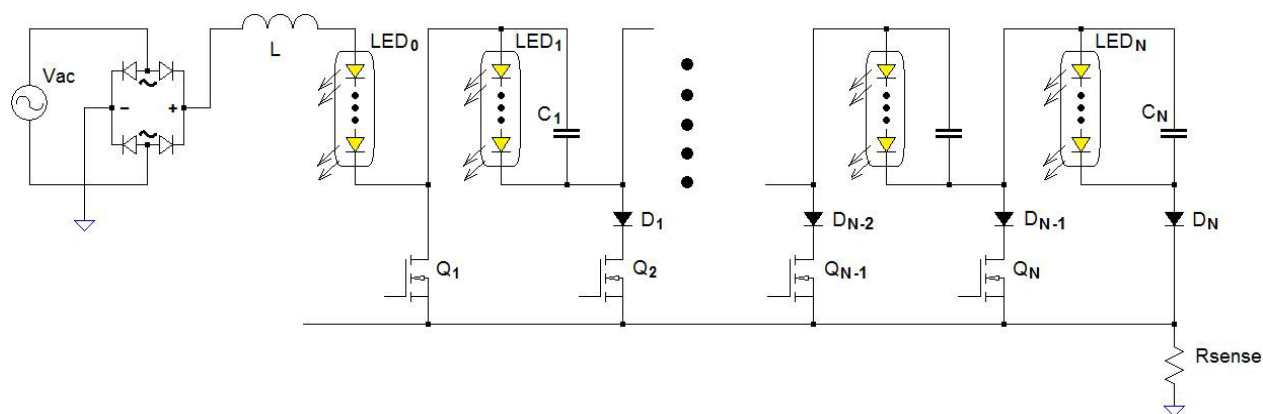


Рисунок 4 – Предлагаемый гибридный светодиодный драйвер

В статье проанализирована работа предлагаемого драйвера для выявления преимуществ. Проведено компьютерное моделирование. Результаты моделирования подтверждают преимущества предлагаемого гибридного светодиодного драйвера.

Материалы и методы

Предложена следующая процедура работы для ключей Q_1 - Q_N . При заданном входном напряжении V_{in} , таком как $V_{LED1} + V_{LED2} + \dots + V_{LED(K-1)} < V_{in} < V_{LED1} + V_{LED2} + \dots + V_{LED(K)}$, выполняется этап (K): транзисторы Q_1 - Q_{K-1} не проводят, транзистор Q_{K+1} – постоянно проводит и только силовой транзистор Q_K работает в импульсном режиме для регулирования мощности. При увеличении или уменьшении входного напряжения предлагаемый драйвер переходит соответственно на этап выше (K+1) или ниже (K-1).

Этап (K), транзистор Q_K включен (см. рисунок 5а).

Транзисторы Q_1 - Q_{K-1} находятся в выключенном состоянии, транзистор Q_{K+1} находится во включенном состоянии, транзистор Q_K находится во включенном состоянии, цепочки

LED_1 - LED_{K-1} подключены последовательно к катушке индуктивности L , входной ток I_L увеличивается и достигает заданного верхнего уровня $I_{HIGH}(t)$, поскольку выполняется условие $V_{LED1} + V_{LED2} + \dots + V_{LED(K-1)} < V_{in}$ на этапе (K). Диоды D_K - D_N заперты напряжениями $V_{D(K)}$, ..., $V_{D(N)}$ соответственно, где $V_{D(K)} = V_{LED(K)}$, $V_{D(K+1)} = V_{LED(K)} + V_{LED(K+1)}$, ..., $V_{D(N)} = V_{LED(K)} + V_{LED(K+1)} + \dots + V_{LED(N)}$.

Этап (K), транзистор Q_K выключен (см. рисунок 5b).

Транзисторы Q_1 - Q_{K-1} находятся в выключенном состоянии, транзистор Q_{K+1} находится во включенном состоянии, транзистор $Q(K)$ находится в выключенном состоянии, цепочки LED_1 - LED_{K-1} и LED_K подключены последовательно к катушке индуктивности L , диод V_K проводит входной ток I_L который уменьшается до предопределенного низкого значения $I_{LOW}(t)$, поскольку выполнено условие $V_{in} < V_{LED1} + V_{LED2} + \dots + V_{LED(K)}$ на этапе (K). Диоды D_{K+1} - D_N обратимо смещены напряжениями $V_{D(K+1)}$, ..., $V_{D(N)}$ соответственно, где $V_{D(K+1)} = V_{LED(K+1)}$, ..., $V_{D(N)} = V_{LED(K+1)} + \dots + V_{LED(N)}$.

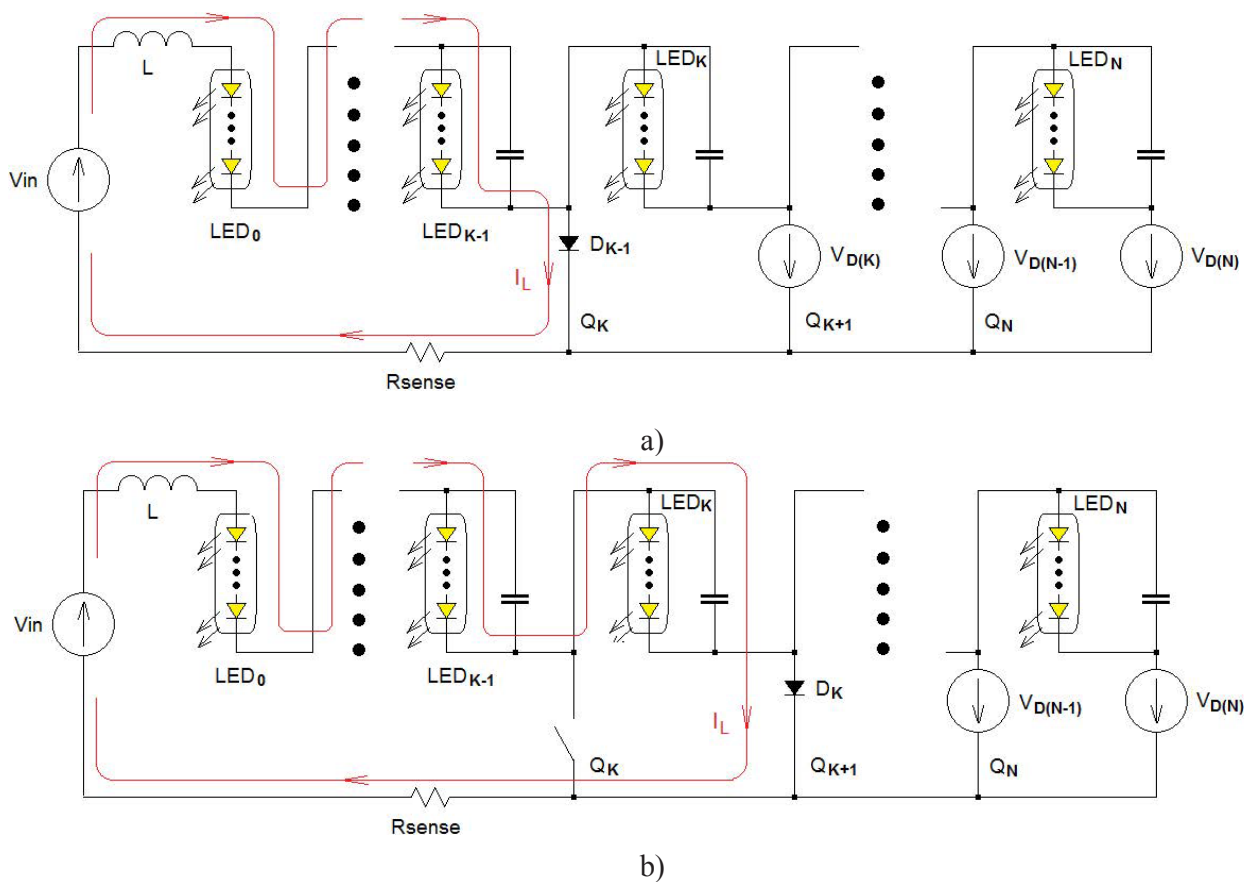


Рисунок 5 – Эквивалентные схемы предлагаемого светодиодного драйвера на этапе (K):

- а) транзистор Q_K находится во включенном состоянии;
- б) транзистор Q_K находится в выключенном состоянии

Амплитуда коммутационных напряжений для катушки индуктивности L , активного транзистора Q_K и активного диода D_K равна напряжению $V_{LED(K)}$ светодиодной линейки $V_{LED(K)}$.

На рисунке 5 показана компьютерная модель схемы с четырьмя светодиодными линейками, разработанная для моделирования в PSIM. Выбирая значение напряжения падения V_{LED0} на линейке LED_0 (см. рисунок 4), можно управлять интервалом пропуска импульсных переключений при низком входном напряжении V_{in} . На рисунке 5 нет линейки LED_0 , таким образом, моделируемая схема генерирует импульсы около $V_{in}=0$ включительно. Для простоты ре-

ализовано управление с гистерезисом по входному току. Два компаратора $Comp_L$ и $Comp_H$ сравнивают ток I_L катушки индуктивности с эталонными значениями I_high и I_low . Операционный усилитель $U1$ формирует опорные напряжения I_high и I_low , которые являются выпрямленными переменными сигналами, формирующими направляющие границы для тока I_L катушки индуктивности. DEMUX блок реализует переход между этапами $(K-1) \leftrightarrow (K) \leftrightarrow (K+1)$, передает модулированный импульсный сигнал с триггера на текущий активный ключ Q_K , удерживает значения $Gate(1)-Gate(K-1)$ равным нулю, а значения $Gate(K+1)-Gate(4)$ на высоком уровне.

Для реализации переходов $Stage(K) \leftrightarrow Stage(K+1)$ можно использовать различные алгоритмы для реализации в блоке DEMUX. В блоке DEMUX (рисунок 6) реализованная процедура следующая: а) этап (4) является начальным этапом при первой инициализации; б) если $Comp_L$ срабатывает при понижении тока I_L дросселя ниже нижнего уровня I_low и остается в этом состоянии в течение некоторого времени выдержки DELAY, то происходит переход $Stage(K) \rightarrow Stage(K-1)$; в) если $Comp_H$ срабатывает при повышении тока I_L дросселя выше верхнего уровня I_high и остается в этом состоянии в течение некоторого времени выдержки DELAY, то происходит переход $Stage(K) \rightarrow Stage(K+1)$; д) во всех остальных случаях импульсные сигналы ШИМ триггера напрямую передаются на затвор транзистора Q_K текущего этапа (K).

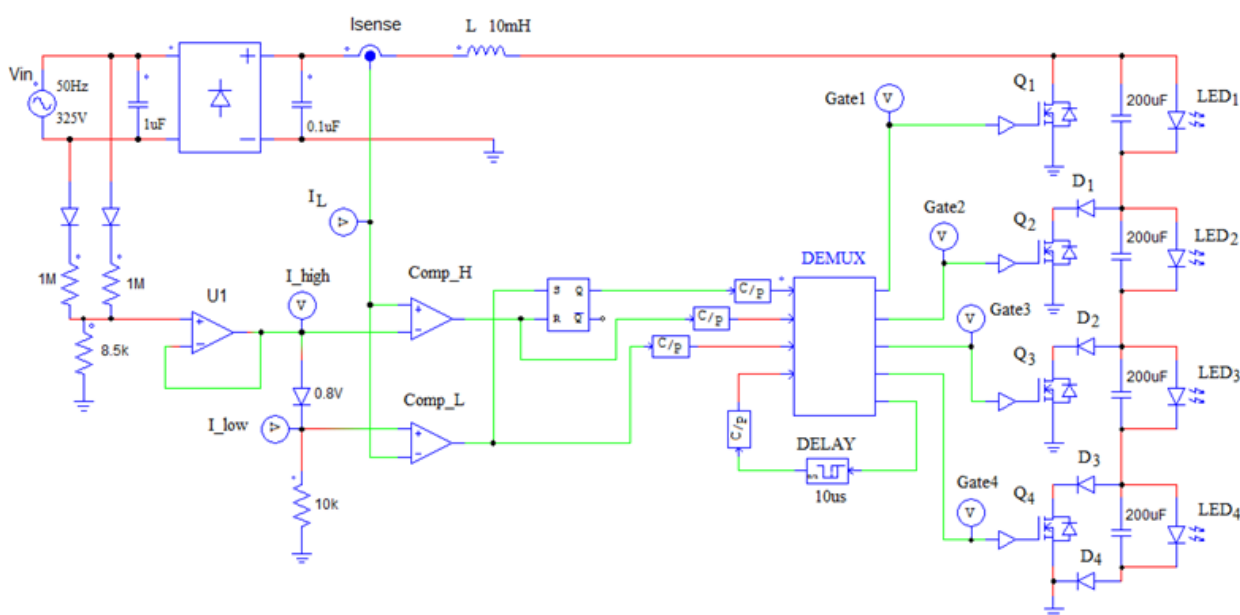


Рисунок 6 – Схема гибридного светодиодного драйвера для моделирования

На рисунке 6 блок демультиплексирования для работы, помимо сигнала триггера, использует выходные сигналы компараторов и блок DELAY.

Результаты и обсуждение

На рисунке 7 (стр. 261) можно увидеть стационарные сигналы результата моделирования для одного полупериода входного напряжения. Входное напряжение $V_{in}=230V$. Для удобства наблюдения катушка индуктивности L выбрана равной $10mH$, чтобы уменьшить частоту импульсного переключения так, что можно четко отслеживать моделируемые формы сигналов в течение одного полупериода входного напряжения.

Из рисунка 7 видно, что все силовые транзисторы, диоды и дроссель L испытывают низкие амплитуды импульсного напряжения. Это благоприятно для повышения эффективности и

снижения электромагнитных помех. Светодиоды питаются постоянным током, таким образом, достигнута цель исключить жесткую коммутацию светодиодов. Средние токи транзисторов Q_K увеличиваются с индексом K , но общее напряжение на транзисторах V_{ds_K} уменьшается от транзистора Q_1 до Q_4 . Это хороший результат для оптимизации транзисторов. Номинальные значения напряжения и тока диодов D_K увеличиваются при $K=0 \rightarrow 4$. Общая номинальная мощность светодиодных блоков уменьшается с индексом $K=1 \rightarrow 3$, номинальный ток и мощность светодиодного блока LED_4 с самым высоким индексом $K=4$ составляет примерно половину от любой линейки LED_{1-3} , этот факт может быть полезен для оптимизации.

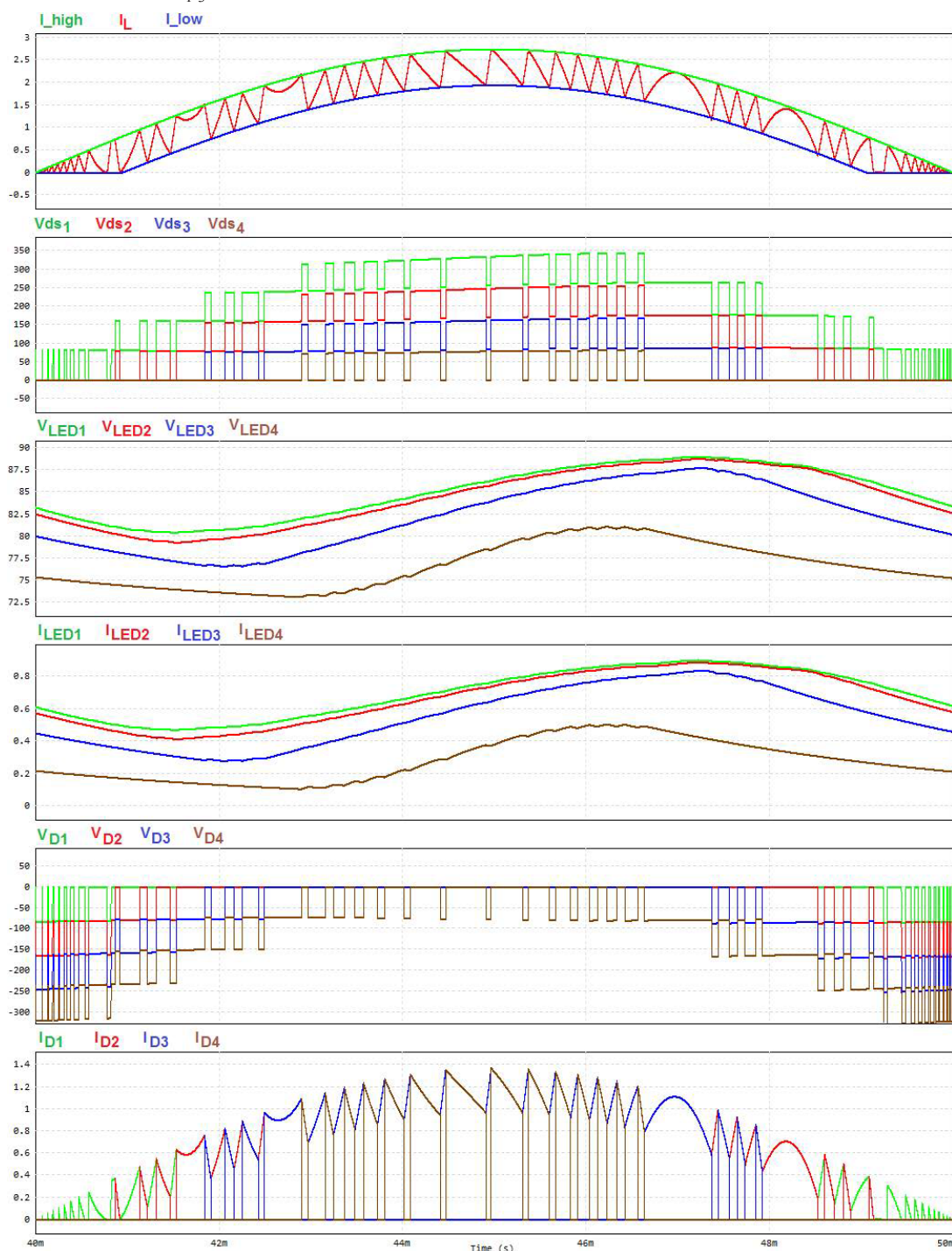


Рисунок 7 – Имитационные сигналы гибридного светодиодного драйвера

Выводы

В статье обсуждаются преимущества и недостатки гибридных светодиодных драйверов. Для устранения недостатков предлагается новый гибридный светодиодный драйвер. Внимание было уделено предотвращению жесткого переключения светодиодов, что повысит эффективность по мощности и уменьшит электромагнитные помехи. Проанализировано предлагаемое усовершенствование гибридного драйвера. Для подтверждения результатов было проведено компьютерное моделирование. Моделирование показывает, что схема, предложенная для предотвращения жесткого переключения светодиодов, верна. В статье были обсуждены методы оптимизации схемы. Уменьшение электромагнитных помех благоприятно сказывается на возможности уменьшения массогабаритных показателей силового дросселя, упрощения фильтра помех по проводам в сеть, уменьшения мероприятий по снижению излучаемых помех. Уменьшение потерь по мощности приводит к возможности уменьшения тепловыделяющих элементов осветительного прибора, уменьшению температуры эксплуатации, увеличению срока службы, уменьшению общей стоимости как прибора, так и стоимости от владения прибором. Благодаря низким потерям мощности предложенный новый гибридный светодиодный драйвер привлекателен для интеграции в микросхему, что позволит далее уменьшить размер и стоимость по сравнению с предыдущими техническими решениями. Интеграция силовых ключей и схемы управления является наиболее эффективным во всех смыслах вариантом применения предложенного решения. Решение имеет потенциально большой эффект как в экономическом плане, так и в экологии. Целью является применение во всех осветительных приборах в деятельности человека. Для дорожного освещения возможно использование трехфазного питания для существенного снижения световых пульсаций. Авторы статьи не планируют ограничиться заявлением о новом решении для драйвера, а в дальнейшем последует публикация результатов практической работы над созданным лабораторным образцом.

Благодарность

Работа финансировалась Комитетом по науке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках проекта АР № 19678370 «Исследование и разработка гибридного светодиодного драйвера».

REFERENCES

- 1 Hwang S.-S., Hwang W.-S., Jang B.-J., Han S.-K. and Kang J.-I. (2014) Cost-effective single switch multi-channel LED driver. 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, Antalya, Turkey, pp. 156–161. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2014.6980704>.
- 2 Cardesín J., García-Llera D., López-Corominas E., Calleja A.J., Ribas J. and Gacio D. (2013) Low cost intelligent LED driver for public Lighting Smart Grids. 2013 International Conference on New Concepts in Smart Cities: Fostering Public and Private Alliances (SmartMILE), Gijon, Spain, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/SmartMILE.2013.6708167>.
- 3 Esteki M., Khajehoddin S.A., Safae A. and Li Y. (2023) LED Systems Applications and LED Driver Topologies: A Review, IEEE Access, vol. 11, pp. 38324–38358. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3267673>.
- 4 Jha A. and Kumar M. (2018) A wide range constant current LED driver with improved power quality and zero standby. 2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxT), New Delhi, India, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ETECHNXT.2018.8385327>.
- 5 Menke M.F., Duranti J.P., Roggia L., Bisogno F.E., Tambara R.V. and Seidel Á.R. (2020) Analysis and Design of the LLC LED Driver Based on State-Space Representation Direct Time-Domain Solution. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 12, pp. 12686–12701. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2995942>.

6 Abdelmessih G.Z., Alonso J.M. and Tsai W.-T. (2019) Analysis and Experimentation on a New High Power Factor Off-Line LED Driver Based on Interleaved Integrated Buck Flyback Converter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 4, pp. 4359–4369. <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2910785>.

7 Shao J. and Stamm T. (2012) A low cost high power factor primary regulated offline LED driver. *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Montreal, QC, Canada, pp. 4498–4502. <https://doi.org/10.1109/IECON.2012.6389460>.

8 Osram Licht AG. (2022) Reliability and lifetime of LEDs. Appl. Note 006. https://media.osram.info/media/img/osram-dam-2496614/AN006_Reliability_and_lifetime_of_LEDs.pdf

9 Zhang H. (2018) A Viable Nontesting Method to Predict the Lifetime of LED Drivers, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 6, no. 3, pp. 1246–1251. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2018.2826364>.

10 Barwar M.K., Sahu L.K. and Bhatnagar P. (2022) Reliability Analysis of PFC Multilevel Rectifier Based LED Driver Circuit. *2022 Second International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T)*, Raipur, India, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICPC2T53885.2022.9776846>.

11 Demir M., Yildiz A.B. and Ağır T. (2018) Observation of the Effects of Electrostatic Discharge and Lightning Surge on the Reliability of a LED Circuit Driven by Half-Bridge Converter. *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Amalfi, Italy, pp. 1073–1078. <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2018.8445297>.

12 Watté P., van Hees G., Engelen R., van Driel W.D. and Chen T. (2021) Reliability of Electronic Drivers: An Industrial Approach. *2021 18th China International Forum on Solid State Lighting & 2021 7th International Forum on Wide Bandgap Semiconductors (SSLChina: IFWS)*, Shenzhen, China, pp. 246–249. <https://doi.org/10.1109/SSLChinaIFWS54608.2021.9675170>.

13 Liu B., Qi J., Yin X. and Sun Y. (2020) Consistency and degradation of electrochemical double layer capacitors under calendar ageing. *2020 Global Reliability and Prognostics and Health Management (PHM-Shanghai)*, Shanghai, China, pp. 1–5, <https://doi.org/10.1109/PHM-Shanghai49105.2020.9280955>.

14 Dzhunusbekov E.J., Orazbayev S.A. (2020) Electrolytic capacitor life time calculation under varying operating conditions, *Journal of Vibroengineering*, vol 22, Issue 3, pp. 721–734. <https://doi.org/10.21595/jve.2019.20733>.

15 Awad K., Abdel-Rahim O., Gaafar M.A. and Orabi M. (2023) Design Methodology of an Electrolytic Capacitorless LED Driver Using SEPIC PFC Converter. *2023 IEEE Conference on Power Electronics and Renewable Energy (CPERE)*, Luxor, Egypt, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/CPERE56564.2023.10119530>.

16 Salazar-Pérez D., Ponce-Silva M., Alonso J.M., Aquí-Tapia J.A. and Cortés-García C. (2021) A Novel High-Power-Factor Electrolytic-Capacitorless LED Driver Based on Ripple Port, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 5, pp. 6248–6258. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2021.3066145>.

17 Qu Y. and Qiu L. (2021) I2V2 Average Current Control for Modular LED Drivers, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 1, pp. 78–82. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3005571>.

18 Valipour H., Rezazadeh G. and Zolghadri M.R. (2016) Flicker-Free Electrolytic Capacitor-Less Universal Input Offline LED Driver With PFC, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 9, pp. 6553–6561. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2504378>.

19 Abdelmessih G.Z., Alonso J.M., Spode N. d. S. and M.A.D. Costa. (2020) Electrolytic-Capacitorless Off-Line LED Driver based on Integrated Parallel Buck-Boost and Boost Converter. *2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Detroit, MI, USA, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/IAS44978.2020.9334804>.

20 Cao L., Zhu Y. and Wu H. (2020) A New Electrolytic Capacitor-less LED Driver with Coupled-Inductor. *2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, New Orleans, LA, USA, pp. 1537–1543. <https://doi.org/10.1109/APEC39645.2020.9124527>.

21 Abdelmessih G.Z., Alonso J.M., Spode N. d. S. and Costa. (2022) High-Efficient Electrolytic-Capacitor-Less Offline LED Driver With Reduced Power Processing, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 2, pp. 1804–1815. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3108137>.

22 Hongbo Gao et al. (2015) An electrolytic-capacitorless and inductorless AC direct LED driver with power compensation. *2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC)*, Taipei, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/IFEEEC.2015.7361491>.

23 Hwu K.I. and Tu W.C. (2023) Controllable and Dimmable AC LED Driver Based on FPGA to Achieve High PF and Low THD, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 9, no. 3, pp. 1330–1342. <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2226042>.

24 Chou H.-H. (2023) Design and Implementation of the Linear LED Driver, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 70, no. 3, pp. 1059–1063. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2022.3219226>.

25 Zhang H. (2018) Developing highly reliable LED luminaries for high temperature applications using AC-direct driving LED technology. 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), San Antonio, TX, USA, pp. 3466–3470. <https://doi.org/10.1109/APEC.2018.8341602>.

26 Li L., Gao Y. and Mok P.K.T. (2016) A multiple-string hybrid LED driver with 97% power efficiency and 0.996 power factor. 2016 IEEE Symposium on VLSI Technology, Honolulu, HI, USA, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/VLSIT.2016.7573396>.

27 Dzhunusbekov E.J., Zhubatkhanova M.Sh. LED lighting apparatus with control, patent KZ32513, bul. 22, Nov. 30 2017.

28 Chong K.-H., Gao Y. and Mok P. K.T. (2021) A Customized AC Hybrid LED Driver With Flicker Reduction for High Nominal Range Applications, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 68, no. 5, pp. 1635–1639. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2021.3066416>.

¹Оразбаев С.А.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-7286-9990,

e-mail: sagi.oralbayev@gmail.com

^{2*}Джунусбеков Е.Ж.,

ORCID ID: 0000-0002-7413-6360, e-mail: erlan555dj@yahoo.com

²Евлеев А.А.,

бакалавр, ORCID ID: 0009-0005-2645-2309, e-mail: abdulvogopovich@mail.ru

²Курмашева А.К.,

бакалавр, ORCID ID: 0009-0008-9570-0021, e-mail: kurmasheva-2002@mail.ru

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

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

ЖАҢА ГИБРИДТІ ЖАРЫҚДИОДТЫ ДРАЙВЕР

Андатпа

Мақалада жаңа гибриді жарықдиодты драйвер (hybrid LED driver) ұсынылады. Гибриді жарықдиодты драйвер желіге тікелей қосылу үшін жарықдиодты модульдегі (Direct ACLED module) кіріс кернеуімен синхронды түрде жарықдиодты жолақтарды ауыстыру идеясын және дәстүрлі жарықдиодты драйвердегі (LED driver) импульстік қуатты түрлендіру принципін біріктіреді. Мұндай біріктіру тиімділікті арттырады, электромагниттік кедергілерді азайтады. Қуат шығынының төмендігі арқасында гибриді жарықдиодты драйвер микросхемаға біріктіруге тиімді және қазіргі уақытта қолданылатын дәстүрлі жарықдиодты драйверлермен салыстырғанда өлшем мен шығындарды азайтуға мүмкіндік береді. Алдыңғы деңгейдегі гибриді жарықдиодты драйверлерде жарықдиодты шамдар коммутациялық режимде жұмыс істейді, бұл жарықдиодты шамдардың баяу жұмыс істеуіне байланысты тиімділікті шектейді. Сонымен қатар, мұндай жарықдиодтарының сәулелену қарқындылығы импульстік режимде төмендейді. Ұсынылған жаңа драйвер тиімділікті арттыратын және электромагниттік кедергілерді азайтатын жарық диодтарының қатты жұмыс режимін жоққа шығарады. Мақалада жаңа гибриді драйверге талдау жасалады. Алынған нәтижелерді растау үшін мамандандырылған бағдарламалық жасақтаманы қолдана отырып компьютерлік модельдеу жүргізілді.

Тірек сөздер: гибриді жарықдиодты модуль, желіге тікелей қосылатын жарықдиодты модуль (direct ACLED module), конденсаторсыз жарықдиодты драйвер, жоғары вольтты жарықдиодты драйвер, жарықдиодты көше жарығы, сенімділік.

¹**Orazbayev S.A.,**

Associate Professor, ORCID ID: 0000-0002-7286-9990,
e-mail: sagi.orazbayev@gmail.com

^{2*}**Dzhunusbekov E.ZH.,**

ORCID ID: 0000-0002-7413-6360, e-mail: erlan555dj@yahoo.com

²**Evloev A.A.,**

bachelor, ORCID ID: 0009-0005-2645-2309, e-mail: abdulvogopovich@mail.ru

²**Kurmasheva A.A.,**

bachelor, ORCID ID: 0009-0008-9570-0021, e-mail: kurmasheva-2002@mail.ru

¹Al-Farabi Kazakh National University,

²Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan
Electronics laboratory

A NEW HYBRID LED DRIVER

Abstract

In the paper, the new hybrid LED driver is proposed. The hybrid LED driver combines the idea of pulsed power conversion of a conventional LED driver with the idea of adjusting configurable LED strings synchronously with input voltage like in a direct AC LED module. This synthesis promises to increase efficiency and reduce electromagnetic interference. Due to low power loss a hybrid LED driver is attractive for circuit integration to reduce size and cost compared to the traditional LED drivers. But in the hybrid LED drivers of previous arts the topology exploits LEDs in switch-pulse mode operation, which limits the efficiency because of LEDs slow nature. In addition, the light intensity of the LEDs decreases in pulsed mode. Therefore the new hybrid LED driver is proposed to overcome the drawbacks. The attention was paid to preventing LEDs from hard switching to improve efficiency and alleviate EMI issues. To confirm the results obtained, computer modeling was performed using specialized software.

Key words: Hybrid LED module, Direct AC LED module, Capacitorless LED driver, High voltage LED driver. LED street lighting, Reliability

UDC 620.3
IRSTI 29.19.22

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-266-272>

¹**Amirbekova G.S.,**

doctoral student, ORCID ID: 0009-0001-3774-0120, e-mail: gulzhanatt95@gmail.com

^{1*}**Tolepov ZH.K.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7895-0434, e-mail: mr.tolepov@mail.ru

¹**Guseinov N.,**

ORCID ID: 0000-0003-4804-5323, e-mail: solar_neo@mail.ru

¹**Tulegenova M.A.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-6413-4302, e-mail: malika.tulegenova@bk.ru

¹**Orynbai B.G.,**

ORCID ID: 0009-0004-6550-9761, e-mail: bakytzhan2797@mail.ru

²**Koshtybayev T.,**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, ORCID ID: 0009-0004-9052-0081,
e-mail: koshtybayev70@mail.ru

³**Otarbay ZH.,**

ORCID ID: 0009-0008-6842-1908, e-mail: Otarbay@human-engine.com

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

²Kazakh National Women's Teacher Training University, 050040, Almaty, Kazakhstan

³Human-Engine LLC, Los Angeles, CA, 91106, USA

CONTROL OF THE SIZES OF LEAD SULFIDE (PbS) NANOPARTICLES BY PLASMA TREATMENT METHOD

Abstract

In this work, the optimal parameters for the production of lead sulfide nanoparticles (PbS) were determined. Lead sulfide nanoparticles were obtained by chemical precipitation in an aqueous solution of lead nitrate ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) 25 ml 0.18 M (1.524 g), sodium hydroxide (NaOH) 75 ml 0.38 M (1.172 g), thiourea ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$) 50 ml 0.11 M (0.399 g), at a reaction temperature of 100 °C, the duration of the synthesis reaction was 120 minutes. The particles were deposited on a pre-purified silicon (Si) substrate. After synthesis, the particles were processed in a glow discharge plasma in an argon atmosphere at a pressure of the order of $D = 1$ Pa, for $t_1 = 1$ min and $U = 2$ min, at a voltage of $U = 2$ kV and a current strength of $I = 1,5$ mA. The morphology of the obtained structures was studied using a scanning electron microscope (SEM), the elemental composition of the particles was determined by energy dispersion analysis (EDX). Plasma treatment reduces the average particle size from the submicron to the nanometer range.

Key words: PbS particles, CBD method, plasma treatment, optimal parameters, Si substrate.

Introduction

Lead sulfide (PbS) is a semiconductor material that is one of the main materials in solar cells, photo detectors [1–5] and for selective coating for photo thermal conversion [6–9]. PbS is also used in devices such as LEDs, photoluminescence and infrared photo detectors [10] and in gas sensors [11]. This material is of particular interest, since its band gap (0.41 eV at 300 K) can increase with a decrease in its crystallite size and particle size become comparable to the exciton radius of Boron, this affects its physical properties and arouses the interest of scientific researchers, therefore they are intensively studied today [12].

PbS nanoparticles can be produced by various methods such as vacuum evaporation, pyrolysis by spraying, electro deposition, pulsed laser deposition, chemical vapor deposition (CVD), ultrasonic deposition and chemical bath deposition (CBD) [13].

In this work, the chemical bath deposition (CBD) method was used. This method is financially budgetary and very convenient, since it does not require a vacuum and the reaction takes place in an open space [14–18]. With the help of parameters (reaction time, temperatures and concentrations of reagents), the particle size can be varied and their properties can be influenced. If we compare, the physical method is energy-intensive and has a high cost of production [19]. Therefore, the (CBD) method is the most optimal method for the future, because it is more efficient, highly manageable and environmentally friendly [20].

Materials and methods

Lead sulfide (PbS) nanoparticles were obtained by chemical bath deposition (CBD). At the beginning of the experiment, the Si (100) substrate was washed with distilled water and the surface was cleaned with alcohol. The masses of the reagents were Pb (NO₃)₂ (lead nitrate) 25 ml 0.18 M (1.524 g), NaOH (sodium hydroxide) 75 ml 0.38 M (1.172 g), CH₄N₂S (thiourea) 50 ml 0.11 M (0.399 g), reaction temperature 100°C. Lead nitrate and sodium hydroxide were diluted in 75 ml of distilled water, with a turnover of 1200 rpm, using a magnetic stirrer at a temperature of 100 °C. And thiourea was diluted separately in 50 ml of distilled water with a turnover of 500 rpm, using an agitator at room temperature. Both reactions took place within 120 minutes. After that, the two solutions were mixed and after two minutes, when the color of the solution turned blue-black, at that moment the Si (100) silicon substrate was immersed in the solution for exactly 10 minutes, at room temperature. To maintain the uniformity of the solution, a magnetic stirrer was used. After receiving the PbS, the substrate surface was cleaned in an ultrasonic bath for 10 minutes.

Further, the resulting film was subjected to plasma treatment of a glow discharge in argon. The surface treatment was performed under the following parameters: pressure $P = 1$ Pa, voltage $U = 1,5$ kV, discharge current $I = 1,5$ mA and processing time $t_1 = 5$ min and $t_2 = 5$ min. The main parameters of the glow discharge (voltage, current, brightness) remain unchanged under constant external conditions. Figure 1 shows that the smoldering discharge is accompanied by a visible glow, the color of which depends on the type of gas.



Figure 1 – Glow discharge

In the process of plasma generation, argon gas and direct current were used in the glow discharge, which is released from the power supply of the Aktakom APS-1915 High voltage DC Power supply. A constant current source provides stable voltage and current. A low pressure is created in the

vacuum chamber and the vacuum pump regulates the pressure in the chamber and the control system monitors and corrects the pressure using sensors and feedback. The vacuuming process takes place - the chamber is pumped out to a set pressure of 10^{-4} Pa, the pressure is not absolutely constant, but is usually maintained with high accuracy (for example, $\pm 5\%$). Argon is injected into the chamber until an operating pressure of 1 Pa is reached. A voltage of 2 kV is applied between the electrodes. During the collision of electrons with argon atoms, their ionization occurs and an avalanche of ionization leads to the formation of a quasi-neutral electron-ion gas - plasma. The camera material was made of stainless steel.

The choice of specific parameters for plasma surface treatment of lead sulfide on a silicon substrate is determined by a combination of factors aimed at achieving the desired effect. The pressure (1 Pa) ensures a high degree of ionization of the working gas, which increases the number of active particles bombarding the surface. It helps to remove impurities and adsorbed molecules from the surface more effectively. Modifications to the surface of lead sulfide reduce the formation of byproducts associated with collisions of neutral particles. High voltage (2 kV) prevents the destruction of lead sulfide by high-energy particles. Provides a controlled change in the chemical composition of the surface. Promotes the functionalization of the surface. A low current (1.5 mA) limits the thermal load on the sample, which reduces the risk of degradation. It promotes uniform surface treatment and increases the reproducibility of the process.

Quanta 200i 3D (FEI Company, USA) was used to measure the size of nanoparticles and study structural properties, and the energy dispersion spectroscopy (EDX) method was used to verify the stoichiometry of the obtained films.

Main provision

The treatment of cubic particles of lead sulfide with glow discharge plasma reduces the average particle size from the submicron to the nanometer range.

Results and discussion

The morphology and elemental composition of the particles were studied using a scanning electron microscope and energy dispersion analysis, respectively. The images were obtained at 50,000 times magnification. Figure 2 (a) shows that as a result of chemical deposition, individual cubic particles with an average size of 320 ± 70.1 nm are formed. It is worth noting that the reaction temperature and synthesis time affect their uniformity. Figure 2(b) is an energy dispersion analysis (EDS) of these particles. Figure 2 (c) shows the particle size distribution.

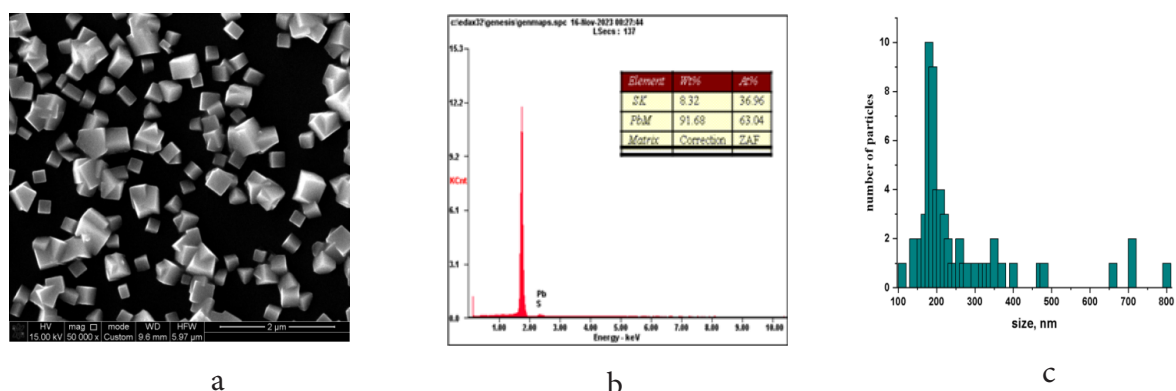


Figure 2 – SEM image, energy dispersion analysis and distribution of PbS particles obtained by the CBD method.

Further, these cubic particles were subjected to plasma treatment. Figure 3 (a) and 3 (d) show images treated with plasma for $t_1 = 1$ minutes and $t_2 = 5$ minutes. The average particle size during treatment with duration of $t_2 = 5$ min is 178 ± 44.7 nm. The reduction of the average size occurs linearly, which is very important for controlling the size of cubic particles.

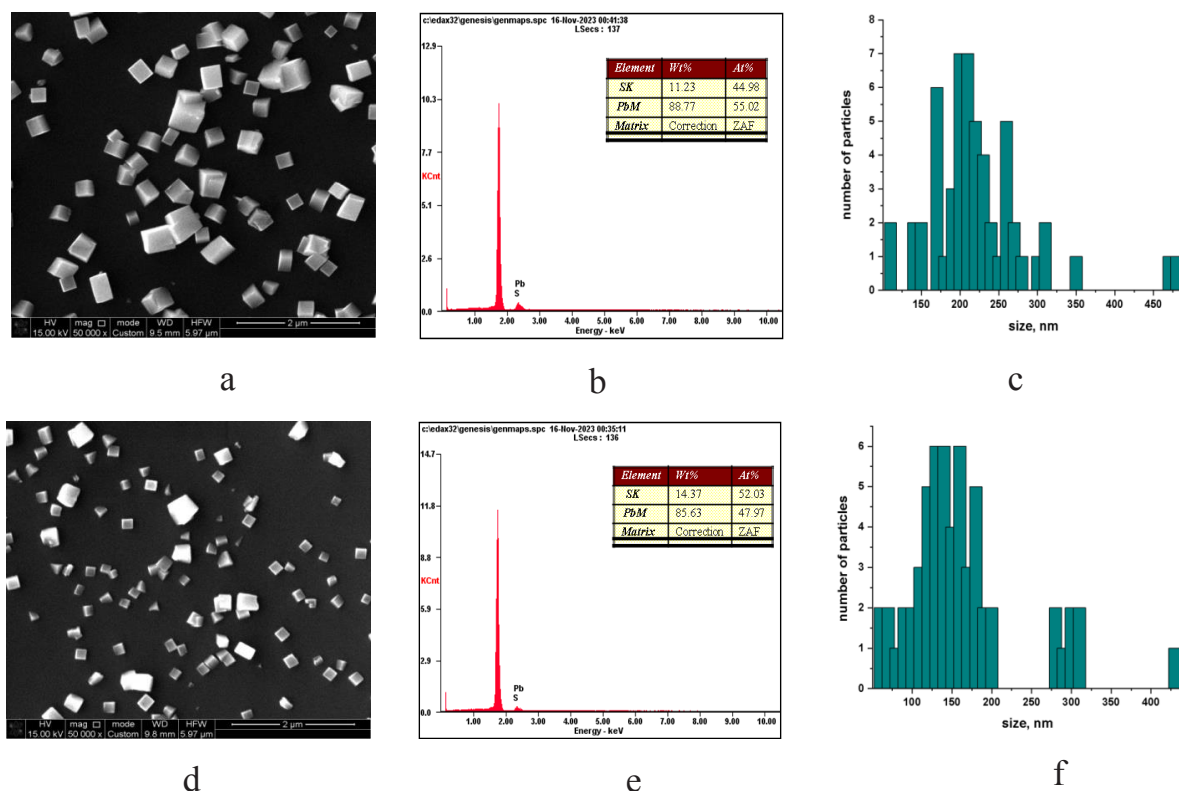


Figure 3 – SEM images, energy dispersion analysis and distribution of PbS particles obtained using CBD and plasma processing

Figure 3 (a) demonstrates PbS particles obtained by chemical method for 10 minutes and subjected to plasma treatment for 1 minute. Figure 3 (b) is an energy dispersion analysis (EDS) of these particles. Figure 3 (d) shows PbS particles obtained by chemical method for 10 minutes and subjected to 5-minute plasma treatment. Figure 3 (e) – EDS analysis of these particles. The elemental composition of PbS nanostructures was investigated using EDS. Energy dispersive spectroscopy of the samples revealed peaks of Si, Pb and S, which confirms the presence of these elements in the nanostructure. Figure 3 (c, f) shows the separation of particles by size, treated with plasma for one and five minutes, respectively. As can be seen from these figures, the smallest cubic particle size in 1 minute treatment was 110 nm, and in 5 minute treatment, the smallest cubic particle size decreased by 60 nm.

Lead sulfide crystallites have a cubic shape due to the peculiarities of the crystal structure of this substance. Lead sulfide crystallizes in the cubic symmetry that its unit cell has the shape of a cube. In this cell, lead and sulfur atoms are arranged in strictly defined positions, creating a repeating three-dimensional structure. Defects in the crystal lattice: may lead to the formation of imperfect cubic shapes.

Conclusion

In this paper, the effect of plasma treatment on the size of cubic particles of lead sulfide (PbS) obtained by chemical method was studied. It was found that plasma treatment for five minutes leads to a significant reduction in the particle size of PbS. As a result of plasma exposure to cubic particles of lead sulfide, a change is observed.

REFERENCES

- 1 El Madani A., Daoudi O., Benyousse S., Qachaou A., Fahoume M., Lharch M. (2021) Experimental and Ab Initio Investigation of the Physical Properties of PbS Thin Films Prepared by Chemical Bath Deposition (CBD), *Brazilian Journal of Physics*, no 51, pp. 1166–1174.
- 2 Gunes S., Fritz K.P., Neugebauer H., Sariciftci N.S., Kumar S., Scholes G.D. (2007) Hybrid solar cells using PbS nanoparticles. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 91, pp. 420–423.
- 3 Preetha K.C., Murali K.V., Regina A.J., Deepa K., Remadevi T.L. (2012) Effect of cationic precursor pH on optical and transport properties of silar deposited nanocrystalline PbS thin films. *Curr. Appl. Phys.*, no. 12, pp. 53–59.
- 4 Yu H., Liu S., Baek S., Kim D.Y., Dong C., So F. (2016) Solution-Processed Copper Oxide Interlayers for Broadband PbS Quantum- Dot Photodiodes., no. 4, pp. 11205–11211.
- 5 Patel M., Kim H.S., Kim J., Yun J.H., Kim S.J., Choi E.H., Park H.H. (2017) Excitonic Metal Oxide Heterojunction (NiO/ZnO) Solar Cells for All-Transparent Module Integration. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, no. 170, pp. 246–253.
- 6 Barrios-Salgado E., Rodríguez-Lazcano Y., Pérez-Orozco J.P., Colin J., Altuzar P., Campos J., Quesada D. Effect of Deposition Time on the Optoelectronics Properties of PbS Thin Films Obtained by Microwave-Assisted Chemical Bath Deposition, *Hindawi Advances in Condensed Matter Physics*, vol. 2019, p. 8.
- 7 Chattarki A.N., Kamble S.S., Deshmukh L.P., *Mater. Lett.*, 67(1), 39 (2012).
- 8 Akhmedov O.R., Huseynaliyev M.G., Abdullaev N.A., Abdullaev N.M., Babaev S.S., Kasumov N.A. (2016) Optical properties of PbS thin films, *Physics and Technology of Semiconductors*, vol. 50, issue 1, pp. 51–54.
- 9 Gao F., Lu Q., Liu X., Yan Y., Zhao D. (2001) Controlled Synthesis of Semiconductor PbS Nanocrystals and Nanowires Inside Mesoporous Silica SBA-15 Phase, *Nano Letters*, vol. 1, no. 12, pp. 743–748.
- 10 Rodríguez C.A., Mera A.C., Pizarro-Castillo L., Ashfaq M., Sandoval-Paz M.G., Burgos M.J.C., Suárez S. (2021) *Materials Science in Semiconductor Processing*, no. 131, p. 105839.
- 11 Gunes S. et al. (2007) *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 91, 420.
- 12 Abe S., Mochizuki K., Masumoto K., *Nippon Kinroku. J. Jpn., Inst. Met.*, 56, 1479.
- 13 Akhmetov N.S. (2001) *General and Inorganic Chemistry*. Higher. School, Ed. center Academy, Moscow, 743 p.
- 14 Liu Y.-C., Xiong Y., Lu D.-N. *Appl. Surface Sci.*, 252, 8, 2960–2966, 2006
- 15 Yildirim A.K., Altiocka B. (2020) *Emerg. Mater. Res.*, 9(1), 47.
- 16 Alekseeva G., et al., *Semiconductors*, 30, p. 1125 View in Scopus Fiz Tverd Tela, 23 p. 2888
- 17 Crisp R.W., Kroupa D.M., Marshall A.R., Miller E.M., Zhang J., Beard M. C. Luther, J.M. *Sci. Rep.* 2015, 5, 9945.
- 18 Ekimov A., Efros A.L. and Onushchenko A. (2018) *Solid state communications* 88 947 5. Carroll G. M, Limpens R. and Neale N. R. *Nano letters*, 18 3118.
- 19 Huo N., Gupta, S., Konstantatos G. (2017) MoS₂-HgTe Quantum Dot Hybrid Photodetectors beyond 2 μm. *Adv. Mater.*, 29
- 20 Abdallah B., Hussein R., Al-Kafri N., Zetoun W. (2020) *Iranian Journal of Science and Technology*, vol. 6, issue 2, pp. 94–98.

¹Әмірбекова Г.С.,

докторант, ORCID ID: 0009-0001-3774-0120, e-mail: gulzhanatt95@gmail.com

^{1*}Төлепов Ж.Қ.,

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7895-0434, e-mail: mr.tolepov@mail.ru*

¹Гусейнов Н.,

ORCID ID: 0000-0003-4804-5323, e-mail: solar_neo@mail.ru

¹Төлегенова М.А.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-6413-4302, e-mail: malika.tulegenova@bk.ru

¹Орынбай Б.Ғ.,

ORCID ID: 0009-0004-6550-9761, e-mail: bakytzhan2797@mail.ru

²Қоштыбаев Т.,

ф.-м.ғ.к, ORCID ID: 0009-0081, e-mail: koshtybayev70@mail.ru0004-9052

³Отарбай Ж.,

ORCID ID: 0009-0008-6842-1908, e-mail: Otarbay@human-engine.com

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

² Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, 050040, Алматы қ., Қазақстан

³Human-Engine LLC, Лос-Анджелес қ., Калифорния, 91106, АҚШ

ПЛАЗМАЛЫҚ ӨНДЕУ ӘДІСІ БОЙЫНША ҚОРҒАСЫН СУЛЬФИДІ (PbS) НАНОБӨЛШЕКТЕРІНІҢ ӨЛШЕМДЕРІН БАСҚАРУ

Аңдатпа

Бұл жұмыста қорғасын сульфидінің (PbS) нанобөлшектерін қалыптастырудың оңтайлы параметрлері анықталды. Қорғасын сульфидінің нанобөлшектері қорғасын нитратының (Pb (NO₃)₂) 25 мл 0,18 М (1,520 г), натрий гидроксиді (NaOH) 75 мл 0,38 М (1,150 г), тиомочевина (CH₄N₂S) 50 мл 0,11 М (0,396 г) сулы ерітіндісінде, реакция температурасы 100°C, синтез реакциясының ұзақтығы 120 минут шамасында химиялық тұндыру арқылы алынды. Бөлшектер алдын ала тазартылған кремний (Si) төсенішіне қойылды. Синтезден кейін бөлшектер $I = 1,5$ кВ кернеуде және $I = 1,5$ мА тоқта, $t_1 = 5$ мин және $t_2 = 5$ мин уақыт шамасында, $t_1 = 1$ Па қысымда аргон атмосферасында солғын разряд плазмасында өңделді. Алынған құрылымдардың морфологиясы сканерлеуші электронды микроскоптың (SEM) көмегімен зерттелді, ал бөлшектердің элементтік құрамы энергодисперсиялық талдау (EDX) арқылы анықталды. Плазмамен өңдеу бөлшектердің орташа өлшемін субмикроннан нанометрлік диапазонға дейін кішірейтеді.

Тірек сөздер: PbS бөлшектері, CBD әдісі, плазмалық өңдеу, оңтайлы параметрлер, Si төсеніші.

¹Амирбекова Г.С.,

докторант, ORCID ID: 0009-0001-3774-0120, e-mail: gulzhanatt95@gmail.com

^{1*}Толепов Ж.К.,

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7895-0434, e-mail: mr.tolepov@mail.ru

¹Гусейнов Н.,

ORCID ID: 0000-0003-4804-5323, e-mail: solar_neo@mail.ru

¹Тулегенова М.А.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-6413-4302, e-mail: malika.tulegenova@bk.ru

¹Орынбай Б.Г.,

ORCID ID: 0009-0004-6550-9761, e-mail: bakytzhan2797@mail.ru

²Коштыбаев Т.,

канд. физ.-мат. наук, ORCID ID: 0009-0081-7344-6801,

e-mail: koshtybayev70@mail.ru0004-9052

³Отарбай Ж.,

ORCID ID: 0009-0008-6842-1908, e-mail: Otarbay@human-engine.com

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

²Казахский национальный женский педагогический университет,
050040, г. Алматы, Казахстан

³Human-Engine LLC, г. Лос-Анджелес, Калифорния, 91106, США

КОНТРОЛЬ РАЗМЕРОВ НАНОЧАСТИЦ СУЛЬФИДА СВИНЦА (PbS) МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация

В этой работе были определены оптимальные параметры получения наночастиц сульфида свинца (PbS). Наночастицы сульфида свинца были получены методом химического осаждения в водном растворе нитрата свинца ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) 25 мл 0,18 М (1,524 г), гидроксида натрия (NaOH) 75 мл 0,38 М (1,172 г), тиомочевина ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$) 50 мл 0,11 М (0,399 г), при температуре реакции 100 °С, длительность реакции синтеза составляла 120 минут. Частицы осаждались на предварительно очищенной кремниевой (Si) подложке. После синтеза частицы были обработаны в плазме тлеющего разряда в атмосфере аргона при давлении порядка $t_1 = 1$ Па, в течение $t_1 = 1$ мин и $I = 1,5$ мин., при напряжении $I = 1,5$ кВ и силе тока $I = 1,5$ мА. Морфология полученных структур была исследована с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), элементный состав частиц определялся методом энергодисперсионного анализа (EDX). Обработка плазмой приводит к уменьшению среднего размера частиц от субмикронного до нанометрового диапазона.

Ключевые слова: PbS частицы. CBD метод, плазменная обработка, оптимальные параметры, подложка Si.

УДК 544.6
МРНТИ 31.15.33

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-273-280>

¹Калкозова Ж.К.,

канд. физ.-мат. наук, ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0002-4826-1678,
e-mail: zhanar.kalkozova@kaznu.edu.kz

²Балгимбаева У.А.,

докторант, ORCID ID: 0000-0002-6051-5538, e-mail: u.balgimbaeva@kbtu.kz

³Серикканов А.С.,

канд. физ.-мат. наук, ORCID ID: 0000-0001-6817-9586, e-mail: a.serikkanov@gmail.com

¹Абдуллин Х.А.,

докт. физ.-мат. наук, профессор, ORCID ID: 0000-0002-2729-2272,
e-mail: kh.abdullin@physics.kz

¹Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа (ННЛОТ),
Казахский национальный университет им. аль-Фараби, 050040, г. Алматы, Казахстан

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

³Satbayev University, ТОО «Физико-технический институт», 050013, г. Алматы, Казахстан

СИНТЕЗ ГИДРОКСИ-КАРБОНАТОВ ЦИНКА, КОБАЛЬТА И МЕДИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО НЕФЕРМЕНТАТИВНОГО СЕНСОРА ГЛЮКОЗЫ

Аннотация

Неферментативные сенсоры глюкозы являются перспективными для электрохимических тест-систем многократного использования, поскольку обладают высокой чувствительностью, быстрым откликом и простотой в эксплуатации. Для создания неферментативных сенсоров глюкозы используется широкий класс материалов, таких как наночастицы благородных металлов, композиты на основе углеродных наноматериалов, оксиды металлов. Поиск новых материалов для создания высокочувствительных сенсоров глюкозы является актуальной задачей. В настоящей работе исследован новый сенсорный материал, перспективный для создания биосенсоров глюкозы. Гидрокси-карбонаты цинка, кобальта и меди синтезированы гидротермальным методом при температуре 120 °С и охарактеризованы методами сканирующей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, рамановской спектроскопией и электрохимическими методами. Показано, что синтезированный материал демонстрирует высокую чувствительность к глюкозе ($11.2 \text{ мА мМ}^{-1} \text{ см}^{-2}$), широкий диапазон чувствительности, термическую стабильность и перспективен для создания неферментативных биосенсоров глюкозы. Предел обнаружения, оцененный по величине электрохимического отклика при варьировании концентрации глюкозы в пределах интервала до 0.5 мМ, составил 0.007 мМ. Полученный материал показал термическую стабильность вплоть до 200 °С при нагреве в окислительной атмосфере, что важно для обеспечения долговременной стабильности сенсорных характеристик.

Ключевые слова: биосенсор глюкозы, электрохимический датчик, неферментативный сенсор.

Введение

С учетом важности лечения диабета и контроля преддиабетических состояний задача по разработке новых материалов для сенсоров уровня глюкозы является актуальной. В настоящее время разработано большое количество различных типов датчиков глюкозы. Однако ввиду важности данного направления интенсивность исследований по разработке сенсоров глюкозы остается высокой, о чем свидетельствует большое число недавних обзорных работ [1–7]. Ферментативные датчики глюкозы широко распространены и часто используются в медицинской

практике, однако они подвержены деградации белковых соединений, входящих в состав таких сенсоров, это негативно влияет на срок хранения и возможность их повторного использования.

Неферментативные (безэнзимные) сенсоры являются перспективной альтернативой энзимным сенсорам глюкозы, и, хотя они исследуются достаточно давно [8], их разработки до сих пор ведутся весьма интенсивно. Поскольку такие сенсоры не содержат органических материалов, они обладают значительно более высокой стабильностью, не подвержены деградации при хранении. Среди различных типов сенсоров электрохимические датчики являются весьма многообещающими устройствами, когда требуются портативные и неинвазивные приборы для мониторинга уровня сахара в крови и других физиологических аналитов.

Электрохимический безэнзимный метод имеет такие достоинства, как экономическая эффективность и простота методов, низкое энергопотребление, малое время анализа. Электрохимический безэнзимный метод детектирования глюкозы основан на электрохимическом окислении глюкозы, необходимым условием является щелочная среда с высоким pH, в то время как биологические жидкости имеют нейтральный pH около 7. Однако, как показано в [9], можно обеспечить локальное повышение pH в нейтральной среде и таким образом нивелировать недостаток электрохимического метода в рабочей среде с высоким pH.

Разработаны различные типы неферментативных сенсоров глюкозы на основе благородных металлов, в основном с использованием золота [10]. Также созданы сенсоры Glu на основе композитов с переходными металлами, оксидов металлов [11], например, оксида никеля [12], оксида меди [13] и сульфидов, например, сульфида серы [14], и широкого круга других соединений [1–7]. Однако до сих пор не было сообщений о применении гидрокси-карбонатов в качестве сенсоров, вызывающих окисление глюкозы.

В настоящей работе показано, что гидрокси-карбонаты цинка, кобальта и меди, синтезированные гидротермальным методом, демонстрируют высокую чувствительность к глюкозе, широкий диапазон чувствительности, поэтому перспективны для создания неферментативных биосенсоров глюкозы.

Основные положения

В связи с широким распространением сахарного диабета в настоящее время существует запрос на создание сенсоров глюкозы, обладающих широким спектром свойств и характеристик. Поэтому разработка новых материалов для создания сенсоров глюкозы, в частности неферментативных сенсоров, является актуальной задачей. Основными требованиями к таким материалам являются высокая чувствительность к целевым реагентам, широкий диапазон детектируемых концентраций, стабильность при хранении в нормальных условиях и экономическая эффективность процесса синтеза.

Целью данной работы был поиск новых материалов для детектирования глюкозы. Показано, что материал на основе гидрокси-карбонатов цинка, кобальта и меди, который синтезирован гидротермальным методом, демонстрирует высокую устойчивость структуры в широком диапазоне условий синтеза, а также показывает высокую чувствительность для детектирования глюкозы, поэтому является новым перспективным материалом для создания биосенсоров.

Материалы и методы

Для синтеза использованы азотнокислый цинк 6-водный $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Sigma Aldrich), кобальт $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ азотнокислый 6 – водный (Sigma Aldrich), $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ азотнокислый 6 – водный (Sigma Aldrich), мочевины $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ (Sigma Aldrich), никелевая пена, ацетон. Деионизованная вода (18.2 МОм×см) получалась из системы очистки воды ARIUM 611 DI, Sartorius Group.

Порошкообразные образцы были получены с помощью гидротермального метода. Для приготовления водного рабочего раствора использовали нитраты цинка, кобальта, меди и мочевины в различных молярных концентрациях. В типичных синтезах 50 мл рабочего раствора заливали в тefлоновый стакан с крышкой, который помещали в автоклав из нержавеющей стали и герметизировали. Автоклав помещали в муфельную печь, нагретую до 120 °C. Длительность гидротермального синтеза составляла 6 часов. Полученные образцы несколько раз промывали деионизованной водой и сушили. Было синтезировано три образца с разным молярным соотношением прекурсоров кобальта, цинка и меди. Для образца №1 молярное отношение прекурсоров Co:Zn:Cu составляло 4 : 1.8 : 0.2. Для образцов №2 и №3 молярное отношение прекурсоров составляло соответственно 4 : 0.2 : 1.8 и 4 : 1 : 1. Молярная концентрация мочевины всегда была в два раза больше молярной концентрации кобальта.

Рентгеноструктурный анализ (XRD) проводили на дифрактометре MiniFlex Rigaku с использованием Cu K α излучения. Рамановские спектры исследованы на спектрометре Ntegra Spectra (NT-MDT) при возбуждении на длине волны 473 нм. Морфологию и микроструктуру изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) Quanta 3D 200i FEI. Электрохимические измерения проводили с использованием потенциостата Elins P-40X в трехэлектродной электрохимической ячейке с платиновым противoeлектродом и Ag/AgCl электродом сравнения. В качестве рабочего электрода использовался электрод из стеклоглeрода диаметром 2 мм, на который наносили порошкообразный образец. В качестве электролита использовался раствор 0.1 М КОН.

Результаты и обсуждение

Необходимо отметить, что, несмотря на различия в составах ростовых растворов при синтезе образцов, результаты рентген-структурного анализа (XRD), электронной микроскопии (SEM) и спектроскопии комбинационного рассеяния всех трех образцов были весьма близкими. На рисунке 1 (стр. 276) приведены результаты рентген-структурного анализа синтезированных образцов.

Как видно из рисунка, XRD результаты всех образцов близки, положения основных рефлексов совпадают для всех трех образцов. Все наблюдающиеся рефлексy XRD можно описать наличием в образцах двух фаз гидроксид-карбонатов, а именно, во-первых, $\text{Co}_2(\text{OH})_2 \cdot (\text{CO}_3)$, соответствующая карта JCPDS #01-079-7085, а также $\text{CuZn}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$, этой фазе соответствует карта JCPDS#00-036-1475. Ширина XRD пиков во всех трех дифрактограммах одинаковая и значительная, как видно из рисунка. По шести одиночным рефлексам образца №3 с использованием формулы Шеррера был оценен средний размер кристаллитов, который оказался 9.5 ± 1.8 нм.

Необходимо отметить, что XRD результаты и морфология образцов не изменялись после отжига при 200 °C в течение 5 часов на воздухе, что свидетельствует о стабильности структуры. Спектры комбинационного рассеяния также слабо менялись при таком отжиге. На рисунке 3 (стр. 277) приведены спектры комбинационного рассеяния образца №3 до и после отжига при 200 °C. Другие образцы демонстрировали похожие спектры, поэтому они здесь не приводятся. На спектрах присутствие интенсивной линии при 1075 cm^{-1} , а также слабой, но узкой полосы при 710 cm^{-1} свидетельствует о наличии групп $\text{Me}-(\text{CO}_3)$ в карбонатах металлов [15], в которых замена металлов вызывает только слабый сдвиг линии [16]. Идентификация низкочастотных линий при 520, 225 и 150 cm^{-1} не так очевидна, но их также можно отнести к структуре карбонатов металлов, которые в этой области демонстрируют ряд линий [15]. Так же как и в случае XRD и SEM исследований, рамановские спектры не демонстрируют заметных изменений после отжига, что доказывает относительную термическую устойчивость полученных гидроксид-карбонатов.

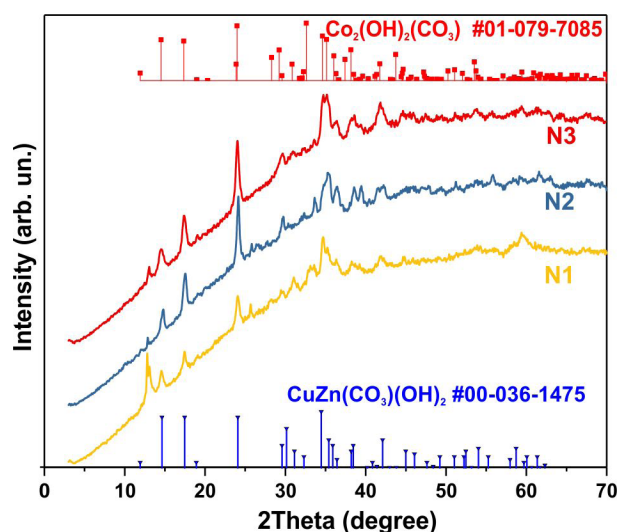


Рисунок 1 – Результаты рентген-структурного анализа синтезированных образцов

На рисунке 2 приведены снимки сканирующей электронной микроскопии (SEM) образцов №1–№3. Морфология образцов примерно одинаковая и состоит из тонких пластин толщиной около 40 нм.

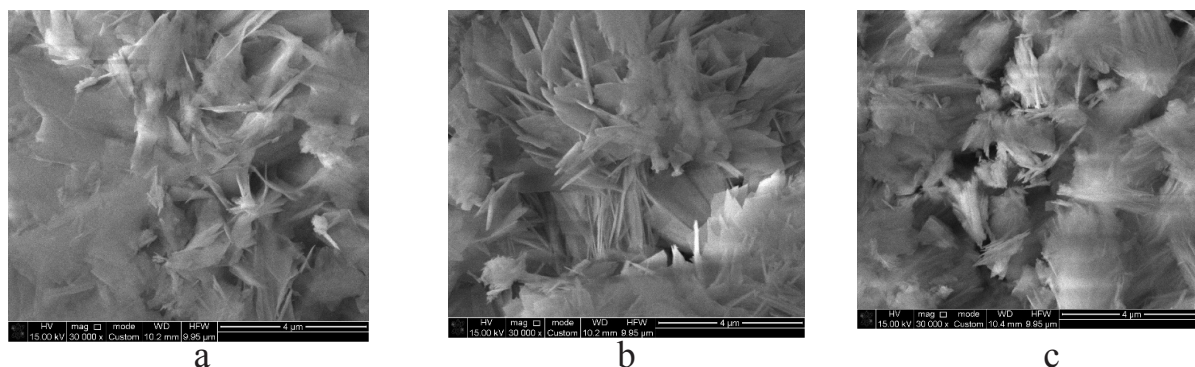


Рисунок 2 – SEM снимки образцов №1 (a), №2 (b) и №3 (c).
Масштабный отрезок 4 мкм

Чувствительность к глюкозе была протестирована методом циклической вольтамперометрии CV. На рисунках 4 (a) и 5 (a) показаны CV кривые для образцов №2 и №3 соответственно. Видно, что при добавлении глюкозы наблюдаются значительные изменения CV кривых. Ток, измеренный при потенциале 0.6 В относительно Ag/AgCl, растет в интервале до ~0.5 mM по зависимости, близкой к линейной, как показано на рисунках 4 (b) и 5 (b). На этих же рисунках показана зависимость чувствительности от концентрации. Как видно, чувствительность достигает ~13 $\text{mA mM}^{-1} \text{cm}^{-2}$, эта величина весьма высокая в сравнении с данными, имеющимися в литературе. Например, высокая чувствительность к глюкозе $7.432 \text{ mA mM}^{-1} \text{cm}^{-2}$ достигнута на пленке из нановолокон ($\text{NiCo}_2\text{S}_4/\text{EGF}$) в линейном диапазоне до 3.57 mM [17]. В работе [18] сенсор из углеродных нановолокон с оксидом кобальта продемонстрировал предел обнаружения около 1 нМ. Однако типичный диапазон чувствительности составляет $0.1 \div 10 \text{ mA mM}^{-1} \text{cm}^{-2}$, при линейном диапазоне до нескольких mM глюкозы [19, 20]. Таким образом, такие параметры полученных сенсоров, как чувствительность и диапазон концентраций, сравнимы либо превосходят параметры известных сенсоров глюкозы.

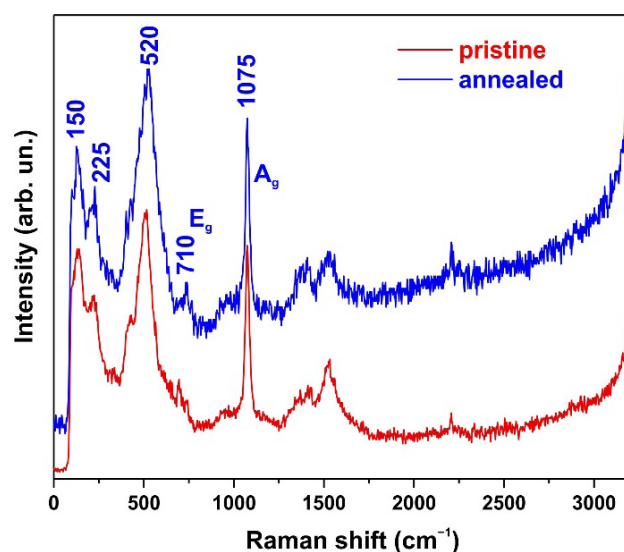


Рисунок 3 – Спектры комбинационного рассеяния образца №3 до и после отжига при 200 °С на воздухе

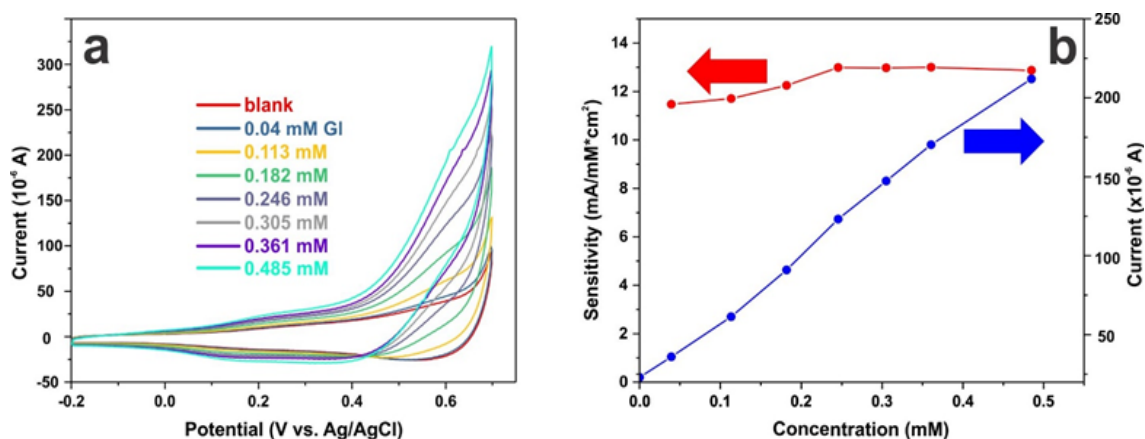


Рисунок 4 – CV характеристики для образца №2 в диапазоне концентраций глюкозы от 0 до 0.485 mM (a); зависимость тока при потенциале 0.6 В относительно Ag/AgCl и чувствительности от концентрации глюкозы (b).

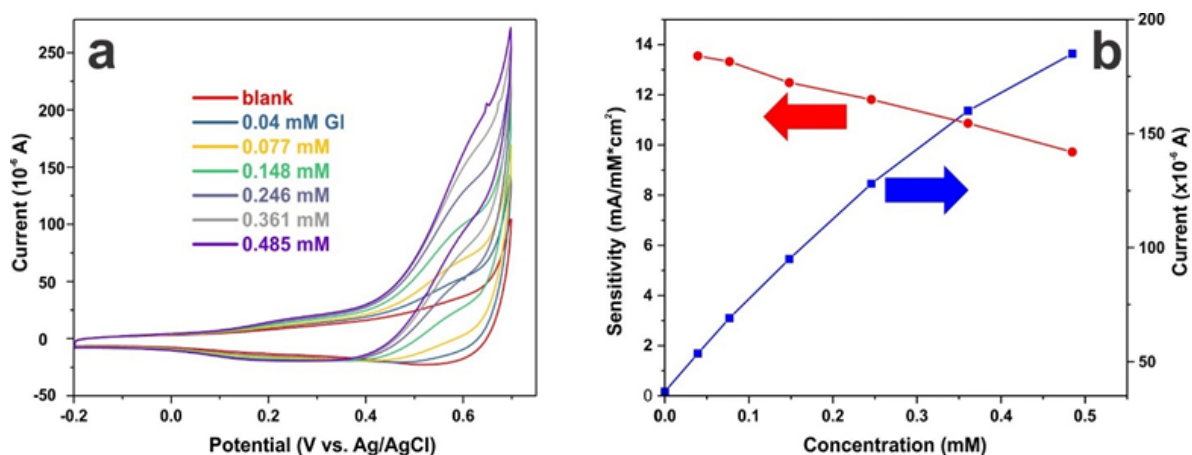


Рисунок 5 – CV характеристики для образца №3 в диапазоне концентраций глюкозы от 0 до 0.485 mM (a); Зависимость тока при потенциале 0.6 В относительно Ag/AgCl и чувствительности от концентрации глюкозы (b).

Закключение

Таким образом, в настоящей работе сообщается о новом материале для изготовления сенсора глюкозы – гидроксид-карбонатов цинка, кобальта и меди. Устойчивый фазовый состав этого материала формируется при достаточно широком диапазоне условий синтеза, в этом же диапазоне сохраняется высокая чувствительность сенсора. Материал продемонстрировал чувствительность $11.2 \text{ mA mM}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, линейную область до 0.5 mM , в этой области показал предел обнаружения глюкозы 0.007 mM . Простой синтез материала и его высокая чувствительность делают полученный материал перспективным для практического применения при создании неферментативных сенсоров обнаружения глюкозы.

Информация о финансировании. Данное исследование было профинансировано Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан, гранты № AP19676535 и № BR18574141.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Tamoghna Saha, Rafael Del Caño, Kuldeep Mahato, Ernesto De la Paz, Chuanrui Chen, Shichao Ding, Lu Yin and Joseph Wang (2023) Wearable Electrochemical Glucose Sensors in Diabetes Management: A Comprehensive Reviews 123, 12, 7854–7889. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00078>.
- 2 Yan Wang, You Wu and Yifeng Lei. (2023) Microneedle-based glucose monitoring: a review from sampling methods to wearable biosensors. *Biomater. Sci.*, 11, 5727–5757. <https://doi.org/10.1039/D3BM00409K>.
- 3 Kermue Vasco Jarnda, Danqi Wang, Qurrat-Ul-Ain, Richmond Anaman, Varney Edwin Johnson, Garmai Prosperity Roberts, Pauline Sammumah Johnson, Bob Wisdom Jallowide Jr, Tianhan Kai, Ping Ding (2023) Recent advances in electrochemical non-enzymatic glucose sensor for the detection of glucose in tears and saliva: A Review. *Sensors and Actuators A: Physical* 363, 114778. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114778>.
- 4 Daria Di Filippo, Frédérique N. Sunstrum, Jawairia Umar Khan, Alec W. Welsh. (2023) Non-Invasive Glucose Sensing Technologies and Products: A Comprehensive Review for Researchers and Clinicians. *Sensors*, 23(22), 9130. <https://doi.org/10.3390/s23229130>.
- 5 Muthukumar Govindaraj, Ananya Srivastava, Magesh Kumar Muthukumaran, Pei-Chien Tsai, Yuan-Chung Lin, Bharathi Kannan Raja, Jerome Rajendran, Vinoth Kumar Ponnusamy, J Arockia Selvi. (2023) Current advancements and prospects of enzymatic and non-enzymatic electrochemical glucose sensors. *International Journal of Biological Macromolecules* 253(Part 2), 126680. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126680>.
- 6 Seyed Saman Nemati, Gholamreza Dehghan, Samaneh Rashtbari, Tran Nhat Tan, Alireza Khataee. (2023) Enzyme-based and enzyme-free metal-based glucose biosensors: Classification and recent advances. *Microchemical Journal* 19, 109038. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.109038>.
- 7 Guati, Carlota, Gomez-Coma, Lucía, Fallanza, Marcos and Ortiz, Inmaculada. (2024) Progress on the influence of non-enzymatic electrodes characteristics on the response to glucose detection: a review (2016–2022). *Reviews in Chemical Engineering*, 40, 123-148. <https://doi.org/10.1515/revce-2022-0058>.
- 8 Kathryn E. Toghill, Richard G. Compton (2010) Electrochemical Non-enzymatic Glucose Sensors: A Perspective and an Evaluation, *International Journal of Electrochemical Science*, Volume 5, 9, 1246–1301. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)15359-4](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)15359-4).
- 9 Strakosas, X., Selberg, J., Pansodtee, P. et al. (2019) A non-enzymatic glucose sensor enabled by bioelectronic pH control. *Sci Rep* 9, 10844. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46302-9>.
- 10 Mauro Pasta, Fabio La Mantia, Yi Cui. (2010) Mechanism of glucose electrochemical oxidation on gold surface, *Electrochimica Acta*, 55, 20, 5561–5568. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.04.069>.
- 11 Naikoo Gowhar A., Salim Hiba, Hassan Israr U., Awan Tasbiha, Arshad Fareeha, Pedram Mona Z., Ahmed Waqar, Qurashi Ahsanulhaq. (2021) Recent Advances in Non-Enzymatic Glucose Sensors Based on Metal and Metal Oxide Nanostructures for Diabetes Management. A Review *Frontiers in Chemistry*, 9. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.748957>.

12 Devesh K. Pathak, Hong Chul Moon. (2023) Enzyme-free, metal oxide-based amperometric-colorimetric dual-mode functional glucose sensor. *Materials & Design* 234, 112309. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112309>.

13 Emil R. Mamleyev, Peter G. Weidler, Alexei Nefedov, Dorothée Vinga Szabó, Monsur Islam, Dario Mager and Jan G. Korvink (2021) *ACS Applied Nano Materials* 4, 12, 13747–13760. <https://doi.org/10.1021/acsanm.1c03149>.

14 He W., Huang Y. & Wu J. (2020) Enzyme-Free Glucose Biosensors Based on MoS₂ Nanocomposites. *Nanoscale Res Lett* 15, 60. <https://doi.org/10.1186/s11671-020-3285-3>.

15 Alves J.F., Edwards H.G.M., Korsakov A., de Oliveira L.F.C. (2023) Revisiting the Raman Spectra of Carbonate Minerals. *Minerals*, 13, 1358. <https://doi.org/10.3390/min13111358>.

16 William Dufresne, Carson Ruffelt, Craig P Marshall. Raman spectroscopy of the eight natural carbonate minerals of calcite structure. *Journal of Raman Spectroscopy* 49, 3, 1999–2007, 2018. <https://doi.org/10.1002/jrs.5481>.

17 Qiaohui Guo, Tingting Wu, Lijuan Liu, Yi He, Dong Liu, Tianyan You. (2020) Hierarchically porous NiCo₂S₄ nanowires anchored on flexible electrospun graphitic nanofiber for high-performance glucose biosensing. *Journal of Alloys and Compounds* 819, 153376. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153376>.

18 Kim S.G., Jun J., Kim Y.K., Kim J., Lee J.S., Jang J. (2020) Facile Synthesis of Co₃O₄ -Incorporated Multichannel Carbon Nanofibers for Electrochemical Applications. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 12, 20613–20622. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c06254>.

19 Mohammadpour-Haratbar A., Mohammadpour-Haratbar S., Zare Y., Rhee K.Y., Park S.-J. (2022) A Review on Non-Enzymatic Electrochemical Biosensors of Glucose Using Carbon Nanofiber Nanocomposites. *Biosensors*, 12, 1004. <https://doi.org/10.3390/bios12111004>.

20 Vuslat B. Juska, Martyn E. Pemble. (2020) A Critical Review of Electrochemical Glucose Sensing: Evolution of Biosensor Platforms Based on Advanced Nanosystems. *Sensors* 20, 6013. <https://doi.org/10.3390/s20216013>.

¹Калкозова Ж.К.,

ф.-м.ф.к., қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0002-4826-1678,
e-mail: zhanar.kalkozova@kaznu.edu.kz

²Балгимбаева У.А.,

докторант, ORCID ID: 0000-0002-6051-5538, e-mail: u.balgimbaeva@kbtu.kz

³Серикканов А.С.,

ф.-м.ф.к., ORCID ID: 0000-0001-6817-9586, e-mail: a.serikkanov@gmail.com

¹Абдуллин Х.А.,

ф.-м.ф.д., профессор, ORCID ID: 0000-0002-2729-2272,
e-mail: kh.abdullin@physics.kz

¹Ашық түрдегі ұлттық нанотехнологиялық зертхана (АТҰНЗ), әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

²Қазақстан-Британ техникалық университеті, Төле би көшесі 59,
Алматы қ., 050000, Қазақстан

³Сәтбаев университеті, «Физика-техникалық институты» ЖШС, Алматы қ., Қазақстан

ЭЛЕКТРОХИМИЯЛЫҚ ФЕРМЕНТАТИВТІ ЕМЕС ГЛЮКОЗА СЕНСОРЫН ЖАСАУ ҮШІН МЫРЫШ, КОБАЛЬТ ЖӘНЕ МЫС ГИДРОКСИ КАРБОНАТТАРЫНЫҢ СИНТЕЗІ

Аңдатпа

Глюкозаның ферментативті емес сенсорлары қайта пайдалануға болатын электрохимиялық сынақ жүйелері үшін перспективті, өйткені олар жоғары сезімталдыққа ие, жылдам әрекет етеді және пайдалануда қарапайым. Глюкозаның ферментативті емес сенсорларын жасау үшін асыл металлдардың нанобөлшектері, көміртегі наноматериалдарына негізделген композиттер және металл оксидтері сияқты материалдардың

кең класы қолданылады. Сезімталдығы жоғары глюкоза сенсорларын жасау үшін жаңа материалдарды іздеу өзекті мәселе. Бұл жұмыста глюкоза биосенсорларын жасау үшін перспективті жаңа сенсор материалы зерттелді. Мырыш, кобальт және мыс гидроксокарбонаттары гидротермалды әдіспен 120 °C температурада синтезделді және сканерлеуші электронды микроскопия, рентгендік құрылымдық талдау, Раман спектроскопиясы және электрохимиялық әдістермен сипатталды. Синтезделген материал глюкозаға жоғары сезімталдықты ($11.2 \text{ mA mM}^{-1} \text{ cm}^{-2}$), сезімталдықтың кең диапазонын, термиялық тұрақтылықты көрсетті және глюкозаның ферментативті емес биосенсорларын жасау үшін перспективті. Глюкоза концентрациясының 0,5 mM-ге дейінгі аралықта өзгеруі кезінде электрохимиялық реакцияның шамасы бойынша бағаланған анықтау шегі 0,007 mM құрады. Алынған материал тотығу атмосферасында қыздыру кезінде 200 °C дейін термиялық тұрақтылықты көрсетті, бұл сенсорлық сипаттаманың ұзақ мерзімді тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін маңызды.

Тірек сөздер: глюкоза биосенсоры, электрохимиялық датчик, ферментативті емес сенсор.

¹**Kalkozova Zh.K.,**

Candidate of Phys.-Math. Sc., Associate Professor, ORCID ID: 0000-0002-4826-1678,
e-mail: zhanar.kalkozova@kaznu.edu.kz

²**Balgimbayeva U.A.,**

PhD student, ORCID ID: 0000-0002-6051-5538, e-mail: u.balgimbaeva@kbtu.kz

³**Serikkanov A.S.,**

Candidate of Phys.-Math. Sc., ORCID ID: 0000-0001-6817-9586,
e-mail: a.serikkanov@gmail.com

¹**Abdullin Kh.A.,**

Dr. Phys.-Math. Sc., ORCID ID: 0000-0002-2729-2272, e-mail: kh.abdullin@physics.kz

¹National nanotechnology laboratory of open type (NNLOT),
Al-Farabi Kazakh National university, Almaty, Kazakhstan

²Kazakh-British Technical university, Tole bi street 59, Almaty, 050000, Kazakhstan

³Satbayev University, «Institute of Physics and Technology», Almaty, Kazakhstan

SYNTHESIS OF ZINC, COBALT AND COPPER HYDROXY-CARBONATES FOR CREATION OF ELECTROCHEMICAL NON-ENZYMATIC GLUCOSE SENSOR

Abstract

Non-enzymatic glucose sensors are promising for reusable electrochemical test systems because of their high sensitivity, fast response and ease of operation. A wide class of materials such as noble metal nanoparticles, composites based on carbon nanomaterials, and metal oxides are used to create non-enzymatic glucose sensors. The search for new materials for the creation of highly sensitive glucose sensors is an urgent task. In the present work a new sensor material promising for the creation of glucose biosensors is investigated. Zinc, cobalt and copper hydroxy-carbonates were synthesized by hydrothermal method at 120 °C and characterized by scanning electron microscopy, X-ray diffraction analysis, Raman spectroscopy and electrochemical methods. It is shown that the synthesized material exhibits high sensitivity to glucose ($11.2 \text{ mA} \cdot \text{mM}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$), wide sensitivity range, thermal stability and is promising for the development of non-enzymatic glucose biosensors. The limit of detection, evaluated by the magnitude of the electrochemical response when the glucose concentration was varied within the interval up to 0.5 mM, was 0.007 mM. The obtained material showed thermal stability up to 200 °C when heated in an oxidizing atmosphere, which is important for ensuring long-term stability of sensory characteristics.

Key words: glucose biosensor, electrochemical sensor, non-enzymatic sensor.

УДК 677.862.513.55
МРНТИ 29.19.04

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-281-294>

^{1,2}Идинов М.Т.,

PhD докторант, e-mail: idinov_medet@list.ru

^{3,4*}Козловский А.Л.,

PhD, ORCID ID 0000-0001-8832-7443, e-mail: kozlovskiy.a@inp.kz

¹Касымов А.Б.,

PhD, и.о. ассоциированного профессора, ORCID ID: 0000-0002-1983-6508;

e-mail: kassymov.asb@gmail.com

⁵Градобоев А.В.,

докт. техн. наук, профессор, ORCID ID: 0000-0002-2803-5972,

e-mail: gradoboev1@mail.ru

¹НАО «Университет им. Шакарима города Семей», 071412, г. Семей, Казахстан

²ТОО «Nucmed», 070000, г. Семей, Казахстан

³ Институт ядерной физики МЭ РК, 050000, г. Алматы, Казахстан

⁴НАО «Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева»,
010008, г. Астана, Казахстан

⁵Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, Россия

ИЗУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ $\text{Cu}(\text{Co},\text{Ni})\text{Bi}_2\text{O}_4$ ПЛЕНОК К КОРРОЗИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ С АГРЕССИВНЫМИ СРЕДАМИ

Аннотация

В работе рассмотрено влияние замещения меди кобальтом и никелем в составе CuBi_2O_4 пленок, полученных с применением метода электрохимического осаждения. Замещение было инициировано путем добавления в состав сернокислого раствора – электролита сульфатов кобальта или никеля, что позволило получить пленки с тетрагональным типом кристаллической решетки, характерной для фазы CuBi_2O_4 . При этом анализ структурных параметров и изменений элементного состава пленок показал, что добавление в состав электролита сульфатов никеля и кобальта приводит к формированию тетрагональной фазы по типу замещения, связанному с частичным замещением меди никелем или кобальтом в зависимости от состава раствора – электролита. В ходе моделирования процессов деградации пленок при внешних воздействиях были получены результаты коррозионных испытаний CuBi_2O_4 пленок в агрессивной среде модельного раствора 0.1 М NaCl при различных температурах среды. Определены зависимости изменения степени структурного упорядочения и степени разупрочнения исследуемых пленок в зависимости от времени нахождения в агрессивной среде. Установлено, что замещение меди кобальтом или никелем приводит к увеличению сопротивляемости исследуемых пленок к деградации и окислению, что свидетельствует о положительном эффекте замещения, обуславливающему снижение скорости деградации поверхности пленок при контакте с агрессивной средой.

Ключевые слова: тонкие пленки, электрохимический синтез, антикоррозионные покрытия, CuBi_2O_4 , структурное разупорядочение.

Введение

Одним из перспективных типов защитных материалов для экранирования различных типов ионизирующего излучения (в частности, гамма- и рентгеновского излучения) являются композитные пленки на основе соединений меди и висмута, интерес к которым обусловлен высокими поглощающими характеристиками висмута и его оксидных форм, а также проч-

ностными параметрами. При этом в случае пленок очень часто используется технология объединения легких и тяжелых элементов, которая позволяет снизить эффект воздействия вторичного излучения к минимуму за счет различий в атомных радиусах, а также электронной плотности элементов. Ввиду того, что в большинстве случаев невозможно использовать классический фактор увеличения толщины пленок для повышения эффективности экранирования, в последнее время используют различные факторы, позволяющие модифицировать пленки за счет эффектов допирования или частичного замещения [1, 2]. При этом выбор допантов, как правило, обусловлен возможностями не только увеличения эффективности экранирования, но и повышения прочностных характеристик, а также увеличения сопротивляемости внешним воздействиям, включая агрессивные среды или процессы естественного старения.

Большое внимание в данном направлении, в частности, уделяется поиску оптимальных составов пленок, обладающих высокой эффективностью экранирования, а также использованию их в качестве защитных материалов с хорошим сочетанием прочностных и экранирующих характеристик. Так, среди многообразия тонких пленок и покрытий можно выделить два типа материалов: оксид цинка и медь, которые обладают хорошими проводящими свойствами, а также результаты ряда работ [1–6] показывают большую перспективность использования их в качестве экранирующих материалов для защиты от гамма-, электронного, рентгеновского или электромагнитного излучения. Интерес к данным типам пленок обусловлен не только их проводящими, прочностными и экранирующими свойствами, но и простотой их получения (как правило, с применением методов магнетронного распыления или электрохимического осаждения). При этом в последнее время большое внимание уделяется поиску способов повышения эффективности данных типов пленок за счет их структурной модификации, путем добавления в них тяжелых или редкоземельных элементов [7–9]. Использование данного типа структурной модификации позволяет повысить эффективность экранирования, а также изменить свойства синтезируемых тонких пленок или покрытий, в том числе увеличить их устойчивость к деградации, коррозии, повысить прочностные свойства и т.д. При этом в ряде работ [10, 11] в качестве допанта рассматривают соединения с висмутом, добавление которого приводит к существенному увеличению не только экранирующих характеристик, но и устойчивости к внешним воздействиям за счет повышения прочности и износостойкости. Сам по себе висмут или его оксидные соединения рассматриваются как один из перспективных материалов для экранирования, использование которого, как было показано в ряде работ [12–15], приводит к существенным изменениям экранирующих характеристик защитных материалов.

Однако в случае сочетания меди и висмута, а также их оксидов данные пленки обладают достаточно низкими показателями устойчивости к окислению при взаимодействии с агрессивными средами, которое обусловлено слабой устойчивостью меди к окислению за счет образования оксидных и гидроксидных форм, а также образования оксидных включений в приповерхностных слоях. В этой связи в случае использования подобных пленок в условиях возможного соприкосновения с различными водными средами, включая агрессивные (кислотные или щелочные среды), необходимо повышение устойчивости пленок к окислению и последующей структурной и прочностной деградации. Одним из вариантов повышения устойчивости можно рассматривать фактор частичного замещения меди близкими элементами, к примеру кобальтом или никелем, которые обладают более высокими показателями к окислению, а также достаточно легко могут встраиваться в кристаллическую структуру путем замещения ионов меди, тем самым увеличивая прочность материала и коррозионную стойкость.

Цель данного исследования заключается в определении влияния добавления в состав раствора – электролита, используемого для получения CuBi_2O_4 пленок при электрохимическом синтезе, сульфатов кобальта или никеля, приводящего к возникновению эффекта частичного замещения меди кобальтом или никелем в структуре CuBi_2O_4 пленок, на повышение устойчивости к процессам коррозии и деградации, возникающих при взаимодействии пленок с агрессивными средами. При этом проведение экспериментов на определение устойчивости пленок

к коррозии, как правило, в лабораторных условиях проводится с использованием модельных растворов, к примеру, раствора 0.1 М NaCl, использование которого позволяет определить механизмы коррозии, возникающие при взаимодействии поверхности покрытий в условиях, сравнимых с атмосферным воздействием при повышенной влажности. В свою очередь, использование данного раствора согласно работе [16], позволяет инициировать коррозионные процессы, связанные с окислением и образованием оксидных включений. В свою очередь, использование частичного замещения меди кобальтом или никелем оправдано тем фактом, что эффект частичного замещения приводит к увеличению прочностных свойств пленок, а также к увеличению сопротивляемости коррозии и деградации при длительном нахождении в водных средах. При этом следует отметить, что замещение приводит к структурным изменениям основной фазы CuBi_2O_4 , без каких-либо формирований включений в виде фаз никеля и кобальта в составе пленок, что исключает эффект токсичного воздействия данных элементов на загрязнение окружающей среды за счет высокой стабильности к окислению пленок с эффектом замещения.

Материалы и методы исследования

Синтез CuBi_2O_4 пленок был осуществлен с применением метода электрохимического осаждения. Для синтеза использовалась электрохимическая ячейка из термопластичного полимера (PLA), изготовленная с применением 3D-печати. В качестве электродов использовались медные пластины площадью 9 см^2 ($3.0 \times 3.0 \text{ см}$). Перед каждым процессом электрохимического осаждения данные пластины подвергались полировке с целью устранения оксидных пленок, а также остатков продуктов электрохимических реакций. Контроль за процессами осаждения проводился с применением моноканального потенциостата VersaSTAT 3 (Ametek-AMT, США), позволяющего путем построения графиков хроноамперограмм контролировать процесс осаждения за счет изменения показателей силы тока и плотности тока в ячейке в процессе осаждения. Контроль за процессом роста пленок осуществлялся с применением метода хроноамперометрии, в качестве электрода сравнения использовался AgCl электрод. В качестве подложек для получения $\text{Cu(Bi)/CuBi}_2\text{O}_4$ пленок использовались полимерные пленки на основе полиэтилентерефталата (ПЭТФ), на одну из сторон которых методом магнетронного напыления наносился тонкий проводящий слой золота (толщиной порядка 30 нм), который является связующим слоем для формирования зерен, из которых в ходе электрохимического осаждения формировались пленки.

Для получения пленок $\text{Cu(Bi)/CuBi}_2\text{O}_4$ был использован следующий раствор – электролита $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (238 г/л), $\text{Bi}_2(\text{SO}_4)_3$ (10 г/л), H_2SO_4 (21 г/л). Для получения пленок $\text{Cu(Co)Bi}_2\text{O}_4$ с частичным замещением меди кобальтом использовали следующее соотношение сульфатов для приготовления раствора – электролита $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (200 г/л), $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (40 г/л), $\text{Bi}_2(\text{SO}_4)_3$ (10 г/л), H_2SO_4 (21 г/л). Для получения $\text{Cu(Ni)Bi}_2\text{O}_4$ пленок с частичным замещением меди никелем использовали следующее соотношение компонент сульфатов солей $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (200 г/л), $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (40 г/л), $\text{Bi}_2(\text{SO}_4)_3$ (10 г/л), H_2SO_4 (21 г/л).

Все используемые химические реактивы были приобретены у компании Sigma-Aldrich (Merck KGaA, США), химическая чистота реактивов составляла 99.95%. Для дальнейшей простоты интерпретации данных раствор без добавления сульфата кобальта или никеля именовали раствор №1, с добавлением сульфата кобальта – раствор №2, с добавлением сульфата никеля – раствор №3. С целью определения возможности вариации элементного состава пленок за счет добавления в растворы – электролиты сульфатов кобальта или никеля эксперименты по электрохимическому синтезу образцов были осуществлены в диапазоне прикладываемых разностей потенциалов от 2.0 до 4.0 В, с шагом 0.5 В. Граничные условия синтеза 2.0 В и 4.0 В выбраны с учетом априорных экспериментов, в ходе которых было определено, что при разностях потенциалов ниже 2.0 В электрохимическое осаждение пленок сопровождается

ся большим количеством включений в виде оксидов меди. В случае разностей потенциалов выше 4.0 В наблюдалось бурное выделение кислорода в электрохимической ячейке, что приводило к частичной пассивации катода и анода.

После осаждения полученные пленки промывались в дионизированной воде и высушивались на фильтровальной бумаге, после чего помещались в пластиковые пакеты для возможности длительного хранения и последующего использования.

Определение элементного состава исследуемых образцов пленок в зависимости от условий получения было проведено путем съемки энерго-дисперсионных спектров на растровом электронном микроскопе TM3030 (Hitachi, Токио, Япония), оснащенным приставкой для энерго-дисперсионного анализа.

Определение фазового состава синтезированных пленок в зависимости от условий синтеза (при вариации разности прикладываемых потенциалов, а также изменениях растворов – электролитов) было проведено с применением метода рентгеновской дифракции. Рентгеновские дифрактограммы были сняты на порошковом дифрактометре D8 ADVANCE ECO (Bruker, Карлсруэ, Германия) в геометрии Брегг – Brentano.

Определение устойчивости пленок к внешним воздействиям, в частности к процессам деградации, вызванным воздействием агрессивной среды (NaCl), было проведено в виде серийных испытаний. Синтезированные образцы при различных разностях потенциалов и, как следствие, с различной степенью структурного упорядочения, а также элементного и фазового состава были помещены в раствор 0.1 М NaCl, использующийся в качестве модельного раствора для проведения коррозионных испытаний с целью определения эффективности устойчивости материалов к деградации и окислению. Испытания проводились при двух температурах: 25 °С и 50 °С, что позволило определить устойчивость полученных пленок к процессам деградации. Время выдержки образцов – 10 дней, после каждых двух дней образцы извлекались из растворов и на них проводилось изменение структурных и прочностных характеристик.

Оценка структурной деградации была проведена путем определения изменений степени структурного упорядочения (степени кристалличности) до и после испытаний. Изменение степени структурного упорядочения в зависимости от времени нахождения образцов в агрессивной среде позволило определить скорость деградации пленок, а также влияние эффектов замещения на сохранение стабильности к процессам деградации.

Определение прочностных характеристик синтезированных пленок в зависимости от времени нахождения в агрессивной среде проводилось с применением метода индентирования, реализованного с помощью микротвердомера Duroline M1 (Metkon, Бурса, Турция). Для индентирования была использована пирамида Виккерса при различной величине нагрузки на индентер, вариация которой позволила определить величину твердости на различной глубине индентирования. Анализ проводился путем оценки твердости до и после выдержки образцов в агрессивной среде в течение определенного времени, а на основе изменений значений твердости была определена степень разупрочнения пленок при их деградации.

Основные положения

Выбор в качестве объектов исследования CuBi_2O_4 и $\text{Cu}(\text{Co},\text{Ni})\text{Bi}_2\text{O}_4$ пленок, полученных методом электрохимического осаждения обусловлен возможностями определения эффективности использования данных пленок в качестве защитных материалов, которые можно рассматривать как один из классов материалов, обладающих высокой устойчивостью к коррозионным процессам, возникающим при взаимодействии с агрессивными средами или окружающей средой (процессы естественного старения при взаимодействии с атмосферой). При этом добавление в состав электролита, используемого для получения CuBi_2O_4 пленок сульфата кобальта или сульфата никеля, обусловлено возможностями формирования твердых раство-

ров замещения ионов меди ионами кобальта или никеля в структуре CuBi_2O_4 – шпинели, что, в свою очередь, может привести к увеличению устойчивости пленок к внешним воздействиям. Повышение коррозионной стойкости пленок за счет эффекта замещения обусловлено более высокими показателями структур, содержащих никель или кобальт, к внешним воздействиям за счет низкой скорости окисления в сравнении с медесодержащими структурами. При этом сам эффект замещения основан на схожести электродных потенциалов восстановления ионов меди, кобальта и никеля, что в случае вариации разности прикладываемых потенциалов в выбранном диапазоне от 2.0 до 4.0 В приводит к возникновению эффекта замещения меди кобальтом (в случае использования сульфата кобальта) или никелем (в случае использования сульфата никеля). Представленные в таблице 1 данные изменения элементного состава пленок в зависимости от вариации разности прикладываемых потенциалов в случае использования различных растворов – электролитов, свидетельствуют об увеличении эффекта замещения меди кобальтом или никелем при изменении разности прикладываемых потенциалов.

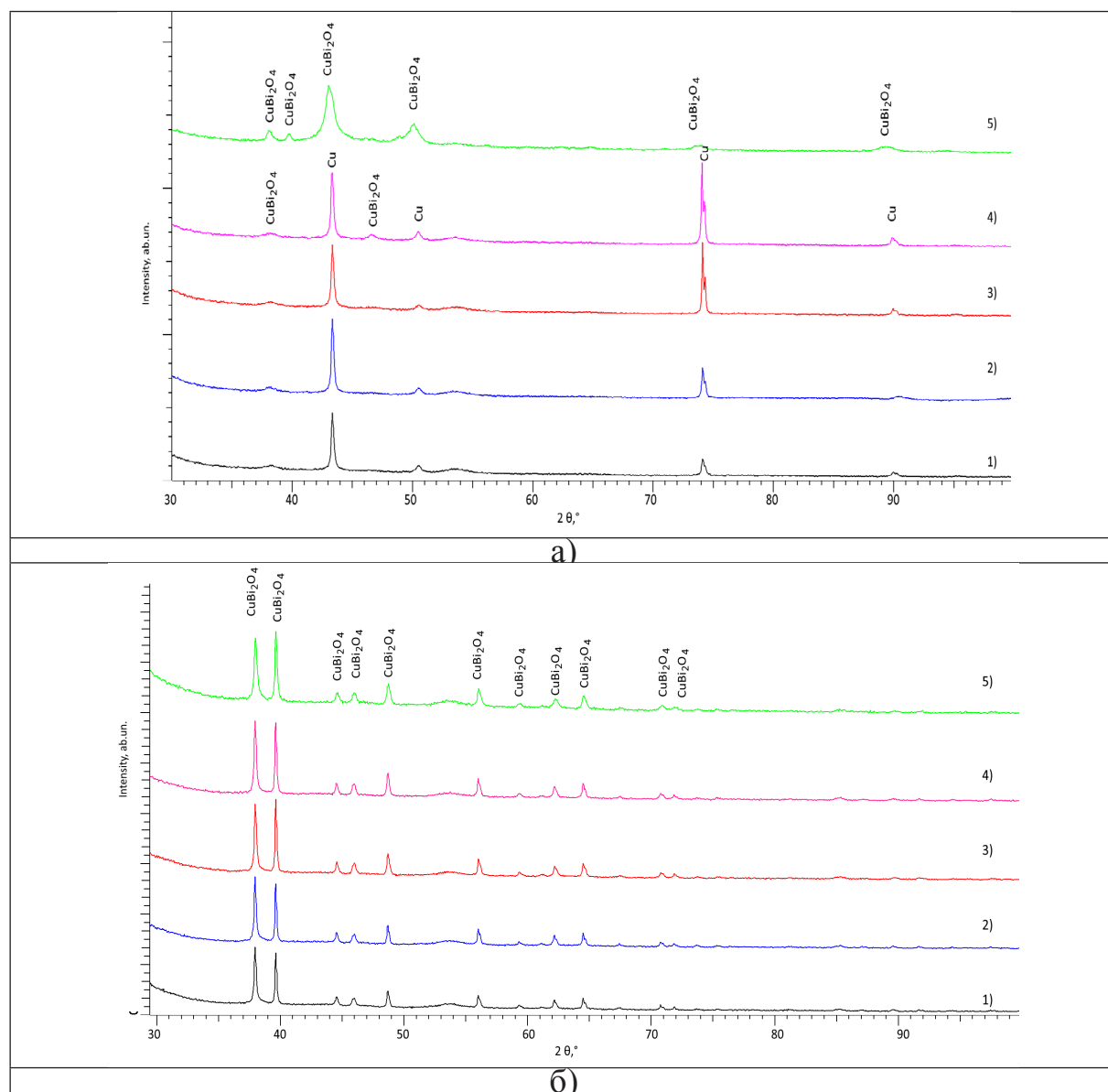
Таблица 1 – Данные изменения элементного состава CuBi_2O_4 и $\text{Cu}(\text{Co},\text{Ni})\text{Bi}_2\text{O}_4$ пленок, полученных из разных растворов – электролитов

Элемент	Раствор – электролит №1				
	Разность прикладываемых потенциалов, В				
	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Cu, ат. %	93.4±1.4	87.5±1.3	83.2±1.1	73.4±1.4	21.2±0.6
Bi, ат. %	6.6±0.5	12.5±0.8	14.3±0.9	21.2±0.8	35.3±1.1
O, ат. %	-	-	2.5±0.2	5.4±0.4	43.5±1.2
Характерная фаза, согласно данным рентгеновской дифракции	Кубическая фаза Cu(Bi), характерная для пленок с большим содержанием меди в составе			Тетрагональная фаза CuBi ₂ O ₄ , образующаяся в результате увеличения содержания висмута в составе пленок	
Элемент	Раствор – электролит №2				
	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Cu, ат. %	19.7±0.3	16.6±0.5	15.5±0.5	13.3±0.3	13.0±0.5
Co, ат. %	7.7±0.2	12.2±0.7	14.3±0.3	18.9±0.7	22.3±0.9
Bi, ат. %	27.8±0.9	27.9±0.9	28.1±0.6	28.2±1.1	29.2±1.2
O, ат. %	44.8±1.6	43.3±1.5	42.1±1.6	39.6±1.2	35.5±1.5
Характерная фаза, согласно данным рентгеновской дифракции	Тетрагональная фаза CuBi ₂ O ₄ с измененными структурными параметрами, обусловленными эффектами замещения меди кобальтом, что, в свою очередь, приводит к структурному упорядочению фазы при изменении разности прикладываемых потенциалов				
Элемент	Раствор – электролит №3				
	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Cu, ат. %	19.8±1.1	19.0±0.8	16.9±0.6	12.3±0.4	10.2±0.6
Ni, ат. %	6.5±0.3	10.2±0.6	13.2±0.7	17.9±0.6	19.8±0.7
Bi, ат. %	28.4±0.9	29.6±0.9	29.5±1.2	29.8±1.1	30.4±0.9
O, ат. %	45.3±1.5	41.2±1.1	40.4±0.9	40.0±0.8	39.6±1.1
Характерная фаза, согласно данным рентгеновской дифракции	Рентгеноаморфные пленки, характерные для структур, состоящих из малых частиц, не имеющих структурного упорядочения		Тетрагональная фаза CuBi ₂ O ₄ с измененными структурными параметрами, обусловленными эффектами замещения меди никелем		

Согласно данным, представленным в таблице 1, в случае использования раствора – электролита №1 (без добавления сульфата кобальта или никеля) вариация разности прикладываемых потенциалов с 2.0 до 4.0 В приводит к существенным изменениям элементного состава, изменение которого обуславливает процессы фазообразования в пленках. При малых разнос-

тых прикладываемых потенциалов (2.0–3.0 В) доминирующую роль в составе пленок играет содержание меди (более 80 ат. %), при этом анализ данных рентгеновской дифракции, представленной на рисунке 1, свидетельствует о доминировании кубической фазы Cu в составе пленок. В случае же увеличения разности прикладываемых потенциалов выше 3.0 В структура пленок представлена композитом из двух фаз: кубической фазы Cu и тетрагональной фазы CuBi_2O_4 , формирование которой происходит за счет увеличения содержания висмута в составе пленок, осаждение которого сопровождается также внедрением кислорода в состав пленок в большом количестве (более 40%), наличие которого также обуславливает возможность формирования тетрагональной фазы CuBi_2O_4 .

При использовании раствора – электролита №2 (содержащего в себе сульфат кобальта) во всем рассматриваемом диапазоне разностей прикладываемых потенциалов (от 2.0 В до 4.0 В) наблюдается формирование хорошо упорядоченной тетрагональной фазы CuBi_2O_4 , из чего можно сделать вывод о том, что при добавлении кобальта в состав инициируется процесс фазообразования при более низких разностях прикладываемых потенциалов, чем в случае использования раствора – электролита №1.



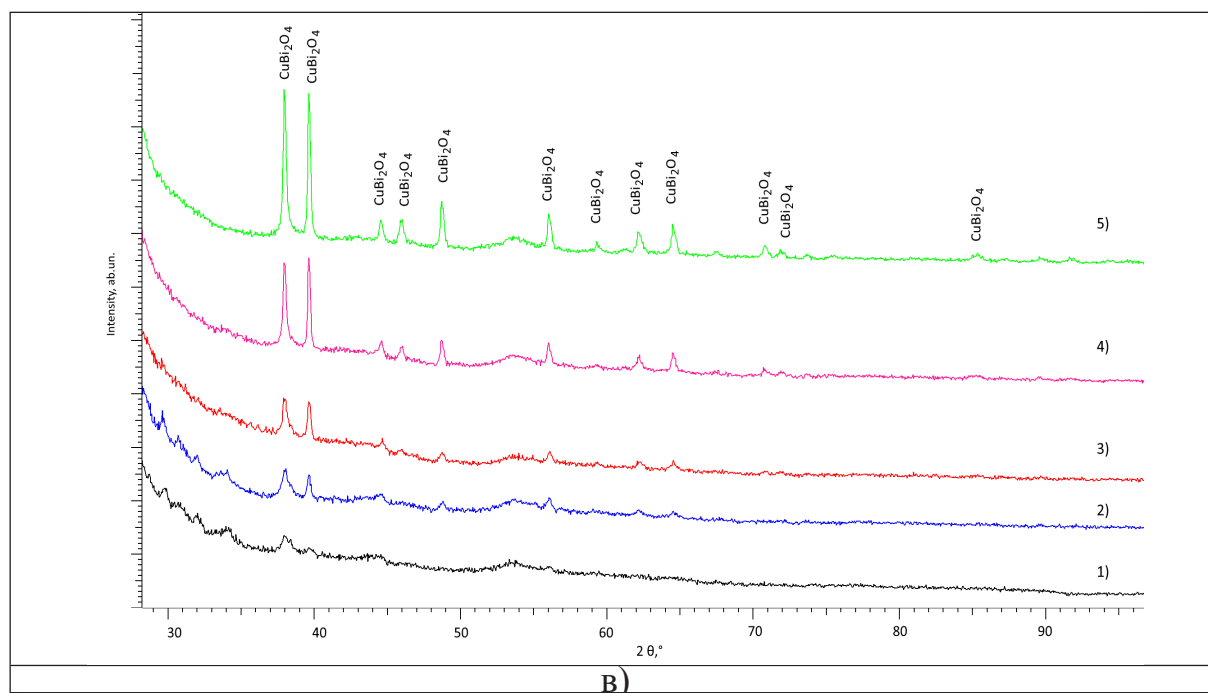


Рисунок 1 – Результаты рентгеновской дифракции исследуемых пленок, полученных при использовании различных растворов – электролитов: а) раствор – электролит №1; б) раствор – электролит №2; в) раствор – электролит №3 (цифрами на рентгеновских дифрактограммах обозначена разность прикладываемых потенциалов, при которых они были получены: 1) 2.0 В; 2) 2.5 В; 3) 3.0 В; 4) 3.5 В; 5) 4.0 В)

При анализе рентгеновских дифрактограмм исследуемых образцов пленок в зависимости от условий их получения, включающих вариацию растворов – электролитов, а также разности прикладываемых потенциалов были определены основные фазовые изменения в образцах. Краткая характеристика изменений фазового состава пленок представлена в таблице 1. Анализ рентгеновских дифрактограмм исследуемых пленок показал, что добавление в состав электролита сульфата кобальта вне зависимости от разности прикладываемых потенциалов приводит к формированию упорядоченной фазы CuBi_2O_4 , в то время как использование раствора – электролита с добавлением сульфата никеля при малых разностях потенциалов приводит к формированию рентгеноаморфных пленок, а при разностях потенциалов выше 3.0 В – к формированию хорошо упорядоченной фазы CuBi_2O_4 .

Касательно однородности распределения элементов никеля и кобальта в составе пленок. В ходе экспериментов по определению изотропности распределения элементов в составе пленок с применением метода картирования было установлено, что изменение разности потенциалов приводит к увеличению содержания концентрации никеля и кобальта в составе пленок, в то время как однородность распределения сохраняется во всем объеме. При этом увеличение концентрации никеля и кобальта, согласно представленным данным элементного состава, приводит к уменьшению содержания кислорода в составе пленок, что также может способствовать увеличению устойчивости к коррозии пленок.

Результаты и обсуждение

Одним из важных критериев использования пленок или покрытий в промышленности, в частности при использовании их в качестве защитных материалов, является устойчивость к внешним воздействиям, в том числе и к различным агрессивным средам (кислотам или щело-

чам), при взаимодействии с которыми могут происходить процессы деструкции пленок, связанные с окислением (т.е. формированием оксидных включений), приводящим к снижению устойчивости прочностных свойств.

На рисунках 2–4 представлены результаты изменения степени структурного упорядочения исследуемых $\text{CuBi}/\text{CuBi}_2\text{O}_4$ пленок, полученных из различных растворов – электролитов в ходе проведения коррозионных испытаний при различных температурах агрессивной среды. Степень структурного упорядочения (степень кристалличности) оценивалась как соотношение площадей дифракционных рефлексов, характеризующих основные фазы, и площади фонового излучения, характеризующей структурно-неупорядоченные включения в составе пленок, возникающие как в процессе синтеза, так и в результате внешних воздействий. Данные измерения проводились с использованием программного кода DiffracEVA v.4.2, использование которого позволяет проанализировать полученные дифрактограммы и определить величину степени структурного упорядочения. Сравнительный анализ величин степени структурного упорядочения образцов до и после определенного времени выдержки в модельном растворе позволил определить величину структурной деградации при коррозии, которая представляет собой отклонение степени структурного упорядочения от начального значения для каждого исследуемого образца. Скорость коррозии оценивалась на основе изменений степени структурного упорядочения, изменение которой свидетельствует о деградации кристаллической структуры пленок при внешних воздействиях, которые связаны с деформационными искажениями кристаллической структуры, а также ее частичной аморфизации. В данном контексте скорость коррозии является обобщенным параметром, отражающим изменение кристаллической структуры в результате внешних воздействий. Ввиду того, что эксперименты были выполнены на одних и тех же образцах (т.е. измерение степени структурного упорядочения проводилось на образцах в исходном состоянии и последовательно выдержанных определенное время в модельном растворе), общий тренд снижения степени структурного упорядочения позволил определить, насколько деградирует кристаллическая структура пленок в течение времени.

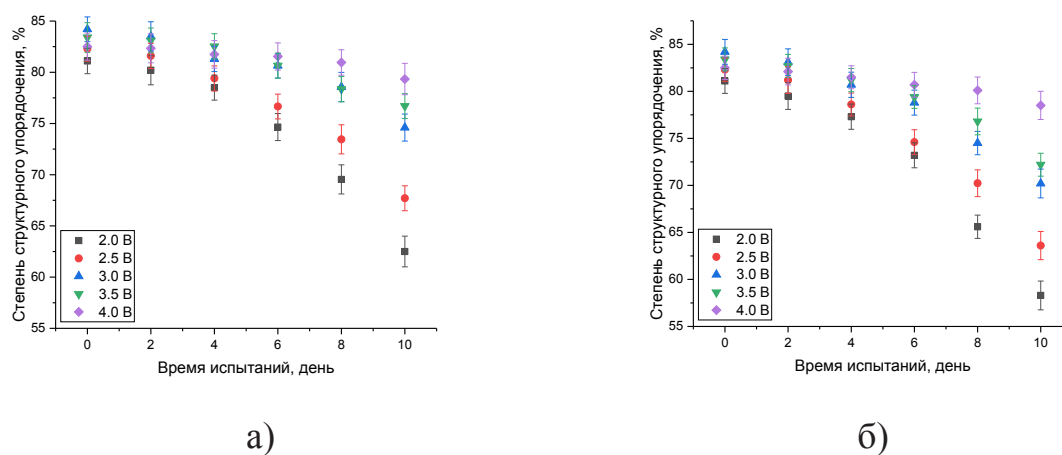


Рисунок 2 – Результаты изменения степени структурного упорядочения (степени кристалличности) $\text{CuBi}/\text{CuBi}_2\text{O}_4$ пленок, полученных из раствора – электролита №1 при коррозионных испытаниях в условиях вариации температуры среды: а) при температуре 25 °C; б) при температуре 50 °C

Как видно из представленных данных, в случае $\text{CuBi}/\text{CuBi}_2\text{O}_4$ пленок, полученных при использовании раствора – электролита №1, в случае, когда в составе пленок доминирует ку-

бическая фаза Cu, наблюдается ускоренная деградация пленок, в особенности после 4–6 дней коррозионных испытаний. Такое поведение CuBi/CuBi₂O₄ пленок обусловлено низкой устойчивостью меди к процессам окисления, которые при длительном нахождении в агрессивной среде сопровождаются формированием оксидных включений в приповерхностном слое, что приводит к ускорению деградации и, как следствие, к снижению степени структурного упорядочения. При этом данные процессы деградации протекают более интенсивно при повышении температуры, что в случае Cu, Cu(Bi) пленок, полученных при разностях потенциалов 2.0 и 2.5 В, приводит к деградации более чем на 20–25% после 10 дней нахождения в агрессивной среде при температуре 50 °С (см. данные на рисунке 5). При этом изменение фазового состава пленок с образованием тетрагональной фазы CuBi₂O₄ приводит к увеличению устойчивости к деградации более чем в 2–2,5 раза, что свидетельствует о положительном влиянии фазовых трансформаций на устойчивость к воздействию агрессивных сред и снижению скорости коррозии пленок более чем в 3,5–4 раза в сравнении с Cu, Cu(Bi) пленками.

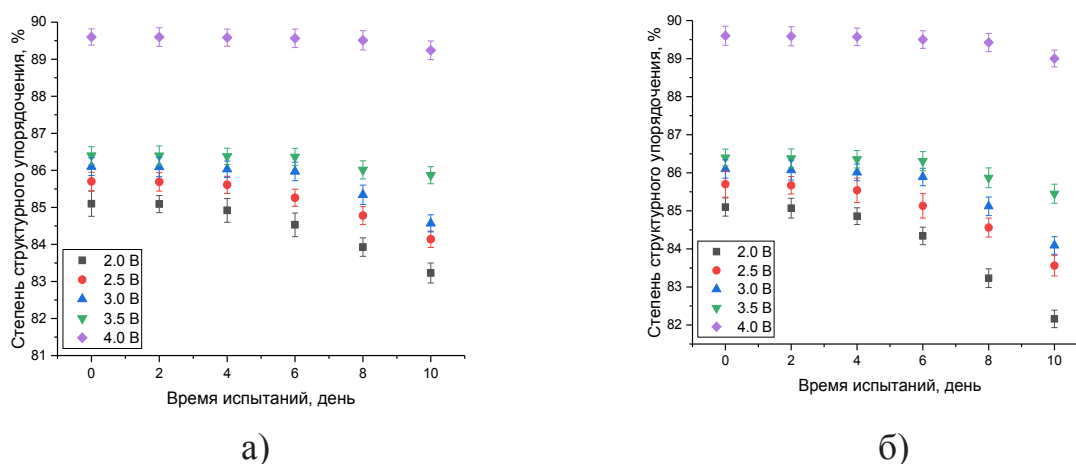


Рисунок 3 – Результаты изменения степени структурного упорядочения (степени кристалличности) CuBi/CuBi₂O₄ пленок, полученных из раствора – электролита №2 при коррозионных испытаниях в условиях вариации температуры среды: а) при температуре 25 °С; б) при температуре 50 °С

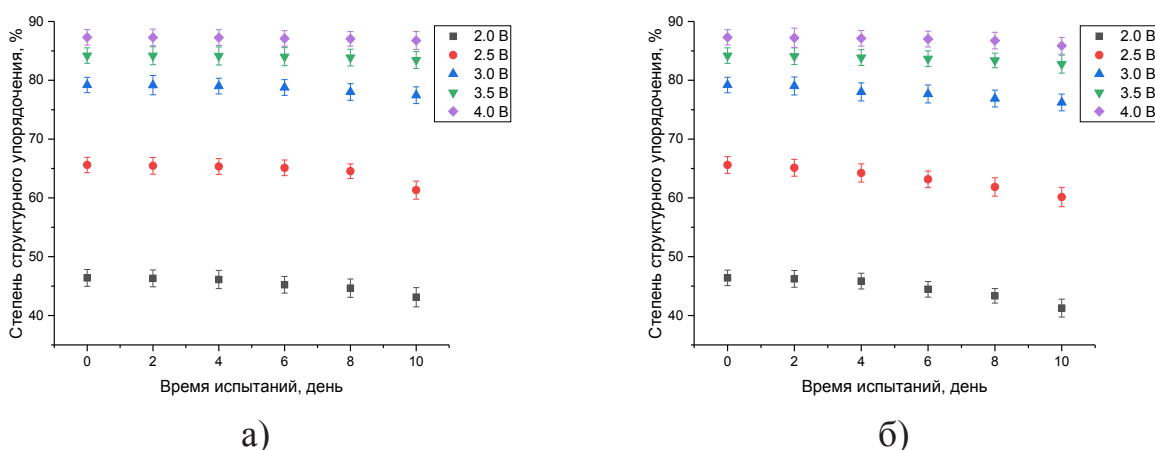


Рисунок 4 – Результаты изменения степени структурного упорядочения (степени кристалличности) CuBi/CuBi₂O₄ пленок, полученных из раствора – электролита №3 при коррозионных испытаниях в условиях вариации температуры среды: а) при температуре 25 °С; б) при температуре 50 °С

Изменение элементного состава $\text{CuBi/CuBi}_2\text{O}_4$ пленок за счет замещения меди кобальтом или никелем в составе пленок, полученных при использовании растворов – электролитов №2 и №3, приводит к увеличению стабильности сохранения степени структурного упорядочения пленок в агрессивной среде вне зависимости от температуры среды (максимальное изменение степени структурного упорядочения при изменении температуры среды составляет не более чем 1,5–2,0%). При этом для $\text{CuBi/CuBi}_2\text{O}_4$ пленок, полученных из растворов – электролитов №2 и №3, снижение степени структурного упорядочения наблюдается после 6–8 дней, что также свидетельствует об увеличении устойчивости к коррозии.

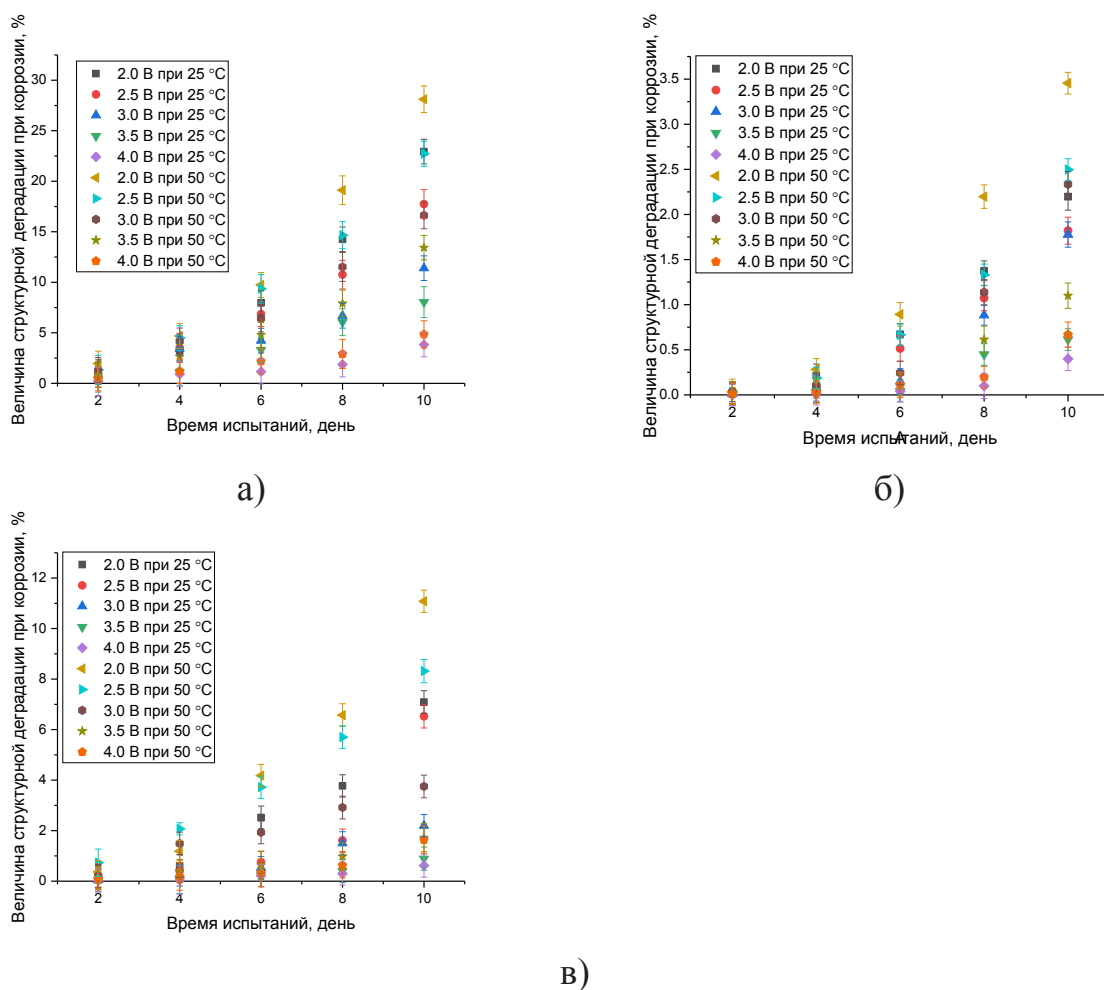


Рисунок 5 – Результаты оценки степени структурной деградации пленок в зависимости от времени нахождения в агрессивной среде, а также вариации температуры среды:
а) $\text{Cu(Bi)/CuBi}_2\text{O}_4$ пленки; б) $\text{Cu(Co)Bi}_2\text{O}_4$ пленки; в) $\text{Cu(Ni)Bi}_2\text{O}_4$ пленки

На рисунке 6 (стр. 291) представлены результаты оценки степени разупрочнения (изменения твердости образцов пленок) в зависимости от условий проведения коррозионных испытаний (при вариации температуры среды).

Общая тенденция изменений степени разупрочнения свидетельствует о прямом влиянии степени деградации кристаллической структуры на снижение твердости пленок, которое наиболее проявлено для Cu , Cu(Bi) пленок, полученных из раствора – электролита №1, при разностях прикладываемых потенциалов 2.0 и 2.5 В. В случае $\text{Cu(Co)Bi}_2\text{O}_4$ и $\text{Cu(Ni)Bi}_2\text{O}_4$ пленок, полученных из растворов – электролитов №2 и №3, снижение твердости (степени разупроч-

нения) составляет порядка 3–4% после 10 дней испытаний, что более чем в 2,0–2,5 раза ниже, чем значения степени разупрочнения для Cu, Cu(Bi) пленок.

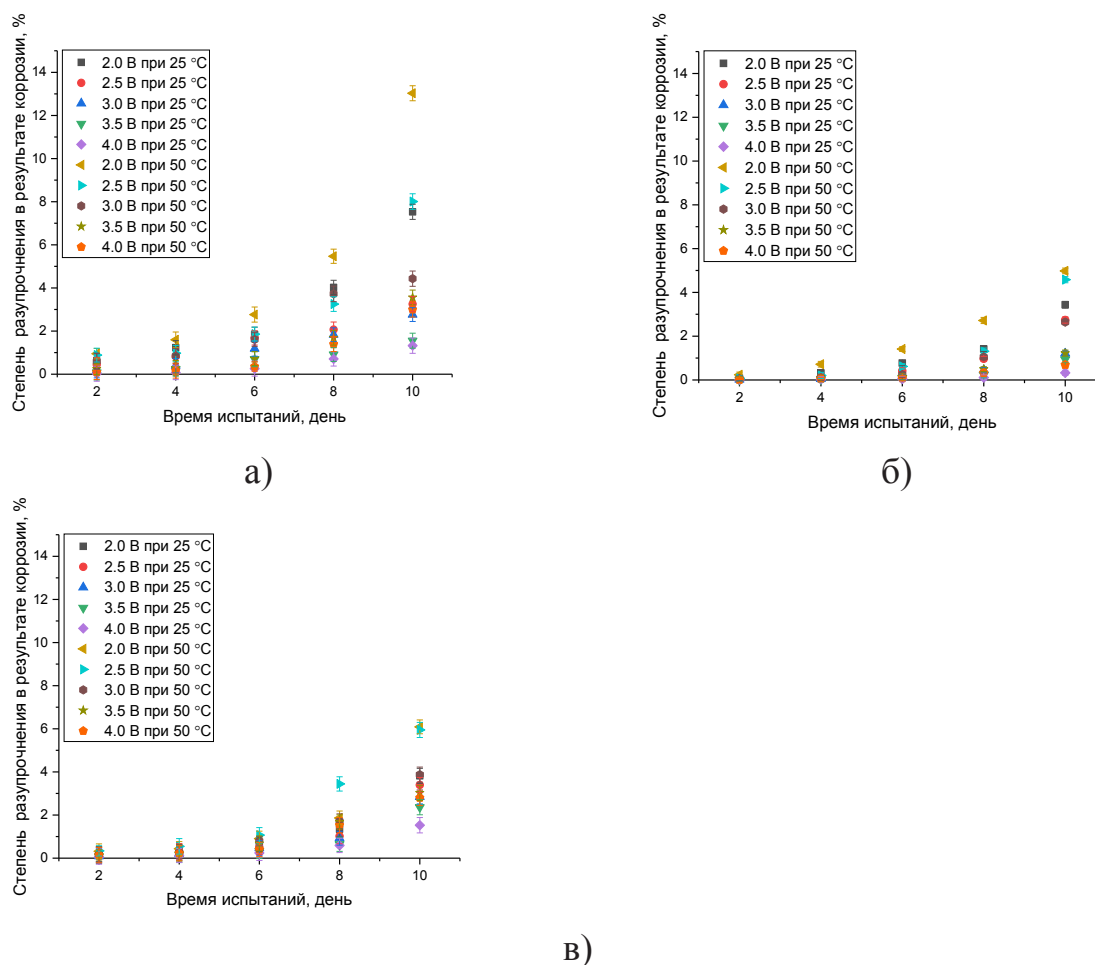


Рисунок 6 – Результаты оценки изменения степени разупрочнения пленок в зависимости от времени нахождения в агрессивной среде, а также вариации температуры среды:
а) Cu(Bi)/CuBi₂O₄ пленки; б) Cu(Co)Bi₂O₄ пленки; в) Cu(Ni)Bi₂O₄ пленки

Таким образом, анализируя полученные данные, можно сделать вывод о положительном влиянии эффекта замещения меди кобальтом или никелем в составе CuBi₂O₄ пленок на повышение устойчивости к воздействию агрессивной среды, которое сопровождается процессами коррозии и деградации. Увеличение устойчивости к коррозии для Cu(Co)Bi₂O₄ и Cu(Ni)Bi₂O₄ пленок обусловлено в первую очередь увеличением степени структурного упорядочения в исходном состоянии, которое наиболее проявлено для Cu(Co)Bi₂O₄ пленок. При этом замещение меди кобальтом или никелем, в свою очередь, приводит к повышению сопротивляемости к окислению и образованию областей разупорядочения в приповерхностном слое пленок, наличие которых характерно для медесодержащих структур и связано с образованием оксидных и гидроксидных пленок. При этом наличие областей разупорядочения (обусловленных процессами синтеза пленок) также способствует ускорению процессов деградации для Cu, Cu(Bi) пленок, однако в случае формирования двухфазных пленок Cu/CuBi₂O₄ наблюдается увеличение сопротивляемости к окислению за счет наличия межфазных границ, препятствующих распространению коррозии в глубь пленок. Под определением сопротивляемость к окислению в данном контексте подразумевалось увеличение устойчивости кристаллической структуры

пленок к деградации и снижению степени структурного упорядочения за счет деформации кристаллической структуры и образованию разупорядоченных включений.

Заключение

В работе представлены результаты оценки влияния изменения элементного состава CuBi_2O_4 пленок путем частичного замещения меди кобальтом или никелем, обусловленного процессами электрохимического осаждения, на устойчивость пленок к процессам деградации и коррозии при взаимодействии с агрессивными средами.

Опираясь на данные изменений степени структурного упорядочения (степени кристалличности) синтезированных пленок в зависимости от условий нахождения в агрессивной среде (в случае вариации температуры среды и времени нахождения в ней), было установлено, что наименьшей стабильностью к коррозионной деградации обладают Cu , $\text{Cu}(\text{Bi})$ пленки, в то время как формирование фазы CuBi_2O_4 в пленках, а также при частичном замещении меди никелем и кобальтом наблюдается увеличение устойчивости к коррозии более чем в 2,0–4 раза.

В ходе проведенных исследований было показано, что частичное замещение меди в составе CuBi_2O_4 пленок приводит к увеличению сопротивляемости к коррозии и процессам окисления как при комнатной температуре модельного раствора 0.1 M NaCl, так и при температуре 50 °C.

При оценке изменений прочностных параметров пленок в зависимости от условий нахождения их в агрессивной среде было установлено, что частичное замещение меди никелем и кобальтом приводит к снижению скорости деградации прочностных свойств более чем в 2,0–2,5 раза после 10 дней испытаний в сравнении с аналогичными параметрами для Cu , $\text{Cu}(\text{Bi})$ пленок.

Результаты, показывающие влияние эффекта замещения меди никелем или кобальтом в составе CuBi_2O_4 пленок, приводящие к увеличению устойчивости пленок к коррозии, в дальнейшем могут быть использованы при определении механизмов повышения устойчивости пленок и покрытий к внешним воздействиям. При этом полученные зависимости скоростей деградации пленок в ходе коррозионных испытаний могут быть использованы для определения потенциала применимости данных пленок в качестве защитных антикоррозионных покрытий.

Исследование выполнено в рамках грантового финансирования при поддержке МНВО РК AP14871152 «Синтез $\text{CuBi}/\text{CuBi}_2\text{O}_4$ пленок – перспективных материалов для создания защитных покрытий от электромагнитного и ионизирующего излучения».

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Choi Y.J. et al. (2013) Characteristics of the electromagnetic interference shielding effectiveness of Al-doped ZnO thin films deposited by atomic layer deposition. *Applied Surface Science*, vol. 269, pp. 92–97.
- 2 Yamada T. et al. (2008) Application of low resistivity Ga-doped ZnO films to transparent electromagnetic interference shielding material. *Thin Solid Films*, vol. 517, no. 3, pp. 1027–1031.
- 3 Kang K.M. et al. (2021) Al/F codoping effect on the structural, electrical, and optical properties of ZnO films grown via atomic layer deposition. *Applied Surface Science*, vol. 535, p. 147734.
- 4 Xia C. et al. (2016) Natural fiber composites with EMI shielding function fabricated using VARTM and Cu film magnetron sputtering. *Applied Surface Science*, vol. 362, pp. 335–340.
- 5 Han E.G., Kim E.A., Oh K.W. (2001) Electromagnetic interference shielding effectiveness of electroless Cu-plated PET fabrics. *Synthetic metals*, vol. 123, no. 3, pp. 469–476.
- 6 Li R. et al. (2021) Enhancement of electromagnetic interference shielding from the synergism between Cu@ Ni nanorods and carbon materials in flexible composite films. *Materials Advances*, vol. 2, no. 2, pp. 718–727.

- 7 Chandrika B.M. et al. (2023) Green synthesis and characterization of dibismuth zinc oxide diborate nano particle as a good candidate for radiation shielding applications. *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 938, p. 168600.
- 8 Zarei M., Sina S., Hashemi S.A. (2021) Superior X-ray radiation shielding of biocompatible platform based on reinforced polyaniline by decorated graphene oxide with interconnected tungsten–bismuth–tin complex. *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 188, p. 109588.
- 9 Zarei M., Sina S., Hashemi S.A. (2021) Superior X-ray radiation shielding of biocompatible platform based on reinforced polyaniline by decorated graphene oxide with interconnected tungsten–bismuth–tin complex. *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 188, p. 109588.
- 10 Al-Balushi M.A. et al. (2021) Ionization Radiation Shielding Effectiveness of Lead Acetate, Lead Nitrate, and Bismuth Nitrate-Doped Zinc Oxide Nanorods Thin Films: A Comparative Evaluation. *Materials*, vol. 15, no 1, pp. 3–18.
- 11 Maksoud M. I. A. A. et al. (2021) Gamma radiation shielding properties of poly (vinyl butyral). Bi2O3@ BaZrO3 nanocomposites. *Materials Chemistry and Physics*, vol. 268, p. 124728.
- 12 Zhang T. et al. (2022) Spatially confined Bi2O3–Ti3C2Tx hybrids reinforced epoxy composites for gamma radiation shielding. *Composites Communications*, vol. 34, p. 101252.
- 13 Eyssa H.M. et al. (2023) Structure-property behavior of polyethylene nanocomposites containing Bi2O3 and WO3 as an eco-friendly additive for radiation shielding. *Ceramics International*, vol. 49, no. 11, pp. 18442–18454.
- 14 Maghrabi H.A. et al. (2016) Bismuth oxide-coated fabrics for X-ray shielding. *Textile Research Journal*, vol. 86, no. 6, pp. 649–658.
- 15 Malothu R. et al. (2021) Combination of Copper Bismuth Oxide (CuBi2O4) and Polymer Composites from Plastic Waste: A Boon for EMF Shielding. *i-Manager's Journal on Future Engineering and Technology*, vol. 16, no. 4, p. 11.
- 16 Cáceres L., Vargas T., Herrera L. (2009) Influence of pitting and iron oxide formation during corrosion of carbon steel in unbuffered NaCl solutions. *Corrosion science*, vol. 51, no. 5, pp. 971–978.

^{1,2}**Идинов М.Т.,**

PhD докторант, e-mail: idinov_medet@list.ru

^{3,4*}**Козловский А.Л.,**

PhD, ORCID ID 0000-0001-8832-7443, e-mail: kozlovskiy.a@inp.kz

¹**Касымов А.Б.,**

PhD, қауымдастырылған профессор м.а., ORCID ID: 0000-0002-1983-6508,

e-mail: kassymov.asb@gmail.com

⁵**Градобоев А.В.,**

т.ғ.д., профессор, ORCID ID: 0000-0002-2803-5972, e-mail: gradoboev1@mail.ru

¹«Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті» КЕАҚ,

071412, Семей қ., Қазақстан

²«Nucmed» ЖШС, 070000, Семей қ., Қазақстан

³ҚР ЭМ Ядролық физика институты, 050000, Алматы қ., Қазақстан

⁴Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті КЕАҚ,

010008, Астана қ., Қазақстан

⁵Томск политехникалық ұлттық зерттеу университеті, 634050, Томск қ., Ресей

АГРЕССИВТІ ОРТА ӘСЕРІНЕН $\text{Cu}(\text{CO}, \text{Ni})\text{Bi}_2\text{O}_4$ ҚАБЫҚШАЛАРЫНЫҢ КОРРОЗИЯҒА ТӨЗІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа

Жұмыста электрохимиялық тұндыру әдісімен алынған CuBi_2O_4 қабықшаларының құрамындағы мыс-ты кобальтпен және никельмен алмастырудың әсері зерттеледі. Ауыстыру күкірт қышқылы ерітіндісіне – электролитке кобальт немесе никель сульфаттарын қосу арқылы басталды, бұл CuBi_2O_4 фазасына тән кристалдық тордың тетрагональды түрі бар қабыршақтарды алуға мүмкіндік берді. Сонымен қатар

пленкалардың құрылымдық параметрлері мен элементтік құрамының өзгерістерін талдау электролитке никель мен кобальт сульфаттарын қосу ішінара алмастыру түріне сәйкес тетрагональды фазаның түзілуіне әкелетінін көрсетті. электролит ерітіндісінің құрамына байланысты мысты никельмен немесе кобальтпен алмастыру. Сыртқы әсерлер кезінде қабықшаның ыдырау процестерін модельдеу барысында қоршаған ортаның әртүрлі температураларында 0,1 М NaCl үлгі ерітіндісінің агрессивті ортасындағы CuBi_2O_4 қабықшаларының коррозияға сынау нәтижелері алынды. Агрессивті ортада өткізілетін уақытқа байланысты зерттелетін пленкалардың құрылымдық реттілік дәрежесі мен жұмсарту дәрежесінің өзгеруінің тәуелділіктері анықталды. Мысты кобальтпен немесе никельмен алмастыру зерттелетін пленкалардың деградацияға және тотығуға төзімділігінің жоғарылауына әкелетіні анықталды, бұл агрессивті ортамен байланыста болған кезде пленка бетінің деградация жылдамдығының төмендеуіне әкелетін алмастырудың оң әсерін көрсетеді.

Тірек сөздер: жұқа қабықшалар, электрохимиялық синтез, коррозияға қарсы жабындар, CuBi_2O_4 , құрылымдық бұзылулар.

^{1,2}**Idinov M.T.,**

PhD student, e-mail: idinov_medet@list.ru

^{3,4*}**Kozlovskiy A.L.,**

PhD, ORCID ID 0000-0001-8832-7443, e-mail: kozlovskiy.a@inp.kz

¹**Kasymov A.B.,**

PhD, acting associate professor, ORCID ID: 0000-0002-1983-6508,
e-mail: kassymov.asb@gmail.com

⁵**Gradoboev A.V.,**

Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID ID: 0000-0002-2803-5972,
e-mail: gradoboev1@mail.ru

¹NJSC «Shakarim University of Semey», 071412, Semey, Kazakhstan

²«Nucmed» LLP, 070000, Semey, Kazakhstan

³Institute of Nuclear Physics ME RK, 050000, Almaty, Kazakhstan

⁴NJSC L.N. Gumilyov Eurasian National University, 010008, Astana, Kazakhstan

⁵National Research Tomsk Polytechnic University, 634050, Tomsk, Russia

STUDY OF THE CORROSION RESISTANCE OF $\text{Cu}(\text{Co,Ni})\text{Bi}_2\text{O}_4$ FILMS WHEN EXPOSED TO AGGRESSIVE ENVIRONMENTS

Abstract

The work examines the effect of substitution of copper with cobalt and nickel in the composition of CuBi_2O_4 films obtained using the electrochemical deposition method. The substitution was initiated by addition of cobalt or nickel sulfates to the sulfuric acid electrolyte solution, which made it possible to obtain films with a tetragonal type of crystal lattice characteristic of the CuBi_2O_4 phase. Moreover, an analysis of the structural parameters and changes in the elemental composition of the films showed that the addition of nickel and cobalt sulfates to the electrolyte leads to the formation of a tetragonal phase according to the type of substitution associated with the partial replacement of copper by nickel or cobalt, depending on the composition of the electrolyte solution. During simulation of the film degradation processes under external influences, the results of corrosion tests of CuBi_2O_4 films in the aggressive environment of a model solution of 0.1 M NaCl at different ambient temperatures were obtained. The dependences of changes in the structural ordering degree and the softening degree of the films under study were determined depending on the time spent in an aggressive environment. The substitution of copper with cobalt or nickel has been found to increase the resistance of the studied films to degradation and oxidation, indicating a positive substitution effect, reducing the degradation rate of the surface of the films in contact with the aggressive medium.

Key words: thin films, electrochemical synthesis, anti-corrosion coatings, CuBi_2O_4 , structural disorder.

МҰНАЙ ГАЗ ИНЖЕНЕРИЯСЫ ЖӘНЕ ГЕОЛОГИЯ
OIL AND GAS ENGINEERING, GEOLOGY
НЕФТЕГАЗОВАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ГЕОЛОГИЯ

УДК 504.3.054
МРНТИ 87.17.15

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-295-306>

¹**Кожагулов С.О.**,
докторант, ORCID ID:0009-0005-4428-5129, e-mail: s_kozhagulov@mail.ru

¹**Сальников В.Г.**,
докт. географ. наук, профессор, ORCID ID:0000-0003-3392-4587,
e-mail: Vitali.Salnikov@kaznu.edu.kz

^{1*}**Байдаулетова Г.К.**,
ORCID ID:0000-0002-2595-8106, *e-mail: carlugast69@gmail.com

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

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ
АТМОСФЕРЫ РЕГИОНОВ ЗАПАДНОГО КАЗАХСТАНА

Аннотация

В статье проведен сравнительный анализ атмосферных выбросов на территории Западного Казахстана. Результаты анализа выбросов загрязняющих веществ в атмосферу Западно-Казахстанского региона показывают, что на исследуемой территории достаточно много источников, выбросы которых формируют высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха на большей части региона. В разрезе видов экономической деятельности показано, что основная доля выбросов принадлежит предприятиям нефтегазодобывающей и химической отрасли промышленности. Рассчитанные показатели выбросов, характеризующие уровни загрязнения атмосферы в пересчете на единицу площади, душу населения, а также интегральные коэффициенты показали, что вклад областей в общие выбросы атмосферных загрязнений неравнозначен. Так, на Атыраускую и Актыбинскую области приходится основная доля (36,6% и 35,4% соответственно) от общего количества выбросов. На территории Западного Казахстана осуществляется улавливание только твердых частиц, выбрасываемых в атмосферу преимущественно в промышленной зоне, доля улавливания газообразных веществ незначительная, на большей части территории региона очистные сооружения отсутствуют. Проведенная работа способствует дальнейшей оценке экологического состояния атмосферы крупных промышленных регионов страны. Результаты анализа источников и уровней загрязнения позволяют определить приоритетные направления для снижения атмосферных выбросов, а также разработать стратегии и программы по экологической безопасности и устойчивому развитию в регионе Западного Казахстана.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, стационарные источники загрязнения, Западный Казахстан, интегральный коэффициент загрязнения атмосферы.

Введение

Регион Западного Казахстана, включающий Актюбинскую, Западно-Казахстанскую, Атыраускую и Мангистаускую области, является мировым лидером по запасам хрома, его объемы превышают 400 млн тонн. Около 98% всех разведанных запасов газа сосредоточено на западе Казахстана (3,3 трлн м³), а также более 87% крупных нефтегазовых (Тенгиз, Кашаган, Королевское, Жанажол) и нефтегазоконденсатных (Карачаганак, Имашевское) месторождений [1]. Кроме того, в регионе содержится 40% общереспубликанских запасов титана и 55% никеля, 30% прогнозных запасов углеводородного сырья, а также сосредоточены крупные месторождения золота, серебра, меди, цинка, кобальта, каолина, фосфоритов, нефтебитумных пород и сырья для производства строительных материалов [2]. В ближайшие годы ожидается рост добычи углеводородного сырья компаниями «Тенгизшевройл» (ТШО) и «North Caspian Operating Company» (NCOC) на месторождениях Тенгиз и Кашаган до 60 млн и 39 млн тонн нефти в год соответственно [1].

Вместе с тем Западный Казахстан, обладая богатыми природными ресурсами и развитой промышленностью, сталкивается с вызовами, связанными с сохранением экологического равновесия. Промышленные комплексы, энергетика и транспорт, являясь неотъемлемой частью региональной экономики, формируют источники выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Сбалансированное использование экономического и природно-ресурсного потенциалов территорий должно быть направлено на соблюдение экологического равновесия, устойчивое развитие природных экосистем и их воспроизводство [3]. В настоящее время глобальная экологическая политика имеет четкую цель обеспечить устойчивое развитие, одной из главных целей которого является сохранение, восстановление и эффективное использование компонентов природной среды. Изучение этих проблем и поиск путей их разрешения в рамках достижения углеродной нейтральности, обязательств в Парижском климатическом соглашении – актуальная задача обеспечения устойчивого развития для каждой страны, включая Казахстан [4, 5]. В нефтедобывающих регионах мира отмечается загрязнение атмосферного воздуха, поверхностных и подземных водоисточников, почвенных покровов, наблюдается гибель растительного и животного мира, наносится значительный вред здоровью местного населения. Все эти изменения могут привести к нарушению экосистемы в районах добычи, переработки и транспортировки нефти [6].

В индустриально развитых странах оптимальным сочетанием уровня атмосферного загрязнения и степени защиты от него является система управления качеством атмосферного воздуха, основанная на учете экологических и экономических приоритетов.

Атмосферный воздух больше, чем другие природные объекты, связан с жизненными интересами людей, его качество непосредственно влияет на их здоровье и состояние других объектов окружающей среды. Интерпретация данных по выбросам в атмосферу требует комплексного подхода, включая технические, экологические, медицинские и социальные аспекты. Пространственный анализ загрязнения атмосферного воздуха позволяет выявить источники загрязнения и имеет решающее значение для управления качеством воздуха и оценки эффективности принимаемых управленческих решений. При этом важно учитывать многообразие факторов, влияющих на качество воздуха и состояние окружающей среды, а также проводить постоянный мониторинг и корректировать разработанные стратегии управления качеством воздуха.

Цель настоящего исследования: провести сравнительный анализ загрязнения воздушного бассейна Западного Казахстана.

Материалы и методы

Материалы для анализа загрязнения атмосферного воздуха взяты из ежегодных информационных бюллетеней о состоянии окружающей среды РК за 2017–2022 гг. [1–3]. Информация формируется по итогам общегосударственного статистического наблюдения по форме 2-ТП воздух (годовая) в виде показателей в соответствии с установленными требованиями [7, 8]. Анализ полученных данных важен для отслеживания динамики изменений и эффективности принимаемых мер.

Интегральный коэффициент загрязнения ($K_{атм}$) для всех районов Западного Казахстана рассчитывался по следующей формуле:

$K_{атм} = A / \sqrt{S \times N}$, где:

A – выбросы в атмосферу вредных веществ, тыс. тонн;

S – площадь территории, тыс. км²;

N – среднегодовая численность населения, тыс. человек [9, 10].

Результаты и обсуждение

В 2022 г. суммарные выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников в Западном Казахстане составили 373,1 тыс. т., или на 6,8% меньше, чем в 2021 г. Согласно данным РГП «Казгидромет», уровень загрязнения атмосферного воздуха в 2021 г. в четырех изучаемых областях по показателям «стандартный индекс» (СИ) и «наибольшая повторяемость» (НП) оценивался как очень высокий, высокий и повышенный [1]. Под выбросами в атмосферу загрязняющих веществ, представленными на рисунке 1, понимается поступление в атмосферный воздух загрязняющих веществ от стационарных источников выбросов (организованных и неорганизованных). Причем к стационарным организованным источникам отнесены неподвижные источники, от которых загрязняющие вещества поступают через системы газоотходов и воздухоотводов (дымовые трубы, аэрационные фонари, вентиляционные шахты и др.). Вклад областей в общие выбросы атмосферных загрязнений неравнозначен. Основные объемы загрязняющих веществ были сформированы в более промышленно развитых регионах – Атырауской и Актюбинской областях, на долю которых приходится 36,6% и 35,4% соответственно. Выбросы загрязняющих веществ в Мангистауской области в 2022 г. составляли 78,7 тыс.т. (21,09% от общих выбросов), а минимальные объемы загрязняющих веществ наблюдались в Западно-Казахстанской области – 25,79 тыс.т. (6,9% от общих выбросов). Различие в объемах выбросов обусловлено неодинаковым количеством источников загрязнения в рассматриваемых регионах, а также отличием в характере рассеивания примесей в атмосфере [3]. Так, за 2022 г. зарегистрировано стационарных источников:

- ♦ в Атырауской области – 27 017 единиц;
- ♦ в Актюбинской области – 20 715 единиц;
- ♦ в Мангистауской области – 28 304 единицы;
- ♦ в Западно-Казахстанской области – 11 747 единиц.

Следует отметить, что за 2020–2022 гг. наблюдается увеличение их числа во всех регионах Западного Казахстана [1]. Это, очевидно, связано с систематизацией источников выбросов с установлением предельно допустимых выбросов (ПДВ) в соответствии с Экокодексом РК (2021) [11]. Согласно Экологическому кодексу в Казахстане разработаны нормативы предельно допустимых и временно согласованных выбросов (ПДВ и ВСВ) для стационарных источников [12–13]. Вместе с тем сложилась такая практика, при которой природопользователи, стремясь учесть изменчивость выбросов на будущий период, завышают нормативы выбросов с целью минимизации рисков нарушения ПДВ. Кроме того, ПДВ могут определяться на основании проектной мощности технологического оборудования, тогда как в действительности

очень часто предприятия не работают на полную мощность. Все это не создает достаточной мотивации для сокращения имеющегося уровня выбросов.

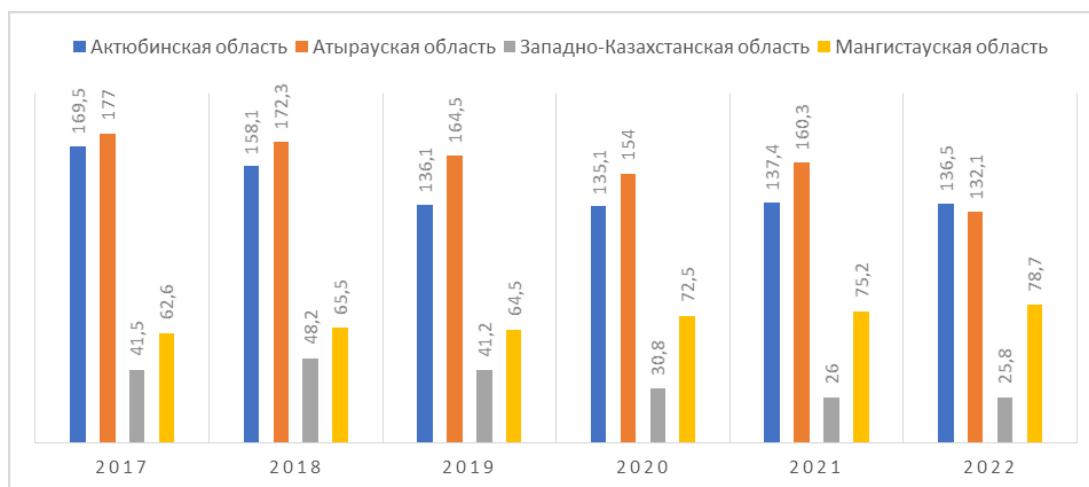


Рисунок 1 – Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников (тыс.т.) в Западном Казахстане за 2017–2022 гг.

Примечание: Составлено авторами на основании материалов [1–3].

Для характеристики пространственного размещения атмосферных выбросов был рассчитан объем атмосферных выбросов в пересчете на единицу площади. На рисунке 2 представлены в сравнении выбросы загрязняющих веществ в атмосферу в Западном Казахстане на единицу площади за 2017–2022 гг. Согласно им в 2022 г. этот показатель ниже, чем в среднем по Казахстану (0,51 и 0,85т/км² соответственно). Однако данный показатель существенно выше только в Атырауской области как в 2022 г. – 1,11 т/км², так и по всем рассматриваемым годам. Наименьший уровень выбросов наблюдается в Западно-Казакштанской области (за 2022 г. – 0,17 т/км²).

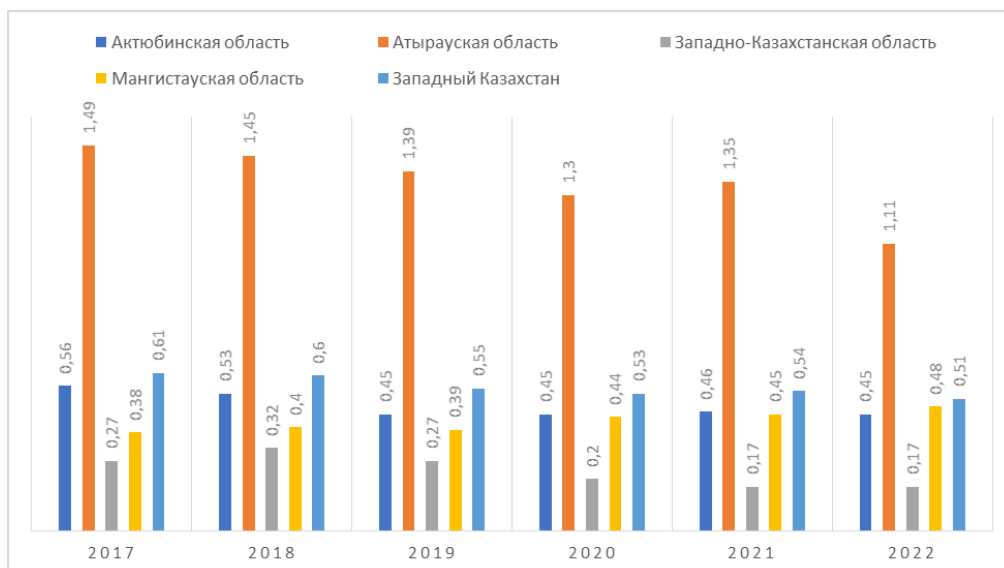


Рисунок 2 – Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу (т/км²) по Западному Казахстану в 2017–2022 гг. в расчете на единицу площади

Примечание: Составлено авторами на основании материалов [1–3].

Рассчитанные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу в пересчете на душу населения (кг/чел.) в Западном Казахстане за 2017–2022 гг. представлены в таблице 1. Динамика изменения этого показателя, характеризующего расселение в Западном Казахстане, выглядит следующим образом: уровень атмосферных выбросов на душу населения в Западном Казахстане несколько выше, чем в среднем по Казахстану по всем рассматриваемым годам. К примеру, в Казахстане за 2022 г. уровень выбросов на душу населения – 117 кг/чел., в Западном Казахстане – 123 кг/чел., причем наибольшее значение наблюдается по Атырауской области – 200 кг/чел., значительно ниже этот показатель отмечается для Западно-Казахстанской области – 37,5 кг/чел.

Таблица 1 – Выбросы загрязняющих атмосферу веществ в Западном Казахстане в расчете на душу населения (кг/чел.) в 2017–2022 гг.

Регионы	Выбросы кг/чел					
	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Актюбинская область	200	184	157	153	152	148
Атырауская область	291	278	256	239	244	200
Западно-Казахстанская область	60	75	63	47	37	37,5
Мангистауская область	97	99	95	101	105	103
Западный Казахстан	165	159	143	135	134	123
ИТОГО по Казахстану	129	133	134	128	124	117
Примечание: Составлено авторами на основании материалов [1–3].						

Учитывая различный характер предприятий, сосредоточенных в Западном Казахстане, следовательно, и специфику атмосферных выбросов, представляет интерес изучение распределения загрязняющих веществ не только по их суммарному количественному, но и качественному (химическому) составу. Как известно, основные вредные для здоровья вещества, загрязняющие воздух, – оксиды азота (NO_x) и серы (SO_x), озон и дисперсные вещества, особенно диаметром менее 2,5 микрона [14].

Расчеты были произведены как на единицу площади (рисунок 3), так и на душу населения по каждой области Западного Казахстана (таблица 2, стр. 300).

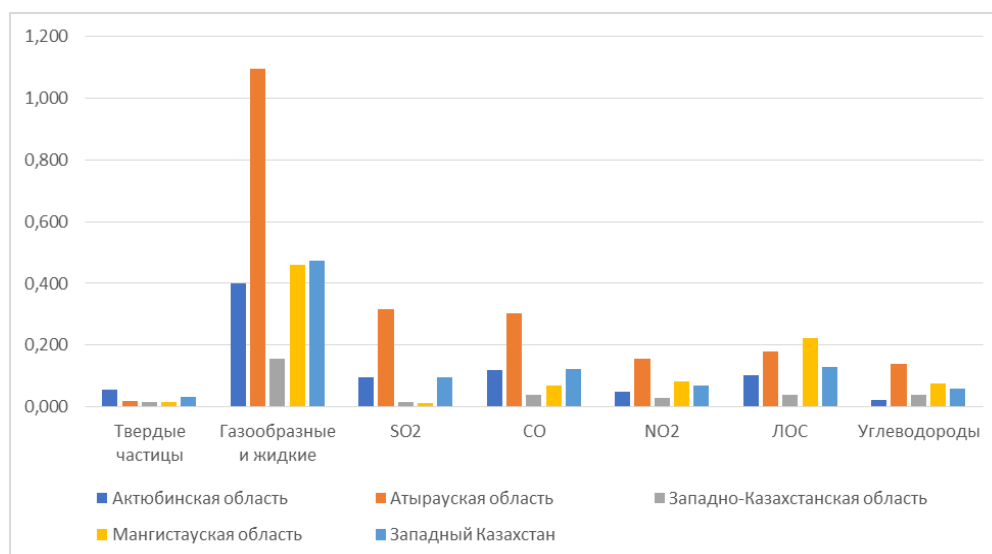


Рисунок 3 – Состав атмосферных выбросов по Западному Казахстану в расчете на единицу площади (т/км²) за 2022 г.

Примечание: Составлено авторами на основании материалов [1–3].

Таблица 2 – Состав атмосферных выбросов по Западному Казахстану в расчете на душу населения (кг/чел.) за 2022 г.

Наименование	Регионы				
	Актюбинская область	Атырауская область	Западно-Казахстанская область	Мангистауская область	Западный Казахстан
Население, тыс.чел.	924,875	661,014	688,127	762,027	3036,018
Твердые частицы	20,47	3,41	3,16	3,11	8,48
Газ и жидкость	127,15	196,48	34,39	100,23	114,46
SO ₂	25,5	56,49	3,51	2,61	21,52
CO	40,53	54,48	8,28	14,64	29,76
NO ₂	15,56	28,01	6,57	17,55	16,74
ЛОС	34,27	36,59	8,49	48,74	32,56
Углеводы	7,26	25,23	8,58	16,52	13,8
Сероводород	0,36	0,27	0,012	0,013	0,17
Аммиак	0,037	0,032	0,051	0,336	0,114
Примечание: Составлено авторами на основании материалов [1–3].					

От стационарных источников выбросов в атмосферу выделяются различные вещества, которые представлены в статистической отчетности девятью наименованиями, показанными в таблице 2. Основной объем выбросов в атмосферу в Западном Казахстане приходится на газообразные и жидкие вещества, составляющие от 34,4 (Западно-Казахстанская область) до 196,5 кг/чел. (Атырауская область). Причем в составе газообразных веществ, загрязняющих атмосферу в Атырауской области, наблюдается значительно большее в сравнении с другими областями содержание SO₂ – 56,5 кг/чел., CO – 54,5 кг/чел., NO₂ – 28,0 кг/чел., летучих органических соединений (ЛОС) – 36,6 кг/чел., углеводов – 25,3 кг/чел. Это подтверждается данными департамента экологии по Атырауской области, согласно которым 80–85% выбросов приходится на предприятия нефтегазового сектора [1].

Сравнительно высокое содержание ЛОС наблюдается также в других нефтедобывающих областях: Актюбинской, Мангистауской – 34,27 кг/чел. и 48,74 кг/чел. соответственно. В то же время в Западно-Казахстанской области этот показатель значительно ниже – 8,49 кг/чел. Для сравнения: по Казахстану этот показатель составляет 7,9 кг/чел. [1]. Повышенное содержание углеводов в атмосфере наблюдается и в Мангистауской области – 16,52 кг/чел., в то время как в среднем по Казахстану этот показатель составляет 6,8 кг/чел.

Кроме того, среди выбросов химических веществ в атмосферу особое место занимает сероводород. Так, в составе добываемого углеводородного сырья на Карачаганакском месторождении содержится до 4,5% высокотоксичного и коррозионного сероводорода (H₂S) [15]. По результатам мониторинга РГП «Казгидромет» в Западном Казахстане были зафиксированы случаи превышения предельно допустимой концентрации (ПДК) по сероводороду: за 2020 г. – 774 превышения ПДК, за 2021 г. – 838, за 2022 г. – 1375 [1].

Следует отметить, что значительно большее загрязнение атмосферы в расчете на душу населения твердыми частицами характерно для территории Актюбинской области. Этот факт не может быть связан только с рельефом местности, поскольку в оставшихся трех областях этот показатель существенно ниже. Эти результаты показывают, что доля мелких частиц в этой области может включать сложную смесь очень вредных неорганических, в частности Cr, и органических соединений, например, различные углеводороды. Загрязнение воздушного бассейна Актюбинской области в основном обусловлено деятельностью таких крупных предприятий, как АО «СНПС-Актобемунайгаз», ТОО «КазахойлАктобе», Актюбинский завод ферросплавов и ДГОК, филиалы АО «ТНК «Казхром», АО «Интергаз Центральная Азия», УМГ «Актобе», АО «Актобе ТЭЦ» [1]. Полученные данные требуют детальных исследова-

ний. Тем более что в РК в данных по мониторингу атмосферного воздуха разделения твердых частиц по диаметру (PM_{10} , $PM_{2.5}$), как это предусмотрено стандартами ЕС, не проводится [16]. Полный состав соединений, подвергаемых мониторингу в ЕС, должен включать SO_2 , H_2S , NO_2 , PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3 , CO , ЛОС, Hg, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), As, Cd, Ni и Pb [17]. На наш взгляд, процедура отбора загрязняющих веществ, подвергаемых мониторингу атмосферы, не соответствует текущему пониманию приоритетных загрязнений, которые наносят наиболее серьезный вред здоровью. Особое внимание должно быть уделено мониторингу высокоприоритетных загрязняющих веществ – PM_{10} , $PM_{2.5}$ из-за их сильного негативного воздействия на здоровье.

Глобальные рекомендации ВОЗ по качеству воздуха предусматривают промежуточные целевые показатели концентраций дисперсных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$, которые достигаются постепенным переходом от высоких концентраций к более низким [14].

Источниками воздействия на атмосферный воздух работающих нефтегазовых предприятий являются технологическое оборудование, установки, системы и сооружения основного и вспомогательных производств, необходимые для добычи, сбора, переработки и транспорта продукции и углеводородного сырья. Основное загрязнение атмосферного воздуха осуществляется продуктами сгорания органического топлива оксидами углерода, сажей, а также веществами, содержащимися в исходном топливе или продуктах сгорания, углеводородами, ЛОС и др.

Из них лишь на одну группу суммации однонаправленного действия (оксиды азота+ сернистый ангидрид) приходится от 20,1 (Западно-Казахстанская область) до 43,01% (Атырауская область). Выбросы окислов азота при сжигании нефтяных газов связаны с окислением азота воздуха в высокотемпературном газовом факеле. Количество выделяющихся окислов азота зависит от организации процесса горения и может регулироваться технологическими методами. В состав окислов входят: монооксид N0 (до 95%), диоксид азота NO_2 (5%) и другие оксиды. При рассеивании дымовых газов в атмосфере в результате фотохимических реакций взаимодействия с атмосферным озоном происходит доокисление N0 и NO_2 [18].

Причинами отмеченного высокого загрязнения, по-видимому, являются неэффективность работы пылегазоочистных сооружений на заводах, отсутствие эффективной системы улавливания, изношенность оборудования и обеззараживания загрязняющих веществ в составе промышленных выбросов. По степени их улавливания можно судить об эффективности управления качеством атмосферного воздуха в целом.

Установлено, что по всем регионам Западного Казахстана очистке подлежат в основном твердые вещества. Так, в Западно-Казахстанской области очистке подвергаются твердые частицы (71,3% от их общего количества), а также порядка 20% ЛОС. Незначительно улавливаются и очищаются вредные соединения на предприятиях района Байтерек. Например, за 2022 г. их доля составила лишь 0,2%. В остальных районах указанной области отсутствуют очистные сооружения. В Актюбинской области улавливаемые загрязняющие вещества из числа газообразных и жидких составляют только 4,1% [1].

По нашему мнению, для более корректного определения уровня антропогенного воздействия на атмосферный воздух исследуемой территории целесообразно использовать интегральный показатель, который учитывал бы и численность населения, проживающего на территории, подверженной загрязнению, и ее площадь, и объем выбросов загрязняющих веществ. Для этого в работе нами рассчитан интегральный коэффициент, характеризующий плотность выбросов загрязняющих веществ в атмосферную среду ($k_{атм}$) для всех регионов Западного Казахстана согласно [5, 6]. В таблице 3 (стр. 302) представлены результаты, которые показывают, что в целом по Западному Казахстану три области: Атырауская, Актюбинская и Мангистауская отличаются высокими значениями этого показателя как для всего объема выбросов, так и для газообразных веществ.

Таблица 3 – Значения интегрального коэффициента выбросов в атмосферу Западного Казахстана за 2022 г.

Наименование региона, области	S, площадь, тыс. км ²	N, численность населения, тыс. чел.	A, объем выбросов, тыс. т.	катм *10-3 для общего объема выбросов	катм *10-3 для твердых частиц	катм *10-3 для газообразных веществ
Актюбинская	300,6	924,845	136,5	258,9	35,900	223,027
Атырауская	118,6	661,014	132,1	471	8,059	463,800
Западно-Казахстанская	151,34	688,127	25,79	81	6,730	74,220
Мангистауская	165,6	762,027	78,7	221,5	6,680	214,820
Западный Казахстан в целом	736,2	3036,013	373,1	249,5	17,210	232,290
Казахстан в целом	2724,9	19 703,159	2314,8	315,9	60,870	254,290
Примечание: Составлено авторами по материалам [1–3, 7, 8].						

Причем наибольший интегральный показатель характерен для Атырауской области – $471 \cdot 10^{-3}$, $463,8 \cdot 10^{-3}$ соответственно. При этом наименьшее значение этого показателя наблюдается для Западно-Казахстанской области – $81 \cdot 10^{-3}$, $74,2 \cdot 10^{-3}$ соответственно. Следует отметить высокий интегральный коэффициент загрязнения для твердых частиц в Актюбинской области в сравнении со значениями для других областей и всего Западного Казахстана. В целом полученные данные свидетельствуют о том, что регионы Западного Казахстана с наибольшим загрязнением атмосферы следует рассматривать как приоритетные для проведения атмосфероохранных мероприятий.

Основные положения. Заключение

На основе сравнительного анализа загрязнения атмосферного воздуха Западного Казахстана можно сделать следующие выводы:

- ♦ на исследуемой территории достаточно много источников, выбросы которых формируют высокие уровни загрязнения атмосферного воздуха на большей части территории, что говорит о необходимости детального изучения данной проблемы;
- ♦ количественная и качественная характеристика выбросов в атмосферу в Западном Казахстане определяется главным образом деятельностью нефтегазодобывающей, химической промышленности, причем, основными загрязняющими веществами, выбрасываемыми предприятиями в атмосферу, являются сернистый ангидрид, окислы азота, окись углерода, углеводороды (суммарные) и твердые вещества;
- ♦ рассчитанные показатели выбросов, характеризующие уровни загрязнения атмосферы в пересчете на единицу площади, душу населения, а также интегральные коэффициенты показали, что вклад областей в общие выбросы атмосферных загрязнений неравнозначен, на Атыраускую и Актюбинскую области приходится основная доля (36,6% и 35,4% соответственно) от общего количества выбросов;
- ♦ на территории Западного Казахстана осуществляется улавливание только твердых частиц, выбрасываемых в атмосферу, преимущественно в промышленной зоне, доля улавливания газообразных веществ незначительная, на большей части территории региона очистные сооружения отсутствуют;
- ♦ особое внимание должно быть уделено мониторингу высокоприоритетных загрязняющих веществ PM_{10} , $PM_{2,5}$ из-за их сильного негативного воздействия на здоровье;

♦ в сфере осуществления государством мер по защите окружающей среды вопрос охраны воздушного бассейна Западного Казахстана становится весьма актуальным. Регионы Западного Казахстана с наибольшим загрязнением атмосферы следует рассматривать как приоритетные для проведения атмосфероохранных мероприятий.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта № BR21882122 «Устойчивое развитие природно-хозяйственных и социально-экономических систем Западно-Казахстанского региона в контексте зеленого роста: комплексный анализ, концепция, прогнозные оценки и сценарии».

ЛИТЕРАТУРА

1 Национальный доклад о состоянии окружающей среды и об использовании природных ресурсов Республики Казахстан за 2022 год. – Астана, 2023. URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/ecogeo/documents/details/383692?lang=ru>

2 Информационные бюллетени о состоянии окружающей среды Республики Казахстан. URL: <https://www.kazhydromet.kz/ru/ecology/ezhemesyachnyy-informacionnyy-byulleten-o-sostoyanii-okruzhayushey-sredy>

3 Бюро национальной статистики РК. URL: <https://stat.gov.kz/>

4 Nordhouse W.D. Climate Casino: Risk, Uncertainty And Economics For a Warming World Yale University Press. – 2015. – 392 p. URL: <https://yalebooks.yale.edu/9780300212648/the-climate-casino>

5 Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года. Указ Президента Республики Казахстан от 2 февраля 2023 года №121. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121>

6 Gongcheng Zh., Li J., Lei L., Zhao Zh. Analysis of the orderly distribution of oil and gas fields in China based on the theory of co-control of source and heat // Natural Gas Industry B. – 2015. – Vol.2. – No. 1. – P. 49–76. URL: http://www.igic.bas.bg/wpcontent/uploads/2019/07/IGIC_BAS_Quotations_2014.pdf

7 Методика формирования показателей статистики окружающей среды, утвержденная приказом и.о. председателя Комитета по статистике Министерства национальной экономики Республики Казахстан № 223 от 25.12.2015 г. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500012931>.

8 РД 52.04.667–2005. Документы состояния загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению и содержанию. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200067118>

9 Михеева А.С. Оценка ассимиляционной емкости природной среды в целях совершенствования экономического механизма природопользования // Вестник Бурятского государственного университета. География. – 2007. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-assimilyatsionnoy-emkosti-prirodnoy-sredy-v-tselyah-sovershenstvovaniya-ekonomicheskogo-mehanizma-prirodopolzovaniya>

10 Имашев Э.Ж. Пространственный анализ изменения экологического состояния окружающей среды Западно-Казахстанской области // Вестник КазНУ. Серия географическая. – 2011. – № 1(32). – С.13–20. URL: <https://bulletin-geography.kaznu.kz/index.php/1-geo/article/download/617/503>

11 Кодекс Республики Казахстан от 2 января 2021 года № 400-VI ЗПК. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/K2100000400>

12 Об утверждении Требований к отчетности по результатам производственного экологического контроля. Приказ Министра экологии, геологии и природных ресурсов РК от 10 марта 2021 года № 63.

13 Об утверждении Перечня загрязняющих веществ, эмиссии которых подлежат экологическому нормированию. Приказ министра экологии, геологии и природных ресурсов РК от 25 июня 2021 года № 212.

14 Whaley P., Nieuwenhuijsen M., Burns J. Update of the WHO global air quality guidelines: systematic reviews. Environ Int. 142, 2021 (Special issue) URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/environment-international/special-issue/10MTC4W8FXJ>.

15 Кенесариев У.И., Адильгирейулы З., Амрин М.К., Досмухаметов А.Т., Ержанова А.Е., Баймухамедов А.А. Мониторинг качества объектов окружающей среды в регионе Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения // Здоровье семьи – 21 век. URL: <http://www.fh-21.perm.ru/download/2011-4-6.pdf>

16 Шкодинский С.В., Рыкова И.Н., Юрьева А.А. Опыт отдельных зарубежных стран в сфере снижения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Экономика. – 2021. – № 4. – С. 118–132. [https:// doi.org/10.18384/2310-6646-2021-4-118-132](https://doi.org/10.18384/2310-6646-2021-4-118-132).

17 Вилнитис В., Докторова Ю., Палло Т. Принципы управления качеством воздуха в Европейском Союзе Основные особенности системы управления качеством воздуха в ЕС – WECOOP2. URL: <https://wecoop.eu/wp-content/uploads/2020/05/1.-Air-quality-management-system-JDW070719.pdf>

18 Айдосов А.А., Ажиева Г.И. Анализ источников выброса вредных веществ в атмосферу, приводящих к усугублению экологической обстановки в зоне влияния НГДУ «Жайыкнефть», 2012 г. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-istochnikov-vybrosa-vrednyh-veschestv-v-atmosferu-privodyaschiikh-usugubleniyu-ekologicheskoy-obstanovki-v-zone-vliyaniya-ngdu>

REFERENCES

1 Nacional'nyj doklad o sostojanii okruzhajushhej sredy i ob ispol'zovanii prirodnih resursov Respubliki Kazahstan za 2022 god, Astana, 2023. URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/ecogeo/documents/details/383692?lang=ru> [in Russian].

2 Informacionnye bjulleteni o sostojanii okruzhajushhej sredy Respubliki Kazahstan. URL: <https://www.kazhydromet.kz/ru/ecology/ezhemesyachnyy-informacionnyy-byulleten-o-sostoyanii-okruzhajushhej-sredy> [in Russian].

3 Bjuro nacional'noj statistiki RK. URL: <https://stat.gov.kz/> [in Russian].

4 Nordhouse W.D. (2015) Climate Casino: Risk, Uncertainty And Economics For a Warming World Yale University Press, 392 p. URL: <https://yalebooks.yale.edu/9780300212648/the-climate-casino>.

5 Strategii dostizhenija uglerodnoj nejtral'nosti Respubliki Kazahstan do 2060 goda. Ukaz Prezidenta Respubliki Kazahstan ot 2 fevralja 2023 goda №121. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121> [in Russian].

6 Gongcheng Zh., Li J., Lei L., Zhao Zh. (2015) Analysis of the orderly distribution of oil and gas fields in China based on the theory of co-control of source and heat. Natural Gas Industry B, vol. 2, no. 1, pp. 49–76. URL: http://www.igic.bas.bg/wpcontent/uploads/2019/07/IGIC_BAS_Quotations_2014.pdf

7 Metodika formirovaniya pokazatelej statistiki okruzhajushhej sredy, utverzhdannaja prikazom i.o. predsedatelja Komiteta po statistike Ministerstva nacional'noj jekonomiki Respubliki Kazahstan №223 ot 25.12.2015 g. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500012931>. [in Russian].

8 RD 52.04.667–2005. Dokumenty sostojaniya zagrazneniya atmosfery v gorodah dlja informirovaniya gosudarstvennyh organov, obshhestvennosti i naselenija. Obshhie trebovaniya k razrabotke, postroeniju, izlozheniju i soderzhaniju. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200067118> [in Russian].

9 Miheeva A.S. (2007) Ocenka assimilacionnoj emkosti prirodnoj sredy v celjah sovershenstvovaniya jekonomicheskogo mehanizma prirodopol'zovaniya. Vestnik Burjatskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografija. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-assimilyatsionnoy-emkosti-prirodnoj-sredy-v-tselyah-sovershenstvovaniya-ekonomicheskogo-mehanizma-prirodopolzovaniya> [in Russian].

10 Imashev Je.Zh. (2011) Prostranstvennyj analiz izmenenija jekologicheskogo sostojaniya okruzhajushhej sredy Zapadno-Kazahstanskoj oblasti. Vestnik KazNU. Serija geograficheskaja, no. 1(32), pp. 13–20. URL: <https://bulletin-geography.kaznu.kz/index.php/1-geo/article/download/617/503> [in Russian].

11 Kodeks Respubliki Kazahstan ot 2 janvarja 2021 goda № 400-VI ZRK. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/K2100000400> [in Russian].

12 Ob utverzhdenii Trebovanij k otchetnosti po rezul'tatam proizvodstvennogo jekologicheskogo kontrolja. Prikaz Ministra jekologii, geologii i prirodnih resursov RK ot 10 marta 2021 goda № 63 [in Russian].

13 Ob utverzhdenii Perechnja zagraznjajushhih veshhestv, jemissii kotoryh podlezhut jekologicheskomu normirovaniyu. Prikaz ministra jekologii, geologii i prirodnih resursov RK ot 25 ijunya 2021 goda № 212 [in Russian].

14 Whaley P., Nieuwenhuijsen M., Burns J. (2021) Update of the WHO global air quality guidelines: systematic reviews. Environ Int. 142 (Special issue) URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/environment-international/special-issue/10MTC4W8FXJ>.

15 Kenesariyev U.I., Adil'girejuly Z., Amrin M.K., Dosmuhametov A.T., Erzhanova A.E., Bajmuhametov A.A. Monitoring kachestva ob#ektov okružhajushhej sredy v regione Karachaganakskogo neftegazokondensatnogo mestorozhdenija. Zdorov'e sem'i – 21 vek. URL: <http://www.fh-21.perm.ru/download/2011-4-6.pdf> [in Russian].

16 Shkodinskij S. V., Rykova I. N., Jur'eva A. A. (2021) Opyt otдел'nyh zarubezhnyh stran v sfere snizhenija vybrosov zagrjaznjajushhih veshhestv v atmosferyj vozduh. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Serija: Jekonomika, no. 4, pp. 118–132. <https://doi.org/10.18384/2310-6646-2021-4-118-132> [in Russian].

17 Vilnitis V., Doktorova Ju., Pallo T. Principy upravlenija kachestvom vozduha v Evropejskom Sojuze Osnovnye osobennosti sistemy upravlenija kachestvom vozduha v ES – WECOOP2. URL: <https://wecoop.eu/wp-content/uploads/2020/05/1.-Air-quality-management-system-JDW070719.pdf> [in Russian].

18 Ajdosov A.A., Azhieva G.I. (2012) Analiz istochnikov vybroso vrednyh veshhestv v atmosferu, privodjashhih k usugubleniju jekologicheskoy obstanovki v zone vlijaniya NGDU «Zhajykneft'». URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-istochnikov-vybroso-vrednyh-veschestv-v-atmosferu-privodyaschih-k-usugubleniju-ekologicheskoy-obstanovki-v-zone-vliyaniya-ngdu> [in Russian].

¹Кожагулов С.О.,

докторант, ORCID ID: 0009-0005-4428-5129, e-mail: s_kozhagulov@mail.ru

¹Сальников В.Г.,

г.г.д., ORCID ID: 0000-0003-3392-4587, e-mail: Vitali.Salnikov@kaznu.edu.kz

^{1*}Байдаулетова Г.К.,

ORCID ID: 0000-0002-2595-8106, e-mail: carlugast69@gmail.com

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

БАТЫС ҚАЗАҚСТАН АУМАҚТАРЫНДАҒЫ АТМОСФЕРАНЫҢ ЛАСТАНУЫНА САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Аңдатпа

Мақалада Батыс Қазақстан аумағындағы атмосфералық шығарындыларға салыстырмалы талдау жасалды. Батыс Қазақстан өңірінің атмосферасын ластаушы шығарындыларды талдау нәтижелері зерттелетін аумақта құрамы жалпы аумақтың басым бөлігінде шығарындылары атмосфералық ауаның ластануына жоғары деңгейде әсер ететін негіздер жеткілікті екенін көрсетті. Экономикалық қызмет түрлері бойынша шығарындылардың негізгі үлесі мұнай-газ өндіру және химия өнеркәсібі кәсіпорындарына тиесілі екендігі анықталды. Аудан бірлігіне, жан басына шаққанда атмосфераның ластану деңгейін сипаттайтын шығарындылардың есептелген көрсеткіштері, сондай-ақ интегралдық коэффициенттер атмосфераны ластаудың жалпы шығарындыларына өңірлердің үлесі тең емес екенін көрсетті. Осылайша Атырау және Ақтөбе облыстарына шығарындылардың жалпы санының негізгі үлесі (тиісінше 36,6% және 35,4%) тиесілі. Батыс Қазақстан аумағында атмосфераға шығарылатын қатты бөлшектер ғана тұтынылады, негізінен өнеркәсіптік аймақта газ тәріздес заттарды тұтыну үлесі шамалы, өңір аумағының басым бөлігінде тазарту құрылыстары жоқ. Жүргізілген жұмыс еліміздің ірі өнеркәсіптік өңірлеріндегі атмосфераның экологиялық жай-күйін одан әрі бағалауға ықпал етеді. Ластану көздері мен деңгейлерін талдау нәтижелері атмосфералық шығарындыларды азайтудың басым бағыттарын айқындауға, сондай-ақ Батыс Қазақстан өңірінде экологиялық қауіпсіздік және орнықты даму жөніндегі стратегиялар мен бағдарламаларды әзірлеуге мүмкіндік береді.

Тірек сөздер: атмосфераның ластануы, ластанудың стационарлық көздері, Батыс Қазақстан, атмосфераның ластануының интегралдық коэффициенті.

¹Kozhagulov S.O.,

PhD student, ORCID ID:0009-0005-4428-5129, e-mail: s_kozhagulov@mail.ru

¹Salnikov V.G.,

Doctor of Geography, Professor, ORCID ID:0000-0003-3392-4587,

e-mail: Vitali.Salnikov@kaznu.edu.kz

¹Baidauletova G.K.,

ORCID ID:0000-0002-2595-8106, e-mail: carlugast69@gmail.com

¹Non-commercial joint stock company Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Almaty, Kazakhstan

COMPARATIVE ANALYSIS OF ATMOSPHERE POLLUTION IN WESTERN KAZAKHSTAN REGIONS

Annotation.

The article contains a comparative analysis of atmospheric emissions on the territory of the Western Kazakhstan regions. An analysis of pollutants emissions into the atmosphere of Western Kazakhstan shows that in the study area there are quite a lot of sources, the emissions of which create high levels of air pollution in most of the territory. In terms of economic activity types, the main share belongs to industry. It has been established that the main air pollution's stationary sources are the oil, gas complex and chemical industry enterprises. Calculated emission indicators characterizing the air pollution levels per unit area, per capita, as well as integral coefficients showed that the regions contribution to atmospheric pollution's total emissions is unequal, Atyrau and Aktobe regions account for 36.6% and 35.4% of the total emissions, respectively. On the territory of Western Kazakhstan, only solid particles emitted into the atmosphere are captured, mainly in the industrial zone, the share of gaseous substances captured is insignificant, and in most of the region there are no treatment facilities. The work carried out contributes to further analysis of the assessment of the atmosphere environmental state in country's large industrial regions. The results of the sources and pollution levels' analysis make it possible to determine priority areas for reducing atmospheric emissions, as well as to develop strategies and programs for environmental safety and sustainable development in the region of Western Kazakhstan.

Key words: air pollution, stationary sources of pollution, Western Kazakhstan, integral coefficient of air pollution.

МРНТИ 38.61.31
УДК 556

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-22-2-307-323>

¹**Аманжолова Р.,**

магистр, ORCID ID: 0000-0001-9129-1074, e-mail: r_amanzholova@kbtu.kz

²**Аденова Д.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7973-811X, e-mail: d.adenova@satbayev.university

¹**Аманжолов К.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0007-6698-2106, e-mail: ka_amanzholov@kbtu.kz

³**Мурат Д.**

магистр, ORCID ID: 0009-0009-2332-4802, e-mail: dauletmurat8080@gmail.com

^{1,3}**Дүйсебек Б.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-2596-4936, e-mail: b.duisebek@kbtu.kz

^{1*}**Сагин Ж.,**

PhD, профессор, ORCID ID: 0000-0002-0386-888X, *e-mail: j.sagin@kbtu.kz

³**Сарсекова Д.,**

д.с.-х.н., профессор, ORCID ID: 56403235500,
e-mail: "sarsekova.dani@kaznaru.edu.kz" sarsekova.dani@kaznaru.edu.kz

⁴**Орунбаев С.,**

PhD, профессор, ORCID ID: 0000-0002-9321-6390, e-mail: orunbaev_s@auca.kg

^{5,6}**Алиев М.**

магистр, ORCID ID: 0000-0002-3550-5223, e-mail: hydrolab.kr@gmail.com

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

²Институт гидрогеологии и геоэкологии им. У.М. Ахмедсафина,
Сатпаев университет, 050000, г. Алматы, Казахстан,

³Казахский национальный аграрный исследовательский университет,
050010, г. Алматы, Казахстан

⁴Американский университет в Центральной Азии, 720060, г. Бишкек, Кыргызстан

⁵Кыргызский научно-исследовательский институт ирригации,
720055, г. Бишкек, Кыргызстан

⁶Служба водных ресурсов при Министерстве водных ресурсов, сельского хозяйства и
перерабатывающей промышленности Кыргызской Республики,
720014, г. Бишкек, Кыргызстан

ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИИ КЫРГЫЗСТАНА – КАЗАХСТАНА ДЛЯ ВНЕДРЕНИЯ ВОДОРОДНО-ВОДНОГО РЫНКА

Аннотация

Дефицит воды является одним из глобальных рисков в засушливых и полузасушливых регионах, таких как Центральная Азия (ЦА), включая Кыргызстан и Казахстан. Основные реки ЦА являются трансграничными, как, например, бассейн рек Чу и Талас, которые находятся на территории Кыргызстана и Казахстана. Природные и антропогенные факторы, такие как изменение климата, могут привести к водным кризисам и конфликтам из-за снижения водоснабжения и ухудшения качества воды. К сожалению, в ЦА в основном изучаются поверхностные водные ресурсы, а ресурсы подземных вод исключены из открытого аналитического анализа. В то же время подземные воды являются жизненно важным компонентом экосистемы речных бассейнов и должны изучаться одновременно с поверхностными водами, чтобы получить более полный анализ устойчивости интегрированной системы поверхностных, подземных вод бассейна. Комбинированные научные исследования поверхностных, подземных вод, прогноз водного баланса бассейнов связаны с большими сложностями трансграничной кооперации специалистов – метеорологов, гидрологов, гидрогеологов

граничащих государств. В основном в трансграничных переговорах преобладает ведомственное управление, больше административное управление, без системного планирования, анализа адаптации и подготовки к естественным природным процессам, без стимулирования вовлечения местного населения, студентов школ, колледжей, университетов в изучение, без проведения полевых водных исследований, моделирования водных балансов поверхностных, подземных вод бассейнов. Местные жители аулов бассейнов рек Кыргызстана и Казахстана нуждаются в усилении совместной поддержки повышения квалификации населения, возможностей адаптации к изменению климата в цепочке школа – колледж – индустрия – университет. Совместные гидрогеологические исследования естественных природных процессов в Кыргызстане и Казахстане плохо отработаны. Кыргызстан, Казахстан упускают возможности совместной кооперации. Во многих странах сейчас идет «золотая лихорадка» гидрогеологических исследований, исследований по природному геологическому «белому» водороду, в том числе на границе Франции и Германии, где обнаружены крупнейшие мировые подземные запасы водорода. На территории трансграничного бассейна рек Мозель, Саар, где расположены заброшенные более 20 лет назад угольные шахты, обнаружены большие объемы природного геологического «белого» водорода с оцениваемым объемом до 250 млн тонн с циклом возобновления выработки в подземных «фабриках» водорода около 80 лет – средний цикл человеческой жизни. Подземным «фабрикам» водорода важна подпитка воды для физико-химических окислительных процессов серпентинизации, радиолиза, что является важным для согласования представителями трансграничного бассейна рек Мозель, Саар – Франции и Германии. Кыргызстану с Казахстаном важно усилить кооперацию с созданием стимулов роста, поддержкой исследователей ученых-гидрогеологов, созданием совместных киргизско-казахстанских бассейновых колледжей подготовки техников по водным ресурсам, водородным технологиям, аналогично тому, как делается в других странах. В настоящем обзоре представлены возможности усиления кооперации Кыргызстана и Казахстана, в том числе по совместному эффективному управлению природными ресурсами, изучению гидрогеологии Кыргызстана, Казахстана для эффективного совместного использования водородно-водных ресурсов двух стран.

Ключевые слова: поверхностные, подземные воды, бассейновый совет, Франция – Германия, Канада – США, Кыргызстан – Казахстан, природный «белый» водород.

Введение

Заблаговременная подготовка с эффективной научной поддержкой бизнес-планирования прихода-расхода водных ресурсов плохо отработана в ЦА, в том числе на бассейнах рек Кыргызстана – Казахстана [1–3]. Так происходит на примере бассейна рек Чу – Талас, когда был сделан слишком оптимистичный расчет, что будет много воды в 2023 г. «По предварительному прогнозу гидрометеорологической службы водности рек и притока воды в водохранилища на вегетационный период (апрель–сентябрь) 2023 г. по реке Шу приток в Орто-Токойское водохранилище ожидался в пределах 474–727 млн кубометров, или 115%. А по реке Талас приток в Кировское водохранилище предполагался в объеме 316–474 млн кубометров, или 109%. Учитывая прогноз, были составлены графики на вегетацию 2023 г., где по реке Шу должно было поступить 222 млн кубометров воды, а по реке Талас – 520 млн». «Однако из-за низких ночных температур весной и в начале лета таяние ледников оказалось неинтенсивным. В этой связи прогноз не подтвердился. К примеру, объем воды в Кировском водохранилище с апреля по 10 августа 2023 г. составил 60 млн кубометров, в то время как в аналогичном периоде 2022 г. в водохранилище поступило 297,09 млн кубометров воды», «на 10 августа 2023 г. объем воды в Кировском водохранилище составляет 31,27 млн кубометров, то есть всего 6% от проектной мощности; в августе 2022 г. этот показатель был на уровне 174,29 млн кубометров» [2].

Следующая сложность связана с управлением водными ресурсами, где в бассейновых управлениях преобладает административная система, похожая на снабженческую структуру. Взаимоотношения между Кыргызстаном и Казахстаном представляют собой систему снабженческих сделок, когда один снабженец пытается убедить другого забрать что-то как можно скорее и побольше или, наоборот, забрать позже, без детального анализа учета последствий, прогноза, что может произойти в будущем, как эти текущие сиюминутные действия повлияют на устойчивость целостной системы бассейна, на окружающую среду. Так, одна

сторона – Кыргызстан убеждала другую сторону – Казахстан, что приближаются проблемы с заполнением Кировского водохранилища, но снабженцам воды из Казахстана нужно было забрать воду вне графика поставок, вода нужна прямо сейчас, без прогноза анализа сложностей. «17–19 июля 2023 г. в Бишкеке прошла встреча представителей Кыргызстана и Казахстана, в ходе которой казахская сторона просила увеличить поставки воды. Казахская сторона обратилась с просьбой об увеличении подачи воды из Кировского водохранилища с 18 по 31 июля до 45 кубометров в секунду, хотя по подписанному графику должна была получать 40. В свою очередь, кыргызская сторона проинформировала об аналогичной тяжелой ситуации с поливами в Чуйской и Таласской областях и уведомила казахскую сторону, что при расходе 45 кубометров в секунду доля Казахстана, которая составляет 3,54 млн кубометров, будет исчерпана к 4 августа. Несмотря на приведенные расчеты и доводы, казахская сторона не отказалась от своей просьбы. В результате стороны подписали протокол, согласно которому со второй декады августа вода казахской стороне не будет подаваться», – рассказали в Минсельхозе Кыргызстана [3].

Мнение местных жителей, фермеров, пользователей воды бассейнов практически отсутствует в принятии решений, как им использовать воду в их бассейне, их регионе проживания. Местные жители исключены из системы программ эффективной подготовки анализа объемов воды в их бассейнах, у местных жителей отсутствует возможность самим согласованно планировать с другими членами бассейна, как им лучше подготовиться к сезону, что лучше засеять, как им планировать ресурсы в координации с другими без создания проблем своим близким соседям. Система прихода и расхода общего бассейна водных ресурсов плохо отрегулирована, когда нужно приход правильно спланировать с эффективной системой доходов. Практически сколько осадков, снега, дождей, какой водный баланс в бассейне, какой приход воды в Кыргызско-казахском Чу-Таласском бассейне плохо просчитано. Обе стороны, как жители Кыргызстана, так и Казахстана, тратят больше, чем имеется приход. Оптимально приход с расходом отрегулировать с учетом интересов и возможностей обеих сторон. Важно подготавливать наиболее эффективное использование прихода для увеличения следующего дохода, без ущерба для природы, с максимальным сохранением окружающей среды, помогая своим детям видеть и понимать, что такое хорошо и что такое плохо, и стимулировать их сознательно самостоятельно принимать правильные решения без административного давления. Разумеется, это кропотливая и долгая работа, требующая повышения квалификации и обучения с раннего детства и в течение всей жизни в цепочке школа – колледж – индустрия – университет. Создание совместных киргизско-казахских бассейновых колледжей – перспективное направление кооперации для обеих стран.

Основные положения

Как усилить изучение гидрогеологии Кыргызстана – Казахстана для внедрения водородно-водного рынка?

Для ответа на эти вопросы оптимально изучить опыт других аналогичных пар, как они взаимодействуют в таких ситуациях, как планируют свой приход-расход, какой у них уровень прихода-расхода, кто занимается расчетом, как они используют свой приход, во что вкладываются, как создают устойчивую эффективную систему использования общих ресурсов. Приблизительно идентичные пары – регионы Канада – США, Франция – Германия – представлены для изучения и обмена опытом, создания дуальных программ обучения, взаимных визитов, сравнения похожих и имеющих идентичные сложности территорий, для рациональной системы взаимной адаптации (рисунок 1, стр. 310).

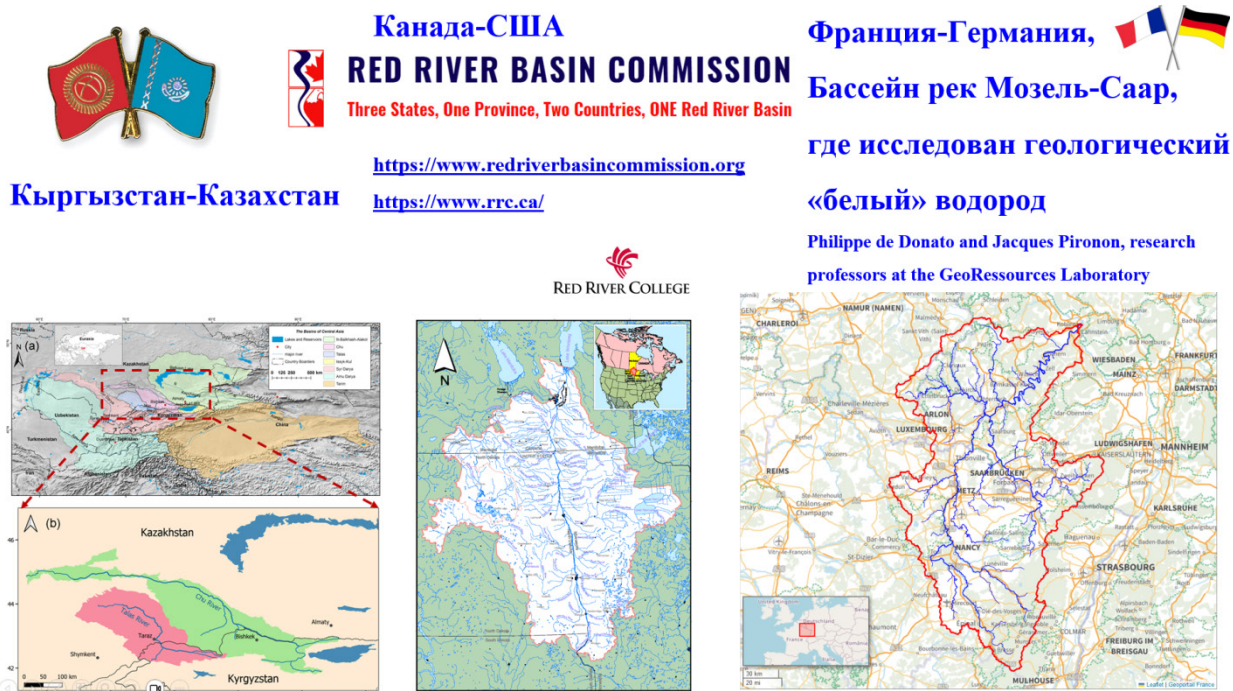


Рисунок 1– Кыргызско-Казахский Чу-Таласский бассейн, один из бассейновых комитетов Канады – США [8] с аффилированным колледжем Red River [9] и французско-германский бассейн Мозель-Саар

Материалы и методы

Методы исследования возможности внедрения водородно-водного рынка с предварительным изучением гидрогеологии Кыргызстана – Казахстана по опыту других стран, в бассейнах рек Франции – Германии, США – Канады, представлены на рисунке 2.

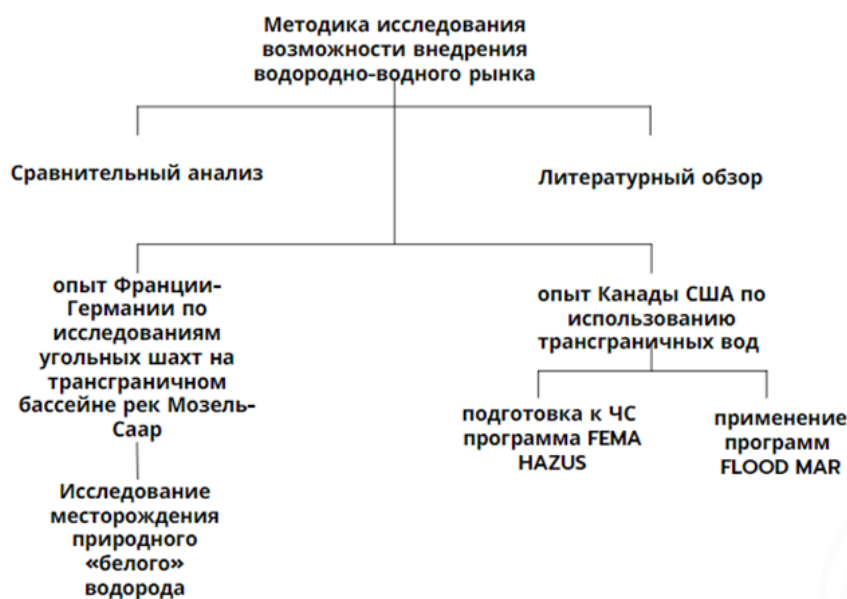


Рисунок 2 – Диаграмма исследования возможности внедрения водородно-водного рынка с предварительным изучением гидрогеологии Кыргызстана – Казахстана по опыту других стран, в бассейнах рек Франции – Германии, США – Канады

Система устойчивости управления и использования природных ресурсов трансграничного бассейна Кыргызстана – Казахстана проанализирована в сравнении с трансграничными бассейнами рек Канады – США, Франции – Германии.

Кыргызско-казахский Чу–Таласский бассейн

Верховье бассейна рек Чу–Талас (БРЧТ) находится в Кыргызстане, а низовье рек – в Казахстане. Реки Чу (Шу) и Талас берут воду с гор Центрального Тянь-Шаня в Кыргызстане на высоте более 4000 м над уровнем моря и далее спускаются в низовье до степей и пустынь Казахстана с высотами около 400 м над уровнем моря, где они завершаются топографической депрессией, образующей мелкие озера (рисунок 1). Бассейн Чу получает больше осадков (до 1000 мм/год в высокогорье Тянь-Шаня), чем Таласский (около 500 мм/год), и имеет более высокую плотность населения и долю пахотных земель, которые составляют 11% и 5,3% от площади бассейнов соответственно [4]. Столица Кыргызстана – Бишкек с населением чуть более миллиона человек расположена в верховье реки Чу, на притоке Ала-Арча. В водопотреблении преобладает ирригация, на которую приходится более 90% водопотребления на кыргызской стороне БРЧТ. Об этом бассейне гораздо меньше современной информации по сравнению с другими бассейнами ЦА, хотя текущая работа, координируемая Чу–Таласской трансграничной комиссией (ЧТТК), созданной правительствами Казахстана и Кыргызстана, направлена на расширение водного сотрудничества [5]. Бассейн рек Чу–Талас наименее изучен среди других речных бассейнов ЦА [4]. Мнение местных жителей, фермеров БРЧТ как со стороны Казахстана, так и Кыргызстана практически отсутствует в решении совместных проектов программ эффективного использования водных ресурсов бассейна, слабое участие гражданского общества в управлении водными ресурсами, также и слабый местный потенциал водных техников для управления своими водными ресурсами. БРЧТ, отсутствует открытая, доступная каждому жителю база данных ГИС (геоинформационная система), платформа поверхностных–подземных вод БРЧТ с внедренной системой моделирования прогнозов, интегрированных гидрологических, гидрогеологических данных, отсутствует открытая база данных пользователей воды БРЧТ, используемых скважин подземных вод, отсутствует единая программа подготовки БРЧТ к чрезвычайным ситуациям по наводнениям и засухам, с финансовыми расчетами, использованием программ, аналогичных FEMA HAZUS, Flood-MAR [6]. Кировское водохранилище, находящееся в БРЧТ, построено в районе девятибалльной сейсмической опасности, строительство велось в 1965–1975 гг. В связи с изменением климата пики периодов наводнений и засух усиливаются, и в случае комбинированного совпадения с землетрясением дамбы водохранилища могут разрушиться от паводка с землетрясением. В случае прорыва плотины Кировского водохранилища близ Тараза могут погибнуть более 150 тыс. человек и быть разрушено более 44 тыс. жилых домов [7].

Один из бассейновых комитетов Канады – США

Бассейновый комитет Канады – США координирует водные проектные программы (рисунок 1), включая финансовые, инженерные работы по наводнениям, засухам, эффективному использованию водных ресурсов. Система базируется на самоуправлении общими водными ресурсами жителей фермеров, индейцев, проживающих в трех штатах США (Миннесота, Северная и Южная Дакота) и провинции Канады (Манитоба). Местные жители, фермеры, индейцы, гражданские общества защиты природы, флоры и фауны активно участвуют в решении совместных проектов программ эффективного использования водных ресурсов, в управлении водными ресурсами. Сильный местный потенциал водных техников в управлении своими водными ресурсами с финансово-технической подготовкой техников в аффилированных колледжах постоянно обновляется самыми современными знаниями и технологиями с высокой оплатой труда [8, 9]. Бассейновый комитет Канады – США ведет базы данных, они открыты и доступны каждому. Информация по каждому проекту и группе, ведущей проект, находится на открытом веб-сайте [10]. К примеру, по бассейну жители, фермеры решили сделать LIDAR [11], Light Detection and Ranging – Remote Sensing, снимки высокой резолуции в

50 см для создания топографических карт, цифровых моделей рельефа, планирования земли фермеров, моделирования наводнений и засух. На это было потрачено 5 млн долларов. Финансы были вложены частично общими усилиями местных фермеров Канады и США – 3 млн, другая часть – 2 млн долларов была субсидирована провинциальной администрацией. Данные LIDAR в открытом доступе для скачивания [12]. Доступные программы обучения по использованию LIDAR открыты для каждого [13] с программами моделирования по прогнозу и адаптации к изменению климата [14]. По эффективному использованию накопления дренажных, паводковых вод наводнений бассейновый комитет использует интенсивно моделирование согласованно с фермерами Канады и США. Стороны совместно определяют регионы, где будет оптимально создать малые накопители для пополнения водоносных подземных горизонтов (MAR-Managed Aquifer Recharge) [15], аналогично программам Flood-MAR действующим в Калифорнии [16]. Местными жителями Канады – США используется единая геоинформационная база данных моделирования чрезвычайных ситуаций Канады – США FEMA HAZUS [6], представляющая стандартизированные инструменты и данные для оценки риска землетрясений, наводнений, ураганов, засух, пожаров с экономическим анализом и сценариями планирования финансовых расходов (рисунок 3) в кооперации со страховыми компаниями этих государств.



Рисунок 3 – Единая геоинформационная база данных моделирования чрезвычайных ситуаций FEMA HAZUS по оценке рисков землетрясений, наводнений, ураганов, засух, пожаров с финансовыми расчетами [6]

Экономическая польза, эффективность от внедрения программ моделирования, прогноза, мероприятий заранее до чрезвычайных событий (ЧС), использование комбинированных действий с технологиями FEMA HAZUS оценена Федеральным агентством Канады – США по ЧС в пропорции 1:10, каждый доллар, вложенный до ЧС, экономит до 10 долларов на последствиях ЧС [17]. По мере того как число и стоимость погодных и климатических катастроф увеличиваются, Федеральное агентство по ЧС FEMA США все больше инвестирует в программы подготовки к ЧС с эффективным реагированием, с акцентом на повышение квалификации на местах самим населением, в местных колледжах. Каждый год в течение последних пяти лет в США происходит более 20 бедствий, ущерб от которых оценивается более чем в 20 млрд долларов [17]. Стратегия FEMA США – стать более дальновидным, а не реактивным. Изменение климата требует планирования на десятилетия вперед, но в прошлом это не входило в обязанности FEMA. Сейчас же FEMA США интенсивно вкладывается в исследовательские работы по моделированию сценариев на десятки лет вперед по ЧС с передачей и доступностью знаний для разного уровня в цепочке школа – колледж – индустрия – университет. Моде-

ли HAZUS сочетают в себе опыт из многих дисциплин для создания полезной информации о рисках, которая повышает устойчивость сообщества. Программное обеспечение HAZUS распространяется как настольное приложение на основе ГИС с растущим набором упрощенных инструментов с открытым исходным кодом. Ресурсы по оценке рисков из программы HAZUS всегда находятся в свободном доступе и прозрачно развиваются. Программой HAZUS управляет Программа оценки рисков природных опасностей (NHRAP) Федерального агентства по чрезвычайным ситуациям управления рисками. HAZUS включает модули: а) историческое и сценарное моделирование; б) экономические потери; в) ущерб зданиям и социальные последствия исторических событий; г) сценарии планирования [6]. Бассейновый комитет Канады – США действует по принципам единой платформы в цепочке школа – колледж – индустрия – университет с вовлечением детей и взрослых в обсуждение и решение их общих сложностей, нахождение оптимальных решений, имея аффилированный колледж при бассейне [9]. Школьники вовлекаются и помогают своим родителям-фермерам в компьютерных технологиях, а также в полевых работах по изучению состояния поверхностных-подземных вод бассейна. Программы школьников, аналогичные программе «Знай свою скважину» [18], обучение тому, как отбирать пробы и проверять качество воды скважин, популярны в США – Канаде. Студенты сравнивают свои результаты с тестами, проведенными в лаборатории водных наук. Скважины местных жителей проверяются на наличие нитратов, нитритов, металлов, пестицидов и бактерий группы кишечной палочки. Студенты собирают данные о землепользовании для определения уязвимости к загрязнению. Владельцам скважин предоставляются результаты испытаний и информация, которая поможет им оценить качество воды. Программа «Знай свою скважину» помогает владельцам скважин и школьникам самим анализировать свою воду на местном уровне в регионах без централизованной системы администрирования (рисунок 4).

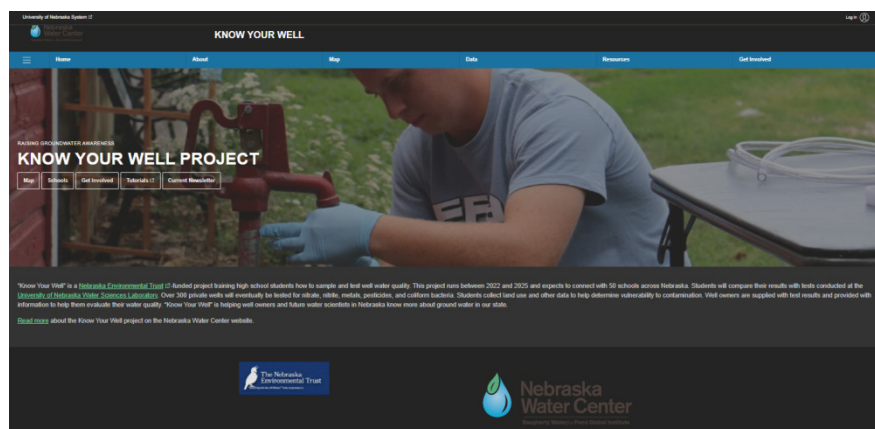


Рисунок 4 – Школьники США – Канады обучаются
полевым работам по изучению подземных вод,
отбору проб и проверяют качество воды скважин [18]

США, Канада также интенсивно поддерживают научные работы ученых исследователей в кооперации с Индустрией по созданию водородных хабов (рисунок 5, стр. 314) с развитием внутренних совместных рынков водорода, в том числе для использования аграрными корпорациями, ирригационными и транспортными машинами для работ по производству продовольствия.

Природный «белый» водород в категории «золотой лихорадки» во многих странах. Гидрогеологами ведутся интенсивные исследования в Северной Америке на землях фермеров (рисунок 6, стр. 314). Природный «белый» водород – это самое дешевое решение для производства углеродно-нейтрального водорода, который может конкурировать с ископаемым топливом. Цепочка геологической разведки природного водорода аналогична добыче природного газа и включает в себя разведку, выбор участков, бурение, добычу и разделение продукции.

Защита окружающей среды является приоритетом для реализации добычи природного «белого» водорода, который не требует использования экологически опасных методов, таких как гидроразрыв пласта. Природный «белый» водород на 33% дешевле, чем самый дешевый водород из ископаемого топлива, и в несколько раз дешевле самого дешевого «зеленого» водорода [20]. Природный «белый» водород перспективен в качестве более дешевой альтернативы «зеленому» водороду. Природный «белый» водород стоит в десять раз дешевле «зеленого» водорода [21–24].

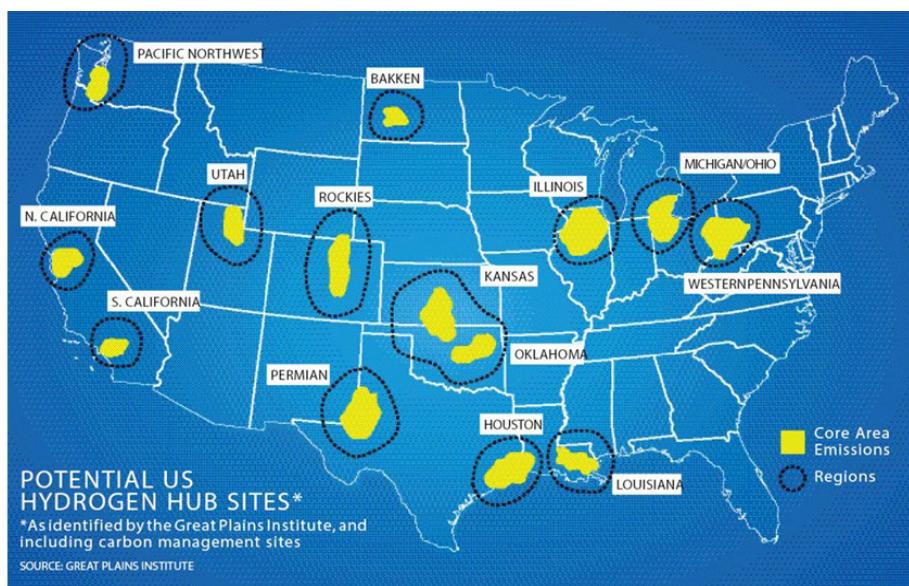


Рисунок 5 – Развиваемые водородные хабы в Северной Америке [19]



Рисунок 6 – Буровые работы компании по добыче природного «белого» водорода на землях фермеров Северной Америки Natural Hydrogen Energy [20]

Франция – Германия, бассейн рек Мозель – Саар

На территории бывших заброшенных шахт, закрытых 20 лет назад, на границе Франции и Германии (рисунок 7) ученые-гидрогеологи Филипп де Донато и Жак Пиронон, профессора-исследователи лаборатории GeoRessources в городе Нанси, исследовали месторождения природного «белого» водорода (H_2). Земля под горнодобывающим бассейном Лотарингии очень богата природным «белым» водородом [24, 25]. Исследователи полагают, что природный «белый» водород непрерывно производится настоящей водородной подземной «фабрикой», скрытой под ногами, сырьем которой являются молекулы воды и минералы, состоящие из карбонатов железа ($FeCO_3$ и $Ca(Fe, Mg, Mn)(CO_3)$) и урановых минералов. Земля вокруг заброшенных угольных шахт рудников Фолшвиллер богата этими типами соединений. Когда минералы вступают в контакт с водой, происходит физико-химическая окислительно-восстановительная реакция, в которой минералы разделяют молекулы воды (H_2O) на кислород (O_2) и водород (H_2) [23].

Природный «белый» водород присутствует в широком спектре горных пород и геологических регионов. Подземные физико-химические реакции включают дегазацию водорода, реакцию воды с геологическими породами (серпентинизации) или радиолиз (диссоциация воды ураном или плутонием) и разложение органического вещества. Серпентинизация – это процесс вступления воды в реакцию с определенными офиолитовыми породами и выделение водорода [20]. Серпентинизация является естественным природным процессом изменения водой горных пород, содержащих высокую концентрацию железа и магния. Это изменение в сочетании с окислением металлов, присутствующих в породах, приводит к образованию богатого водородом газа и очень щелочной воды (pH до 12,5).

Франция-Германия,
Бассейн рек Мозель – Саар

Рисунок 7– На границе Франции и Германии ученые-гидрогеологи Филипп де Донато и Жак Пиронон, профессора-исследователи лаборатории GeoRessources исследовали гигантское месторождение до 250 млн т природного «белого» водорода (H_2) в регионе речного бассейна Мозель – Саар

Результаты и обсуждение

Исследования гидрогеологии природных запасов водорода являются сложной задачей. Исследователями-гидрогеологами проводятся обширные исследования для определения потенциального расположения месторождений природного водорода (рисунок 8).



Рисунок 8 – Подземные природные геологические «фабрики» производства водорода, возобновляемой энергии с циклом около периода человеческой жизни, около 80 лет [26, 27]

Ученые-гидрогеологи используют расширенные исследования базы данных скважин для анализа запасов природного «белого» водорода. В то же время добыча природного «белого» водорода может быть намного дешевле, чем все типы водородов (рисунок 9). Под землей может быть в тысячу раз больше водорода, чем всех существующих типов водорода, производимых на земле [27]. Геологическая службы США, USGS, считает, что Земля ежегодно производит намного больше водорода, чем миллионы тонн, производимые людьми на всей земле [28].

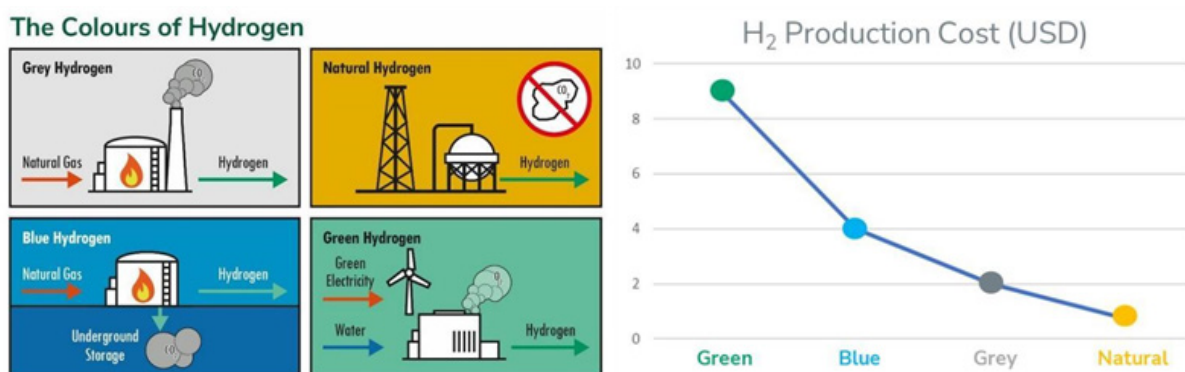
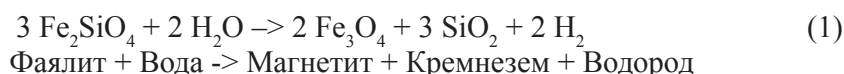


Рисунок 9 – Природный геологический «белый» водород намного дешевле по себестоимости, чем все типы других водородов, производимых на земле [27].

Наличие воды в подземных «фабриках» является одним из основных компонентов процесса выработки природного геологического «белого» водорода. Без воды подземная «фабрика» просто высохнет. В связи с этим очень важно отрегулировать снабжение водой подземных геологических «фабрик» водорода. Основными процессами выработки природного геологического «белого» водорода являются:

- а) серпентинизация (гидратация богатых железом пород/минералов)
- б) радиолиз (расщепление молекул воды при радиоактивном распаде урана и/или тория)

Пример серпентинизации оливина (минерала, богатого железом и магнием):



Пример радиолиза, диссоциация воды ураном или плутонием в земле. При радиолизе вода разлагается на такие частицы, как гидроксильные радикалы (точка НО-радикал), атомы водорода (Н точка-радикал) и атомы кислорода (О точка-радикал) (рисунок 10) [26].

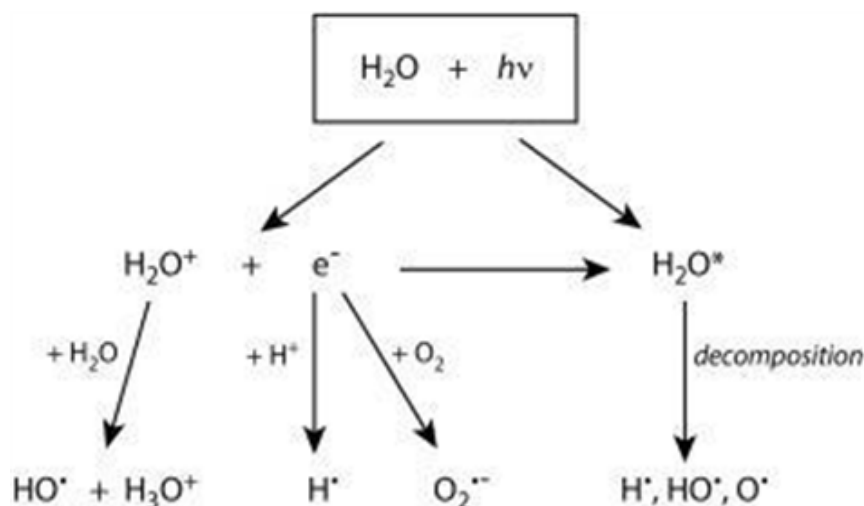


Рисунок 10 – Основные первичные реакции и продукты радиолиза воды [26]

Есть большая вероятность нахождения природного «белого» водорода в Кыргызстане – Казахстане, где имеются большие запасы полиметаллов, урана, подземных вод. В Кыргызстане – Казахстане отсутствовали стимулы поиска природного «белого» водорода, отсутствовало финансирование, стимулы вовлечения ученых-гидрогеологов в изучение природного «белого» водорода. Теперь же имеется информация и знания, как выглядят правильные геологические структуры, где могут находиться подземные «фабрики» производства природного «белого» водорода по опыту исследований Мали, Швейцарии, Франции, Германии, США, Канады, Австралии [29–31]. Оптимально изучить опыт этих стран и их геологические структуры, обучиться и исследовать аналогичные геологические структуры Кыргызстана – Казахстана, где могут быть месторождения природного «белого» водорода, стимулировать и дать финансирование ученым-гидрогеологам Кыргызстана–Казахстана. В случае наличия природного «белого» водорода в Кыргызстане–Казахстане он может быть дешевле производства «зеленого» водорода в десятки раз [21]. Наличие природного «белого» водорода в Кыргызстане – Казахстане вполне может позволить развивать интенсивно внутреннее использование водорода населением этих стран, где нужны будут технологии, аналогичные технологиям французских производителей водородных электрических генераторов с нулевым уровнем выбросов [32, 33]. Накопительные технологии водорода в емкостях, идентичных сжиженному природному

газу, с последующим производством электроэнергии станциями GEN2, вполне могут заменить дорогие технологии хранения электроэнергии в батареях, практически могут заменить батареи (рисунок 11). Развитие использования таких технологий требует технической экспертизы с системой подготовки техников по водороду, включая обучение техников в колледжах в кооперации с колледжами Франции, Канады и Катара. Кыргызстану – Казахстану будет выгодно усилить кооперацию в подготовке техников в цепочке школа – колледж – индустрия – университет в изучении, проведении полевых водных исследований, моделировании водных балансов поверхностных–подземных вод бассейнов, гидрогеологии [34, 35].



Рисунок 11 – Французские технологии водородных электрических генераторов GEN2 с нулевым уровнем выбросов [33, 34, 35] с накопителями водорода в емкостях, идентичных сжиженному природному газу, с последующим производством электроэнергии вполне могут заменить дорогие технологии хранения электроэнергии в батареях, практически могут заменить батареи

Заключение

Кыргызстану и Казахстану важно развить более тесную кооперацию по совместному развитию водородно-водного рынка с созданием стимулов вовлечения населения в изучение гидрогеологии в цепочке школа – колледж – индустрия – университет. Кыргызстан и Казахстан очень богаты подземными природными ресурсами, которые используются в основном только для того, чтобы получить сиюминутную выгоду на несколько лет, без системы долгосрочного сохранения природных ресурсов для будущих поколений этих стран. Добывающая индустрия Кыргызстана – Казахстана нацелена лишь на извлечение руд без возобновляемой системы восстановления природных ресурсов. Технологии использования подземных ресурсов как восстанавливаемой подземной «фабрики» с эффективной системой восстановления природных ресурсов практически нет. Кыргызстан и Казахстан вполне могут исследовать, наладить и эффективно использовать природный геологический «белый» водород в системе непрерывного получения и восстановления в подземной водородной «фабрике». В Кыргызстане и Казахстане плохо отработана кооперация гидрогеологических исследований. Геоинформационные карты расположения природного «белого» водорода отсутствуют. Важно усилить экспертизу, знания, заинтересованность, инвестиции в гидрогеологические исследования при-

родного «белого» водорода в обеих странах. Гидрогеологические исследования естественных природных процессов серпентинизации, радиолиза плохо отработаны в Кыргызстане и Казахстане, практически отсутствуют. Исследования водных ресурсов гидрогеологии имели и имеют остаточный принцип. Работы гидрогеологов очень плохо финансируются. Научные институты гидрогеологов Кыргызстана и Казахстана с трудом выживают без финансирования. Этим странам оптимально использовать текущие возможности «золотой лихорадки» гидрогеологических исследований по природному геологическому «белому» водороду. Наиболее рационально развить партнерские дуальные системы обучения с Канадой – США, Францией – Германией, где обнаружены крупнейшие мировые подземные запасы водорода. Кыргызстану с Казахстаном важно усилить кооперацию с созданием стимулов роста, поддержкой исследователей, ученых-гидрогеологов, созданием совместных кыргызско-казахских бассейновых колледжей подготовки техников по водным ресурсам, водородным технологиям аналогично тому, как делается в других странах.

Информация о финансировании

Данная работа поддерживается проектом № AP19679749 грантового финансирования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Adenova D., Tazhiyev S., Sagin J., Absametov M., Murtazin Y., Trushel L., Miroshnichenko O., Zaryab A. (2023) Groundwater Quality and Potential Health Risk in Zhambyl Region, Kazakhstan. *Water*, no. 15, p. 482. <https://doi.org/10.3390/w15030482>.
- 2 Ob#em vody v Kirovskom vodohranilishhe (2023). <https://agro.gov.kg/ru/10589/> [in Russian].
- 3 ody v Kirovskom vodohranilishhe pochni net. Zasuha na jube (2023). https://youtu.be/Z31qTmL8Hhk?si=Bqk2Vxb-u-gI2V0_ [in Russian].
- 4 Yapiyev V., Sagintayev Z., Inglezakis V.J., Samarkhanov K., Verhoef A. (2017) Essentials of Endorheic Basins and Lakes: A Review in the Context of Current and Future Water Resource Management and Mitigation Activities in Central Asia. *Water*, 9, 798. <https://doi.org/10.3390/w9100798>.
- 5 Transgranichnoe sotrudnichestvo v bassejnah rek Chu i Talas (2018). <https://unece.org/environment-policy/water/areas-work-convention/transboundary-cooperation-chu-and-talas-river-basin> [in Russian].
- 6 FEMA Hazus Program (2024). <https://www.fema.gov/flood-maps/products-tools/hazus>.
- 7 Kazakhstan Today (2009) V sluchae proryva plotiny Kirovskogo vodohranilishha bliz Taraza mozhet pogibnut' bolee 150 tys. chelovek. https://www.kt.kz/rus/society/v_sluchae_proryva_plotini_kirovskogo_vodohranilishta_bliz_taraza_mozhet_pogibnutj_bolee_150_tis_chelovek_mchs_1153502816.html [in Russian].
- 8 RED RIVER BASIN COMMISSION (2024) Three States, One Province, Two Countries, ONE Red River Basin. <https://www.redriverbasincommission.org/>
- 9 RED RIVER COLLEGE (2024) <https://www.rrc.ca/>
- 10 Proekty Kanady-SShA/ <https://www.redriverbasincommission.org/rrbc-projects> [in Russian].
- 11 Light Detection and Ranging – Remote Sensing (2024) <https://www.neonscience.org/resources/learning-hub/tutorials/lidar-basics>.
- 12 Dannye LIDAR otkrytogo dostupa dlja skachivaniya (2024) <https://geoportal.gov.mb.ca/datasets/manitoba-lidar-tracker/explore> [in Russian].
- 13 Programmy obuchenija po ispol'zovaniju LIDAR otkryty dlja kazhdogo (2024) https://www.redriverbasincommission.org/_files/ugd/4a0263_b8b0c30808534dde9af401bf3bf7cc78.pdf [in Russian].
- 14 Novye primeneniya LiDAR dlja Adaptacii k klimatu v bassejne Krasnoj reki https://www.redriverbasincommission.org/_files/ugd/4a0263_52343221a2ad47f8a638213458414f2a.pdf [in Russian].
- 15 Upravlenie zasuhami-navodnenijami na granice Kanady – SShA. <https://drive.google.com/drive/folders/0B776EVHLD2yGaFdPZkxQVVFQRTg?resourcekey=0-GgFPWywQS8RT37yU6F32jA> [in Russian].

- 16 Malye nakopiteli dlja popolnenija vodonosnyh podzemnyh gorizontov, FLOOD-MAR (2024) <https://floodmar.org/> [in Russian].
- 17 US FEMA expenses estimations (2023). <https://www.smartcitiesdive.com/news/fema-climate-billion-dollar-weather-disaster-resilience/685250/>
- 18 Programmy shkol'nikov SShA Kanady po izucheniju vodnyh resursov. Znaj svoju skvazhinu (2024) <https://knowyourwell.unl.edu/> [in Russian].
- 19 ENR. The Rush Is On: Administration's \$8 Billion Attracts Lots of US Hydrogen Hub Builders (2022). <https://www.enr.com/articles/54092-the-rush-is-on-administrations-8-billion-attracts-lots-of-us-hydrogen-hub-builders>.
- 20 White Hydrogen. The hunt for 'holy grail' of clean energy buried beneath the ground (2023). <https://www.independent.co.uk/climate-change/news/hydrogen-renewable-energy-wildcatter-mali-nebraska-b2451551.html>.
- 21 Energy Observer. What potential for natural hydrogen? (2024). <https://www.energy-observer.org/resources/natural-hydrogen>.
- 22 Solar Impulse. White Hydrogen. Drilling for natural hydrogen (2024). <https://solarimpulse.com/solutions-explorer/white-hydrogen>.
- 23 Hand E. (2023) Hidden Hydrogen, Does Earth hold vast stores of a renewable, carbon-free fuel? Science. <https://www.science.org/content/article/hidden-hydrogen-earth-may-hold-vast-stores-renewable-carbon-free-fuel>.
- 24 What is 'white hydrogen'? The pros and cons of Europe's latest clean energy source. EuroNews Green (2023). <https://www.euronews.com/green/2023/11/05/what-is-white-hydrogen-the-pros-and-cons-of-europes-latest-clean-energy-source>
- 25 Bettayeb K. (2023) CNRS Geology, A gigantic hydrogen deposit in northeast France? <https://news.cnrs.fr/articles/a-gigantic-hydrogen-deposit-in-northeast-france>
- 26 Radiolysis (2003). <https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/radiolysis>.
- 27 Getech. A Mineral Systems Approach to Targeting Natural Hydrogen Deposits (2023). <https://getech.com/blog/hydrogen/a-mineral-systems-approach-to-targeting-natural-hydrogen-deposits/>.
- 28 Wang B. (2023) Possibly a Trillion Tons of Mineable Hydrogen. <https://www.nextbigfuture.com/2023/02/possibly-a-trillion-tons-of-mineable-hydrogen.html>.
- 29 Amadi A. (2024) Natural Hydrogen: A Potential Carbon-Free Energy Source of the Future? <https://medriva.com/health/environmental-health/natural-hydrogen-a-potential-carbon-free-energy-source-of-the-future/>.
- 30 UN, Department of Economic and Social Affairs, Sustainable Development, Hydrogen and Ammonia fertilizers for Sustainable Agriculture and New Global Framework for Managing Nature programs (2023). <https://sdgs.un.org/partnerships/hydrogen-and-ammonia-fertilizers-sustainable-agriculture-and-new-global-framework>.
- 31 Hawkinson K. (2023) What is white hydrogen? Scientists say clean-energy gas could save the world. Business Insider Science. <https://www.businessinsider.com/white-hydrogen-france-clean-energy-climate-change-2023-10>.
- 32 American Gas Association. Natural Hydrogen Has Been Underestimated (2023). <https://www.aga.org/natural-hydrogen-has-been-underestimated/>.
- 33 EODEV. GEH2: The zero-emission hydrogen power generator (2024). <https://www.eo-dev.com/products/geh2-the-zero-emission-hydrogen-power-generator>.
- 34 Generac Power, US-French EODev Hydrogen GEH2 (2024). <https://www.generac.com/Industrial/all-about/hydrogen>.
- 35 Hydrogen Technician, college based TVET program (2024). <https://cna.nl.ca/program/hydrogen-technician#>.

¹Аманжолова Р.,

магистр, ORCID ID: 0000-0001-9129-1074, e-mail: r_amanzholova@kbtu.kz

²Аденова Д.,

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7973-811X, e-mail: d.adenova@satbayev.university

¹Аманжолов К.,

магистрант, ORCID ID: 0009-0007-6698-2106, e-mail: ka_amanzholov@kbtu.kz

³Мурат Д.,

магистр, ORCID ID: 0009-0009-2332-4802, e-mail: dauletmurat8080@gmail.com

^{1,3}Дүйсебек Б.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-2596-4936, e-mail: b.duisebek@kbtu.kz

^{1*}Сагин Ж.,

PhD, профессор, ORCID ID: 0000-0002-0386-888X, *e-mail: j.sagin@kbtu.kz

³Сарсекова Д.,

а.-ш.ғ.д., профессор, ORCID ID: 56403235500,

e-mail: sarsekova.dani@kaznaru.edu.kz" sarsekova.dani@kaznaru.edu.kz

⁴Орунбаев С.,

PhD, профессор, ORCID ID: 0000-0002-9321-6390, e-mail: orunbaev_s@auca.kg

^{5,6}Алиев М.

магистр, ORCID ID: 0000-0002-3550-5223, e-mail: hydrolab.kr@gmail.com

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

²У. Ахмедсафин атындағы Гидрогеология және геоэкология институты,

Қ. Сәтбаев университеті, 050000, Алматы қ., Қазақстан

³Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, 050010, Алматы қ., Қазақстан

⁴Орталық Азиядағы Америка университеті, 720060, Бішкек қ., Қырғызстан

⁵Қырғыз ирригация ғылыми-зерттеу институты, 720055, Бішкек қ., Қырғызстан

⁶Қырғыз Республикасының Су ресурстары, ауыл шаруашылығы және қайта өңдеу өнеркәсібі министрлігі, 720014, Бішкек қ., Қырғызстан

СУТЕГІ-СУ НАРЫҒЫН ЕНГІЗУ ҮШІН ҚЫРҒЫЗСТАН – ҚАЗАҚСТАН ГИДРОГЕОЛОГИЯСЫН ЗЕРТТЕУ

Андатпа

Су тапшылығы Орталық Азия (ОА), соның ішінде Қырғызстан – Қазақстан сияқты құрғақ және жартылай құрғақ аймақтардағы жаһандық тәуекелдердің бірі. Орталық Азияның негізгі өзендері – Қырғызстан мен Қазақстан аймағында орналасқан Шу–Талас өзендер алабы сияқты трансшекаралық болып келеді. Климаттың өзгеруі, сумен қамтамасыз етудің қысқаруы, су сапасының нашарлауы сияқты табиғи және техногендік факторлар су дағдарыстары мен қақтығыстарына әкелуі мүмкін. Өкінішке орай, негізінен Орталық Азияның жер үсті суларының ресурстары зерттеліп, жер асты суларының ресурстары ашық аналитикалық талдаудан тыс қалған. Сонымен қатар жер асты сулары өзен алабы экожүйесінің өмірлік маңызды құрамдас бөлігі және алабтың жер үсті-жер асты суларының біріктірілген жүйесінің тұрақтылығын толық талдау үшін жер үсті суларымен бір мезгілде зерттелуі керек. Жер үсті және жер асты сулары біріктірілген ғылыми зерттеулер, алабтардың су теңгерімін болжау шекаралас мемлекеттердің метеоролог, гидролог, гидрогеолог мамандарының ынтымақтастығындағы қиындықтармен байланысты. Негізінен трансшекаралық келіссөздерде мекемелік басқару, жүйелі жоспарсыз, табиғи үрдістерге бейімділік пен дайындықты талдамай, далалық жұмыстарға жергілікті тұрғындарды, мектептердің, колледждердің және университет студенттерін тартып, ынталандырмай, жер үсті және жер асты сулары алабындағы су теңгерімін модельдеуді, суды зерттейтін әкімшілік басқарудан басымырақ. Қырғызстан мен Қазақстан алабтарындағы ауылдардың жергілікті тұрғындарының мектеп – колледж – өндіріс – университет тізбегінде біліктілігін, климаттың өзгеруіне бейімделу мүмкіндіктерін арттыру үшін бірлесе қолдау көрсету керек. Қырғызстан мен Қазақстандағы табиғи үрдістердің бірлескен гидрогеологиялық зерттеулері нашар дамыған. Қырғызстан мен Қазақстан бірлескен ынтымақтастық мүмкіндіктерін жоғалтуда. Қазір көптеген елдерде гидрогеологиялық зерттеулер мен табиғи геологиялық «ак» сутегі бойынша зерттеулердің «алтын қарқыны» жүріп жатыр, сонымен қатар Франция – Германия шекарасынан әлемдегі ең үлкен жер асты

сутегінің қоры табылды. 20 жыл бұрын қараусыз қалған көмір шахталары орналасқан Мозель және Саар өзендерінің трансшекаралық алабтары аумағында жер асты «зауыттарындағы» өндірісті – адамның орташа өмір сүру кезеңімен шамалас 80 жылда қайта қалпына келтіру мүмкіндігіне ие, көлемі шамамен 250 миллион тоннаға жететін табиғи геологиялық «ақ» сутектің үлкен көлемі анықталды. Мозель, Саар өзендерінің трансшекаралық алабының өкілдері – Франция мен Германияның келісімі серпентинизация мен радиолиздің физика-химиялық тотығу үрдістерін жүзеге асыру үшін жер астындағы сутегі «зауыттарын» суға толтыру кезінде маңызды рөл атқарады. Қырғызстан мен Қазақстан үшін халқын дамуға ынталандырып, зерттеушілер мен гидрогеологтарға қолдау көрсетіп, екі елдің Ғылым академияларын нығайту арқылы ынтымақтастықты күшейту керек. Бұл шолуда Қырғызстан мен Қазақстанның гидрогеологиясын зерделеу арқылы Қырғызстан мен Қазақстан арасындағы қоғамдастықты нығайту, сонымен қатар екі елдің бірлесіп табиғи ресурстарды тиімді басқару, сутек пен су ресурстарын тиімді пайдалану мүмкіндіктері ұсынылды.

Тірек сөздер: жер үсті, жер асты сулары, алабық кеңес, Франция –Германия, Канада – АҚШ, Қырғызстан – Қазақстан, табиғи «ақ» сутегі.

¹**Amanzholova R.,**

master, ORCID ID: 0000-0001-9129-1074, e-mail: r_amanzholova@kbtu.kz

²**Adenova D.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7973-811X, e-mail: d.adenova@satbayev.university

¹**Amanzholov K.,**

master student's, ORCID ID: 0009-0007-6698-2106, e-mail: ka_amanzholov@kbtu.kz

³**Murat D.,**

master, ORCID ID: 0009-0009-2332-4802, e-mail: dauletmurat8080@gmail.com

^{1,3}**Dujsebek B.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-2596-4936, e-mail: b.dusebek@kbtu.kz

^{1*}**Sagin Zh.**

PhD, professor, ORCID ID: 0000-0002-0386-888X, *e-mail: j.sagin@kbtu.kz

³**Sarsekova D.,**

Doctor of Agricultural Sciences, professor, ORCID ID: 56403235500,
e-mail: "sarsekova.dani@kaznaru.edu.kz" sarsekova.dani@kaznaru.edu.kz

⁴**Orunbaev S.,**

PhD, professor, ORCID ID: 0000-0002-9321-6390, e-mail: orunbaev_s@auca.kg

^{5,6}**Aliev M.**

master, ORCID ID: 0000-0002-3550-5223, e-mail: hydrolab.kr@gmail.com

¹Kazakh-British Technical University, 050000, Almaty, Kazakhstan

²Akhmedsafin Institute of Hydrogeology and Geoecology, Satpayev University,
050000, Almaty, Kazakhstan

³Kazakh National Agrarian Research University, 050010, Almaty, Kazakhstan

⁴American University of Central Asia, 720060, Bishkek, Kyrgyzstan

⁵Kyrgyz Research Institute of Irrigation, 720055, Bishkek, Kyrgyzstan

⁶Water Resources Service under the Ministry
of Water Resources, Agriculture and Processing Industry of the Kyrgyz Republic,
720055, Bishkek, Kyrgyzstan

HYDROGEOLOGY OF KYRGYZSTAN-KAZAKHSTAN EXPLORATION FOR HYDROGEN-WATER MARKET DEVELOPMENT

Abstract

Water scarcity is one of the global risks in arid and semi-arid regions such as Central Asia (CA), including Kyrgyzstan-Kazakhstan. The main rivers of Central Asia are transboundary, such as the Chu-Talas River basin, which is located on the territory of Kyrgyzstan and Kazakhstan. Natural and man-made factors such as climate change

can lead to water crises and conflicts due to reduced water supplies and deteriorating water quality. Unfortunately, in Central Asia, surface water resources are mainly studied, and groundwater resources are excluded from open analytical analysis. At the same time, groundwater is a vital component of the river basin ecosystem and should be studied simultaneously with surface water to obtain a more complete analysis of the sustainability of the integrated surface-groundwater system of the basin. Combined scientific research of surface and groundwater, forecasting the water balance of basins is associated with great difficulties in transboundary cooperation of specialists from meteorologists, hydrologists, hydrogeologists of bordering states. Basically, cross-border negotiations are dominated by departmental management, more administrative management, without system planning, analysis of adaptation and preparation for natural processes, without stimulating the involvement of the local population, students of schools, colleges and universities in studying, conducting field water research, modeling surface water balances -groundwater of swimming pools. Local residents of the villages of the basins of Kyrgyzstan and Kazakhstan need increased joint support for advanced training of the population, opportunities for adaptation to climate change in the school-college-industry-university chain. Joint hydrogeological studies of natural processes in Kyrgyzstan and Kazakhstan are poorly developed. Kyrgyzstan-Kazakhstan is missing out on opportunities for joint cooperation. In many countries there is now a “gold rush” of hydrogeological research and research on natural geological “white” hydrogen, including on the France-German border, where the world’s largest underground reserves of hydrogen have been discovered. It is important for Kyrgyzstan and Kazakhstan to strengthen cooperation with the creation of growth incentives, support for researchers, hydrogeologists, and strengthening of the Academies of Sciences of the two countries. This review presents opportunities for strengthening cooperation between Kyrgyzstan and Kazakhstan, including joint effective management of natural resources, studying the hydrogeology of Kyrgyzstan and Kazakhstan for the effective joint use of hydrogen and water resources of the two countries.

Key words: surface-groundwater, basin council, France-Germany, Canada-USA, Kyrgyzstan-Kazakhstan, natural “white” hydrogen.

UDC 532.694
IRSTI 31.25

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-324-333>

¹**Junyi Zhang,**

Master student, e-mail: 1506074112@qq.com

^{1*}**Hongbin Yang,**

PhD, Associate Professor, e-mail: hongbinyang@upc.edu.cn

²**Yufei Zheng,**

Master, e-mail: zhengfei19861014@163.com

³**Bin Zhang,**

Master, e-mail: atiger08@foxmail.com

²**Bo Zhang,**

Master, e-mail: 1027353472@qq.com

²**Xiang Li,**

Master, e-mail: 307187527@qq.com

¹**Huazheng Wang,**

Master student, e-mail: 914017571@qq.com

¹School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China),
Qingdao 266580, PR China

²China Oilfield Service Limited, Tianjin 300459, PR China

³Dongying Ruifeng Petroleum Technical Development Co., Ltd, Dongying 257092, PR China

RESEARCH PROGRESS ON THE EFFECT OF NANOPARTICLES ON FOAM STABILITY

Abstract

As a fluid with a certain viscosity, foam is widely used to control gas channeling and reduce gas mobility in oil fields due to its simple process, low cost and stability in water, and has achieved good results. Through literature research and the research results of our team in recent years, the research status of CO₂ foam is expounded from the direction of foam structure and foam decay. On this basis, the research progress of the effects of nanoparticles and external conditions on foam stability is introduced. Finally, the mechanism of nanoparticle stabilized foam was discussed by introducing the maximum desorption energy theory, the maximum capillary pressure theory and the interaction theory between particles. With the continuous development of foam flooding technology, the diversity and functionality of foam will continue to show, the development cost will be further reduced, and its application prospects in oil fields will become more and more broad.

Key words: foam, fluid mobility, gas channeling, nanoparticles.

Introduction

Researchers consider foam flooding a crucial technology for enhancing oil recovery due to its straightforward process, cost-effectiveness, and ability to control gas channeling. Foam demonstrates good stability in formation water within reservoir channels, allowing it to effectively block high permeability layers, adjust reservoir heterogeneity, and increase sweep efficiency. Additionally, using foam as a displacement fluid offers advantages such as low density, minimal formation leakage, and limited formation damage, making it a widely employed method. China began the experiment of foam flooding in Yumen oilfield in 1965. Since then, a large number of foam flooding research and field tests have been carried out in Daqing, Liaohe and Shengli [1]. Currently, gases like flue gas, N₂, and CO₂ are predominantly used in foam flooding. However, as global focus on reducing CO₂

emissions has grown, carbon capture, utilization, and storage technologies have gained significant attention from major energy companies worldwide. CO_2 foam flooding is an important technology for enhancing oil recovery in oilfields. It not only overcomes issues of CO_2 gas channeling seen in conventional CO_2 flooding but also enhances swept volume and oil displacement efficiency while utilizing and sealing CO_2 gas. Despite these benefits, challenges like poor foam stability during application persist, and existing methods using polymers as foam stabilizers have not adequately addressed this issue. As a result, researchers have suggested using hydrophobic inorganic nanoparticles to stabilize CO_2 foam [2]. The addition of nanoparticles can enhance foam's mechanical strength by adsorbing onto the gas-liquid interface, reducing foam's elastic deformation from gas collision, preventing coarsening and coalescence, and thus improving foam stability [3]. However, the use of inorganic nanoparticles can cause irreversible damage to low permeability layers after foam rupture, limiting its application in oilfields.

In view of the above problems, this work focuses on the research status and application of nanoparticles in the direction of foam, and analyzes and summarizes the stability of foam under different conditions. The effects of nanoparticles, external conditions and other factors on foam stability were described in detail. Combined with the theory of foam stability factors, the mechanism of nanoparticle stabilized foam was systematically introduced. It lays a theoretical foundation for the popularization and application of foam in the direction of oil and gas field development.

Research status of CO_2 foam

During the 1950s, the United States, with its abundant CO_2 gas resources, laid the groundwork for CO_2 foam flooding and was the pioneering country in researching this technology. In China, research on CO_2 foam systems started relatively late. However, both domestic and international research results have demonstrated the efficacy of foam plugging in controlling channeling. The crux of CO_2 foam flooding technology lies in the foaming effect and stability of the foam system. The primary cause of foam instability is the decay of the foam structure itself.

The structure of foam

Foam can be described as a dispersion system of 'bubble polymer,' where gas is separated by a liquid film. There are various foam shapes, with spherical foam containing more liquid and thicker liquid film between bubbles. As foam loses liquid and the liquid film between bubbles thins, it transitions from spherical to polyhedral, forming polyhedral foam.

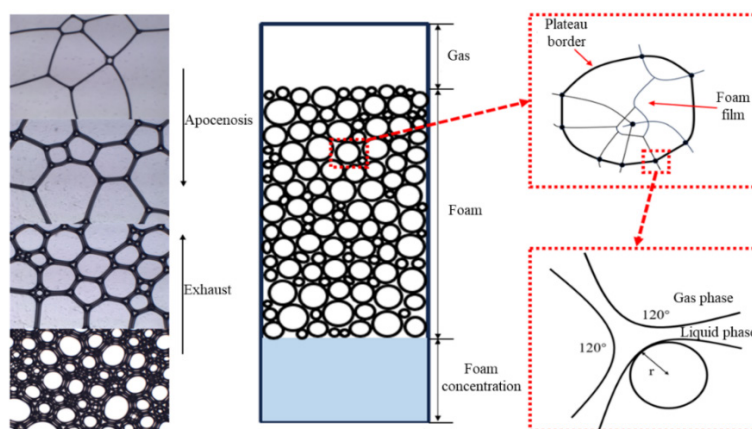


Figure 1 – Composition and structure of foam

Foam is a dynamic system that naturally decays over time. Its basic elements include the liquid film, node, and Plateau channel, as illustrated in Figure 1. The fundamental framework of foam, known as the Plateau channel, is created by the meeting of liquid films from three adjacent bubbles. Four adjacent frameworks join to form a node, which acts as the connecting point of the framework [4].

During the defoaming process, the structure of foam in layers of varying heights differs. Due to gravity, the foam system expels liquid from top to bottom, while gas is released from bottom to top. Consequently, the lower layers of the system have a higher liquid content in the liquid film, resulting in smaller, more spherical bubbles with lower gas content. As the height of the foam layer increases, the liquid content in the system's liquid film decreases, leading to thinner liquid films and larger bubble sizes. Excessive spherical foam transitions to polygonal foam, which is more stable than spherical foam [5].

The decay of foam

Foam is a thermodynamically unstable dispersion system where the gas phase is dispersed in the liquid phase. With numerous gas-liquid interfaces, the foam naturally tends to transform into its lowest energy form according to the principle of minimum energy. As the interface area decreases, the system's energy lowers, leading to foam collapse [6]. The collapse of foam primarily occurs due to the drainage of the liquid film and the coalescence and enlargement of bubbles.

Film Drainage: Liquid film drainage consists of two main processes. Initially, when the foam contains a high liquid content, gravity causes the liquid to drain mainly through the Plateau channel. As the liquid film thins, drainage shifts from gravity-driven to thermodynamic. Thermodynamic drainage includes capillary pressure and surface tension-induced separation pressure at the gas-liquid interface [7].

Bubble Coalescence: When adjacent bubbles collide during defoaming, two outcomes can result: elastic collision or bubble coalescence. Elastic collision occurs when the liquid film's elastic deformation offsets the collision force, maintaining the number and size of bubbles. Bubble coalescence happens when the liquid film cannot withstand the collision force, leading to film rupture and the merging of bubbles into larger ones [8]. In relatively stable dynamic environments, bubble collisions are primarily driven by coalescence due to the weak motion intensity between bubbles, making coalescence the main cause of bubble instability.

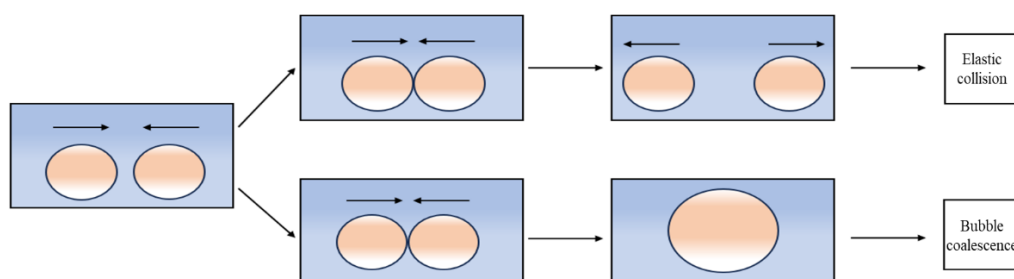


Figure 2 – Collision process of adjacent bubbles

Research progress on the effect of nanoparticles on foam stability

To address the stability of CO_2 foam, foam stabilizers are commonly added, with polyacrylamide, sodium carboxymethyl cellulose, xanthan gum, and other polymer stabilizers being widely used. These stabilizers work by increasing the viscosity of the liquid phase. Higher viscosity slows down liquid film drainage and gas exchange between bubbles, but this can also reduce foaming ability due to increased viscous resistance.

In addition to polymers, nanoparticles exhibit excellent foam stabilization due to their high desorption energy, allowing them to adsorb effectively at the gas-liquid interface. This inhibits foam disproportionation and enhances liquid film strength. In a three-phase foam system, nanoparticles enhance foam stability by increasing the mechanical strength of the liquid film and preventing liquid film drainage [9].

Effect of nanoparticles on foam stability

(1) Effect of Particle Size on Foam Stability: The particle size of nanoparticles influences their long-term adsorption at the foam liquid film boundary and their arrangement on the film, crucial factors in foam stability. Studies have shown that smaller nanoparticles generally enhance foam stability compared to larger ones. For example, Tang et al. [10] studied nano-SiO₂ particles (20-500 nm) in sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS) foam, finding that smaller particles led to better foam stability. Similarly, Aktas et al. [11] observed that smaller particle sizes significantly improved foam stability. He et al. developed hydrophobic nanoparticles and discovered that smaller particle sizes correlated with stronger foam stability. However, there can be an optimal particle size range for stability. Liu et al. investigated the effect of PTFE particle size on foam stability, noting that stability initially increased and then decreased with particle size. They concluded that extremely small or large particle sizes were detrimental to foam stability, as they couldn't stably adsorb at the foam's liquid film boundary.

(2) Effect of Surface Hydrophobicity on Foam Stability: The hydrophobicity of spherical nanoparticle surfaces is often characterized by the three-phase contact angle. When the contact angle between the nanoparticles and the liquid film is less than 90°, the nanoparticle area in the liquid phase exceeds that in the gas or oil phase. Conversely, when the contact angle is greater than 90°, the nanoparticle area in the gas or oil phase surpasses that in the liquid phase. This principle also applies to curved interfaces [12].

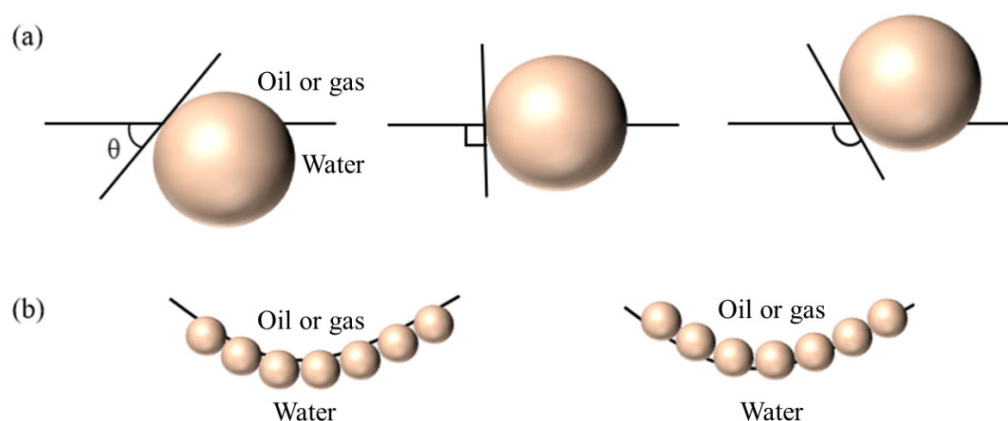


Figure 3 – The adsorption state of spherical particles at the interface (a) plane (b) curved interface

The contact angle between nanoparticles' surfaces and water (surface wettability) is another crucial factor in stabilizing foam. If the contact angle is too large or too small, it can hinder foam stabilization. Liang et al. [13] found that when the contact angle between nanoparticles and the liquid film was around 80°, it had the best stabilizing effect on foam. Nanoparticles with strong hydrophilicity had almost no effect on foam stabilization. Johansson et al. [14] observed that excessively hydrophobic particle surfaces were unable to stabilize foam. Wang et al. developed a high-performance three-phase foam system using α -olefin sulfonate (AOS) as a foaming agent and fly ash as a foam stabilizer. They discovered that at low AOS concentrations, the particles' surface became hydrophobic, enhancing their adsorption and dispersion at the foam interface, thus improving foam stability. However, at high AOS concentrations, excessive AOS molecules on the particle surface changed its wettability from hydrophobic to hydrophilic, reducing its ability to adsorb at the foam interface and thus decreasing foam stability. Zhang et al. used Fe₃O₄ nanoparticles as a foam stabilizer in a foam flooding system, modifying their surface to be hydrophobic. They found that nanoparticles with a water contact angle of 68° had the best foam stabilization effect. Stephanie et al.

[15] stabilized supercritical CO₂ foams with both hydrophilic and hydrophobic SiO₂ nanoparticles. They found that nanoparticles with extreme hydrophilicity or hydrophobicity were not adsorbed on the liquid film and were more likely to remain in the liquid or gas phase, lacking the ability to stabilize foam.

(3) Effect of Concentration on Foam Stability: Nanoparticle concentration influences their adsorption and arrangement on the foam membrane. Guignot et al. [16] observed that increasing particle concentration inhibited liquid film drainage and stabilized foam by reducing particle agglomeration. Sheng et al. studied SiO₂ particles' enhancement mechanism on firefighting CO₂ foam stability, noting a slight decrease in foam volume with increasing nanoparticle concentration but a significant increase in foam stability. Carn et al. [17] found that exceeding a 1% nanoparticle concentration led to most particles being adsorbed on the liquid film, significantly reducing foam liquid drainage in the Plateau channel. Foam stability generally increases with nanoparticle concentration up to a critical value, beyond which stability decreases due to particle coalescence. Hunter et al. [18] observed that high nanoparticle concentrations formed a shell on the liquid film surface, enveloping the gas-liquid interface and reducing liquid film drainage, thus improving foam stability. However, exceeding the maximum load the liquid film can withstand causes nanoparticle coalescence, negatively impacting foam stability.

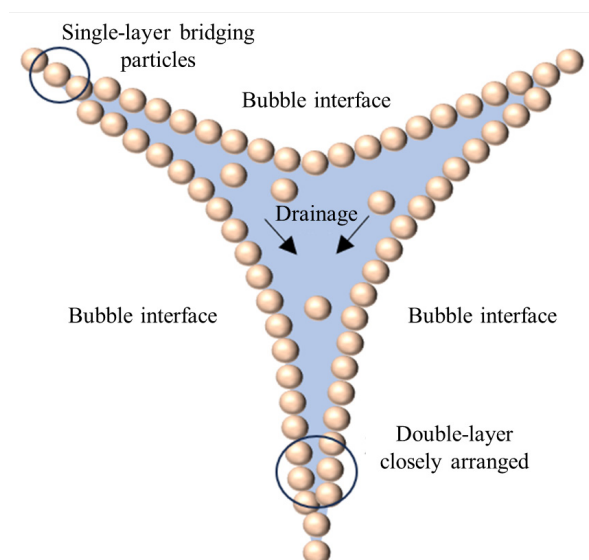


Figure 4 – Particles adsorbed at the boundary of foam liquid film

Effect of external conditions on foam stability

(1) Oil saturation

After the foam agent encounters water, it will produce a large amount of foam after the formation encounters water, blocking the high permeability channel, to achieve the purpose of expanding the spread range. The foam system will quickly defoam after contacting a small amount of residual oil on the rock wall, resulting in a decrease in plugging effect. The addition of nanoparticles can form a protective layer between crude oil and foam to prevent direct contact between crude oil and foam liquid, reduce the damage of crude oil to foam structure, thus improve the oil resistance of foam [19]. Yang et al. [20] found that the foam system with nanoparticles (AIOOH) as a foam stabilizer had better oil resistance than the foam system with a single surfactant. This is because nanoparticles (AIOOH) can be adsorbed at the gas-liquid interface of the foam to form a spatial network structure, and the hydrophobic groups on the surface can effectively adsorb crude oil, slowing down the contact between crude oil and the liquid film and the diffusion on the liquid film.

(2) Salinity

The inorganic salt ions in the formation will affect the stability of the foam. Generally, the stability of the foam increases with the increase of the concentration of inorganic salt ions. This is because inorganic salt ions can be adsorbed on the liquid film of the foam, to increase the stability of the foam. However, with the increase of salinity, the concentration of inorganic salt ions in the solution increases, the diffusion electric double layer is compressed, the electric repulsion is weakened, the thickness of the liquid film becomes smaller, the drainage speed of the liquid film increases, and the stability of the foam decreases. Dickinson et al. [21] found that different concentrations of sodium chloride ($0-4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) had a certain effect on the stability of the foam. With the increase of sodium chloride concentration, the Zeta potential of the particles decreased and agglomerated, which had an adverse effect on the stability of the foam.

Study on foam stabilization mechanism of nanoparticles

The foam system is inherently thermodynamically unstable, leading to various factors contributing to foam collapse, such as liquid film drainage, bubble coalescence, and bubble coarsening [22]. In recent years, there has been increasing research on the mechanism of nanoparticle-stabilized foam. Currently, the maximum capillary pressure theory, desorption energy theory, and particle interaction theory are used to explain the mechanism of nanoparticle-stabilized foam.

(1) Maximum Desorption Energy Theory: Desorption energy refers to the energy required for nanoparticles adsorbed at the gas-liquid interface of the foam liquid film to detach. Studies have shown that nanoparticles can be stably adsorbed at the gas-liquid interface, enhancing foam's mechanical strength and stability. Horozov et al. [23] observed that nanoparticle adsorption on the gas-liquid interface effectively reduces liquid loss from the liquid film, decreases the gas-liquid interface's surface area, and increases gas diffusion resistance between different foams, thereby inhibiting foam coarsening to some extent.

The desorption energy of particles at the gas-liquid interface of foam is much greater than that of surfactants. A higher desorption energy indicates stronger particle adsorption capacity at the gas-liquid interface, making it more challenging for particles to desorb and thus stabilizing the liquid film [24]. The desorption energy ΔG_{remove} of spherical particles is expressed in Equation (1), with a schematic diagram shown in Figure 5.

$$\Delta G_{\text{remove}} = \pi a^2 \gamma (1 - |\cos \theta|)^2 \quad (1)$$

Where a is the particle radius, m. γ is the surface tension of the gas-liquid interface, $\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$. θ is the contact angle between particles and liquid phase, $^\circ$.

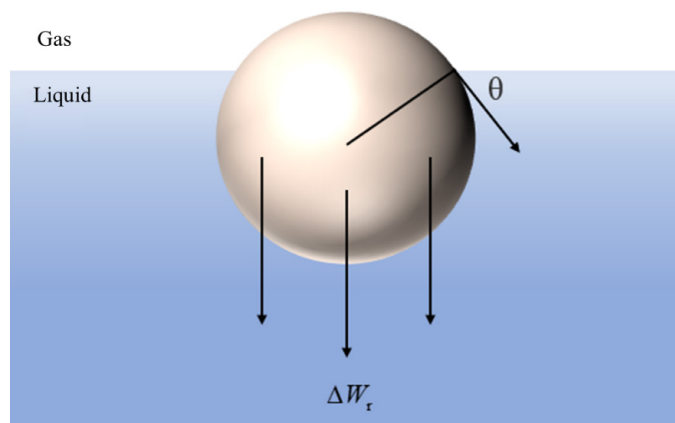


Figure 5 – The desorption energy of particles at the gas-liquid interface

(2) Maximum Capillary Pressure Theory: According to Equation (1), foam is most stable when the contact angle between nanoparticles and the liquid film boundary is around 90° . However, defining the optimal contact angle for nanoparticle-stabilized foam solely based on the maximum desorption energy theory is insufficient. As illustrated in Figure 6, there exists a force between two adjacent particles that prevents adjacent bubbles from merging, known as the maximum capillary pressure. This pressure represents the dispersing effect of nanoparticles on the foam liquid film. A higher maximum capillary pressure indicates better nanoparticle dispersion between bubbles and greater foam stability. The formula for maximum capillary pressure P_c is shown in Equation (2). Combining this theory with the maximum desorption energy theory, the most stable state for a three-phase foam system occurs when the contact angle between nanoparticles and the gas-liquid interface is in the range of 50° – 70° .

$$P_c = \pm \beta \frac{2\gamma}{a} \cos \theta \quad (2)$$

Where β is the theoretical packing constant. a is the particle radius, m. γ is the surface tension of gas-liquid interface, $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$. θ is the contact angle between particles and liquid phase, $^\circ$.

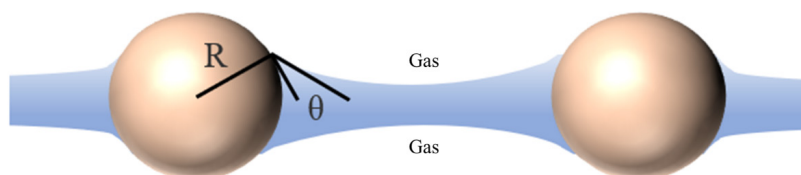


Figure 6 – Maximum capillary pressure between particles

(3) Interaction theory between particles

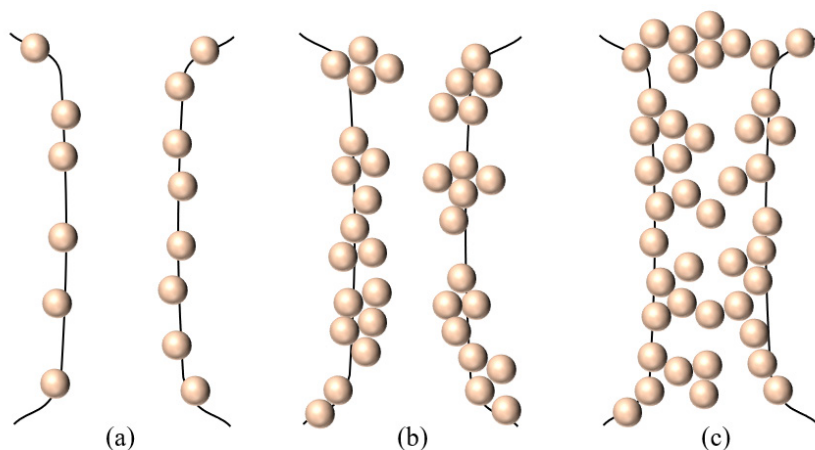


Figure 7 – The arrangement of particles on the liquid film

The arrangement of particles on the liquid film surface can be categorized into (a) single-layer arrangement, (b) double-layer compact arrangement, and (c) spatial network arrangement, as depicted in Figure 7. Lian et al. discovered that interactions between particles at the interface can alter the interfacial tension of the liquid film. When gravitational forces dominate, particles tend to decrease interfacial tension. Conversely, when repulsive forces are at play, particles increase interfacial tension. This interaction theory suggests that nanoparticles can form a 'mesh protective film' at the foam surface, reducing contact between adjacent liquid films, enhancing foam's resilience, and preventing bubble merging, thereby stabilizing the foam.

In summary, according to the maximum capillary pressure theory, desorption energy theory, and particle interaction theory, only nanoparticles can stably adsorb at the gas-liquid boundary of the foam liquid film to stabilize the foam. Nanoparticle size, concentration, and surface wettability affect their adsorption at this boundary.

Zhang et al. studied the effect of nanoparticles ranging from 22 nm to 200 nm on foam stability and found that stability increased with decreasing nanoparticle size. With an appropriate concentration and surface hydrophobicity, smaller nanoparticles led to better foam stability. Therefore, selecting nanoparticles with smaller sizes and suitable surface hydrophobicity is crucial for foam stabilization.

Conclusion

Foam plays an important role in channeling sealing because of its unique rheology and stability. At present, experts and scholars in the field of oil and gas field development have made some progress in the research of foam structure and foam decay. As a component of stable foam, nanoparticles can increase the mechanical strength of the liquid film by adsorbing on the surface of the foam liquid film and prevent the drainage of the liquid film to improve the stability of the foam. However, the application cost of foam technology and nanoparticle materials in the field of oil and gas field development is high, and a mature development system has not been formed. With the expansion of oil and gas exploration and development to deep, ultra-deep, unconventional and other harsh oil and gas resources, the research and development of foam technology will become the main way to efficiently develop oil fields. In the future, foam technology should comprehensively consider reservoir geology, engineering, materials and other disciplines to carry out research and practice, strengthen the universal applicability of foam technology, and then realize the efficient application of foam in the field of oil and gas field development, and accelerate the process of unconventional oil and gas exploration and development.

REFERENCES

- 1 Zhaomin Li, Ran Li, Wei Liu, et al. (2013) Application and Outlook of Foam in Oil and Gas Field Development(II)Application of Foam Fluid in Immediate Vicinity of Wellbore and Formation[J]. *Oilfield Chemistry*, 30(1): 155–160.
- 2 Binks B.P, Horozov T.S. (2005) Aqueous foams stabilized solely by silica nanoparticles[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(24): 3788–3791.
- 3 Denkov N.D, Marinova K.G., Tcholakova S.S. (2014) Mechanistic understanding of the modes of action of foam control agents[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 206(S1): 57–67.
- 4 Pugh R.J. (2005) Experimental techniques for studying the structure of foams and froths [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 114, pp. 239–251.
- 5 Pugh R.J. (2016) Bubble and foam chemistry[M]. London: Cambridge University Press.
- 6 Haizhuang Jiang, Wanli Kang, Xinxin Li, et al. (2021) Stabilization and performance of a novel viscoelastic N₂ foam for enhanced oil recovery[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 337: 116609.
- 7 Bhakta A., Ruckenstein E. (1997) Decay of standing foams: drainage, coalescence and collapse[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 70(1): 1–124.
- 8 Moreno Y.S., Bournival G., Ata S. (2017) Analysis of Bubble Coalescence Dynamics and Postrupture Oscillation of Capillary-Held Bubbles in Water[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 56(50): 14781–14792.
- 9 Yousef Z., Almobarky M., Schechter D. (2017) Enhancing the Stability of Foam by the Use of Nanoparticles[J]. *Energy and Fuels*, 31(10): 10620–10627.
- 10 Tang FQ, Zheng X., Tang JA, et al. (1989) The Effect of SiO₂ Particles Upon Stabilization of Foam[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 131(2): 498–502.
- 11 Aktas Z., Cilliers J.J, Banford A.W. (2008) Dynamic froth stability: Particle size, airflow rate and conditioning time effects[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 87(1–2): 65–71.

- 12 Binks B.P. (2002) Particles as surfactants-similarities and differences[J]. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 7(1–2): 21–41.
- 13 Liang L., Li ZY, Peng YL, et al. (2015) Influence of coal particles on froth stability and flotation performance[J]. *Minerals Engineering*, 81, 96–102.
- 14 Johansson G., Pugh R.J. (1992) The influence of particle size and hydrophobicity on the stability of mineralized froths[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 34(1–2): 1–21.
- 15 Adkins S.S., Gohil D., Dickson J.L., et al. (2007) Water-in-carbon dioxide emulsions stabilized with hydrophobic silica particles[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 9(48): 6333–6343
- 16 Guignot S., Faure S., Vignes-Adler M., et al. Liquid and particles retention in foamed suspensions[J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(8): 2579–2585.
- 17 Carn F., Colin A., Pitois O., et al. (2009) Foam Drainage in the Presence of Nanoparticle-Surfactant Mixtures[J]. *Langmuir*, 25(14): 7847–7856.
- 18 Hunter T.N., Pugh R.J., Franks G.V., et al. (2008) The role of particles in stabilising foams and emulsions[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 137(2): 57–81.
- 19 Yekeen N., Idris A.K., Manan M.A., et al. (2017) Experimental study of influence of silica nanoparticles on the bulk stability of SDS-foam in presence of oil[J]. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 38(3): 416–424.
- 20 Yang WP, Wang TF, Fan ZX, et al. (2017) Foams Stabilized by In Situ-Modified Nanoparticles and Anionic Surfactants for Enhanced Oil Recovery[J]. *Energy and Fuels*, 31(5): 4721–4730.
- 21 Dickinson E., Ettelaie R., Kostakis T., et al. (2004) Factors controlling the formation and stability of air bubbles stabilized by partially hydrophobic silica nanoparticles[J]. *Langmuir*, 20(20): 8517–8525.
- 22 Hongbin Yang, Zhiqi Lv, Lan Wang, et al. (2023) Stability mechanism of controlled acid-resistant hydrophobic polymer nanospheres on CO₂ foam. *Fuel*, 346, 128332.
- 23 Horozov T.S. (2008) Foams and foam films stabilised by solid particles[J]. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 13(3): 134–140.
- 24 Xia Yin, Wanli Kang, Shuyang Song, et al. (2018) Stabilization mechanism of CO₂ foam reinforced by regenerated cellulose[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 555: 754–764.

¹ Юньи Жанг,

магистрант, e-mail: 1506074112@qq.com

^{1*} Хонгбин Янг,

PhD, ассоциированный профессор, e-mail: hongbinyang@upc.edu.cn

² Юфеи Женг,

магистр, e-mail: zhengfei19861014@163.com

³ Бин Жанг,

магистр, e-mail: atiger08@foxmail.com

² Бо Жанг,

магистр, e-mail: 1027353472@qq.com

² Хуанг Ли,

магистр, e-mail: 307187527@qq.com

¹ Huazheng Wang,

магистрант, e-mail: 914017571@qq.com

¹Школа нефтяной инженерии, Китайский нефтяной университет (Восточный Китай),
Циндао 266580, Китайская Народная Республика

²China Oilfield Service Limited, Тяньцзинь 300459, Китайская Народная Республика

³Дуньин Жуйфэн Петролеум Технический Девелопмент К°, Лтд, Дуньин 257092,
Китайская Народная Республика

НАНОБӨЛШЕКТЕРДІҢ КӨБІК ТҰРАҚТЫЛЫҒЫНА ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ ЖЕТІСТІКТЕРІ

Андатпа

Белгілі бір тұтқырлыққа ие сұйықтық ретінде көбік арзан баға мен судағы тұрақтылық сияқты қарапайым үрдістің аркасында мұнай кен орындарында газ серпілісін бақылау және газ қозғалғыштығын төмендетуде кеңінен қолданылып, жақсы нәтиже көрсетті. Әдебиеттерді талдау мен тобымыздың соңғы жылдары жүргізген зерттеулерінің нәтижесі арқылы CO_2 көбігінің зерттеу күйі баяндалды. Баяндама негізде нанобөлшектер мен сыртқы жағдайлардың көбік тұрақтылығына әсерін зерттеудегі жетістік ұсынылды. Қорытындыда нанобөлшектермен тұрақтандырылған көбік механизмі ұсынылған максималды десорбциялық энергия теориясы, максималды капиллярлық қысым теориясы және бөлшектер арасындағы өзара әрекеттесу теориялары арқылы талқыланды. Көбікті сутоғыту технологиясының үздіксіз дамуымен көбіктің алуан түрлілігі мен функционалдығының жаңа түрлері пайда болады. Көбікті игеру құны одан әрі төмендеп, оны мұнай кен орындарында қолдану перспективасы ұлғая түседі.

Тірек сөздер: көбік, сұйықтықтың қозғалғыштығы, газ серпілісі, нанобөлшектер.

¹Юньи Жанг,

магистрант, e-mail: 1506074112@qq.com

^{1*}Хонгбин Янг,

PhD, ассоциированный профессор, e-mail: hongbinyang@upc.edu.cn

²Юфеи Женг,

магистр, e-mail: zhengfei19861014@163.com

³Бин Жанг,

магистр, e-mail: atiger08@foxmail.com

²Бо Жанг,

магистр, e-mail: 1027353472@qq.com

²Хианг Ли,

магистр, e-mail: 307187527@qq.com

¹Huazheng Wang,

магистрант, e-mail: 914017571@qq.com

¹Школа нефтяной инженерии, Китайский нефтяной университет (Восточный Китай),
Циндао 266580, Китайская Народная Республика

²China Oilfield Service Limited, Тяньцзинь 300459, Китайская Народная Республика

³Дуньин Жуйфэн Петролеум Технический Девелопмент К°, Лтд, Дуньин 257092,
Китайская Народная Республика

ДОСТИЖЕНИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ ВЛИЯНИЯ НАНОЧАСТИЦ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ПЕНЫ

Аннотация

Пена как жидкость с определенной вязкостью широко используется для контроля прорыва газа и уменьшения подвижности газа в нефтяных месторождениях благодаря простому процессу, низкой стоимости и стабильности в воде и показала хорошие результаты. Через исследование литературы и результаты исследований нашей команды за последние годы освещено состояние исследований пены CO_2 . На этой основе представлен прогресс исследований влияния наночастиц и внешних условий на стабильность пены. В заключение обсуждается механизм стабилизации пены наночастицами путем представления теории максимальной энергии десорбции, теории максимального капиллярного давления, а также теории взаимодействия между частицами. С постоянным развитием технологии пенного заводнения разнообразие и функциональность пены будут продолжать проявляться, стоимость разработки будет еще больше снижаться, а перспективы ее применения на нефтяных месторождениях будут все более и более широкими.

Ключевые слова: пена, подвижность жидкости, прорыв газа, наночастицы.

ЭКОНОМИКА ЖӘНЕ БИЗНЕС
ECONOMY AND BUSINESS
ЭКОНОМИКА И БИЗНЕС

UDC 331.107
IRSTI 82.33.19

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-334-344>

^{1*}Abdykhalykov K.,

PhD, assistant professor, ORCID ID: 0009-0008-6525-100X, e-mail: k.abdykhalykov@kbtu.kz

¹Bolatova M.,

Master student, ORCID ID: 0009-0002-8594-0810, e-mail: maral.bolatova.9821@mail.ru

¹Omarbekova G.,

Master student, ORCID ID: 0009-0004-6424-8379, e-mail: g_omarbekova@kbtu.kz

¹Pak S.,

Master student, ORCID ID: 0009-0009-0749-7279, e-mail: s.pak@kbtu.kz

¹Kazakh-British Technical University, 050000, Almaty, Kazakhstan

**THE SIGNIFICANCE OF IMPLEMENTING
EFFECTIVE HUMAN RESOURCE MANAGEMENT****Abstract**

In the modern economy, there is a continuous development of market dynamism, where strategic human resource management acts as a fundamental factor determining the sustainability and development of an organization. Employees are the core of any organization. Effective interaction with them contributes to the well-coordinated and flexible work of the organization. This article discusses the importance of implementing effective human resource management practices. As part of this study, a survey was conducted among Ernst&Young auditors, aimed to analyze the impact of various human resource management practices on employee effectiveness within this organization. The article reveals the aspects that are important for improving the efficiency and satisfaction of employees. Five key aspects are analyzed: training and development, performance evaluation, compensation, authority and responsibility, and the work environment. The study is provided in the form of a quantitative analysis of respondents' responses, which reflect their perception of existing human resource management initiatives. Research has revealed that investments in staff training and development, as well as the creation of a transparent evaluation and remuneration system, have an impact not only on increasing employee satisfaction and strengthening the position of loyalty to the company, but also contribute to achieving the strategic goals of the organization.

Key words: human resource management, human resource management practices, employee effectiveness, training and development, performance assessment, compensation, authority and responsibility, work environment.

Introduction

Human resource (HR) management has been studied for over 30 years and received much attention for its positive impact on organizational performance. It has been used as organizational

strategy in managing human knowledge, skill and talent to work for increasing organizational performance (Lee, 2023: 10).

In this context, effective utilization of human resources, especially in professional services such as auditing, directly correlates with overall productivity, innovation activity and corporate culture of the company. This research paper attempts to analyze and evaluate the impact of managerial HR practices on employee satisfaction and productivity using a case study of auditors from Ernst & Young (EY). EY is one of the world's leading professional services firms and stands as one of the most extensive professional services networks globally. Regarded as a member of the Big Four accounting firms, EY holds a prominent position in the industry (EY, 2013: 1).

According to EY Kazakhstan Transparency Report (2022), EY Kazakhstan is part of the EMEIA Area, which includes EYG member firms in 94 countries and is divided into eight regions, with the EY Kazakhstan belonging to the Central, Eastern and Southeastern Europe and Central Asia (CESA) Region. EY prioritizes investing in talent to enhance audit quality, providing significant value to audited companies. Despite disruptions, EY continues to invest in its people, emphasizing retention as crucial for delivering high-quality audits. A key factor in retention is addressing employee expectations, particularly work-life balance, which has become increasingly important. The EY Global Wellbeing Strategy aims to embed a culture of wellbeing, increasing job satisfaction and effectiveness. Given that new workers are less likely to stay with one company for their entire careers, retention efforts now focus on improving the overall employee experience.

The significance of implementing effective human resource management is underscored by EY Kazakhstan's commitment to investing in talent and enhancing employee wellbeing, as highlighted in their ongoing efforts to improve audit quality and retention within the Europe, the Middle East, India, and Africa (EMEIA) Area. The specifics of working in the audit field require a high degree of responsibility and specialized knowledge, which makes the issues of effective human resource management especially relevant.

The questions addressed in the questionnaire aimed at identifying the extent to which employees agree with the statements regarding these aspects, as well as collecting opinions on how these aspects are realized in their daily work practices. In his regard, the aim of this study is to analyze the impact of various aspects of HR management practices on employee productivity and satisfaction, in the example of Kazakhstan.

Main provisions

Using data from a comprehensive questionnaire, the study examines how training and professional development, performance appraisal methods, compensation structures, authority and responsibility, and the quality of the work environment affect motivation, loyalty, and professional satisfaction in the audit profession.

Literature review

Human resource management is the practice of managing an organization's employees in order to improve the organization's performance and efficiency. Effective and adequate resources contribute to a smoother corporate operation and a more sustainable business development (Freddy, 2022: 5). As part of the study aimed at analyzing the effectiveness of human resource management practices at the Ernst & Young audit company, key aspects that affect employee productivity and satisfaction were considered. Based on the collected data, the following main provisions have been identified that are of interest for the theoretical justification and practical implementation of modern HR strategies.

Various investigations into HR management practices have delineated distinct methodologies, often labeled as "best practice," "high-performance," "formal," "sophisticated," or "professional." Some scholars advocate for a standardized set of superior HR management practices that boost organizational performance, while others doubt on the existence of such a universally superior approach. Theories posit that adequately remunerated, motivated employees within a culture of trust

lead to enhanced productivity and decreased expenses. Noteworthy is Pfeffer's initial identification of 16 best practices, subsequently distilled to seven core ones: job security, selective recruitment, self-directed teams, performance-based high compensation, extensive training, decrease of hierarchical distinctions, and transparent communication. Moreover, Redman and Matthews pinpointed an HR management package that bolsters quality strategies in service-oriented firms, whereas Saxena and Tiwari formulated the 3cTER Framework including training, employee engagement, incentives, cultural cultivation, career progression, and remuneration. (Tiwari, 2012).

A recent study by Meenu G., et al (2017) identifies several HR management practices crucial for effective employee retention management. These practices help maintain employee motivation and productivity, ensuring they stay with the organization. The article will discuss selected practices in detail.

1. Training and development. Training and development represent crucial components for every employer, essential for unlocking and cultivating the value, performance, and potential of their workforce. The significance of training is particularly pronounced for new employees as it facilitates the acquisition of vital skill sets necessary for independent task execution. Furthermore, it affords employers the opportunity to gain a deeper understanding of their employees' strengths and weaknesses. Following training and development sessions, employees experience heightened levels of support and motivation in the workplace, leading to increased productivity and job satisfaction (Ritesh, 2018: 9).

Training is a prompt reaction to an elevation in job effectiveness, whereas development constitutes a comprehensive program aimed at enhancing managerial efficacy. The objective of HRM training is to enhance the essential competencies required, whereas development strives to fortify the employees' holistic persona. Managers undertake the training process to address any deficiencies in employees' skills, while the development process is executed with a prospective succession strategy in view (Beydoun, 2023: 11).

On-the-job learning is essential to guarantee a sufficient availability of personnel who possess technical and social skills, as well as the capacity for professional growth directed at supporting organizations in achieving their goals (Alkali Kalli, 2023: 13).

The findings from the survey indicated that the structured execution of educational initiatives and training sessions plays a crucial role in enhancing the proficiency of auditors, essential for handling intricate assignments and adjusting to the dynamic market environment.

2. Performance Appraisal. Performance appraisal is the consequence of a methodical evaluation grounded on a set of performance indicators encompassing input, output, outcome, benefit, and impact indicators. It serves the purpose of informing employees about the extent of their performance and the corresponding rewards. Moreover, the primary objective of performance appraisal is to assess and offer feedback to employees for their development as well as to gauge the efficiency of the organization (Navia, 2020: 5).

Performance appraisal involves a range of factors that allow the supervisor to effectively evaluate an employee's performance. The validity of performance appraisals is enhanced when they are carried out with the involvement of external and internal experts. Employee satisfaction and reduced turnover rates are outcomes of performance appraisals that are grounded in objective criteria (Shahid, 2022: 10).

The research underscores the significance of a just evaluation in not only harmonizing employees' endeavors with the strategic objectives of the organization's advancement but also acting as a stimulant for continuous professional and personal advancement. The necessity of regular and constructive feedback for operational refinement of work has been demonstrated by the findings.

3. Compensation. Compensation is one of the factors affecting the job satisfaction. Each organization should strive to improve job satisfaction by providing a fair and competitive compensation program (Mardiana, 2017: 14).

Compensation management holds a significant role within organizational operations, being essential for both employers and employees alike. The pivotal nature of compensation stems from its direct correlation with the fulfillment of various human needs, whether it be direct or indirect.

The impact of compensation extends to critical aspects such as job satisfaction, talent acquisition, retention rates, performance levels, skill development, and fostering cooperation among individuals (Praveen, 2017: 13).

Attractive and engaging work environments are shaped by salary packages that encompass not monetary rewards, but also social perks. Investments in tangible and intangible rewards stimulate employees to achieve high results and contribute to their long-term commitment to the company.

4. Employee Empowerment and Ownership. Employee empowerment is a concept that has been employed interchangeably with employee participation, engagement, power sharing, and information sharing to articulate the notion of employee autonomy, authority over tasks, exchange of ideas, recommendations, and involvement in the decision-making process. Owing to the volatile nature of the business landscape, employee empowerment has emerged as a potent managerial instrument for impacting organizational triumph (enhanced productivity, employee contentment, and customer gratification) (Sang, 2019: 7). Empowerment assists subordinates realize the importance of their contribution to overall organizational goals. It also can be considered as a motivation tool because the empowering leader expresses her/his confidence in the subordinate's competence and give her/him a chance to have autonomy in work (Judeh, 2022: 11). As the survey results show, auditors with a greater degree of autonomy in their work demonstrate a higher level of satisfaction and productivity.

Employee Empowerment refers to the delegation of authority to individuals. Employee employment is characterized by reduced hierarchy and increased autonomy for employees within their roles. This facilitates prompt decision-making without the need to await directives from superiors. It entails the process of granting employees the ability to think, act, and manage their work and decision-making processes independently or in an autonomous manner. Employee Empowerment represents a mindset where individuals perceive themselves as having the capacity to control their own future. It entails equipping staff with the necessary skills to add value to the organization, with clear roles and responsibilities that contribute to organizational efficiency and effectiveness (Dhanabhakya, 2016: 5).

5. Work Environment. The work environment is a very important component part when employees carry out work activities. By paying attention to a good work environment or creating working conditions that are able to provide satisfaction in doing work, it will have an influence on employee job satisfaction at work (Yusnita, 2023: 14). An ergonomic office space, appropriate technological tools and a culture of respect and support within the team are key elements for maintaining high motivation and productivity of employees.

The HR department ought to develop strategies that cultivate workplace environments conducive to fulfilling the fundamental psychological requirements of autonomy, relatedness, and competence. Establishing positive and supportive work atmospheres can be a daunting task; nonetheless, this endeavor could yield substantial benefits for both leaders and staff members. Employees who evaluate their work settings positively at a cognitive level are more likely to be driven by a sustainable and optimal internal motivation compared to less favorable types of motivation, such as extrinsic and introjected motivations. A work setting that nurtures basic psychological needs is linked to the emergence of healthier work drive and employees' determination to strive for improved organizational outcomes, as suggested by our conceptual framework. The more positively an employee perceives their work environment, the higher the probability that they will be incentivized by intrinsic motivations and demonstrate elevated levels of behavioral intention concerning crucial performance metrics like discretionary effort and endorsement. If cultivating a workforce that operates at efficient, self-directed levels of motivation is deemed beneficial, the HR department would be wise to evaluate the context and characteristics of the work environment as an initial and crucial step (Shuck, 2018: 17).

The impact of the work environment on employees' performance is a significant factor to consider. Enhanced comfort within the environment correlates with higher levels of employee performance. This can be achieved through the provision of comprehensive facilities and ensuring a pleasant non-physical environment, which includes fostering positive relationships with both superiors and colleagues. Such measures serve to bolster and optimize employees' overall performance (Tjahjaningsih, 2019: 4).

Methodology

Provided the above literature review, which was critically reviewed to narrow down to the five HRM aspects, the authors put forth the following research question: What are the effects of different HR management strategies on the efficiency of employees in a company, on the example of EY?

To investigate this questions, the study hypothesis is:

Hypothesis 1: The assertion posits that systematic and all-encompassing human resource management approaches have a positive influence on the contentment and output of employees, consequently bolstering the overall performance of the organization.

Hypothesis 2: Furthermore, it is postulated that within a spectrum of HR practices, remuneration (salary) assumes a pivotal role in ascertaining the satisfaction and efficiency levels of employees at EY.

The methodology is further subdivided into the following stages.

1. Literature Review: A thorough examination of prevailing literature concerning human resource management was undertaken to pinpoint pertinent theories and antecedent research discoveries associated with employee contentment and organizational performance.

2. Data Collection: A meticulously crafted questionnaire was formulated and dispersed among Ernst & Young auditors to amass primary data regarding their perceptions of human resource practices.

3. Data Analysis: The responses were subjected to quantitative methodologies to evaluate the repercussions of diverse HR practices on employee efficiency.

The research included the adopted cross-sectional survey design. The participants comprised auditors from EY, chosen through a convenience sampling technique. The final cohort constituted 27 respondents based in Almaty, Kazakhstan. The questionnaire was sent to the head office as a link via a Google form by the auditors of Ernst Young from April 29 to May 5, 2024.

The questionnaire was disseminated electronically using Google Forms. Involvement was voluntary, and the confidentiality of the participants was preserved throughout the research endeavor. The data collection included the information gathered via a structured questionnaire encompassing inquiries about training, performance appraisal, compensation, authority, responsibility, and the working milieu. Responses were gauged on a four-point Likert scale. "Likert Scales" consist of a series of related "Likert-type items" – statements concerning a specific referent, namely the focus of the attitude to be measured. A balance of both positive and negative items is generally recommended to reduce response-set bias. Responses for each subject are scored from one (1) to five (5), with negative items reverse-coded. The scores for the individual items are then summed to obtain a Summated Rating Score or Likert Scale value for each respondent. Alternatively, the mean scores of the responses of each subject can be used so that the scale scores fall in the same 1 to 5 range as the individual items. Although these five category response alternatives are common, three, four, six, seven, and more have also been used (Fern, K., 2016 :14).

Reliability test. Cronbach's alpha is a statistical indicator utilized for evaluating the reliability, specifically the internal consistency, of a group of test items or scales. Put differently, the reliability of a given measurement pertains to the degree to which it serves as a dependable measure of a particular concept, and Cronbach's alpha represents a method for gauging the robustness of this consistency. Cronbach's alpha is derived through the process of correlating the score assigned to each item within a scale with the total score allocated to each individual observation (typically respondents in a survey or individuals taking a test), and subsequently contrasting this with the overall variance across all individual item scores. The calculation can be expressed by the following formula.

$$\alpha = \frac{K}{k-1} \left(1 - \frac{\sum S_i^2}{S_T^2} \right)$$

where k is the number of items, si² is the variance of the ith item and sT² is the variance of the total score formed by summing all the items (Himani, Kotian, 2022:5).

Results and discussions

The outcomes will be deliberated in connection with prevailing literature on HR management, accentuating how the findings either align with or diverge from prior investigations. This methodology is geared towards meticulously evaluating the repercussions of HR practices on the efficacy and contentment of employees at Ernst & Young, furnishing invaluable insights into the strategic administration of human resources in a constantly evolving market milieu.

In this investigation, the survey instrument's Cronbach's alpha was determined to be 0.852. The obtained result signifies a robust internal consistency present among the survey items. The elevated value of Cronbach's alpha (0.852) implies that the survey items employed in this research effectively gauge the concepts associated with efficient Human Resource Management strategies. You can see the results from Table 1.

Table 1 – Cronbach's alpha calculation

Organization	Question #															Sum
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Ernst&Young	3	4	4	4	3	3	4	4	3	4	3	3	3	3	3	51
	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4	4	4	4	58
	4	4	4	2	4	3	4	4	4	3	3	3	4	4	4	54
	4	4	4	3	4	3	4	4	4	3	3	3	3	3	3	52
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	60
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	45
	4	3	4	3	3	3	4	4	4	3	3	3	4	4	4	53
	4	4	4	3	3	3	4	4	4	3	3	3	4	4	4	54
	4	3	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	3	56
	4	3	3	3	3	4	4	4	4	3	4	3	4	4	4	54
	2	3	3	4	4	4	3	2	4	2	2	4	4	3	3	47
	4	4	4	4	4	3	4	4	3	4	4	3	4	4	4	57
	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	46
	4	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	3	4	4	4	53
	4	4	4	3	3	3	4	4	3	3	3	3	4	4	4	53
	4	4	4	4	4	4	1	1	1	4	4	4	4	4	4	51
	4	4	4	3	3	3	4	3	3	3	3	3	4	3	3	50
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	45
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	60
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	60
	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	4	3	4	4	52
	4	3	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	58
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	60
	4	4	4	2	3	3	3	4	4	3	3	3	4	4	4	52
	4	4	4	2	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	50
	4	3	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	58
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	45
Variance of the total score																23,26
Variance of the item	0,28	0,25	0,20	0,45	0,26	0,25	0,48	0,56	0,49	0,31	0,32	0,25	0,22	0,22	0,23	4,76
Cronbach's alpha																0,85

- Descriptive Statistics: Fundamental descriptive statistics will be showcased to encapsulate the sample attributes and response distributions.

- Inferential Statistics: Approaches like the Relative Importance Index (RII) methodology will be utilized to categorize the influence of diverse HR practices based on the perspectives of the respondents (Mursalim, 2014: 42).

$$\text{Average Index} = (\sum w)/N$$

where w signifies the weightage allocated to each facet by the participants, ranging from 1 to 4, while N denotes the cumulative count of samples or factors.

An examination of the data from the employee survey conducted by Ernst & Young reveals that a significant portion of participants (27 individuals) possess limited tenure within the organization. Work experience among the respondents is primarily categorized into two distinct groups: those with “Less than 1 year” and those with “1-3 years” of experience. The segmentation of the survey sample offers valuable insights into the perceptions of crucial workplace elements by new and relatively new staff members, as well as the factors they deem significant.

Work experience in the current company:

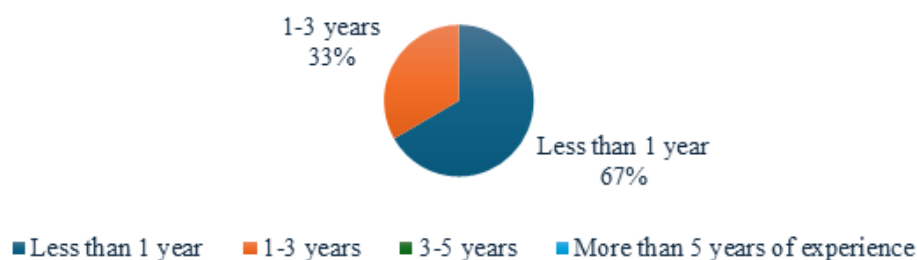


Figure 1 – Work experience in the current company

Table 2 displays the outcomes in the format of mean indices for every group, showcasing the extent to which employees prioritize each of these factors.

Table 2 – Average Index of Importance of Effective HR Utilization

Importance of Effective HR Utilization	Average Index
Training and Development	3,69
Performance Appraisal	3,41
Compensation	3,56
Employee Empowerment and Ownership	3,37
Work Environment	3,69

Training and development attained one of the most elevated average indices (3.69), emphasizing their crucial significance for employees. This highlights the prioritization of opportunities for professional advancement and the expansion of competencies among auditors. Employees who engage in continual learning and growth demonstrate enhanced capability to adjust to fluctuations in industry norms and technologies, thereby ultimately enhancing the overall productivity and innovative capacity of the organization.

In conjunction with training and development, the quality of the workplace environment garners a commendable rating (3.69), underscoring its pivotal role in ensuring heightened employee contentment and efficiency. Efficient management of the work milieu encompasses the establishment of secure, pleasant, and invigorating working conditions. This encompasses not solely physical components like office infrastructure and spatial layout but also a psychological ambiance that fosters cooperation and camaraderie among coworkers.

Compensation, with an index of 3.56, holds a notable position in the hierarchy of employee values. This validates the notion that competitive remuneration stands as a pivotal element in the retention and attraction of skilled professionals. Compensation packages, encompassing salaries, incentives, insurance, and additional perks, directly impact levels of job satisfaction and staff allegiance.

The outcomes derived from 27 auditors at Ernst & Young provided valuable insights into the influence of human resource management strategies on employee effectiveness. The assessment employed the Average Index and Relative Importance Index (RII) methodologies for assessing responses. Notably, training and development, as well as the work environment, obtained the highest Average Index ratings, underscoring their crucial role in enhancing employee satisfaction and effectiveness. Nevertheless, in contrast to the secondary hypothesis, compensation, despite its significance, did not emerge as the predominant factor according to the data.

The discourse ensuring the results of this investigation is in accordance with prevailing literature that accentuates the significance of comprehensive HR practices in augmenting organizational performance. Prior investigations have accentuated the critical nature of training and development in nurturing an adaptable and skilled workforce, a notion that resonates with our discovery that training received one of the most commendable scores among the auditors. The importance attributed to the work environment is congruent with recent research findings linking positive work environments with amplified productivity and job contentment.

An intriguing observation pertains to the common belief that compensation stands as the principal catalyst of employee satisfaction, where our study suggests that it does not overshadow other elements such as professional growth opportunities and working conditions. This infers a potential shift in emphasis among contemporary professionals, who potentially prioritize personal advancement and a conducive work environment over financial motivations.

Conclusion

The present study was conducted with the objective of examining the influence of various human resource management strategies on employee effectiveness at Ernst & Young. Utilizing a quantitative research approach, data was gathered through a structured survey administered to auditors, and the analysis involved techniques such as the Average Index and the Relative Importance Index. The results provide valuable insights into how HR practices impact employee satisfaction and productivity, which are essential for the success of an organization.

The research findings suggest that training and development, and the quality of the work environment are the most highly valued aspects by employees, demonstrating a notable impact on both personal and professional progress. These elements enhance employees' skills, their ability to adapt to market dynamics, and foster a nurturing organizational culture essential for employee satisfaction and efficiency. Despite the expectation that compensation would greatly influence employee satisfaction, it was not identified as the primary factor, underscoring the significance of a holistic HR management approach in shaping employee conduct and organizational allegiance.

The conclusions drawn from this study make a substantial contribution to the existing knowledge on human resource management by illustrating that a combination of comprehensive training, a supportive work environment, and fair compensation strategies are key in enhancing employee effectiveness. These components collectively cultivate a motivated workforce capable of steering organizational success. The results propose a shift from traditional perspectives where compensation

was paramount towards a more holistic approach where personal development and work environment quality equally impact job satisfaction and performance.

Given that EY Kazakhstan operates in three areas, the sample population is relatively small. Furthermore, the sample is geographically confined to Kazakhstan, while EY operates in 94 countries globally. As Tiwari (2012) notes, HRM practices vary between countries due to different external and internal factors. Therefore, the survey results may differ across various EY locations.

Prospects for implementation and further research. Moreover, this study provides practical implications for HR strategies in professional service firms like Ernst & Young. By aligning HR practices with employees' motivations, organizations can better achieve their strategic goals and improve their competitive position in the market. Specifically, investing in continuous professional growth and maintaining a high-quality work environment can result in increased employee engagement, reduced turnover, and superior organizational performance.

For future research, it would be advantageous to conduct longitudinal studies to evaluate the lasting effects of these HR practices on employee satisfaction and organizational outcomes. Additionally, comparative studies across different sectors could offer broader insights into the applicability of the current findings. Opportunities for practical application include developing customized HR programs tailored to meet employees' specific needs based on their career stage and individual aspirations, further enhancing the impact of HR initiatives.

In conclusion, this study emphasizes the importance of a comprehensive approach to human resource management, where training, development, and a supportive work environment are equally essential as fair compensation in fostering a productive and content workforce. The strategic integration of these elements is likely to not only address the immediate needs of employees but also sustain long-term organizational development and resilience.

REFERENCES

- 1 Alkali Kalli K., Abba Y.B. & Bukar A.G. (2023) An assessment of the effect of training and development on employee performance: A review perspective. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 18(02), pp. 258–270. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2023.18.2.0748>.
- 2 Beydoun A.R. & Saleh R.F. (2023) Literature review on training and development in work setting. *BAU Journal – Society, Culture and Human Behavior*, 4(2), Article 13. <https://doi.org/10.54729/2789-8296.1136>.
- 3 Dhanabhakya M. & Rekha, R. (2016) Employee empowerment as an aid for healthy human resource practices. *International Journal of Applied Research*, 2(7), pp. 969–973.
- 4 EY (2013). Facts and figures. Retrieved from <http://www.ey.com/UK/en/Newsroom/Facts-and-figures>
- 5 EY Kazakhstan (2020). Transparency report.
- 6 Fern K., Willits., Gene L., Theodori. A., E. Luloff. (2016) Another Look at Likert Scales. *Journal of Rural Social Sciences*, 31(3), pp. 126–149. <https://egrove.olemiss.edu/jrss/vol31/iss3/6/>.
- 7 Freddy C.M. & Renuga Devi. (2022) Sovereignty of human resource management on organization effectiveness and development. *International Journal of Engineering Technology and Management Sciences*, pp. 99–103. <https://doi.org/10.1108/JOEPP-01-2014-0003>.
- 8 Himani, Kotian., Aiswarya, Liz, Varghese., Rohith, Motappa. (2022) An R Function for Cronbach's Alpha Analysis: A Case-Based Approach. *National journal of community medicine*, 13(08):571–575. <https://doi.org/10.55489/njcm.130820221149>.
- 9 Judeh M., Al-Ghasawneh J., Al-Zu'bi H. & Ngah A.H. (2022) Linking resonant leadership, psychological ownership, and organizational commitment: The mediating role of employee empowerment. *Problems and Perspectives in Management*, 20(1), pp. 153–163. [http://dx.doi.org/10.21511/ppm.20\(1\).2022.14](http://dx.doi.org/10.21511/ppm.20(1).2022.14).
- 10 Lee K.G., Sukhumpong C. & Kulpornpath W. (2023) Human resource management and organizational performance. *International Journal of Advanced Research*, 11(05), pp. 872–881. <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/16940>.
- 11 Mardiana N., Desfiandi A. & Istari A. (2017) HR development and compensation development strategy on the satisfaction of work and its impact on employee performance. In *Proceedings of the International Conference on Information Technology and Business*, pp. 48–61.

- 12 Meenu G., Dr. Kaur Satinder, Dr. Anuradha. (2017) HRM Practices and Retention of Employees. Asian Journal of Research in Business Economics and Management. <http://10.5958/2249-7307.2017.00034.2>.
- 13 Mursalim M.H. (2014) Effectiveness of Human Resource Utilization in Oil and Gas Industry in Malaysia. Dissertation, Universiti Teknologi PETRONAS. Retrieved from <http://utpedia.utp.edu.my/id/eprint/14589>.
- 14 Navia T. & Trinh E. (2020) Human Resource Development: Overview of the Performance Evaluation and Performance Appraisal Viewpoints. Journal La Bisecoman, 1(5), pp. 15–19. <http://dx.doi.org/10.37899/journallabisecoman.v1i5.268>.
- 15 Praveen S. & Karuppasamy R. (2017) Competency-based compensation system: As a strategic HR technique with special reference to Coimbatore. International Journal of Economic Policy in Emerging Economies, 10(1), pp. 116–128. <https://doi.org/10.1504/IJEPEE.2017.083899>.
- 16 Ritesh U. (2018) Role of Training and Development on Employee Performance: A Quantitative Investigation. Psychology and Education Journal, 55(1), pp. 563–571. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.35177.52321>.
- 17 Sang, M. (2019) The power of employee empowerment in influencing organizational success: A literature review. The International Journal of Business and Management, 7(7), pp. 35–41. <https://doi.org/10.24940/theijbm/2019/v7/i7/BM1907-008>.
- 18 Shahid F., Ibrahim M. & Jam A. Q. (2022) Exploring the impact of appraisal performance and HR practices on organizational loyalty. Journal of Social Research Development, 3(1), pp. 22–31. <https://doi.org/10.53664/JSRD/03-01-2022-03-22-31>.
- 19 Tjahjaningsih E., Hayuningtias K.A., Santoso I.H. & Syadly G.M. (2019) The role of work environment on bank employees' performance. In E. Winata, A. P. Mardhiah, & M. F. Arifin (Eds.), Proceedings of the 1st International Conference on Business, Accounting, Management, and Economics (ICOBAME 2018), pp. 127–130. Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/icobame-18.2019.28>
- 20 Tiwari, P. (2012) Human Resource Management practices: A comprehensive review. Pakistan Business Review.
- 21 Yusnita N., Melyiatama M. & Irawan T.T. (2023) The effect of work environment on performance through job satisfaction. The Management Journal of Binaniaga, 8(1), pp. 27–40. <http://dx.doi.org/10.33062/mjb.v8i1.20>.
- 22 Beydoun A.R. & Saleh R.F. (2023) Literature review on training and development in work setting. BAU Journal – Society, Culture and Human Behavior, 4(2), Article 13. <https://doi.org/10.54729/2789-8296.1136>.

^{1*}Абдыхалықов Қ.,

PhD, ассистент-профессор, ORCID ID: 0009-0008-6525-100X, e-mail: k.abdykhalykov@kbtu.kz

¹Болатова М.,

магистрант, ORCID ID: 0009-0002-8594-0810, e-mail: maral.bolatova.9821@mail.ru

¹Омарбекова Г.,

магистрант, ORCID ID: 0009-0004-6424-8379, e-mail: g_omarbekova@kbtu.kz

¹Пак С.,

магистрант, ORCID ID: 0009-0009-0749-7279, e-mail: s.pak@kbtu.kz

Қазақстан-Британ техникалық университеті, 050040, Алматы қ., Қазақстан

АДАМ РЕСУРСТАРЫН ТИІМДІ ПАЙДАЛАНУДЫҢ МАҢЫЗДЫЛЫҒЫ

Аңдатпа

Қазіргі заманғы экономикада нарық серпінділігінің үздіксіз дамуы байқалады, онда адам ресурстарын стратегиялық басқару ұйымның орнықтылығы мен дамуын айқындайтын іргелі фактор ретінде әрекет етеді. Кез келген ұйымның өзегі – қызметкерлер. Олармен тиімді өзара іс-қимыл жасау ұйымның үйлесімді және икемді жұмысына ықпал етеді. Бұл мақалада адам ресурстарын басқарудың тиімді тәжірибесін енгізудің маңыздылығы қарастырылады. Осы зерттеу шеңберінде Ernst&Young аудиторлары арасында адам

ресурстарын басқарудың түрлі әдістерінің осы ұйымдағы қызметкерлердің тиімділігіне әсерін талдауға бағытталған сауалнама жүргізілді. Мақалада қызметкерлердің тиімділігі мен қанағаттанушылығын арттыру үшін маңызды аспектілер ашылады. Бес негізгі аспект талданады: оқыту және дамыту, өнімділікті бағалау, өтемақы, өкілеттіктер және жауапкершілік, сондай-ақ жұмыс ортасы. Зерттеу респонденттердің жауаптарын сандық талдау түрінде ұсынылған, онда адам ресурстарын басқару жөніндегі қолданыстағы бастамаларды қабылдау көрініс тапқан. Зерттеулер персоналды оқытуға және дамытуға, сондай-ақ жұмыс ортасының сапасына инвестициялар қызметкерлердің қанағаттануын арттыруға және компанияға қатысты адалдық ұстанымын нығайтуға ғана әсер етіп қоймай, сонымен қатар ұйымның стратегиялық мақсаттарына қол жеткізуге ықпал ететінін анықтады.

Тірек сөздер: адам ресурстарын басқару, адам ресурстарын басқару бойынша практикалар, қызметкерлердің тиімділігі, оқыту және дамыту, өнімділікті бағалау, өтемақы, өкілеттіктер және жауапкершілік, жұмыс ортасы.

^{1*}**Абдыхалыков К.,**

PhD, ассистент-профессор, ORCID ID: 0009-0008-6525-100X, k.abdykhalykov@kbtu.kz

¹**Болатова М.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0002-8594-0810, e-mail: maral.bolatova.9821@mail.ru

¹**Омарбекова Г.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0004-6424-8379, e-mail: g_omarbekova@kbtu.kz

¹**Пак С.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0009-0749-7279, e-mail: s.pak@kbtu.kz

¹Казахстанско-Британский технический университет, 050040, г. Алматы, Казахстан

ВАЖНОСТЬ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Аннотация

В современной экономике наблюдается непрерывное развитие динамичности рынка, где стратегическое управление человеческими ресурсами выступает в виде фундаментального фактора, определяющего устойчивость и развитие организации. Сотрудники являются ядром любой организации. Эффективное взаимодействие с ними способствует слаженной и гибкой работе организации. В данной статье рассматривается важность внедрения эффективных практик управления человеческими ресурсами. В рамках данного исследования был проведен опрос среди аудиторов компании Ernst&Young, целью которого было проанализировать влияние различных практик управления человеческими ресурсами на эффективность работы сотрудников в этой организации. Статья раскрывает аспекты, которые значимы для повышения эффективности и удовлетворенности сотрудников. Анализируются пять ключевых аспектов: обучение и развитие, оценка производительности, компенсация, полномочия и ответственность, а также рабочая среда. Исследование представлено в виде количественного анализа ответов респондентов, в которых отражены их восприятие существующих инициатив по управлению человеческими ресурсами. Исследование выявило, что инвестиции в обучение и развитие персонала, а также качество рабочей среды имеют влияние не только на повышение удовлетворенности сотрудников и укрепление позиции лояльности по отношению к компании, но и способствуют достижению стратегических целей организации.

Ключевые слова: управление человеческими ресурсами, практики по управлению человеческими ресурсами, эффективность сотрудников, обучение и развитие, оценка производительности, компенсация, полномочия и ответственность, рабочая среда.

UDC 332.1
IRSTI 06.52.13

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-345-352>

^{1*}**Bekbaeva A.E.,**

master's student, ORCID ID: 0009-0002-8213-5859, e-mail: a.bekbaeva2001@gmail.com

²**Keser E.,**

MBA in Economics, ORCID ID: 0000-0003-0360-7492, e-mail: emrekeser1987@gmail.com

¹Kazakh-British Technical University, 050000, Almaty, Kazakhstan

²Isik University, Istanbul, Turkey

THE INFLUENCE OF MACROECONOMIC FACTORS ON THE TOTAL ANNUAL VOLUME OF INVESTMENTS IN PPP PROJECTS

Abstract

The article analyzes the influence of macroeconomic factors on the investment attractiveness of PPP projects. The purpose of this article is to conduct this study to identify the degree of influence of external macro-economic factors on the volume of attracted investments. Methodology of the paper is quantitative, regression analysis. Analysis results show that there is a moderately strong relationship between dependent and independent variables. In conclusion, this study will help both the state and private investors, as well as project managers, since the increasing investments leads to the region competitiveness, that ensures high and sustainable rates of socio-economic growth.

Kew words: project management, PPP projects, macroeconomic factors, regression analysis, investments, national economy.

Introduction

Budget limits, high levels of national debt, and lack of sufficient funds are often identified as a cause of developing countries search to find alternative ways to finance their infrastructure needs [1, 2, 3]. Macroeconomic stability is often considered as a significant factor for implementing PPP projects [4, 5, 6, 7, 8]. Macroeconomic situation and financial state of a country affects the progress of the implementation of alternative source of funding, PPP projects. Analysis of such external aspects such as the public debt of the country, population density, real GDP per capita, annual inflation in the country, international reserves of the country is devoted to this study. The reason these factors were chosen is that according to research in the field of macroeconomics and project management that was mentioned in this study, these factors influence the volume of investment with a high probability, and with great influence, they also help in assessing the economic health. Due to the difficulty of expressing a qualitative indicator in numerical form, and including in the regression, qualitative factors were chosen.

The purpose of this research is to understand independent factors, such as macroeconomic indicators effect dependent factor, which is Total investment in PPP projects. Total investment in PPP projects is measured as the sum of all investments directed to the implementation of the PPP project. Independent factors in this case are represented by public debt of the country, population density, real GDP per capita, annual inflation in the country, international reserves of the country.

The objective of this research is to analyze what effect each of the independent variables has on the amount of investment using regression.

There has been limited scholarly attention devoted to this field in the practice of Kazakhstan. This paper brings original contributions to the Private-Public Partnership projects. The paper demonstrates the applicability and practicability of the regression analysis in analyzing the impact Kazakhstan's macroeconomic factors.

Main provisions

Here are the hypotheses of this research proposal:

It is assumed that inflation (Inf) will negatively affect the volume of the total investment in PPP projects, which is confirmed in most of the earlier works [9]. Population density (Density) and Real GDP per capita (percapRealGDP) should have a positive impact on the amount of investment [10]. Countries with significant public debt (TD) will more actively use the PPP mechanism [11]. The hypothesis of a positive relationship between the activities of the public-private sector and the value of international reserves is also proposed (ReserveInt) [12].

Literature Review

A review of the literature determining the impact on PPP activity in recent years found that it only covered macroeconomic indicators and did not disclose industrial characteristics. In the economic literature, there are various approaches to assessing the factors that influence the attraction of investment in the national economy. Various researchers use in their works quite popular indicators of capital flows, such as economic openness, market capacity, per capita income in real terms and GDP per capita.

Despite the fact that qualitative indicators have an advantage over quantitative indicators, difficulties arise with their inclusion in regression. The problem of conducting mathematical-statistical and empirical analysis arises, often due to the difficulty of expressing a qualitative indicator in numerical form. In addition, discrepancies in the numerical expression of the same qualitative indicator for constructing an econometric model lead to different, and more often than not, inadequate results.

The factors that were chosen in this article are quantitative and mentioned most often in foreign articles, analysis of them will be implemented on Kazakhstan's case. Overall, the works selected by the researchers can be separated into two clusters: analysis considering the impact of a single indicator on the effectiveness of the use of the PPP mechanism, and analysis evaluating the overall effectiveness of several indicators.

Osey-Kyei studied factors that attract investments in PPP projects, conducting a survey from PPP experts, and found out that top important factors include political support, government's positive attitude towards the investments from private partners, political stability that are greatly affected by macroeconomic state of the country [13].

Work analyzing the effects of single factors is primarily concentrated on assessing the effects of debt of public, less attention is paid to the effects of inflation rate. In their work, M. Han et al. and L. Alessi et al. It was concluded that PPP mechanism can implement the allocation of investment among several partners, thus, there can be a positive relationship between public debt levels and activities of PPP [11].

Economist M. Hammami et al. and S. Banerjee et al. Developing countries have been studied as case studies and use almost the same set of macroeconomic variables [9]. According to the study of M. Hammami et al. Population density and size of population have been found to be important predictors of PPP activity, because a mechanism is more common in countries where population is dense [10]. He also concluded that countries that have large amount of budget deficits tend to use PPP mechanisms than resource-rich countries. The latter is due to less stringent budget constraints. S. Banerjee et al. It was concluded that inflation and GDP per capita affect the amount of private investment [9].

In C. Sharma's work it is assumed that higher international reserves aids macroeconomic stability, which means that, for example, for infrastructure projects, the risk of implementation declines [12].

Another critical conclusions were made by Khudko E.V. and Shcherbak A.O. in 2022 on how a positive impact on the volume of investment is provided by indicators of the volume international reserves [14].

The study of Kamasak, Rifat & Yurdakul, Hakan finds a weak association between the number of PPP projects and GDP growth. Authors state that it is related to the other macroeconomic factors that affect the growth of GDP as a proxy of overall economic development [15]. Thus, analyzing the impact of a single variable is considered as weakness of their paper and author recommends to consider other factors that might positively contributions to PPP project investments.

In conclusion, in literature a gap in existing research highlighted regarding the lack of consideration for industrial characteristics alongside macroeconomic indicators. There are various approaches for assessing factors influencing investment attraction in national economies, with a focus on popular indicators like economic openness, market capacity, and GDP per capita. While qualitative indicators are considered advantageous, their inclusion in regression analysis is deemed challenging due to difficulties in numerical representation. The article selects quantitative factors frequently mentioned in foreign literature, intending to analyze them in the context of Kazakhstan. So later in this research paper, analysis of these factors will be implemented on Kazakhstan's case.

Materials and methods

Methods and data sources

This research method chosen is going to be quantitative (statistical) and use secondary data. Due to regression being one of the most suitable types of analysis that can assess quantitatively the relationship between variables, in the course of the study, regression analysis will be used, hypotheses will be formulated and tested. In quantitative methodology, researchers describe existing theories, generate and test a hypotheses, and re-evaluate existing theories deductively based on their results of experiment [16]. Also regression helps to identify what factor significantly impact the attracted investment amount. It is a great tool for forecasting future investments. This can be valuable for policymakers, investors. Analysis is easy to understand and interpret the result to communicate with stakeholders [17]. Secondary data would include some open source data, for ex. data from web-site of Bureau of National Statistics of Republic of Kazakhstan, “Private Participation in Infrastructure” (PPI) and “World Development Indicators” (WDI) [18]. Also sources of information can be publications, press releases, such as Macroeconomic Reviews of Kazakhstan, which are submitted by Applied Economics Research Center (AERC) LLP, Public-Private Partnership Center, also by the Ministry of National Economy of Kazakhstan [19]. Selected period for all indicators are 2005–2023.

Analysis Techniques / Tools

Since the analysis in this study is quantitative analysis and regression analysis, MS Excel is used. The initial data consists of a table containing items, (see Figure 1). It contains from country's annual inflation rate (%), total government debt (% of GDP), population density (number of people per square kilometer), and real GDP. Per capita, (million USD), total investment in PPP projects, (million USD). It will be needed to interpret the results, high or low, moderate indicator R squared.

Results and Discussion

BUREAU OF NATIONAL STATISTICS provided inflation rate of 9.5% for 2023 year. Inflation (annual %): Notation is Inf.

Central Government Debt (% of GDP): Debt is a stock. It can be measured as of a given date, usually the last day of the fiscal year. Notation is TD. Total Debt is 162.7 US\$ as of January 1st 2024 [20].

Total Population as of January 1st 2024 is 20 033 546 people.

Population: Total population of the country. Density is measured by population diving by land area of the country.

Real GDP per capita: The gross domestic product divided by population [21]. Notation is percapRealGDP.

International Reserves (current US\$) are 35.1 billions [22]: Total reserves in months of imports of the country. Notation is ReserveInt.

Total amount of investment in PPP Projects. Notation is totalPPP.

Based on the above variables and available data, the below empirical model is tested statistically:

TotalPPP = f [Inf; TD; Density; percapRealGDP; ReserveInt]

	Inf (%)	TD (mln usd)	Density (people)	percapRealGDP (usd)	ReserveInt (bln usd)	totalPPP
2005	7,87	\$ 23 089,30	5,7	\$ 3 771,30	7,07	6 492 937,00 ¹
2006	8,4	\$ 32 723,73	5,8	\$ 5 291,60	19,13	6 492 937,00 ¹
2007	18,77	\$ 43 428,50	5,87	\$ 6 771,40	17,64	6 492 937,00 ¹
2008	9,48	\$ 74 014,10	5,94	\$ 8 458,00	19,88	6 492 937,00 ¹
2009	6,38	\$ 96 893,00	6,01	\$ 7 165,20	23,18	6 492 937,00 ¹
2010	7,97	\$ 107 933,40	6,1	\$ 9 070,50	28,26	6 492 937,00 ¹
2011	7,43	\$ 112 866,90	6,19	\$ 11 634,00	29,22	6 492 937,00 ¹
2012	6,06	\$ 118 222,80	6,27	\$ 12 386,70	28,3	6 492 937,00 ¹
2013	4,9	\$ 125 320,80	6,36	\$ 13 890,60	24,69	6 492 937,00 ¹
2014	7,54	\$ 136 918,20	6,45	\$ 12 807,30	29,25	6 492 937,00 ¹
2015	13,53	\$ 150 032,90	6,54	\$ 10 510,80	27,85	6 492 937,00 ¹
2016	8,29	\$ 157 114,50	6,63	\$ 7 714,80	29,6	6 492 937,00 ¹
2017	7,22	\$ 153 006,60	6,72	\$ 9 247,60	30,75	\$ 69 758 287,0
2018	5,43	\$ 163 528,50	6,8	\$ 9 812,60	30,98	265 504 230,00 ¹
2019	5,43	\$ 167 482,70	6,88	\$ 9 812,60	28,96	1 400 000,00 ¹
2020	6,37	\$ 160 331,30	6,96	\$ 9 121,60	35,64	96 524 905,50 ¹
2021	8,4	\$ 159 544,20	7	\$ 10 373,80	34,38	96 524 905,50 ¹
2022	20,3	\$ 163 980,10	7,11	\$ 11 492,00	35,08	109 053 312,00 ¹
2023	9,5	\$ 164 131,10	7,2	\$ 13 136,50	35,01	109 053 312,00 ¹

Figure 1 – Dependent and independent variables

Figure above shows independent variables (x): Inf, TD, Density, percapRealGDP, ReserveInt; and dependent variable (y): totalPPP.

Multiple R: Multiple R represents the correlation between the actual values of the dependent variable and the predicted values obtained from the regression model. It measures the strength and direction of the linear relationship between the independent variables and the dependent variable in a regression model.

In our case, this value is 0.66, which means a moderately positive relationship.

R-squared: R-squared is the square of multiple R and is commonly used to evaluate the explanatory power of a regression model. It shows what percentage of the variability in the dependent variable is explained by the independent variables in the model. Our value is 0.43, which means that the model moderately explains the variability in the dependent variable.

Table 1 – Regression Statistics

Regression statistics	
Multiple R	0,657917531
R-square	0,432855478
Nominal R-square	0,214722969
Standars error	59956769,7
Observations	19

F significance is a statistical test that is used to determine whether a regression model is statistically significant overall.

The statistical value I obtained is 0.15, which exceeds the critical threshold at a given significance level (usually 0.05), the regression model is considered statistically significant.

Analysis of variance					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significant F</i>
Regression	5	3,57E+16	7,13E+15	1,984369	0,148198527
Residual	13	4,67E+16	3,59E+15		
Total	18	8,24E+16			

Figure 2 – Analysis of variance

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	-841 889 663,60	464 000 000,00	-1,81	0,09
Inf (%)	-2 055 885,97	3 718 468,00	-0,55	0,59
TD (mln usd)	-816,05	1 062,14	-0,77	0,46
Density (people)	155 071 303,00	89 078 432,00	1,74	0,11
percapRealGDP (usd)	-4 934,08	7 532,56	-0,66	0,52
ReserveInt (bln usd)	1 854 062,61	5 156 005,00	0,36	0,72

Figure 3 – Regression analysis

Withdrawal of balances

Residuals in regression analysis represent the difference between the actual values of the dependent variable and the predicted values obtained from the regression model. In effect, residuals represent model errors—what the model cannot explain or predict.

Each observation in the data has its own residual.

In our case, the model fits the data well because the residuals are random and do not have any systematic structure.

Key aspects of balances include:

Normality: The residuals should be normally distributed around zero. This is important for the correct use of statistical methods and obtaining reliable conclusions.

RESIDUAL OUTPUT			
<i>Observation</i>	<i>Predicted totalPPP</i>	<i>Residuals</i>	<i>Standard residuals</i>
1	1 495 247,37	4 997 689,63	0,10
2	22 909 295,59	-16 416 358,59	-0,32
3	-6 354 881,09	12 847 818,09	0,25
4	-5 528 800,92	12 021 737,91	0,24
5	5 526 302,12	966 634,88	0,02
6	7 222 079,08	-729 142,08	-0,01
7	7 394 077,58	-901 140,58	-0,02
8	12 826 044,58	-6 333 107,58	-0,12
9	9 261 438,45	-2 768 501,45	-0,05
10	22 125 876,40	-15 632 939,40	0,31
11	21 800 717,60	-15 307 780,60	0,30
12	57 791 338,53	-51 298 401,53	-1,01
13	71 869 017,71	-2 110 730,71	-0,04
14	77 007 042,71	188 497 187,30	3,70
15	82 440 716,54	-81 040 716,54	-1,59
16	114 544 374,20	-18 019 468,66	0,35
17	108 701 515,80	-12 176 610,31	0,24
18	93 454 955,81	1 558 356,19	0,31
19	121 247 838,00	-12 194 525,97	-0,24

Figure 4 – Residual

Constant variance: The residuals must have constant variance across all predictor values. If the variance of the residuals is not constant, this may indicate heteroscedasticity.

No autocorrelation: The residuals should not be correlated with each other. If the residuals are correlated, this may indicate a violation of the assumption of independence of observations.

Lack of systematic patterns: The residuals should not show any systematic patterns such as trends or cycles. The presence of such patterns may indicate an incorrect model specification.

Conclusion

Implications in relation to literature review, my results support and justify theories mentioned in literature. The results of this study will help both state and private investors to make a decision. It can be found useful for the government, investors, project managers.

This method is suitable for encouraging state investments in various budget constraints (constant level of public debt of a public funds). Pooling resources and financing with investors are required.

The dynamics of the money supply is important for investors when deciding whether or not to participate in a PPP project, because it is often necessary to obtain external sources of financing to meet PPP agreement obligations.

Based on the findings of this study, it is very difficult to make initial recommendations and suggestions because investors should focus on industry performance rather than population density when making investment decisions in PPP projects in developing countries. Sectoral indicators also make it possible to talk about the possibility of implementing intensive projects.

It is very difficult to give any preliminary recommendations and proposals based on the results of this study, because considering developing countries, when investor decides whether to invest in PPP projects in, it is needed to focus not so much on, for ex., density of country's population as on industry and its indicators. Industrial indicators also allow us to talk about the feasibility of implementing intensive projects.

Given the subject of the study, the study could be limited if there were little information in the public domain, or inaccurate and unreliable information about the country's macro-indicators. It is also worth considering industrial indicators, as they also differ.

REFERENCES

- 1 Altug S. & Firat M.C. (2018) Borrowing constraints and saving in Turkey. *Central Bank Review*, 18 (1), 1e11.
- 2 Amos S., & Zanhoun D.A.K. (2019) Financial constraints, firm productivity and cross-country income differences: Evidence from sub-Sahara Africa. *Borsa Istanbul Review*, 19(4), 357e371.
- 3 Arezki R., Bolton P., Peters S., Samama F., Stiglitz J. (2017) From global savings glut to financing infrastructure. *Economic Policy*, 32 (90), pp. 221–261.
- 4 Boyer E.J. & Scheller D.S. (2018) An examination of state-level public–private partnership adoption: Analyzing economic, political, and demand-related determinants of PPPs. *Public works management & policy*, 23(1), pp. 5–33.
- 5 Delmon J. (2017) *Public-private partnership projects in infrastructure: an essential guide for policy makers*. Cambridge university press.
- 6 Ehrhardt D. & Irwin T.C. (2004) Avoiding customer and taxpayer bailouts in private infrastructure projects: Policy toward leverage, risk allocation, and bankruptcy. *Risk Allocation, and Bankruptcy* (April 12, 2004).
- 7 Hammami M., Ruhashyankiko J.F. & Yehoue E.B. (2006) Determinants of public-private partnerships in infrastructure.
- 8 Thomsen S. (2005) Encouraging public-private partnerships in the utilities sector: the role of development assistance. *Investment for African Development: Making it Happen*, pp. 25–27.
- 9 Banerjee S., Oetzel J. and Ranganathan R. (2006) Private Provision of Infrastructure in Emerging Markets: Do Institutions Matter? *Development Policy Review*, 24(2), pp. 175–202. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1467-7679.2006.00321.x>.

10 Yehoue E.B., Hammami M. and Ruhashyankiko J.-F. (2006) Determinants of Public-Private Partnerships in Infrastructure, IMF Working Paper, 2006(099), p. 1. Available at: <https://doi.org/10.5089/9781451863598.001>.

11 Alessi L. et al. (2014) Central Bank Macroeconomic Forecasting During the Global Financial Crisis: The European Central Bank and Federal Reserve Bank of New York Experiences,” Journal of Business & Economic Statistics, 32(4), pp. 483–500. Available at: <https://doi.org/10.1080/07350015.2014.959124>.

12 Sharma C. (2012) Determinants of PPP in infrastructure in developing economies, Transforming Government: People, Process and Policy, 6(2), pp. 149–166. Available at: <https://doi.org/10.1108/17506161211246908>.

13 Robert, Osei-Kyei & Chan Albert. (2017) Factors Attracting Private Sector Investments in Public-Private Partnerships in Developing Countries: A Survey of International Experts. Journal of Financial Management of Property and Construction.

14 Khudko E. and Shcherbak A.O. (2022) Public-private partnership in in the information and telecommunication technologies sector: relationship with macro- and meso- indicators, Vestnik Universiteta, (2), pp. 91–99. Available at: DOI: 10.26425/1816-4277-2022-2-91-99.

15 Kamasak Rifat & Yurdakul Hakan. (2020) Investment through Public Private Partnership (PPP): The impact of PPP activities on the growth of GDP. Pressacademia. 11, pp. 150–152. 10.17261/Pressacademia.2020.1257. Available at: https://www.researchgate.net/publication/343319985_Investment_through_Public_Private_Partnership_PPP_The_impact_of_PPP_activities_on_the_growth_of_GDP

16 Barroga, Edward & Matanguihan, Glafera & Furuta, Atsuko & Arima, Makiko & Tsuchiya, Shizuma & Kawahara, Chikako & Takamiya, Yusuke & Izumi, Miki. (2023) Conducting and Writing Quantitative and Qualitative Research. Journal of Korean Medical Science. 38. 10.3346/jkms.2023.38.e291. Available at: https://www.researchgate.net/publication/373355080_Conducting_and_Writing_Quantitative_and_Qualitative_Research.

17 Iqbal, Muhammad Ahmad. (2021) Application of Regression Techniques with their Advantages and Disadvantages. 4, pp. 11–17. Available at: https://www.researchgate.net/publication/354921553_Application_of_Regression_Techniques_with_their_Advantages_and_Disadvantages.

18 World Development Indicators, DataBank (no date). Available at: <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>.

19 Applied Economics Research Centre (2022) Makroekonomicheskij obzor Kazahstana Available at: https://aerc.org.kz/images/blogs/2022/07/07/MOK_june_2022.pdf (Accessed: May 11, 2023).

20 “Centras Securities” JSC (2021) Makroekonomicheskij obzor RK za 2021 g. Available at: <https://cesec.kz/analitika/>

21 “Halyk Bank” JSC (2023) Makroekonomicheskij otchet za 4 kvartal 2022 g. Available at: https://halykfinance.kz/download/files/analytics/macro_4q22.pdf?ysclid=lhj28ryyi0774254415.

22 Eurasian Development Bank (2022) Makroekonomicheskij prognoz. Available at: https://eabr.org/upload/iblock/d15/EDB_Macroreview_2022_05_RU_web.pdf?ysclid=lhj1uk90gx906627937.

^{1*}**Бекбаева А.Е.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0002-8213-5859, e-mail: a.bekbaeva2001@gmail.com

²**Кесер Е.,**

экономика магистрі, ORCID ID: 0000-0003-0360-7492, e-mail: emrekeser1987@gmail.com

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

²Ыстық университеті, Стамбул қ., Түркия

МЖӘ ЖОБАЛАРЫНА ЖАЛПЫ ЖЫЛДЫҚ ИНВЕСТИЦИЯ КӨЛЕМІНДЕГІ МАКРОЭКОНОМИКАЛЫҚ ФАКТОРЛАРДЫҢ ӘСЕРІ

Аңдатпа

Мақалада МЖӘ жобаларының инвестициялық тартымдылығына макроэкономикалық факторлардың әсері талданады. Бұл мақаланың мақсаты – тартылған инвестиция көлеміне сыртқы макроэкономикалық факторлардың әсер ету дәрежесін анықтау үшін осы зерттеуді жүргізу. Жұмыстың әдістемесі сандық, регрессиялық талдау. Талдау нәтижелері тәуелді және тәуелсіз айнымалылар арасында орташа күшті

байланыс бар екенін көрсетеді. Қорытындылай келе, бұл зерттеу мемлекетке де, жеке инвесторларға да, жоба менеджерлеріне де көмектеседі, өйткені тартылған инвестициялардың өсуі өңірдің бәсекеге қабілеттілігін арттыруға, әлеуметтік-экономикалық өсудің жоғары және тұрақты қарқынын қамтамасыз етуге әкеледі.

Тірек сөздер: жобаларды басқару, МЖӘ макроэкономикалық факторлар, регрессиялық талдау, инвестициялар, ұлттық экономика.

^{1*}**Бекбаева А.Е.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0002-8213-5859, e-mail: a.bekbaeva2001@gmail.com

²**Кесер Е.,**

магистр экономика, ORCID ID: 0000-0003-0360-7492, e-mail: emrekeser1987@gmail.com

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

²Ишик университет, г. Стамбул, Турция

ВЛИЯНИЕ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ОБЩИЙ ГОДОВОЙ ОБЪЕМ ИНВЕСТИЦИЙ В ПРОЕКТЫ ГЧП

Аннотация

В статье анализируется влияние макроэкономических факторов на инвестиционную привлекательность проектов ГЧП. Целью статьи является проведение данного исследования для выявления степени влияния внешних макроэкономических факторов на объем привлеченных инвестиций. Методология работы – количественный, регрессионный анализ. Результаты анализа показывают, что существует умеренно сильная связь между зависимыми и независимыми переменными. В заключение данное исследование поможет как государству, так и частным инвесторам, а также руководителям проектов, поскольку рост привлеченных инвестиций приводит к повышению конкурентоспособности региона, обеспечению высоких и устойчивых темпов социально-экономического роста.

Ключевые слова: управление проектами, ГЧП проекты, макроэкономические факторы, регрессионный анализ, инвестиции, национальная экономика.

UDC 334.025
IRSTI 06.39.41

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-353-363>

^{1*}**Saulen A.N.,**

Master's student, Researcher, ORCID ID: 0009-0003-9600-6377, e-mail: anelyasaulen@gmail.com

²**Yesmurzayeva A.,**

Researcher, ORCID ID: 0000-0003-0114-5925, e-mail: aknur.yesmurzayeva@gmail.com

¹Kazakh-British Technical University, Almaty, 050000, Kazakhstan

²Institute for Advanced Research and Sustainable Development, Almaty, 050040, Kazakhstan

SUCCESS FACTORS OF PROJECTS IN GLOBAL COMPANIES

Abstract

Project success is the best outcome expected by project stakeholders. Whether it's a product launch or service delivery, practitioners want to achieve success in projects as well and they have their understanding of project success and dependence of it on various factors. This concept is still developing, as the projects constantly transform in dynamic market. Project success is connected to factors, which contribute to the project successful delivery. For the time-being it is not limited to triple constraints pyramid of time, cost, and budget. "Iron triangle" was the initial model for project management success, however, it reflected only general projects in the 20th century. Researchers establish new factors and frameworks analyzing, how companies reach success in different fields. At the same time the business expands, companies strive to extend their territories to more than one country, so become international, global as the time goes by. They way how this companies continue leading projects is a matter of research nowadays, they face challenges as cultural, language, communication, legal, etc. The purpose of this research is to define project success factors from the perspective of practitioners with project management experience in global companies. Conduct of survey, quantitative analysis was applied as a research method. The findings of this study tested the hypothesis claiming that specific factors considerably contribute the success of global projects.

Key words: project, project management, success factors, global companies, project stakeholders.

Introduction

Expansion of companies on the territory of more than one country happens more often, leading to the creation of global companies worldwide. Many organizations switch to a project-based format and use project management principles to reach commercial goals. It's hard to imagine a modern company that isn't engaged in any type of project. Today's dynamic market forces companies to respond faster to modern challenges to gain a competitive advantage. Organizations act in increasingly diverse and complicated environments influenced by constant changes and transformations.

Regardless of business activity, size, duration, and budget, management is essential for projects. Whether it's a product launch or service delivery, practitioners want to achieve success in projects as well and they have their understanding of project success and dependency on various projects [1].

Over forty years, extensive research has discovered a diverse range of new success factors and expanded the scope of success criteria [2].

The purpose of this study is to define project success factors from the perspective of practitioners in a global context. This study aims to contribute to today's knowledge and gather insights into the best practices formed by project managers and organizational leaders, which can serve as an example for other companies with similar activities.

Main provisions

Carrying out projects successfully on a global level requires an understanding of success factors associated with project management. Identification of these factors helps organizations strengthen their capabilities and drive operational excellence. Projects can face a lack of applied PM techniques, but on the other hand, they reach their main goals and seem successful as they comply with the expected results.

The research question and hypothesis are the following:

- ♦ RQ: What factors are considered key to the success of global projects from the perspective of project practitioners?

- ♦ Hypothesis – there are specific factors that significantly contribute to the success of global projects.

The study's goal, which is to assess current project management practitioners' techniques and pinpoint best practices, closely aligns with the research objectives.

Literature review

Choosing articles for literature review is a process of filtering reliable and relevant sources. The keywords for searching the articles were: "project management", "success factors", "global", "project success" and they didn't show up a recognizable amount of literature. So, it means that this field is still not investigated and explored in its big scope. The works dated from 1980th and until present were used for analysis.

The literature review part consists of 3 subparts. First subpart opens the definitions of concepts and meanings used in the research: project, project management, success factors, and recognized PM practices met in the literature, which lead to the project success.

During the review, literature shows that there is no common agreement of what aspects direct project to success. [15, 31-33]. However, organizational concept and communication, and stakeholder management were one of the most frequently mentioned factors, which fall under the focus of authors and became as theme for the second and third subparts of literature review.

Success factors and PM practices

The concept of success always appears in mind when it comes to associating future project outcomes. Each practitioner wants their project to be successful, as in that case, everybody wins.

"Iron triangle" was the initial model for project management success, however, it reflected only general projects in the 20th century [3]. Morris and Hough (1986) introduced safety along with time, cost, and quality as four success factors. Later researchers needed to find other approaches corresponding to the modern demand of practitioners [5].

In literature review success factors can be categorized as either general factors, such as the "iron triangle," or specific factors that are relevant only to a specific project or organization according to Pinto and Slevin (1987) [4].

The critical success factors vary depending on the nature, objectives, and perception of the project as stated by Pinto and Prescott (1988). They conducted a study on critical success factors throughout the project life cycle and found that the relative importance of several critical factors changes significantly at different stages of the life cycle [8].

According to Shenhar (1997) business was described as a distinct dimension of project success in addition to the previous work of De Wit et al. Shenhar proposed four success dimensions, namely: project efficiency; impact on the customer; business and direct success; and preparing for the future were suggested by them [9]. These dimensions contain 13 measures and form a project success multidimensional strategic framework. Additionally, Shenhar categorizes preparation for the future as a long-term company dimension and direct success as a short-term business dimension [9].

Baccarini (1999) presented the logical framework, where four levels of project objectives should be used to define success, namely goals, purpose, output, and input. Baccarini's four levels are similar to Shenhar's four dimensions mentioned above [15].

Chow and Cao's (2008) research model reflects the 12 potential success factors within five categories: organizational, people, process, technical, and project with the claim that they impact the success of large and distributed agile software development projects using Scrum methodology [10].

H.R. Kerzner, (2011) has proposed that PM success is possible to be evaluated through criteria of time, cost, quality, scope, resource, and activity [11].

At the first stage of a project, internal factors such as budget, schedule, and technical performance took place, as noted by Pinto and Covin (1989) [34]. While, in the final stages of the project, external factors such as customer needs and their satisfaction are deemed to be of greater significance.

Lim and Mohamed's framework (1999) proposed two tiers of critical success factors [14]. The first level - micro level included time, cost, performance, and safety and the second level - macro level focused on overall project duration, and user satisfaction during the exploitation and operation of the end product.

When these practices are recognized, adopted, and proven successful by other project managers, they become accepted practices [16]. Hobbs and Besner et al (2016) propose the connection between success factors and PM practices [2]. They define PM practices as common PM norms, routines, traditions, and rules that guide the behavior of project managers in general circumstances and are described in bodies of knowledge and textbooks" [16]. According to Hobbs and Besner et al. (2016) in order for these practices to be considered as success factors, they must be connected to project management success by assessing their effect and influence on project efficiency, product success, quality of deliverables, team performance, and satisfaction of team members [2, 17]. Even if there are debates on how to measure the contribution of these PM practices, studying practices holds value if it can be demonstrated that they significantly enhance project efficiency [2].

Ensuring stakeholder satisfaction, timely delivery, and budgetary adherence are on the top metrics list for project success evaluation. Project failure is more frequently caused by internal than external issues; inaccurate projections or missed deadlines, scope modifications, and a lack of resources account for 50% of the causes [18]. The results of the survey handled by PwC in 2006 showed that project success is primarily affected by stakeholders' satisfaction, on-time delivery, budget, benefits, quality, acceptable return on investments.

Mladen Radujković and Mariela Sjekavica (2017) draw the breakdown where project management success is connected to 1) project management competence (project manager competence, project team competence, coordination), 2) organization (structure, culture, atmosphere, competence), and 3) PM methods, tools and techniques (methodologies, software, tools, decision techniques, risk assessment tools, information communication technology support tools). They argue that strengthening previously mentioned aspects testifies successful PM, which facilitates project success [35].

Organizational concept

Choosing the appropriate procedural model impacts the success of the project [19]. The organizational environment plays a significant role in the successful selection of the approach. Success factors also vary depending on whether the project teams use agile, traditional, or hybrid approaches. In other words, organizations can be unprepared or even resistant to adopting new approaches, and most of the time they continue to rely on existing processes, which is usually a traditional approach [20]. The competence of the team and the organizational abilities of its members are critical to the project's success.

Projects become complex and as organizations continue to undertake a rapidly growing number of projects concurrently, "having a central, horizontal office to govern and control projects amid the shift to a project-oriented approach becomes a necessity" as stated in the KPMG report (2022) [21].

The metrics for project success may vary depending on the business activity of the company, project type, and sometimes applied PM methodology.

The 13th annual Agile report (2019) has an analysis of the survey with 1319 respondents in 6 regions. [22] The respondents were the representatives of North and South America (47% and 8%), Europe (30%), Asia (10%) and Australia with New Zealand (3%) and of different sectors. 95% of respondents answered that somewhat their agile projects were successful and 48% – that most of their projects or all of them were successful. Also, participants emphasized that organizations measure the success of the agile approach in three indices, which remained the same during the last few years. There are customer satisfaction, business value, and on-time delivery. The metric of customer and/or user satisfaction means that companies aim to build reliable relationships between them, establish loyalty, and want to receive positive feedback and reactions. And depending on how much the amount of positive feedback has grown or whether the client returned, it's clear if Agile was successful.

Success models like PMPA – Project Management Performance Assessment [12] or maturity models of management within an organization like Project Excellence Model® [13] can be useful for measuring project success. Project Excellence Model® is divided into six outcome areas encompassing project success criteria and six organizational areas including essential success aspects. The Project Excellence Model describes project organization using five different project categories, providing guidelines on how to use the model.

Project stakeholders

Brown and Eisenhardt (1995) mentioned the significance of team members, project leaders, senior management, customers, and suppliers in the process of new product development [23]. At that time they were called agents but currently, they are named “Project Stakeholders” [24]. Project Management Institute defined project stakeholders as: “Individuals and organizations who are actively involved in the project, or whose interests may be positively or negatively affected as a result of project execution or successful project completion.”

Young and Poon (2013), using a fuzzy set analysis of 15 cases, concluded that when top-managements support the project team and other stakeholders, it is counted as more important rather than other success factors, as it impacts the project's success in general. [25]

It means that the business is people/individuals, and mental support, and cultural awareness are significant for process flow. Building trust can play a key role in developing effective relationships with partners. Trust is also helpful when a failure happens, and customers can share feedback on improvement decreasing the possibility of a second failure. Jack Gido and James P. Clements (2011) claimed that cultural awareness and sensitivity are imperative for successful global project management [26]. Understanding and gaining knowledge of the culture and customs of other team members is essential for a successful global PM as it shows respect, promotes trust, and helps create an efficient project team.

Level of responsibility, duties, and functions, contributions to the project, and sponsorship, including both financial and political support, - bring a variety to the categories of project stakeholders. Project stakeholders usually have expectations and visions of project outcomes, and non-compliance with them means failure.

In most project-based organizations Project Management Office (PMO) acts as a separate division.

Project management offices represent established organizational structures where project managers and team members interact with PM process owners, portfolios, and programs within a parent organization, and the temporary ad-hoc organizations that are created to support a large program or group of projects [27, 28].

Global PMOs are often related to the implementation of mechanisms such as coaching and assistance, information, and knowledge sharing related to political, legal, and cultural factors [29].

Project success requires the development of an effective project team. And even if PM techniques, tools, and approaches are in place, people engaged in the project as project manager and project team, are very important and key to the best outcomes. According to Forsberg, Mooz, and Cotterman (2005), the team is responsible for the achievement of product success in the market, and not only for the effective execution of the project. Since teamwork is a crucial element of project management, project managers must possess the ability to manage people, as they bear much of the burden [36]. In parallel, Akkermans and van Helden (2002) noticed that in case of failure, not all the people engaged in the project are responsible for it [30].

Formation of the team is a separate matter, and the efficiency of it will depend on how smoothly the project will be performed. Random people put together will not create an effective team. It's required to analyze the background of individuals and work with them closely not only on their hard skills and technical performance but also on cultural awareness, communication, and establishing good relationships in a team atmosphere. The project team should move together with the project manager. An effective team clearly understands the expected project outcomes, stated project objectives, what are the requirements of project stakeholders, roles and responsibilities of team members. Members' characteristics also include high collaboration, level of trust, and communication skills, which are a game-player when the team is virtual or works mostly on a remote basis. They share new information timely, generate ideas, provide constructive points of view, and have open discussions on relevant topics during the work. Members of the effective project team are professionals, first. The way they manage their work schedule, respond to the given tasks, adequately react to changes, feel responsible for the assigned work scope, and initiatively go beyond – all of these directly impact the project. The diversity brings opportunities for new visions and ideas and is considered as a strength.

The behavior of team members is significant in building a trusted environment within the organization. Also, it reflects all project stakeholders. The behavior includes a healthy conflict resolution with the acknowledgment that a lack of agreement on questions is possible and normal. Most important here is how it can be handled. Conflicts show the weaknesses and address them to the project team for analysis and further growth. The resolution might be in the form of feedback, argument revision, or meet-up. Any vulnerable situation is a step towards maturity.

The project manager's responsibility isn't only limited to time, cost, and quality management, but also integration, scope, HR, communication, risk, and procurement management. As a result, the project manager is considered one of the key persons in achieving project success and smooth delivery of project objectives within time, budget, and quality constraints.

Project success is always attributed to the role of the project manager and how they lead the processes. Project Managers need to make sure of the perception of the customer, keep in touch with them, and control their satisfaction by minimizing delays and missing deadlines, that affect customers. Customers should be confident in the leader who carries out the assigned project within triple constraints.

Proactivity of PM may warn of future risks of task delays or non-performance, they don't leave things to get solved by themselves, and they take actions to solve the situation in the shortest and optimal meantime. The project manager also acts as a coach and consultant to the team as he/she guides the members, reminds them of the objectives, and trains them for permanent personal development, but doesn't tell them how to execute the assigned task. Again, the team consists of professionals. However, the project is not about a one-man show, in case of complicated decision-making, project managers seek for a piece of advice and suggestions from team members [26].

Methodology

Research design

The main research subject covers the notion of global companies, project success, and its fundamental component success factors as parts of PM.

To answer the research question and test the hypothesis quantitative research was conducted.

Sample group is formed by individual respondent who've taken the survey. They group is represented by project managers, executive, PM practitioners. The aim is to receive answers of PM practitioners working in global companies performing projects, who has insights and opinion on project success factors. The survey was sent to target audience through social media networks and messenger (LinkedIn, Whatsapp, Telegram) and personal face-to-face request.

Google Forms survey tool was applied to gather information and assess the responses of practitioners on their practices and success factors in various regions and fields. The survey-based research was selected as the optimal variant for data collection from moderate and large groups of participants. Answers to the research are collected on a separate Google Excel Sheet, which sorts answers in proper sequence of columns and rows and shapes raw data for future analysis.

The survey can be logically divided into two main parts.

The first part of the survey is dedicated to the background of the respondents and company profiles. The survey included questions about the fact of participation of respondents in a global project, experience, age, possession of PM certifications, their role in the project, as well as questions about the global presence of the company, project duration, team size, industry, sector, project type, and used PM methodology. They help to understand the target participants and filter the answers accordingly. Also, it clears the picture on insights of PM practices in a particular field, sector, project type, etc., in other words, it forms the context.

The middle part of the research reflects information on the analysis of PM methodologies characteristics and variability in project estimates and is not directly linked to the present research.

The last part of the survey reflects the research question of the present study (Table 1), i.e. key success factors in global projects.

The questions were closed-ended and open-ended to understand the characteristics of participants and projects globally and in Kazakhstan. The matrix question in the part for "key success factors" helped to merge multiple options into one and put a rate.

All questions were marked as obligatory, and respondents could not move to the next part until they chose options in all questions on the active page.

Research method.

The author used statistical measures like Mean, Median, and Standard Deviation, a qualitative analysis for the gathered data. These metrics helped to analyze the frequency, distribution, and central tendency of answers in matrix complex questions.

Questions at the Table 1 are dedicated to test the hypothesis:

Hypothesis: There are specific factors that significantly contribute to the success of global projects.

Question: In your view, what do you consider the most critical factors for the success of global projects?

Table 1 – Extract from the survey conducted by the author

No	Metrics	Not Important	Slightly Important	Moderately Important	Very Important	Highly Important
1	Cross-cultural communication strategies					
2	Use of collaboration tools and technology					
3	Clearly defined project objectives and goals					
4	Adaptive project management strategies					
5	Resource allocation and management					
6	Timely and accurate risk assessment					
7	Leadership and team collaboration					
8	Stakeholder engagement and communication					

Findings and discussions

The survey was addressed to the respondents on social networks such as LinkedIn, WhatsApp and Telegram messengers, by creating a post and sending direct messages. It was distributed to Project managers and executive managers from various fields, regions, and project types. The response rate was comparably lower than expected.

Overall, the number of respondents in the conducted survey was twenty-three people. 61% of the total number had experience in global projects, consisting of 35% noting that they led projects in different regions but on the same continent, and 26% noting that they had been engaged in projects on different continents. The average age of participants is 35 years, the average work experience is 6 years. 6 of those people had project management certifications, namely PMP, SMCP, IPMA level D, IPMA D, and Chapter Lead, Prince 2.

The majority hold Project manager positions within the projects, which takes 74% of the total percentage. Additionally, it is needed to highlight the duration of their participation in projects. A large number of respondents were involved in the projects that lasted for a maximum of 5 years. However, there were only two respondents who reported being involved in long-term projects within the research and development (R&D) and oil and gas industries. These projects had a duration of 100 years and 40 years. Professional fields of the respondents occur to be very diverse: IT and consulting – 30%, Banks and insurance – 23%, Oil & Gas, and telecom – 10%, and Mining – 10% (figure 1).

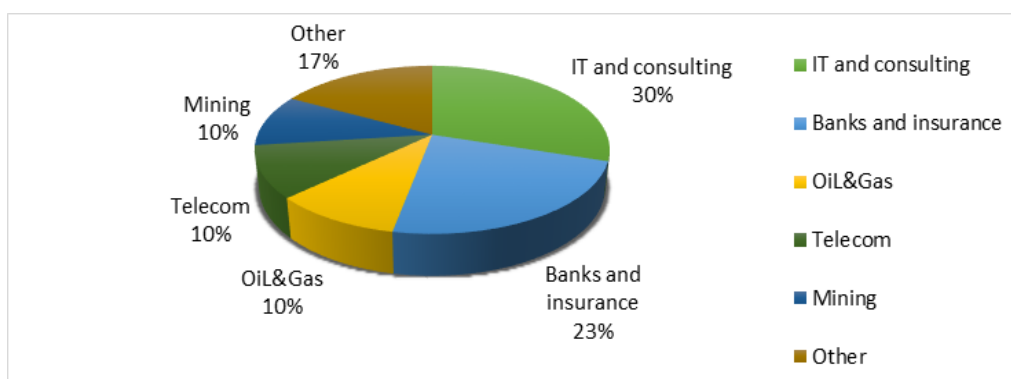


Figure 1 – Professional fields of respondents

The teams' size is also different: 1-10 people within a team were at 44% of respondents, 10-100 people within the team were at 43% of respondents, and at the same time, only 13% were working in teams of more than 100 people.

There was also the choice to choose the applied PM methodology and the answers among those, who work in global companies, were 64% with hybrid methodology and 36% with Agile, no one chose waterfall (figure 2, p. 360).

Matrix questions to evaluate preferences of practitioners in success factors included variants such as cross-cultural communication strategies, use of collaboration tools and technology, clearly articulated project objectives, adaptive project management strategies, resource allocation and management, timely and accurate risk assessment, team leadership, and collaboration, and stakeholder engagement and communication.

The average scores for these factors were 4.52, 4.39, and 4.35 respectively, out of a maximum possible score of 5 (table 2, p. 360). Additionally, the standard deviations for these factors were 0.95, 0.94, and 0.98 respectively. These relatively low standard deviation values suggest a high level of consensus among the respondents regarding the significance of these elements.

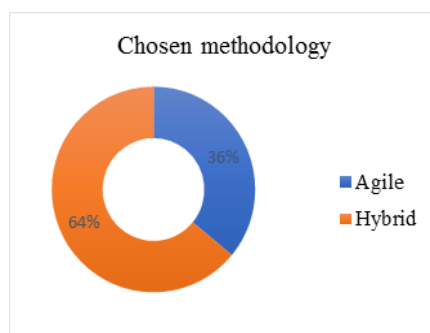


Figure 2 – Methodologies chosen by respondents

Therefore, it is clear that well-defined project objectives, effective resource management, and stakeholder engagement are crucial for initiatives in achieving success in projects within this specific context.

Table 2 – Statistical results of the survey conducted by the author.

Statistics	Variants in matrix question								Key Success Factors
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Mean	3,74	4,04	4,52	3,87	4,39	4,17	4,09	4,35	4,15
Standard deviation	1,14	0,71	0,95	0,92	0,94	1,03	1,04	0,98	0,79
Median	4,00	4,00	5,00	4,00	5,00	4,00	4,00	5,00	4,50
Mode	4	4	5	4	5	5	5	5	4,5
Min value	1	3	1	1	1	1	1	1	1,25
Max value	5	5	5	5	5	5	5	5	4,88
Interquartile range	1,50	0,50	1,00	0,50	1,00	1,00	1,50	1,00	0,75

Conversely, the respondents gave lower ratings to the factors of intercultural communication strategies and adaptive project management, with mean scores of 3.74 and 3.87 respectively. The standard deviations for these factors were 1.14 and 0.92. A high standard deviation for intercultural communication strategies suggests a wider range of opinions among respondents, while a lower standard deviation for adaptive project management indicates a more consistent view. This data supports the idea that intercultural communication strategies and adaptive project management are perceived differently by respondents and may have varying perceptions in the realm of effective project management.

From the final section of the survey, we found out that:

- ♦ clearly defined project objectives and goals,
- ♦ effective resource allocation and management,
- ♦ stakeholder engagement and communication,
- ♦ timely and accurate risk assessment.

They considered as key factors for the success of global projects by project management practitioners, therefore the hypothesis has been tested and approved.

Conclusion

Project success is unquestionably a highly debated topic in the contemporary academic realm of project management, attracting significant research attention. However, a commonly acceptable definition of “project success” has not been detected until nowadays. Organizations that effectively

employ project management practices to facilitate change and accomplish their business goals are the ones that achieve successful project outcomes. There are numerous chances to enhance current project management methods to align with the constantly evolving requirements of the business environment. The success criteria serve as the variables that determine and assess project success. The literature shows that time – schedule, cost – budget, and quality – performance are the three most cited and significant success criteria, added by recently recognized client/user satisfaction.

However, as time goes by and the business expands, the competitive advantage is harder to gain, and the practices begin to vary because the usual path for the project to be successful and reach excellence is not as straight as it used to be before. Our study investigated that nowadays practitioners working in global companies consider clear project objectives, effective resource management, stakeholder engagement, and proper risk management impact on the successful performance and execution of the project.

It's essential to recognize research limitations / ethical and other considerations of this study.

To collect the data by conducting the questionnaire the limit might be:

1. The response bias, as respondents can give inaccurate answers to the questions or interpret the questions in a way not planned by the researcher.
2. Non-response bias is also a possible limit, so in this regard, the list of participants can be shorter than expected. Non-response can be caused by ignoring the request to take a questionnaire.
3. Confidentiality notes - the request to hide the name of the company and the names of the participants might also cause the perception of non-reliability.

These limitations may have altered the findings' universality and must be acknowledged when evaluating them.

REFERENCES

- 1 Howsawi E., Eager D., Bagia R. and Niebecker K. (2014) The four-level project success framework: application and assessment. *Organisational Project Management* 1, pp. 1–15. <https://doi.org/10.5130/opm.v1i1.3865>.
- 2 Hobbs B. & Besner C. (2016) Projects with internal vs. external customers: An empirical investigation of variation in practice". *International Journal of Project Management*, vol. 34, no. 4, pp. 675–687. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.02.010>.
- 3 De Wit A. (1988) Measurement of project success. *International Journal of Project Management*, 6, pp. 164–170. [https://doi.org/10.1016/0263-7863\(88\)90043-9](https://doi.org/10.1016/0263-7863(88)90043-9).
- 4 Pinto, Jeffrey & Slevin D. (1988) Project success: Definitions and measurement techniques. *Project Management Journal*. 2.
- 5 Morris P.W.G. and Hough G.H. (1987) *The Anatomy of Major Projects — A Study of the Reality of Project Management*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester.
- 6 Pinto J.K., Slevin P.S. (1989) Critical success factors in R&D projects. *Research Technology Management*, 32(1), pp. 31–35. <https://doi.org/10.1080/08956308.1989.11670572>.
- 7 Pinto J.K. and Prescott J.R. (1988) Variations in Critical Success Factors over the Stages in the Project Life Cycle. *Journal of Management*, vol. 14, no.1, pp. 5–18. <https://doi.org/10.1177/014920638801400102>.
- 8 Hyväri I. (2006) Success of projects in different organizational conditions. *Project Management Journal*, vol. 37, no. 4, pp. 31–41.
- 9 Shenhar A.J., Levy O. & Dvir D. (1997) Mapping the dimensions of project success. *Project Management Journal*, 28, 9.
- 10 Chow T., & Cao D. (2008) A survey study of critical success factors in agile software projects. *The Journal of Systems & Software*, vol. 81, no. 6, pp. 961–971. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2007.08.020>
- 11 Kerzner H.R. (2011) *Project management metrics, KPIs, and dashboards: a guide to measuring and monitoring project performance*, John Wiley & Sons, New Jersey. <https://doi.org/10.1002/9781119427599>
- 12 Bryde D.J. (2003) Methods for managing different perspectives of project success, *British Journal of Management*, vol. 16, no. 2, pp. 119–131. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8551.2005.00438.x>

- 13 Westerveld E. (2003) The Project Excellence Model®: linking success criteria and critical success factors. *International Journal of Project Management*, vol. 21, no. 6, pp. 411–418. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(02\)00112-6](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(02)00112-6).
- 14 Lim C.S., Mohamed, M.Z. (1999) Criteria for project success: an exploratory re-examination, *International Journal of Project Management*, 17(4), pp. 243–248. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(98\)00040-4](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(98)00040-4).
- 15 Baccarini D. (1999) The logical framework method for defining project success. *Project Management Journal*, vol. 30, issue 4, pp. 25–32. <https://doi.org/10.1177/875697289903000405>.
- 16 Blomquist, Tomas & Hällgren, Markus & Nilsson, Andreas & Söderholm, Anders. (2012) Project-as-practice: In search of project management research that matters. *Project Management Journal*, vol. 41, no. 1, pp. 5–16.
- 17 Drury-Grogan M.L. (2014) Performance on agile teams: Relating iteration objectives and critical decisions to project management success factors. *Information and Software Technology*, vol. 56, no. 5, pp. 506–515. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2013.11.003>
- 18 PricewaterhouseCoopers (2007) Insights and Trends: Current Programme and Project Management Practices. <https://www.pwc.com/cl/es/publicaciones/assets/insighttrends.pdf>.
- 19 Joslin R., Müller R. (2015) Relationships between a project management methodology and project success in different project governance contexts. *International Journal of Project Management*, vol. 33, pp. 1377–1392. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2015.03.005>.
- 20 Conforto E.C., Amaral D.C. (2008) Evaluating an Agile Method for Planning and Controlling Innovative Projects. *Project Management Journal*, vol. 41, no. 2, pp. 73–80.
- 21 KPMG (2022) 2022 Project Management Survey. https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/cy/pdf/2023/kpmg_pmi_project_management_survey_2022.pdf.
- 22 The 13th Annual State of Agile Report (2019) Collabnet Versionone. <https://stateofagile.com/#ufh-i-613553418-13th-annual-state-of-agile-report/7027494>.
- 23 Brown S.L. and Eisenhardt K.M. (1995) Product Development – Past Research, Present Findings, and Future Directions. *Academy of Management Review*, 20(2), pp. 343–378.
- 24 Spalek S. (2014) Success Factors in Project Management. Literature Review, Proceedings of 8th International Technology, Education and Development Conference INTED2014, Valencia, Spain, pp. 4828–4835.
- 25 Young R. and Poon S. (2013) Top management support-almost always necessary and sometimes sufficient for success: Findings from a fuzzy set analysis. *International Journal of Project Management*, 31(7), pp. 943–957.
- 26 Gido J. and Clements, J.P. (2011) *Successful Project Management*” (5th. ed.). South-Western College Publishing.
- 27 Huemann M., Turner R., Keegan A. (2004) Managing Human Resources in the project-oriented company. *The Wiley Guide to Managing Projects*, pp. 1061–1086.
- 28 Aubry M. (2015) Project Management Office Transformations: Direct and Moderating Effects That Enhance Performance and Maturity. *Project Management Journal*, vol. 46, no. 5, pp.19–45.
- 29 Gelbard R. & Carmeli A. (2009) The interactive effect of team dynamics and organizational support on ICT project success. *International Journal of Project Management*, vol. 27, no. 5, pp.464–470.
- 30 Akkermans H. and van Helden K. (2002) Vicious and Virtuous Cycles in ERP Implementation: A Case Study of Interrelations Between Critical Success Factors. *European Journal of Information Systems*, 11(1), pp. 35–46.
- 31 Ika L.A. (2009) Project success as a topic in project management journals, *Project Management Journal*, 40 (4), pp. 6–19.
- 32 Pinto J.K., Slevin D.P. (1988) Critical success factors across the project life cycle, *Project Management Journal*, pp. 67–75.
- 33 McLeod L., Doolin B., MacDonell S.G. (2012) A perspective-based understanding of project success, *Project Management Journal*, 43 (5), pp. 68–86.
- 34 Pinto, Jeffrey & Covin, Jeffrey. (1989) Critical factors in project implementation: A comparison of construction and R&D projects. *Technovation*, 9, pp. 49–62.
- 35 Radujković M. and Sjekavica M. (2017) Project management success factors, *Proc. Eng.*, vol. 196, pp. 607–615.
- 36 Forsberg K., Cotterman H. & Mooz H. (2005) Visualizing project management: models and frameworks for mastering complex systems. John Wiley & Sons.

¹*Саулен А.Н.,

магистрант, ғылыми қызметкер, ORCIDID: 0009-0003-9600-6377, *e-mail: anelyasaulen@gmail.com

²Есмурзаева А.,

ғылыми қызметкер, ORCIDID: 0000-0003-0114-5925, e-mail: aknur.yesmurzayeva@gmail.com,

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

²Жетілдірілген зерттеулер және тұрақты даму институты, Алматы қ., 050040, Қазақстан

ЖАҒАНДЫҚ КОМПАНИЯЛАР ЖОБАЛАРЫНЫҢ ТАБЫС ФАКТОРЛАРЫ

Аңдатпа

Жобаның сәттілігі – жобаның мүдделі тараптары күтетін ең жақсы нәтиже. Бұл өнімді шығару немесе қызмет көрсету болса да, тәжірибешілер жобаларда табысқа жетуді қалайды және олар жобаның сәттілігі мен оның әртүрлі факторларға тәуелділігін түсінеді. Бұл тұжырымдама әлі де дамып келеді, өйткені жобалар динамикалық нарықта үнемі өзгеріп отырады. Жобаның сәттілігі жобаның сәтті орындалуына ықпал ететін факторлармен байланысты. Өзірге ол уақыттың, шығындардың және бюджеттен тұратын үштік шектеу пирамидасымен шектелмейді. «Темір үшбұрыш» жобаны басқарудың сәттілігінің бастапқы үлгісі, бірақ ол 20 ғасырдағы жалпы жобаларды ғана көрсетті. Зерттеушілер компаниялардың әртүрлі салаларда қалай табысқа жететінін талдай отырып, жаңа факторлар мен негіздерді белгілейді. Сонымен қатар бизнес кеңейіп келеді, компаниялар уақыт өте келе халықаралық, жағандық болу үшін бірнеше елде өз аумағын кеңейтуге тырысады. Бұл компаниялардың жобаларды жүргізуді жалғастыру тәсілі қазіргі уақытта зерттеу нысаны болып, мәдени, тілдік, коммуникациялық, құқықтық және т.б. мәселелермен бетпе-бет келеді. Зерттеу әдісі ретінде сауалнама, сандық талдау жүргізілді. Бұл зерттеудің нәтижелері нақты факторлар жағандық жобалардың сәттілігіне айтарлықтай ықпал етеді деген гипотезаны тексерді.

Тірек сөздер: жоба, жобаны басқару, табыс факторлары, жағандық компаниялар, жоба қатысушылары.

¹*Саулен А.Н.,

магистрант, исследователь, ORCID ID: 0009-0003-9600-6377, *e-mail: anelyasaulen@gmail.com

²Есмурзаева А.,

исследователь, ORCID ID: 0000-0003-0114-5925, e-mail: aknur.yesmurzayeva@gmail.com

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

²Институт перспективных исследований и устойчивого развития, г. Алматы, 050040, Казахстан

ФАКТОРЫ УСПЕХА ПРОЕКТОВ ГЛОБАЛЬНЫХ КОМПАНИЙ

Аннотация

Успех проекта – это лучший результат, которого ожидают заинтересованные стороны проекта. Будь то запуск продукта или предоставление услуг, специалисты-практики также хотят добиться успеха в проектах и имеют свое понимание успеха проекта и его зависимости от различных факторов. Эта концепция все еще развивается, поскольку проекты постоянно трансформируются на динамично развивающемся рынке. Успех проекта связан с факторами, которые способствуют успешной реализации проекта. На данный момент дело не ограничивается тройной пирамидой ограничений времени, стоимости и бюджета. «Железный треугольник» был первоначальной моделью успеха управления проектами, однако он отражал лишь общие проекты XX века. Исследователи устанавливают новые факторы и рамки, анализируя, как компании достигают успеха в различных областях. В то же время бизнес расширяется, компании стремятся расширить свою территорию более чем в одной стране, чтобы со временем стать международными, глобальными. То, как эти компании продолжают вести проекты, в настоящее время является предметом исследований, они сталкиваются с проблемами культурными, языковыми, коммуникационными, юридическими и т.д. Целью данного исследования является определение факторов успеха проекта с точки зрения практиков, имеющих опыт управления проектами в глобальных компаниях. В качестве метода исследования было проведено анкетирование, количественный анализ. Результаты этого исследования проверили гипотезу, утверждающую, что конкретные факторы в значительной степени способствуют успеху глобальных проектов.

Ключевые слова: проект, управление проектом, факторы успеха, глобальные компании, участники проекта.

UDC 339.7
IRSTI 06.35.31

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-364-373>

¹Hamdy Mohamed Abdelrady Mohamed,
MS in Economics, ORCID ID: 0000-0001-7143-6352
*e-mail: radyhamdy782@gmail.com

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

THE ROLE OF ENVIRONMENTAL ACCOUNTING IN ACHIEVING SUSTAINABLE DEVELOPMENT: EVIDENCE FROM KAZAKHSTAN

Abstract

Kazakh business establishments demonstrate a collective approach in addressing the environmental dimension by evaluating their environmental management systems and commitment. However, it is important to note that these efforts are implemented in a proportional manner rather than in their full. Consequently, Kazakh companies are able to achieve sustainable development goals to a certain extent, but not to the fullest extent. The objective of this study is to ascertain the characteristics and attributes of environmental performance auditing, as well as the rules and norms that regulate auditors' conduct within this professional domain. SPSS was used to analyse data and it is found that there is a positive and strong relationship between activating the environmental audit and achieving sustainable development goals. The sample members demonstrate a significant level of awareness regarding the crucial significance of examining the environmental issue in the attainment of sustainable development goals. The findings of the research demonstrate the significant and direct impact of audit reports on the motivation of companies to demonstrate a strong commitment towards the protection and preservation of the environment. The study suggests that it is imperative to encourage enterprises to enhance their environmental transparency by including environmental information in their submitted environmental reports to the relevant stakeholders with other some factors.

Key words: Environmental Accounting, Sustainable Development, Environmental Disclosure, Environmental changes, Kazakhstan.

Introduction

The accounting and auditing profession is affected by the conditions of the environment in which it operates and the progress of this profession is measured by the extent to which it keeps pace with environmental changes and developments and the global awareness of the importance of environmental problems in light of the existing economic and social development challenges has increased in recent years. Moreover, pollution control laws have also increased in most countries of the world which has created mechanisms for a new economic policy that determines the form of corporate behaviour accompanied by a change in the traditional view of companies and the way to evaluate their performance as performance evaluation has become linked to the extent of the impact of the company's operations from economic and social aspects on the surrounding community as the company's financial statement data may reflect a clear success according to the standards of profitability or cash flow while in fact the community surrounding the company suffers severely from its exploitation of some environmental factors improperly which causes some damage.

The trend has increased to the need for measurement and accounting disclosure of data that have an environmental content on the one hand and then conducting an environmental review on the other hand for the results of this measurement and evaluation of the general environmental performance of companies because of its importance in the purposeful impact on the behaviour of decision makers in companies to maximize their returns from making such a decision as studies confirm the increasing demand by users of financial statements to obtain relevant information on the environmental impacts of corporate activities and environmental audit is an organized process for collecting and evaluating

evidences related to the environmental performance of the company in all its dimensions to verify the compatibility of this performance with the standards and communicate the results reached to the various parties [8].

The world is currently facing with the current development model two main problems, the first is that many natural resources which we take for granted are subject to depletion in the near future, and the second is the problem of increasing pollution that our environment suffers from at the present time and resulting from the large amount of harmful waste that we produce and as a result the increasing pressure forces us to think about formulation of another development model that maintains the existing natural resources for future generations and reduces waste and harmful emissions and this is known as “sustainable development” which means meeting the needs of the present generation without wasting the rights of future generations in the life at a level not less than the level we live in now. This term was adopted by the international community at the Earth Summit in Brazil in 1992.

Professional organizations and international bodies in the field of accounting and auditing are interested in measuring and reporting environmental performance in terms of goals, evaluation concepts, measurement methodology and standards for preparing the final report and therefore environmental accounting appeared as a means of measuring the environmental performance of the company and communicating the obtained results to interested parties which resulted in the need to audit environmental performance to confer confidence in the disclosed information to reassure the community in all its sects of the results of the environmental activity that should be carried out by companies considering that auditors are an agent for society in all its different sects [10]. Moreover, the close link between the environment and development led to the emergence of the concept of sustainable development which has become one of the vital and urgent issues to be considered in the process of development planning at the level of countries and various business organizations and since financial reports represent the main source of information for each party has a relationship with business so sustainability reports including financial and non-financial information on the performance of these business have become an effective tool in bridging the information gap between the management and the parties interested in that firm [4].

The researchers were not only interested in the disclosure of sustainable development, but they examined factors and characteristics that affect the level of that disclosure as many previous studies found that there is a difference in the level of disclosure of sustainable development between countries worldwide as it was found that the difference in cultures, environmental, social and economic conditions between countries affect the level of disclosure [9]. Hence, it is clear to the researcher that the research problem can be clarified within the framework of the following questions:

1. What is the nature and importance of environmental auditing in light of environmental performance review standards?
2. What are the mechanisms and requirements for activating environmental audit activities in light of environmental performance audit standards?
3. What are the determinants and controls for achieving sustainable development at the local and international levels?
4. Does activating environmental audit activities contribute to achieving the requirements of sustainable development?
5. To what extent can a proposed approach be submitted that reflects the role of activating environmental audit activities in light of environmental performance review standards in achieving the requirements of sustainable development?

Main provisions

The study defines what environmental accounting entails, emphasizing its role in integrating environmental costs and benefits into financial reporting and decision-making processes, discusses the global imperative of sustainable development, emphasizing the need for integrating environmental

considerations into economic activities. The analysis provides an overview of Kazakhstan's economic and environmental landscape, highlighting key industries and environmental challenges the country faces. The study related to finding obstacles and challenges faced in implementing environmental accounting practices in Kazakhstan, such as regulatory frameworks, technological limitations, and institutional barriers.

Overall, the research outlines the potential benefits of adopting environmental accounting practices, such as improved resource efficiency, cost savings, enhanced corporate reputation, and compliance with international standards.

Literature Review

The of study Sharma aimed to identify opportunities for environmental auditing in India, assess the factors affecting the implementation of environmental audits in large industries and identify the strengths and weaknesses of their practices. The study found that the company systematically conducts environmental audits in its various factories and work sites on a regular basis and its reports and data are available on the company's website. The company also has many factories and production units with a large workforce that are directly related to the environment, and it is necessary to verify the level of pollution in their factories and nearby sites so environmental audit practices are necessary to know the state of pollution in their sites in a timely manner [12].

Olga research aimed to provide a framework for reviewing financial statements on future events caused by environmental factors, which are disclosed in financial reports to improve the quality of audit and to verify financial data for organizations that have a negative impact on the environment. The study reached a framework for reviewing financial statements taking into account environmental aspects, which makes it possible to trust the disclosed information about future events resulting from non-compliance with environmental laws and the continuity of the organization being reviewed and this framework was reached in the form of several steps namely setting environmental audit objectives, audit planning procedures and analysing the impact of definitions that were identified in the financial reports. The study recommended using that approach as it helps to achieve the principle of business continuity and estimate the size of reserves for the environmental obligations of the organization [11].

The of study Amal aimed to analyse and evaluate the relationship between environmental performance disclosure and financial performance for sustainable development purposes in Egyptian business environment. The study stressed that the existence of environmental management improves environmental performance and that the disclosure of environmental performance leads to improving internal procedures and policies in order to achieve the goals of sustainable development and the study also stressed that integrated reports contribute to providing a clear picture of the environmental, social and economic performance of the facility [2].

The of study Ahmed (2016) aimed to analyse what is meant by environmental audit and to measure the impact of the environmental audit evaluation of audit activities using the balanced scorecard. The study found that there is a statistically significant effect between the dimensions of the balanced scorecard and the effectiveness of the environmental audit and the study recommended the need for the industrial facilities management to pay attention to developing and updating the requirements of the balanced scorecard and training and qualifying members of the environmental review in the industrial facility to know how to apply the balanced scorecard in industrial facilities.

The study of Ahed dealt with the role of environmental auditing in achieving sustainable development in companies by addressing previous studies related to environmental audit for sustainable development and the intellectual framework for environmental audit and sustainable development. The study found that there are problems related to environmental pollution, climate change, debt and poverty that limit the achievement of the sustainable development goals and the study also found that there is low compliance with laws and regulations and poor disclosure of environmental performance for sustainable development purposes in businesses operating in developing countries [1].

The concept of environmental auditing: The environmental audit includes both estimates related to environmental pollution, environmental impact estimates in investment planning, areas of maintaining environmental integrity, reviewing companies' environmental performance reports and finally reviewing companies' compliance with environmental laws and regulations this concept was adopted by IFAC while US Environmental Protection Agency defined it as organized periodically documented inspection of the environmental practices of the facility to verify that the environmental requirements imposed by the laws and regulations of the environmental organizations are met. Moreover, British Standards Institute defined it as systematic evaluation set to determine the compatibility of the management and environmental system of the facility with the planned programs and to determine the effectiveness and suitability of that system to accomplish the environmental policy of the facility.

Types of Environmental Audit: Regulatory bodies can practice many types of environmental audits and these types are complementary to each other and therefore they can be gathered under one name which is environmental audit. Therefore, the types of internal audit are as follows [10]:

Financial Audit: Reviewing the extent of compliance with GAAP in the entry, classification and summary of operations related to environmental expenses and revenues in other words ensuring that costs, liabilities and assets related to the environment have been identified and valued and that the environmental cost of the company moderately reflects the results of its obligations and reporting in accordance with generally accepted accounting rules.

Compliance Audit: It means the administration's pledge to implement the requirements and legislation related to the activities and operations of the company and this review is considered the most widespread form of environmental reviews in the industrial fields due to the criminal liability that arises as a result of violating environmental laws as facilities that are subject to compliance requirements must take into account the implementation of a program to review compliance with environmental laws noting that the extent of expansion of the review depends on the extent of risks resulting from non-compliance as the non-compliance of business will have a financial impact on their financial statements so the auditor when preparing the report must take this situation into account.

Environmental Management Systems Audit: The environmental management system expresses the structure that defines the responsibilities, practices, procedures and resources necessary to protect the environment and manage environmental issues and this system is considered part of the company's internal management control structure in order to provide information related to the following:

FASB addressed in his publications on environmental aspects to how to identify potential environmental losses, the cost for removal of hazardous materials and accounting for capitalization of environmental pollution treatment costs. The U.S. has adopted a number of guidelines and releases related to environmental disclosure as general rules used by the SEC when providing disclosure evidence by entities approved by it. AICPA addressed in the Statement of Position 1/96 how to handle the effects of environmental pollution as this statement seeks to give accountants an overview of key environmental laws and regulations and the oversight mechanism for environmental issues. Moreover, IAS (10) introduced guidelines on how to capitalize environmental expenditures needed to repair environmental damage to assets and capitalize expenses necessary to avoid the closure of the facility or the suspension of its activities as a result of environmental violations and how to address the expenses incurred by the company as a result of the purchase of a polluting asset [5].

International Auditing Standards Related to Environmental Aspects: Standards are the basis for obtaining an appropriate evaluation of the performance of companies and are one of the tools for the successful practical application of any activity, the issuance of environmental audit standards helps not to lose sight of the environmental aspect of companies that have an important impact on the environment. Therefore, the most important ISAs regarding auditing will be mentioned as follows [6]:

ISA (200) indicates the need to obtain reasonable assurance about whether the data is free from material errors which are caused by fraud or error and therefore the environmental auditor must verify that the data and information contained in environmental disclosure reports are correct.

ISA (250) clarifies the responsibility of the auditor in considering the application of laws and regulations when auditing financial statements. Therefore, the environmental auditor must review environmental laws and regulations to verify the extent of compliance with them

ISA (500) addresses the auditor's responsibility for designing and implementing audit procedures to obtain sufficient and appropriate audit evidence so that he can reach reasonable conclusions. Based on this criterion, the environmental auditor must design and perform environmental audit procedures in order to obtain sufficient evidence.

ISA (540) clarifies the auditor's responsibility for accounting estimates such as estimates of fair value and related disclosures in the process of auditing financial statements and it also includes requirements and guidance on errors in various accounting estimates and indicators of possible bias by management and based on this standard, the environmental auditor can perform the audit of accounting estimates for fair value and disclosures related to environmental activities.

ISA (550) clarifies the responsibility of the auditor related to the treatment of related parties when auditing financial statements in order to enable users of financial statements to understand their nature and the actual or potential effects of them and from the above, the environmental auditor must view environmental records, data and transactions and communicate them in a manner that is easy to understand by all relevant parties.

The environmental audit must stem from the conviction of the management with optional self-motives and not compulsory in order to avoid falling into violation of legal legislation and to provide adequate support to the environmental auditor within the company and facilitate the difficulties in front of him to perform his tasks with the required efficiency and the need for management to comply with environmental obligations and the need to integrate the environmental audit with the overall system of environmental management and documenting the audit process in an appropriate manner [13].

The Importance of the Sustainable Development Reports Audit is that it works on the following [3]:

1. It meets the increasing global interest in sustainable development reports as there are nearly a thousand companies worldwide that provide integrated reports instead of traditional separate financial reports.

2. It increases the reliability of reports issued by entities and enhances the quality of disclosure of non-financial data and goes beyond the traditional financial reporting process.

3. Confirming non-financial information and data to detect sustainability issues by providing integrated reports to ensure that they are reliable and do not conflict with financial information.

The Role of Environmental Audit in Achieving the Sustainable Development Goals

The environmental audit has emerged recently which is concerned with paying attention to environmental matters through the follow-up of commercial and industrial companies to the extent of their compliance with laws, legislations and standards for environmental protection and holding companies responsible for the direct and indirect effects of their activities [7]. Countries increasingly emphasize the importance of preserving the environment through the issuance of legislation regulating the environment as it led organizations to include environmental issues in their agenda and activities in order to achieve the goals of sustainable development and the use of the term sustainable development began largely from the Rio de Janeiro Conference in 1992 where countries, governments and organizations sought to achieve sustainable development represented in preserving the environment, the welfare of society and the development of the human element which led to the emergence of several bodies concerned with environmental control and protection.

Companies seek to achieve the maximum possible return by making the most of the available resources, and the fear of overuse of natural resources through illegal exploitation has emerged and as a result many international bodies interested in sustainable development and the environment including the World Business Council for Sustainable Development have called for the need to pay attention to sustainability. With the increasing interest of the company's related parties in non-financial matters, the company's accounting and financial systems are unable to provide this information and therefore they require development to provide non-financial reports with an economic, social and

environmental dimension which led to the emergence of sustainable development practices as an essential part of the internal policies and procedures of companies and commercial and industrial institutions.

Research Methodology

To achieve the objectives of the research, the researcher relied on the inductive approach which aims to clarify the theoretical framework of the study by presenting the nature and activities of environmental audit in Kazakh joint stock companies on the one hand and what sustainable development activities are and how to reach them and the role of environmental audit in achieving sustainable development in Kazakh joint stock companies on the other hand and this is achieved by reviewing the latest professional publications studies and research related to the subject of study.

The researcher also relied on the deductive approach in testing the research hypotheses through the field study, which relied on a survey list aimed at analysing the answers of the study categories through a survey of a sample of (300) accountants and internal and external auditors to determine the extent of their awareness of their role in activating environmental audit methods in Kazakh joint stock companies at all stages of their work. 260 questionnaires were received back and available for analysis. The statistical program (SPSS) was used and to convert non-quantitative data into measurable quantitative data contained in the questionnaire Likert five points scale was used.

Results and Discussion

Table 1 provides classifies data based on a scale of responses (from Strongly Disagree to Strongly Agree) along with corresponding numerical values and their respective ranges. Here's a description of the data:

Table 1 – Weights of answers in Likert five points scale

Classification	Value	Range
Strongly Agree	5	1.00- 1.80
Agree	4	1.81- 2.60
Neutral	3	2.61- 3.40
Disagree	2	3.41- 4.20
Strongly Disagree	1	4.21- 5

Hypotheses Testing Using One Sample T Test

First hypothesis: There are no statistically significant differences between the respondents' opinions on the requirements of environmental auditing in Kazakh joint stock companies.

Table 2 – Shows opinions towards the requirements of environmental auditing.

The Axis	μ	STD	No	DOF	T value	Sig
Requirements for environmental auditing in Kazakh joint stock companies	3.65	0.55	260	259	19.01	0.01

Since μ (3.65) is greater than standard mean of Likert scale values which is (3) and calculated T (19.01) is greater than critical T which is (2.59) hence, we have to accept the first hypothesis as in

this sense there is a strong and positive trend for the respondents' opinions about the requirements of environmental auditing.

Second hypothesis: There are no statistically significant differences between respondents' opinions on the role of the external auditor towards environmental auditing.

Table 3 – Shows opinions towards the role of external auditor in environmental auditing

The Axis	μ	STD	No	DOF	T value	Sig
The role of the external auditor towards environmental auditing.	3.35	0.55	260	259	10.52	0.01

Since μ (3.35) is greater than standard mean of Likert scale values which is (3) and calculated T (10.51) is greater than critical T which is (2.59) hence, we have to accept the second hypothesis as in this sense there is a strong and positive trend for the respondents' opinions about the role of external auditor in environmental auditing.

Third hypothesis: There are no statistically significant differences between the respondents' opinions on the measures to achieve the dimensions of sustainable development.

Table 4 – Shows opinions towards measures to achieve of sustainable development

The Axis	μ	STD	No	DOF	T value	Sig
Measures to achieve the dimensions of sustainable development	3.64	0.79	260	259	13.09	0.01

Since μ (3.64) is greater than standard mean of Likert scale values which is (3) and calculated T (13.09) is greater than critical T which is (2.59) hence, we have to accept the third hypothesis as in this sense there is a strong and positive trend for the respondents' opinions towards measures to achieve the dimensions of sustainable development.

Forth hypothesis: There is no statistically significant relationship between activating the role of environmental audit and achieving sustainable development in Kazakh joint stock companies. This hypothesis will be tested using Pearson Correlation Coefficient.

Table 5 – Shows the relationship between environmental audit and sustainable development

The Axis	Correlation Coefficient R	Determination Coefficient R ²	Sig
The impact of activating the role of environmental auditing in achieving sustainable development in Kazakh joint stock companies	0.78	.61	0.01

Since R is (78%), hence there is a positive and strong relationship between activating the role of environmental audit and achieving sustainable development in Kazakh joint stock companies. And since R² is (61%), hence (61%) of change in achieving sustainable development is justified by activating the role of environmental audit while the rest (39%) is due to other factors.

1. Kazakh enterprises apply environmental dimension audit only through the revision of environmental management systems or the review of environmental compliance and it is applied relatively but not to the full degree.

2. Kazakh businesses are meeting the Sustainable Development Goals (SDGs) but they are also relatively not reaching the full degree.

3. There is a very high awareness of the important roles of the environmental dimension audit in the implementation of the SDGs.

4. The results of the study indicate a high positive impact of audit reports in urging business organizations towards a commitment to protect and preserve the environment.

Conclusion

The following recommendations are suggested:

- ♦ The need to push companies to improve environmental disclosure by presenting environmental aspects in environmental reports submitted to relevant parties. Increasing government attention to environmental aspects by motivating businesses with a global interest in the environment with the help of environmental experts to give confidence and credibility to the environmental performance audit report.

- ♦ The need for coordination and integration between the work of the external auditor and the internal auditor in order to improve the efficiency and effectiveness of the environmental performance audit process.

- ♦ The need for companies to pay attention to developing their staff in how to pay attention to environmental aspects.

- ♦ Business organizations should be aware that environmental reporting and review activities are an integral part of the environmental management systems within the organization.

- ♦ Community members should be aware of the information of environmental audit reports when making investment decisions.

- ♦ Benefiting from the experiences of developed countries in the field of environmental protection and sustainability of ecological balance to prepare a national framework for environmental auditing.

The state must provide various incentives to business organizations that are interested in reviewing environmental performance, reporting and disclosing it.

Research limitations are related to restricted methodology and regional aspects. Therefore, future studies may use other methods to investigate additional markets and countries.

REFERENCES

1 Ahed A. (2016) Environmental auditing and its role in achieving sustainable development in the business sector. Fifteenth Annual International Business Conference: Sustainability and Business Competitiveness. Al-Zaytoonah University, Jordan

2 Amal A. (2017) Analysis and evaluation of the relationship between environmental performance disclosure and financial performance for development purposes Journal of Accounting Thought, 4 (2).

3 Ernst and Young (2014) Viewpoints for the Audit Committee Leadership Summit No 25.

4 Ferrero J., Sanchez I. & Ballesteros B. (2015) The Effect Financial Reporting Quality on Sustainability Information Disclosure. Corporate Social Reasonability and Environmental Management Journal. 22 (1).

5 Garf Y. (2017) The impact of disclosure of sustainable development activities on the quality of financial reports in Saudi banks. Alexandria Journal for Accounting Research, 6 (8).

6 IFAC (2017) Handbook of International Quality Control, Auditing, Review, Other Assurance and Related Services Pronouncements.

7 Jacob H. (2013) The impact of environmental audit on the disclosure of integrated reports. Sennar University Journal, 6 (6).

8 Kares F. (2015) Recent Trends in Environmental Auditing. Academician Journal, 22 (8), PP 257.

9 Matthias S. & Fifka M. (2012) Focus and Standardization of Sustainability Reporting – A Comparative Study of the United Kingdom and Finland. Business Strategy and the Environment Journal, 21 (6).

- 10 Mohamedi S. (2007) The Role of Environmental Auditing in Rationalizing Investment Decisions in Securities. Master Thesis, Banha University.
- 11 Olga S. (2020) Audit of future environmental events in financial statements. Revista Espacios Journal, 41 (7), pp. 30.
- 12 Sharma D. (2020) An Effective Implementation of Environmental Audit. Test Engineering and Management Journal, Vol. (83), pp. 5370–5379.
- 13 Soliman K. (2015). The Impact of Disclosure of Sustainability Reports on Stock Prices in the Egyptian Exchange by Applying to the Telecommunications Sector. Alexandria Journal for Accounting Research, 10 (6).

¹Хамди Мохамед Абделради Мохамед,
экономика магистрі, ORCID ID: 0000-0001-7143-6352,
e-mail: radyhamdy782@gmail.com

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

ТҰРАҚТЫ ДАМУҒА ЖЕТУДЕГІ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ЕСЕПТІҢ РӨЛІ: ҚАЗАҚСТАН ДЕРЕКТЕРІ

Аңдатпа

Қазақстандық кәсіпорындар өздерінің экологиялық менеджмент жүйелері мен міндеттемелерін бағалау арқылы экологиялық мәселелерді шешуде ұжымдық тәсілді ұсынады. Дегенмен бұл күш-жігердің толық көлемде емес, пропорционалды түрде жүзеге асырылып жатқанын атап өткен жөн. Демек қазақстандық кәсіпорындар тұрақты даму мақсаттарына белгілі бір дәрежеде қол жеткізе алады, бірақ толық емес. Бұл зерттеудің мақсаты – экологиялық тиімділік аудитінің сипаттамалары мен ерекшеліктерін, сондай-ақ осы кәсіби саладағы аудиторлардың іс-әрекетін реттейтін ережелер мен қағидаларды анықтау. Деректерді талдау үшін SPSS пайдаланылды және экологиялық аудитті белсендіру мен тұрақты даму мақсаттарына қол жеткізу арасында оң және күшті байланыс бар екені анықталды. Іріктеуге қатысушылар тұрақты даму мақсаттарына қол жеткізудегі экологиялық мәселені зерттеудің маңыздылығы туралы білім деңгейінің құндылығын көрсетеді. Зерттеу нәтижелері аудиторлық есептердің кәсіпорындарды қоршаған ортаны қорғауға және сақтауға деген берік міндеттемесін орындауға ынталандыратын маңызды және тікелей әсер етуші екенін дәлелдеді. Зерттеу басқа факторлармен қатар, тиісті мүдделі тараптарға ұсынылатын экологиялық есептерге қоршаған орта туралы ақпаратты қосу арқылы бизнесті қоршаған ортаның ашықтығын жақсартуға ынталандыру маңызды екенін көрсетеді.

Тірек сөздер: экологиялық есеп, тұрақты даму, экологиялық ақпаратты ашу, экологиялық өзгерістер, Қазақстан.

¹Хамди Мохамед Абдельради Мохамед,
магистр экономики, ORCID ID: 0000-0001-7143-6352
e-mail: radyhamdy782@gmail.com

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

РОЛЬ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО УЧЕТА В ДОСТИЖЕНИИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ: ДАННЫЕ ИЗ КАЗАХСТАНА

Аннотация

Казахстанские предприятия демонстрируют коллективный подход к решению экологических проблем, оценивая свои системы экологического менеджмента и обязательства. Однако важно отметить, что эти усилия реализуются не в полном объеме, а пропорционально. Следовательно, казахстанские компании способ-

ны в определенной, но не в полной мере, достичь целей устойчивого развития. Целью данного исследования является определение характеристик и особенностей аудита экологической эффективности, а также правил и норм, регулирующих поведение аудиторов в этой профессиональной области. SPSS использовался для анализа данных, и было обнаружено, что существует положительная и сильная связь между активацией экологического аудита и достижением целей устойчивого развития. Участники выборки демонстрируют значительный уровень осведомленности о решающем значении изучения экологической проблемы в достижении целей устойчивого развития. Результаты исследования демонстрируют значительное и прямое влияние аудиторских отчетов на мотивацию компаний демонстрировать твердую приверженность защите и сохранению окружающей среды. Исследование показывает, что крайне важно поощрять предприятия повышать экологическую прозрачность путем включения экологической информации в свои экологические отчеты, представляемые соответствующим заинтересованным сторонам, а также другие факторы.

Ключевые слова: экологический учет, устойчивое развитие, раскрытие экологической информации, экологические изменения, Казахстан.

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 20.06.2024 г.
Тираж 300 экз. Формат 60х84 1/16.
Бумага тип. Усл.печ.л. 47,25 Уч.-изд.л. 49,1
Заказ №

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
