

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 4
October–December 2024

**ҚАЗАҚСТАН-БРИТАН
ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ХАБАРШЫСЫ**

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

**ВЕСТНИК
КАЗАХСТАНСКО-БРИТАНСКОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Алматы
№ 4 (71) 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”

- Abdirahmanov A.R.** - PhD, Assistant Professor JSC “KBTU”, Almaty, Kazakhstan; University of Mons, Mons, Belgium;
- Beysenkhanov N.B.** - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Dean, Professor, School of Materials Science and Green Technologies JSC “KBTU”, Almaty, Kazakhstan;
- Laifa Boufendi** - PhD, Professor, Orlean University, France

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** - Professor, School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, PR 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 JSC “KBTU”, Almaty, Kazakhstan;
- Kozhakhmetova A.K.** - PhD, Assistant Professor, Business School JSC “KBTU”, Almaty, Kazakhstan;
- Aldashev A.** - Professor, International School of Economics JSC “KBTU”, Almaty, Kazakhstan;
- Batkeev B.B.** - PhD, Assistant Professor, International School of Economics JSC “KBTU”, Almaty, Kazakhstan;
- Seitkazieva A.M.** - Doctor of Economics, Professor/Business School JSC “KBTU”, Almaty, Kazakhstan;
- Gabriel Castelblanco** - PhD, Assistant-Professor, University of Florida, Florida, USA;
- Dubina I.** - Doctor of Economic Sciences, Professor, Novosibirsk National Research State University (NSU);
- Osei-Kyei Robert** - PhD, Associate Professor, University of Western Sydney, Penrith, Australia;
- Montag Josef** - PhD, Senior Lecturer, Charles University, Prague, Czech Republic..

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

- Әбдірахманов А.Р.** - PhD, ассистент-профессор, «ҚБТУ» АҚ, Алматы қ., Қазақстан; Монс университеті, Монс қ., Бельгия;
Бейсенханов Н.Б. - ф.-м.ғ.д., декан, профессор, Материалтану және жасыл технологиялар мектебі «ҚБТУ» АҚ, Алматы қ., Қазақстан;
Laifa Boufendi - PhD, профессор, Орлеан университеті, Франция.

«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 - профессор, Мұнай инженериясы мектебі, Қытай мұнай университеті (Шығыс Қытай), Циндао қ., ҚХР;;
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, Бизнес мектебі «ҚБТУ» АҚ, Алматы қ., Қазақстан;
Кожаметова А.К. - PhD, ассистент-профессор, Бизнес мектебі, «ҚБТУ» АҚ, Алматы қ., Қазақстан;
Алдашев А. - PhD, профессор, Халықаралық экономика мектебі, «ҚБТУ» АҚ, Алматы қ., Қазақстан;
Баткеев Б.Б. - PhD, ассистент-профессор, Халықаралық экономика мектебі, «ҚБТУ» АҚ, Алматы қ., Қазақстан;
Сейтказиева А.М. - э.ғ.к., профессор, Бизнес мектебі «ҚБТУ» АҚ, Алматы қ., Қазақстан;
Gabriel Castelblanco - PhD, ассистент-профессор, Флорида университеті, Флорида, АҚШ
Дубина И. - э.ғ.д., профессор, Новосибирск ұлттық зерттеу мемлекеттік университеті (НМУ);
Osei-Kyei Robert - PhD, қауымдастырылған профессор, Батыс Сидней университеті, Пенрит қ., Австралия;
Montag Josef - PhD, сениор-лектор, Карлов университеті, Прага қ., Чехия Республикасы.

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;
- Pyas 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»

- Әбдірахманов А.Р.** - PhD, ассистент-профессор АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан; Университет Монса, г. Монс, Бельгия;
- Бейсенханов Н.Б.** - д.ф.-м.н., декан, профессор, Школа материаловедения и зеленых технологий АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Laifa Boufendi** - PhD, профессор, Университет Орлеана, Франция.

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** - профессор, Школа нефтяной инженерии, Китайский нефтяной университет (Восточный Китай), г. Циндао, КНР;
- 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.
- Дубина И.** - д.э.н., профессор, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ);
- Osei-Kyei Robert** - PhD, ассоциированный профессор, Университет Западного Сиднея, г. Пенрит, Австралия;
- Montag Josef** - PhD, сениор-лектор, Карлов университет, Прага, Чешская Республика.

МАЗМҰНЫ – СОДЕРЖАНИЕ

1 КОМПЬЮТЕРЛІК ҒЫЛЫМДАР КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ

Abildayeva T., Shamoï P.

Fuzzy logic approach for visual analysis of websites with k-means
clustering-based color extraction 10

**Ипалакова М., Дайнеко Е., Болатов Ж., Цой Д.,
Абдугаппарова К., Ходжаев Д.**

Использование информационных технологий
в сохранении культурного наследия Казахстана 22

Nam D.

Classification of lung calcifications and cancer
in Lungs-RADS System based on radiological features 32

Kunikev A., Yerimbetova A., Satybaldiyeva R.

A review of tools, methodologies, and techniques for processing,
pre-processing, and clustering analysis of genetic data 45

Sagidolla B., Ali S., Aibolat D., Shayakhmetov N.

Quantative model for estimating vehicle repair costs in insurance claims 58

**Омаров Б.С., Зиятбекова Г.З., Батыр Ж.А., Майлыбаева А.Д.,
Бидахмет Ж., Шаметова Г.К., Войчик В.**

Жол белгілерін автоматты түрде конволюциялық
нейрондық желілер көмегімен анықтау және тану 81

Сапақова С.З., Камбарова Б.

Машиналық оқытумен әлеуметтік желідегі қазақ тілінің дамуына
орыс тіліндегі сөздердің ықпалын зерттеу 91

2 МАТЕМАТИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Manapova A., Beketayeva A., Makarov V.

Penalty function method for modeling of cylinder flow with
subsonic compressible flow 107

Сүлейменова М.У., Манапова А.Қ., Шоманов А.С., Симинг Ч.

Численное моделирование преждевременного
сердечно-сосудистого старения 124

Бесжанова А.Т., Байарыстанов А.О.

Жоғарғы шегі айнымалы болатын матрицалық оператордың
монотонды тізбектер конусындағы салмақты бағалауы 136

Dukenbayeva A., Sadybekov M.

On a spectral problem for the Laplace operator with more general boundary conditions 146

Zhangirbayev A.

Hardy inequalities and identities related to the Baouendi-Grushin vector fields
and Landau-Hamiltonian 153

Майер Ф.Ф., Тастанов М.Г., Утемисова А.А., Байманкулов А.Т.

Классы почти звездобразных функций, построенные
на основе опорной функции общего вида 168

3 ФИЗИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

Дүйсенбек Ә.Н., Бейсенова Е.Е., Бейсенов Р.Е., Асқарұлы Қ., Приходько Н.Г., Туганбаев А.Б.	
Изготовление электродов суперконденсаторов с высокой производительностью на основе графеноподобного углерода, полученного из отходов чая	186
Жаңабай Н.Ж., Утелбаева А.Б., Тұрсұнқұллы Т., Жаңабай А.Ж., Бахберген С.	
Физика среды – предпосылка для исследования влияния солнечной радиации на наружные стеновые ограждения зданий	196
Кошанова А.Б., Немкаева Р.Р., Гусейнов Н.Г., Мархабаева А.А., Мухаметкаримов Е.С.	
Плазмонный резонанс в тонких пленках ZnO с наночастицами благородных металлов	210
Шонгалова А.Қ., Лебедев И.А., Бондарь Е.А., Дмитриева Е.А., Федосимова А.И., Ибраимова С.А., Кемелбекова А.Е., Жұмабай Б., Нұрбаев Б.М., Исаева Ұ.Б., Кучкаров К.М.	
Изучение иерархических структур в наноразмерных пленках на основе диоксида олова	219
Сариев Б., Амрин А., Джексембаева А., Конканов М.	
Анализ реологических свойств геополимера летучей золы армированного полиэтиленовым волокном для аддитивного производства	234
Kalkozova Zh.K., Markhabayeva A.A., Mukhametkarimov Y.S., Yerlanuly Y., Tulegenova A.T., Abdullin Kh.A., Nuraje N., Cao C.D.	
Photoelectrochemical properties of nanostructured silicon for solar water splitting.....	245

4 МҮНАЙ ГАЗ ИНЖЕНЕРИЯСЫ ЖӘНЕ ГЕОЛОГИЯ НЕФТЕГАЗОВАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ГЕОЛОГИЯ

Пашенов С., Кульбашев М.	
Оптимизация устойчивости в нефтегазовой промышленности на примере ТОО «Казахойл Актөбе»	254
Yubin Zhang, Hongbin Yang, Miao Li, Haizhuang Jiang, Ruichao Wang, Luyao Xing, Haocong Li, Shuhe Zhang, Liang Peng, Xin Chen, Haobin Shi, Wanli Kang	
Study on the influence factors of demulsifier on oil-water interface	269
Zhaksylykov Zh., Samatov A., Sharipov Zh.	
Enhancing reservoir productivity using HiWAY hydraulic fracturing method at Amangeldi field	277

5 ЭКОНОМИКА ЖӘНЕ БИЗНЕС ЭКОНОМИКА И БИЗНЕС

Kim P.	
Successful data management: a case study of airline company in Kazakhstan.....	299
Rajasekhara Mouly Potluri, Madhavi Kilaru, Kuralay Turarbekova, Nikita Shevchik	
Digital Marketing Influence on the Business Performance of Kazakhstan Small & Medium Enterprises (SMEs)	317

CONTENTS

1 COMPUTER SCIENCE

<i>Abildayeva T., Shamoi P.</i> Fuzzy logic approach for visual analysis of websites with k-means clustering-based color extraction	10
<i>Ipalakova M., Daineko Y., Bolatov Zh., Tsoy D., Abdugapparova K., Khojayev D.</i> The use of information technology in preserving the cultural heritage of Kazakhstan.....	22
<i>Nam D.</i> Classification of lung calcifications and cancer in Lungs-RADS System based on radiological features.....	32
<i>Kunikeyev A., Yerimbetova A., Satybaldiyeva R.</i> A review of tools, methodologies, and techniques for processing, pre-processing, and clustering analysis of genetic data	45
<i>Sagidolla B., Ali S., Aibolat D., Shayakhmetov N.</i> Quantative model for estimating vehicle repair costs in insurance claims	58
<i>Omarov B.S., Ziyatbekova G.Z., Batyr1 Zh.A., Mailybayeva A.D., Bydakhmet Zh., Shametova G.K., Wójcik W.</i> Automatic detection and recognition of road signs using convolutional neural networks	81
<i>Sapakova S.Z., Kambarova B.</i> Analyzing Russian borrowings in Kazakh social media using machine learning	91

2 MATHEMATICAL SCIENCES

<i>Manapova A., Beketayeva A., Makarov V.</i> Penalty function method for modeling of cylinder flow with subsonic compressible flow	107
<i>Suleimenova M.U., Manapova A.K., Shomanov A.S., Siming Ch.</i> Numerical modeling of premature cardiovascular aging.....	124
<i>Beszhanova A.T., Bayarystanov A.O.</i> Weighted estimate of a matrix operator with variable upper limit on the cone of monotone sequences.....	136
<i>Dukenbayeva A., Sadybekov M.</i> On a spectral problem for the Laplace operator with more general boundary conditions	146
<i>Zhangirbayev A.</i> Hardy inequalities and identities related to the Baouendi-Grushin vector fields and Landau-Hamiltonian.....	153
<i>Maiyer F.F., Tastanov M.G., Utemissova A.A., Baimankulov A.T.</i> Classes of close-to-starlike functions based on the reference f unction of a general form.....	168

3 PHYSICAL SCIENCES

Duisenbek A.N., Beissenova E.E., Beissenov R.E., Askaruly K., Prikhodko N.G., Tuganbaev A.B., Production of high-performance supercapacitor electrodes based on graphene-like carbon obtained from tea waste	186
Zhangabay N., Utelbayeva A., Tursunkululy T., Zhangabay A., Bakhbergen S. Environmental physics is a prerequisite for studying the effect of solar radiation on the external wall fences of buildings	196
Koshanova A.B., Nemkayeva R.R., Guseinov N.G., Markhabayeva A.A., Mukhametkarimov Ye.S., Plasmon resonance in thin ZnO films with nanoparticles of noble metals	210
Shongalova A.K., Lebedev I.A., Bondar E.A., Dmitriyeva E.A., Fedosimova A.I., Ibraimova S.A., Kemelbekova A.E., Zhumabay B., Nurbayev B.M., Issayeva U.B., Kuchkarov K.M. Study of hierarchical structures in tin dioxide based nanosized films	219
Sariyev B., Amrin A., Jexembayeva A., Konkanov M. Analysis of rheological properties in PE fiber-reinforced fly ash geopolymer for additive manufacturing	234
Kalkozova Zh.K., Markhabayeva A.A., Mukhametkarimov Y.S., Yerlanuly Y., Tulegenova A.T., Abdullin Kh.A., Nuraje N., Cao C.D. Photoelectrochemical properties of nanostructured silicon for solar water splitting.....	245

4 OIL AND GAS ENGINEERING, GEOLOGY

Pashenov S., Kulbashev M. Optimization of a sustainability in the oil and gas industry on the example of “KazakhOil Aktobe” LLP	254
Yubin Zhang, Hongbin Yang, Miao Li, Haizhuang Jiang, Ruichao Wang, Luyao Xing, Haocong Li, Shuhe Zhang, Liang Peng, Xin Chen, Haobin Shi, Wanli Kang Study on the influence factors of demulsifier on oil-water interface	269
Zhaksylykov Zh., Samatov A., Sharipov Zh. Enhancing reservoir productivity using HiWAY hydraulic fracturing method at Amangeldi field	277

5 ECONOMY AND BUSINESS

Kim P. Successful data management: a case study of airline company in Kazakhstan	299
Rajasekhara Mouly Potluri, Madhavi Kilaru, Kuralay Turarbekova, Nikita Shevchik Digital Marketing Influence on the Business Performance of Kazakhstan Small & Medium Enterprises (SMEs)	317

COMPUTER SCIENCE
КОМПЬЮТЕРЛІК ҒЫЛЫМДАР
КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ

UDC 004.89
IRSTI 28.23.24

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-10-21>

¹**Abildayeva T.,**

Master student, ORCID ID: 0009-0005-2983-3377,

e-mail: t_abildayeva@kbtu.kz

^{1*}**Shamoi P.,**

PhD in Engineering, Professor, ORCID ID: 0000-0001-9682-0203,

*e-mail: p.shamoi@kbtu.kz

¹Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

**FUZZY LOGIC APPROACH FOR VISUAL ANALYSIS
OF WEBSITES WITH K-MEANS CLUSTERING-BASED
COLOR EXTRACTION****Abstract**

Websites form the foundation of the Internet, serving as platforms for disseminating information and accessing digital resources. They allow users to engage with a wide range of content and services, enhancing the Internet's utility for all. The aesthetics of a website play a crucial role in its overall effectiveness and can significantly impact user experience, engagement, and satisfaction. This paper examines the importance of website design aesthetics in enhancing user experience, given the increasing number of internet users worldwide. It emphasizes the significant impact of first impressions, often formed within 50 milliseconds, on users' perceptions of a website's appeal and usability. We introduce a novel method for measuring website aesthetics based on color harmony and font popularity, using fuzzy logic to predict aesthetic preferences. We collected our own dataset, consisting of nearly 200 popular and frequently used website designs, to ensure relevance and adaptability to the dynamic nature of web design trends. Dominant colors from website screenshots were extracted using k-means clustering. The findings aim to improve understanding of the relationship between aesthetics and usability in website design.

Key words: Web Aesthetics, Web Design, Fuzzy Logic, User experience, k-means clustering, color harmony.

Introduction

In the present-day world, the number of Internet users is increasing rapidly. More than 5.35 billion people, representing over two-thirds of the global population, use the internet [1]. Websites are core to the Internet, providing a platform for sharing information and accessing online resources. They enable users to access various content and services, making the Internet more useful for everyone. However, the probability of retaining a user decreases as the number of websites increases.

To differentiate yourself from the competition, it is important to focus on both the quality of content and the overall user experience.

First impressions are crucial in determining personality attribution in various contexts [2]. This is especially true for websites, as they strongly influence users' perceptions of appeal and usability [3], [4]. The visual design of a website can elicit positive emotions, enhance user satisfaction, and capture visitors' attention [5]. It is possible to make a reliable decision on whether users like the visual appeal in just 50 milliseconds [6]. Lindgaard et al.'s research illustrates how visual appeal may be closely linked to other design elements, such as layout and color, influencing overall impression.

Garrett [7] considers aesthetics a subjective judgment, as it varies from person to person and is highly dependent on that person's culture and personality. Some researchers have created models for measuring aesthetic values when considering it as a measurable object. If we view aesthetics as something that can be measured, then models for assessing aesthetic values can be developed, similar to the work of Zane et al. [8] and Filonik and Baur [9]. However, these works do not consider all aspects of the site, and only a few people participated in assessing aesthetics.

The current paper presents a model that utilizes the fuzzy logic approach to determine websites' aesthetic preferences using color harmony and font aesthetics. Over 200 sites were collected. The overall methodology is presented in Fig. 1.

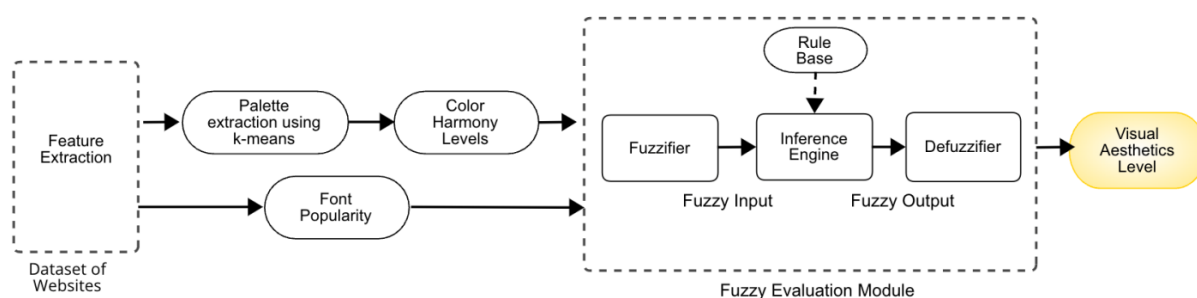


Figure 1 – Methodology figure illustrating the proposed approach

The contributions of this study are:

Application of Fuzzy Logic to create a model in website design aesthetics. We propose a new way to quantify subjective elements, such as color harmony and font aesthetics, and determine the site's aesthetics.

We collected our dataset of the most popular and frequently used website designs from the Internet. This is important due to the dynamic nature of web design trends. Our analysis focuses on projects that gained prominence and were frequently used in 2024.

Aesthetics can be defined as the philosophy of beauty and the perception of what is visually pleasing [10]. Lee and Koubek [11] suggest that the usability of content is processed later than perception. Several authors have pointed out [12], [13], and [14] that the first impression of a website is greatly influenced by its aesthetics. It is now known that our immediate emotional reaction to products, based on how they look, strongly affects how we later judge their usability [15]. Beautiful websites are seen as more usable [6], [16]. Several works applied a fuzzy approach to modeling aesthetic preferences [17], [18], [19].

Developers strive to create web pages that can create a specific experience and fit well into the overall website strategy [20]. In doing so, they carefully select various components such as text, photographs, and other media elements, complementing them using a variety of styles, color palettes, fonts, and animations. These elements work together to create a unique aesthetic and provide a cohesive visual impact to site visitors.

According to study [21], the use of color is crucial in the design of a website. It's important to consider the diverse range of users who will access the site, including those who may be color blind

and unable to differentiate certain colors. Therefore, choosing colors should be carefully considered when developing a website. Additionally, "balance" is also significant. As mentioned in study [22], a balanced website makes users feel psychologically balanced.

Choosing the right distance between website elements such as photographs, color schemes, fonts, and others is also important. There is a close relationship between the number of design elements and the space they occupy, so it's crucial to maintain a balance [23], [24]. Designing a website with appropriate white space can enhance both its usability and aesthetics [24].

When evaluating the visual appeal of websites, it is important to consider the elements mentioned earlier and the design style, which is divided into 21 types by study [25].

The aesthetics of a website significantly impact its perception and usability. These include emotional reactions, color and balance in design, and spatial relationships between elements.

Materials and Methods

Data Collection

For the experiments, a dataset containing approximately 200 websites was collected. The process of collection and preparation involved several key stages. The first phase focused on gathering all site links and their associated names. The selection of sites was based on frequent use and other significant criteria, ensuring their relevance and popularity among users. When selecting websites, particular attention was paid to including diverse fields to cover various topics and interests. The effort was made to incorporate sites in different languages to reflect the diversity of cultural contexts, thereby making the dataset more universal and beneficial for analysis. Subsequently, the process moved on to capturing complete screenshots of each site's homepage. This was achieved by utilizing a specific web browser extension in Google Chrome called "GoFullPage - Full Page Screen Capture."

Finally, the developer tools panel in the browser was utilized to ascertain the fonts used on each site. Particular attention was paid to the most frequently used font family, as this often represents the primary typographic choice of the website designers.

The result of the collected dataset can be seen in Table 1.

Table 1 – Sample records from dataset

Website ID	Website Name	Website Link	Website Category	First color	Second color	Third color	Font-Family
1	YouTube	https://www.youtube.com/	Social Media	#101010	#505051	#a0a0a0	Roboto
2	Informburo	https://informburo.kz/	News	#ffffff	#181818	#e72116	Roboto
3	Telegram	https://telegram.org/	Messaging	#ffffff	#fdd626	#1a1f27	Lucida Grande
4	Naver Dictionary	https://dict.naver.com/	Education	#1f1f1f	#6b6c6c	#aeaeae	Helvetica Neue
5	Naver	https://www.naver.com/	Web Portal	#fefefe	#bcdbdc	#03c75b	Malgun Gothic
6	IEEE	https://ieeexplore.ieee.org/	Academic	#ffffff	#18455a	#0294e1	Helvetica
7	Kaspi.kz	https://kaspi.kz/	Finance	#f5f5f5	#030303	#f04434	Roboto
8	Apple	https://www.apple.com/	Technology	#f5f6f6	#010101	#424242	SF Pro Text
9	Netflix	https://www.netflix.com/kz/	Entertainment	#010101	#fcfcfc	#434343	Bebas Neue Font
10	KFC	https://www.kfc.kz/	Food	#ffffff	#e3012b	#440f1a	Cera
...	...	...	...	...	...	...	...
200	HealthLine	https://www.healthline.com/	Health	#f8f8f8	#010101	#fcba44	Proxima Nova

The dataset comprises information from more than 200 sites collected between March and May 2024. Following the data collection phase, the information can be organized and distributed based on categories, color schemes, and font types. These sites have been divided into categories, and the relationship between the distribution of these categories is depicted in Fig. 3.

Aa Name	Link	Category	Color palette	Color from	Font-family
Google Scholar	https://scholar.google.com/	Academic	1. [254 254 254] 2. [131 114 93] 3. [77 143 241]	1. #ffffff 2. #787878 3. #bcbcbc	1. Arial
KBTU	https://kbtu.kz/	Education	1. [23 40 86] 2. [250 251 251] 3. [166 154 142]	1. #ffffff 2. #022452 3. #856aef	1. Helvetica
IITU	https://iitu.edu.kz/en/	Education	1. [114 24 35] 2. [238 243 240] 3. [75 87 104]	1. #ffffff 2. #405566 3. #b3040f	1. monospace 2. Helvetica Neue 3. Arial
Jisho	https://jisho.org/	Education	1. [42 42 42] 2. [202 212 214] 3. [108 115 118]	1. #2b2b2b 2. #6b6b6b 3. #c0c0c0	1. Helvetica Neue 2. Arial 3. Source Han Sans
Alfa	https://alfa.bank/	Finance	1. [246 246 248] 2. [22 22 22] 3. [169 82 152]	1. #ffffff 2. #121212 3. #9a35ff	-apple-system, BlinkMacSystemFont, Segoe UI, Roboto, Helvetica, Ubuntu, Cantarell, Arial, sans-serif, Apple Color Emoji, Segoe UI Emoji, Segoe UI Symbol
Rik	https://www.rik.studio/	Creative	1. [102 142 152] 2. [4 3 3] 3. [238 185 192]	1. #030303 2. #609ee7 3. #fdddfd	1. Arial
360 Yandex	360.yandex.ru/blog	Technology	1. [252 252 253] 2. [51 42 47] 3. [185 180 180]	1. #ffffff 2. #b4b4b4 3. #272626	1. YS Text

Figure 2 – Collected dataset

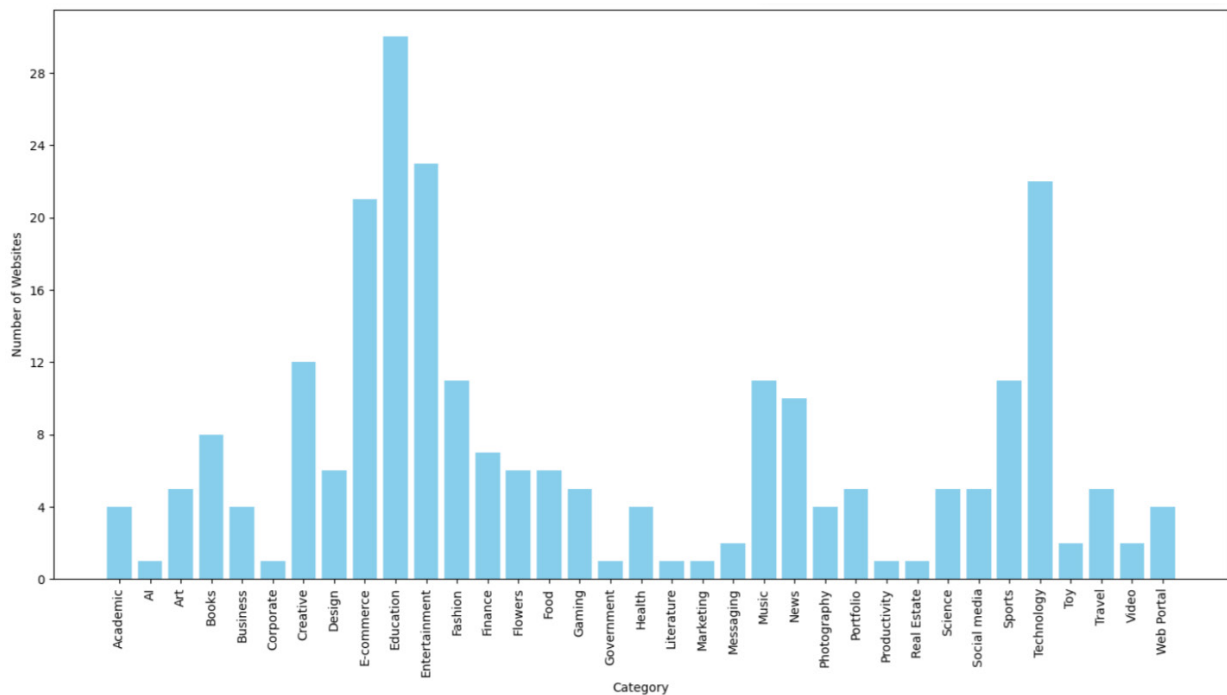


Figure 3 – Distribution of collected websites by categories

Sample images of the website from our Dataset are presented in Fig. 4

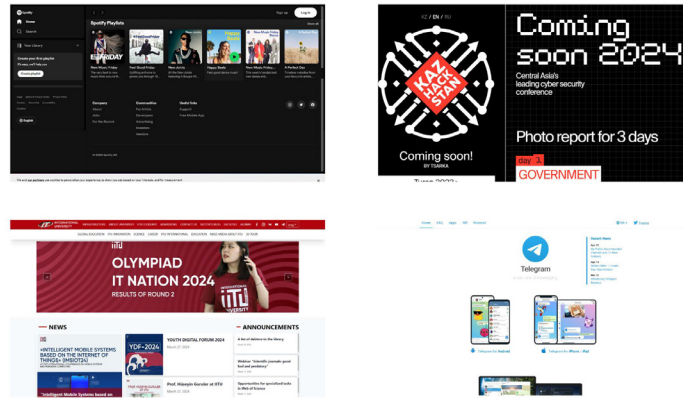


Figure 4 – Sample images from our dataset.
1. Spotify. 2. KazHackStan. 3. IITU. 4. Telegram

Fuzzy Sets and Logic

Fuzzy sets and logic provide a framework for dealing with uncertainty and imprecision, which are inherent in many real-world problems. Unlike classical sets, where an element belongs or does not belong to a set, fuzzy sets allow partial membership.

A fuzzy set A in a universe of discourse X is characterized by a membership function $\mu_A(x)$ that assigns to each element x in X a degree of membership in the interval $[0,1]$ [26]. Mathematically, it is defined as:

$$\mu_A: X \rightarrow [0,1]$$

The basic operations in fuzzy logic include AND, OR, and NOT, which correspond to intersection, union, and complement in fuzzy set theory. For example, the fuzzy AND operation is defined as:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

A fuzzy inference system (FIS) is a framework for reasoning with fuzzy logic. It consists of the following steps [26]:

1. Fuzzification. Convert crisp inputs into fuzzy sets using membership functions.
2. Rule Evaluation. Apply fuzzy rules to the fuzzy inputs to obtain fuzzy outputs.
3. Aggregation. Combine the fuzzy outputs into a single fuzzy set.
4. Defuzzification. Convert the aggregated fuzzy set into a crisp output.

Fuzzy rules are an essential component of fuzzy logic systems. A fuzzy rule is generally expressed as an IF-THEN statement, where the IF part is the antecedent and the THEN part is the consequent. A fuzzy rule can be written as:

$$\text{IF } x_1 \text{ IS } A_1 \text{ AND } x_2 \text{ IS } A_2 \text{ THEN } y \text{ IS } B$$

where x_1, x_2 are input variables, A_1, A_2 are fuzzy sets representing the antecedents, and y is the output variable with fuzzy set B representing the consequent.

Fig. 5 depicts input fuzzy sets, Color Harmony and Font Popularity. Fig. 6 shows output fuzzy sets representing a website's level of Visual Aesthetics. Table 2 illustrates fuzzy rules used in the fuzzy inference system.

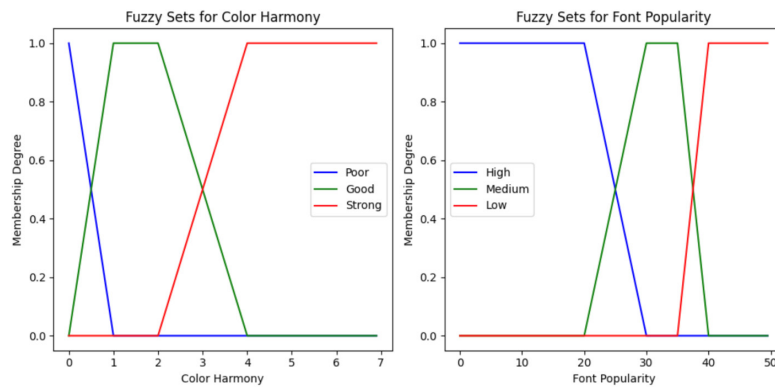


Figure 5 – Input fuzzy sets, Color Harmony and Font Popularity

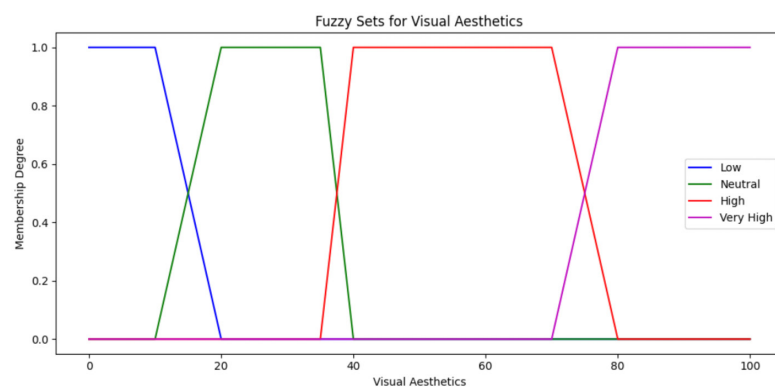


Figure 6 – Output fuzzy sets representing the level of Visual Aesthetics in a website

Table 2 – Fuzzy rules in the knowledge base

Rules	Color Harmony	Font Popularity	Visual Aesthetics
Rule 1	Poor	Low	Low
Rule 2	Poor	Medium	Low
Rule 3	Poor	High	Neutral
Rule 4	Good	Low	Neutral
Rule 5	Good	Medium	High
Rule 6	Good	High	High
Rule 7	Strong	Low	Neutral
Rule 8	Strong	Medium	Very High
Rule 9	Strong	High	Very High

K-means Clustering for Palette Extraction

K-means clustering is a popular unsupervised ML algorithm for partitioning a dataset into distinct, non-overlapping groups or clusters. It is widely used in various fields, including image processing, for tasks such as palette extraction, where the goal is to identify the dominant colors in an image.

The k-means clustering algorithm aims to partition n observations into k clusters, where each observation belongs to the cluster with the nearest mean. The algorithm consists of the following steps:

1. Randomly select k initial cluster centroids from the dataset.

2. Assign each data point to the nearest cluster centroid based on the Euclidean distance. The assignment step can be represented as:

$$C_i = \{x_p : \|x_p - \mu_i\|^2 \leq \|x_p - \mu_j\|^2 \quad \forall j, 1 \leq j \leq k\}$$

where x_p is a data point, μ_i is the centroid of cluster i , and C_i is the set of points assigned to cluster i .

3. Calculate the new centroids as the mean of all points assigned to each cluster. The update step can be represented as:

$$\mu_i = \frac{1}{|C_i|} \sum_{x_p \in C_i} x_p$$

where $|C_i|$ is the number of points in cluster i .

4. Repeat the assignment and update steps until the centroids converge, meaning the centroids no longer change significantly.

Euclidean Distance is defined as:

$$\|x_p - \mu_i\|^2 = \sum_{j=1}^d (x_{pj} - \mu_{ij})^2$$

where x_{pj} is the j -th coordinate of data point x_p and μ_{ij} is the j -th coordinate of the centroid μ_i .

The objective of k-means is to minimize the total within-cluster variance, which is the sum of squared distances between points and their respective cluster centroids. The objective function can be represented as:

$$J = \sum_{i=1}^k \sum_{x_p \in C_i} \|x_p - \mu_i\|^2$$

As defined previously, the new centroid μ_i is the mean of all points x_p in cluster C_i :

$$\mu_i = \frac{1}{|C_i|} \sum_{x_p \in C_i} x_p$$

In image processing, k-means clustering can extract the dominant colors in an image. Various color spaces can be employed for this purpose. The process involves treating each pixel's color value as a data point and clustering these points in the color space. The centroids of the clusters represent the dominant colors in the image, which can be used to create a color palette.

The steps for palette extraction are as follows:

Convert the image into a dataset of color values.

Apply the k-means clustering algorithm to this dataset.

The centroids of the clusters are the colors of the palette.

Color Wheel Harmony

We calculate color wheel harmony by extracting the dominant colors from a website using the K-means clustering algorithm. These dominant colors are then converted from RGB to HSV format, focusing particularly on the Hue component. The color wheel is divided into 12 segments, each corresponding to a primary, secondary, or tertiary color, and each segment represents a 30-degree slice of the wheel. By determining the Hue values of the dominant colors, we can locate their positions on this color wheel.

We then analyze these positions to identify the type of color harmony present. We used traditional harmonies, like "Monochromatic", "Complementary", "Split Complementary", "Triad", "Square", "Rectangular", "Analogous". For that, we used color-harmony 1.0.1 python package. For example, Complementary harmony is identified when colors directly oppose each other on the wheel, and Triad harmony consists of three colors evenly spaced around the wheel. Any combination that does not fit these categories is classified as "Other."

Results and Discussion

Color harmonies were extracted using the approach discussed in the previous section. Information about font popularity was parsed from the website www.myfonts.com. Now, we can illustrate the proposed approach with a specific example.

Fig. 7 illustrates the example of the resulting output, including dominant RGB colors, color wheel harmonies, and the palette illustration.

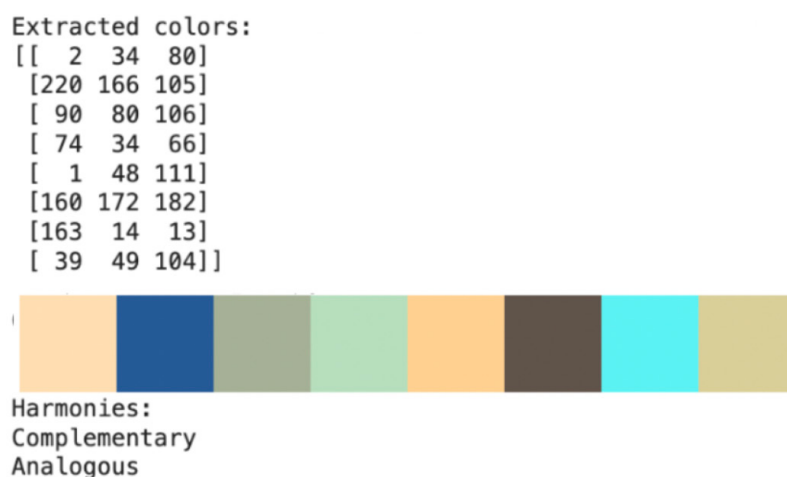


Figure 7 – Example of extracted dominant RGB colors, wheel harmonies and palette illustration

To simulate the fuzzy system, we must first specify the inputs and then use the defuzzification approach. Consider the following example: the inputs are Color Harmony and Font Popularity with values of 3 and 37, respectively. Fuzzy aggregation then combines the output membership functions using the maximum operator. Next, we defuzzify to obtain a final result, which is done using the centroid approach. Aggregation using fuzzy criteria yielded an overall Visual Aesthetics score of 57.9%. This process effectively demonstrates how the fuzzy system simulates and visualizes the results.

```
# Define fuzzy rules
rule1 = ctrl.Rule(color_harmony['Poor'] & font_popularity['Low'], visual_aesthetics['Low'])
rule2 = ctrl.Rule(color_harmony['Poor'] & font_popularity['Medium'], visual_aesthetics['Low'])
rule3 = ctrl.Rule(color_harmony['Poor'] & font_popularity['High'], visual_aesthetics['Neutral'])
rule4 = ctrl.Rule(color_harmony['Good'] & font_popularity['Low'], visual_aesthetics['Neutral'])
rule5 = ctrl.Rule(color_harmony['Good'] & font_popularity['Medium'], visual_aesthetics['High'])
rule6 = ctrl.Rule(color_harmony['Good'] & font_popularity['High'], visual_aesthetics['High'])
rule7 = ctrl.Rule(color_harmony['Strong'] & font_popularity['Low'], visual_aesthetics['Neutral'])
rule8 = ctrl.Rule(color_harmony['Strong'] & font_popularity['Medium'], visual_aesthetics['Very High'])
rule9 = ctrl.Rule(color_harmony['Strong'] & font_popularity['High'], visual_aesthetics['Very High'])
```

Figure 8 – Defining rules using scikit-fuzzy

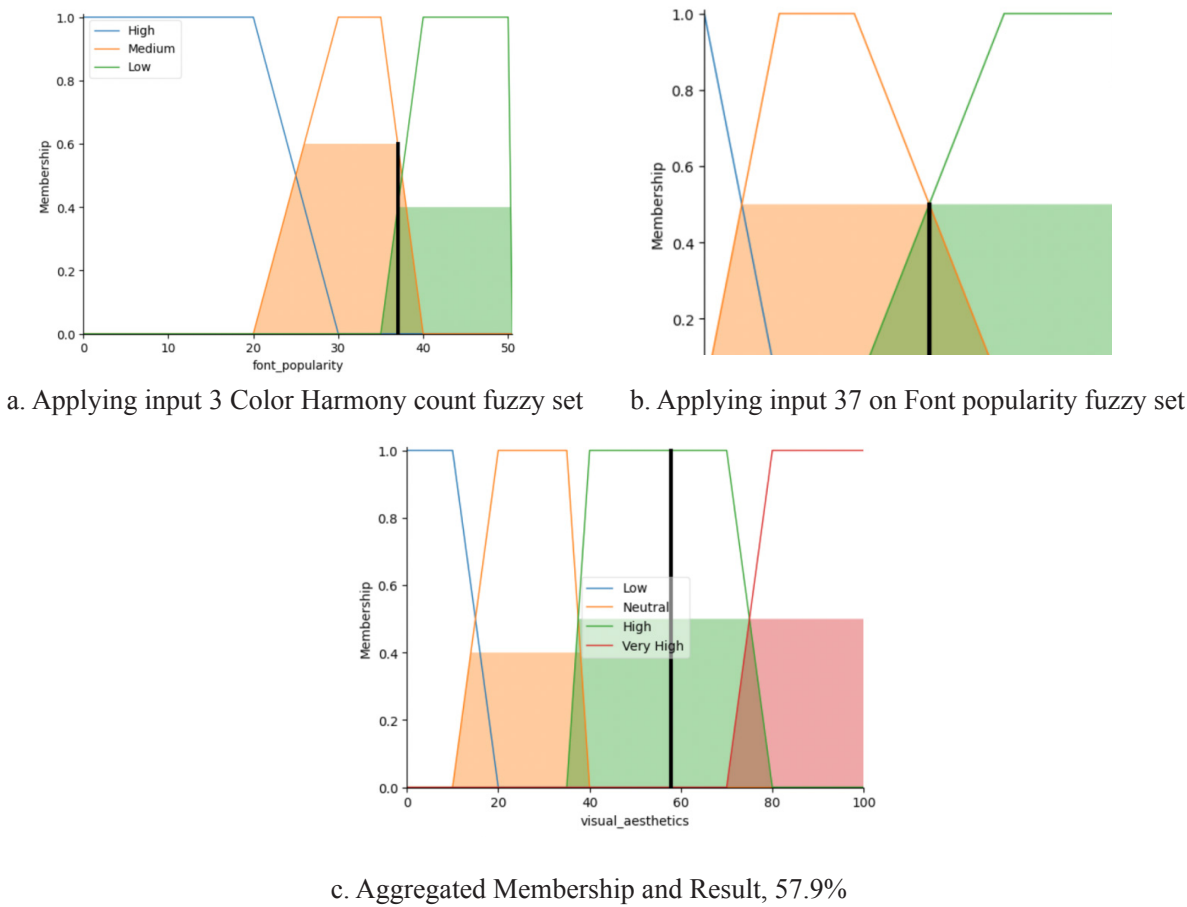


Figure 9 – Simulation Results

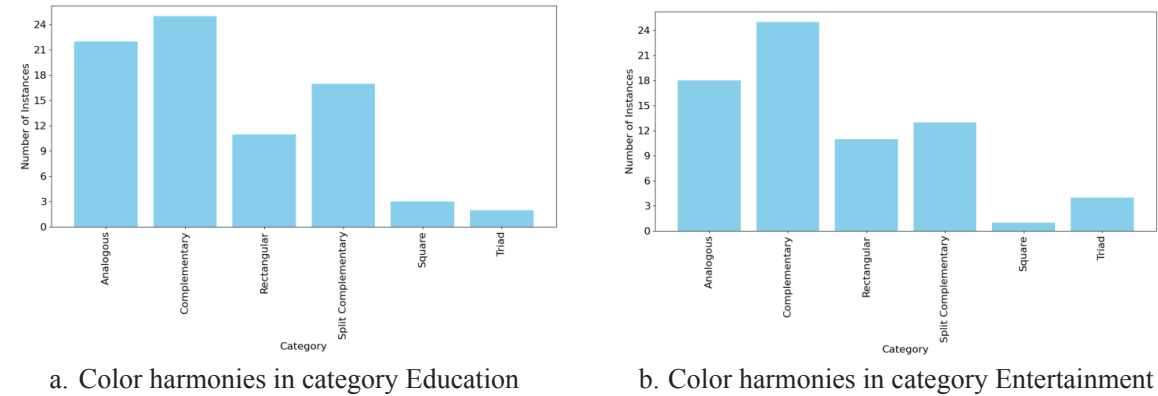


Figure 10 – The distribution of color harmonies

The distribution of color harmonies in categories Education and Entertainment is presented in Fig. 10. As we see, color harmonies do not vary significantly across contexts, which partially supports previous research findings [19].

Conclusion

This study utilizes fuzzy logic and ML to develop a model predicting website aesthetics. The design of a website is critical because it significantly influences the user's first impression, often formed within milliseconds. A website's visual appeal can strongly affect how users judge its ease of use. A well-designed website is perceived as more trustworthy and usable. Therefore, considering aesthetics in website design enhances user experience and usability.

Our findings can empower developers and designers to design effective and visually captivating websites for users.

As for limitations, we consider only one website page, neglecting others. So, animations were not taken into account. Some websites were simple but had image content, which is part of information, not design. We also plan to integrate emotion-aware aesthetic assessment, considering, for example, Russell's circumplex model of affect, as in similar studies related to music [28].

Information on funding

This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP22786412).

REFERENCES

- 1 W.A. Social and Hootsuite, DIGITAL 2024: GLOBAL OVERVIEW REPORT, Jan 2024, <https://datareportal.com/reports/digital-2024-global-overview-report>.
- 2 Anderson N.H. Foundations of Information Integration Theory. New York: Academic Press, 1981.
- 3 Schenkman B.N. and Jönsson F.U. Aesthetics and preferences of web pages, Behaviour and Information Technology, 2000, vol. 19, pp. 367–377. <https://doi.org/10.1080/014492900750000063>.
- 4 Tractinsky N., Katz A., and Ikar D. What is beautiful is usable, Interacting with Computers, 2000, vol. 13, pp. 127–145. [https://doi.org/10.1016/S0953-5438\(00\)00031-X](https://doi.org/10.1016/S0953-5438(00)00031-X).
- 5 Tseng P.-Y. and Lee S.-F. The impact of web visual aesthetics on purchase intention, 2019, pp. 28–31. <https://doi.org/10.1109/ECICE47484.2019.8942664>.
- 6 Lindgaard G., Fernandes G., Dudek C., and Brown J. Attention web designers: You have 50 milliseconds to make a good first impression! Behaviour and IT, 2006, vol. 25, pp. 115–126. <https://doi.org/10.1080/01449290500330448>.
- 7 Garrett J. The Elements of User Experience: User-Centered Design for the Web and Beyond, 2010.
- 8 Mohamad Zain J., Tey M. and Soon G. Using aesthetic measurement application (ama) to measure aesthetics of web page interfaces, 2008, pp. 96–100. <https://doi.org/10.1109/ICNC.2008.764>.
- 9 Filonik D. and Baur D. Measuring aesthetics for information visualization, 2009, pp. 579–584. <https://doi.org/10.1109/IV.2009.94>.
- 10 Coursaris C. Exploring the relationship between aesthetics and usability, 2007.
- 11 Lee S. and Koubek R. Users' perceptions of usability and aesthetics as criteria of pre- and post-use preferences, European J. of Industrial Engineering, 2012, vol. 6. <https://doi.org/10.1504/EJIE.2012.044812>.
- 12 Geissler G., Zinkhan G., and Watson R. The influence of home page complexity on consumer attention, attitudes, and purchase intent, Journal of Advertising, 2013, vol. 35, pp. 69–80. <https://doi.org/10.1080/00913367.2006.10639232>.
- 13 Nadkarni S., Gupta R. A task-based model of perceived website complexity, Management Information Systems Quarterly, 2007, vol. 31, pp. 501–524. <https://doi.org/10.2307/25148805>.
- 14 Tuch A.N., Bargas-Avila J.A., Opwis K., and Wilhelm F.H. Visual complexity of websites: Effects on users' experience, physiology, performance, and memory, International Journal of Human-Computer Studies, 2009, vol. 67, no. 9, pp. 703–715. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S107158190900055X>.
- 15 Sonderegger A., Sauer J. The influence of design aesthetics in usability testing: Effects on user performance and perceived usability, Applied ergonomics, 2009, vol. 41, pp. 403–10. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.09.002>.

- 16 Lindgaard G., Dudek C., Sen D., Sumegi L., and Noonan P. An exploration of relations between visual appeal, trustworthiness and perceived usability of homepages, *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 2011, vol. 18, p. 1. <https://doi.org/10.1145/1959022.1959023>.
- 17 Shamoï P., Inoue A., and H. Kawanaka. Modeling aesthetic preferences: Color coordination and fuzzy sets, *Fuzzy Sets and Systems*, 2020, vol. 395, pp. 217–234. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2019.02.014>.
- 18 Shamoï P., Inoue A., and Kawanaka H. Color aesthetics and context-dependency, in *SCIS-ISIS 2022*, 2022, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/SCISISIS55246.2022.10001872>.
- 19 Shamoï P., Muratbekova M., Izbassar A., Inoue A., and Kawanaka H. Towards a universal understanding of color harmony: Fuzzy approach, in *Fuzzy Systems and Data Mining IX. Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*. IOS Press, 2023, pp. 20–28. <https://doi.org/10.1145/1460355.1460357>.
- 20 Schenkman B. and Jönsson F. Aesthetics and preferences of web pages, *Behaviour and Information Technology*, 2000, vol. 19. <https://doi.org/10.1080/014492900750000063>.
- 21 Tuch A., Presslauer E., Stöcklin M., Opwis K., and Bargas-Avila J. The role of visual complexity and prototypicality regarding first impression of websites: Working towards understanding aesthetic judgments, *International Journal of Human-Computer Studies*, 2012, vol. 70, pp. 794–811. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2012.06.003>.
- 22 Lindgaard G. Does emotional appeal determine perceived usability of web sites, in *Proceedings of CybErg: the second international cyberspace conference on ergonomics*. The International Ergonomics Association Press, Curtin University, 1999, pp. 202–211. <https://doi.org/10.1007/s10660-010-9054-0>.
- 23 Coursaris C. and Kripintris K. Web aesthetics and usability: An empirical study of the effects of white space. *IJEER*, 2012, vol. 8, pp. 35–53. <https://doi.org/10.4018/jebr.2012010103>.
- 24 Pracejus J., Olsen G., and O'Guinn T. How nothing became something: White space, rhetoric, history, and meaning, *Journal of Consumer Research*, 2006, vol. 33, pp. 82–90. <https://doi.org/10.1086/504138>.
- 25 Zhang Y. *Web Design*. Southwest China Normal University Press, 2015.
- 26 Bojadziev G. and Bojadziev M. *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Applications*. WORLD SCIENTIFIC, Jan. 1996. <http://dx.doi.org/10.1142/2867>.
- 27 Shamoï P., Sansyzbayev D., and N. Abiley. Comparative overview of color models for content-based image retrieval, in *2022 International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, 2022, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/SIST54437.2022.9945709>.
- 28 Ualibekova A. and Shamoï P. Music emotion recognition using k-nearest neighbors algorithm, in *2022 International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, 2022, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/SIST54437.2022.9945814>.

¹Абилдаева Т.,

магистрант, ORCID ID: 0009-0005-2983-3377,
e-mail: t_abildayeva@kbtu.kz

^{1*}Шамой П.,

PhD, профессор, ORCID ID: 0000-0001-9682-0203,
*e-mail: p.shamoi@kbtu.kz

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

К-ОРТАША КЛАСТЕРЛЕУГЕ НЕГІЗДЕЛГЕН ТҮСТЕРДІ АЛУ ҚҰРАЛДАРЫ АРҚЫЛЫ ВЕБ-САЙТТАРДЫ ВИЗУАЛДЫ ТАЛДАУДЫҢ БҰЛЫҢҒЫР ЛОГИКАЛЫҚ ТӘСІЛІ

Аңдатпа

Веб-сайттар интернеттің негізін құрап, ақпарат тарату және сандық ресурстарға қол жеткізу платформасы ретінде қызмет етеді. Олар пайдаланушыларға әртүрлі мазмұн мен қызметтермен өзара әрекеттесуге мүмкіндік беріп, интернеттің пайдалылығын арттырады. Веб-сайт эстетикасы оның жалпы тиімділігінде маңызды рөл атқарып, пайдаланушы тәжірибесіне, қызығушылығы мен қанағаттануына айтарлықтай әсер етуі мүмкін. Бұл мақалада жаһандық деңгейде интернет қолданушыларының көбеюін ескере отырып, пайдаланушы тәжірибесін жақсарту үшін веб-дизайн эстетикасының маңыздылығы

карастырылады. Зерттеу алғашқы әсердің маңыздылығын атап көрсетеді, ол көбіне 50 миллисекунд ішінде қалыптасып, пайдаланушылардың веб-сайттың тартымдылығы мен қолайлылығын қабылдауына әсер етеді. Біз веб-сайттың визуалды эстетикасын өлшеудің жаңа әдісін ұсынамыз. Әдіс түстер үйлесімі мен қаріптің танымалдығына негізделіп, эстетикалық талғамды болжау үшін бұлыңғыр логиканы қолданады. Біз веб-дизайн трендтерінің динамикалық сипатына сәйкестік пен бейімделуді қамтамасыз ету мақсатында 200-ге жуық танымал және жиі қолданылатын веб-сайт дизайнынан тұратын деректер жиынын жинадық. Веб-сайт скриншоттарынан басым түстерді k-орташа кластерлеу әдісімен анықтадық. Зерттеу нәтижелері эстетика мен веб-сайт дизайнындағы ыңғайлылық арасындағы байланысты тереңірек түсінуге бағытталған.

Тірек сөздер: веб-эстетика, веб-дизайн, бұлыңғыр логика, пайдаланушы тәжірибесі, k-орташа кластерлеу, түс үйлесімділігі.

¹Абилдаева Т.,
магистрант, ORCID ID: 0009-0005-2983-3377,
e-mail: t_abildayeva@kbtu.kz

^{1*}Шамои П.,
PhD, профессор, ORCID ID: 0000-0001-9682-0203,
*e-mail: p.shamoi@kbtu.kz

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

ПОДХОД НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ВИЗУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ВЕБ-САЙТОВ С ВЫДЕЛЕНИЕМ ЦВЕТА НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРИЗАЦИИ К-СРЕДНИХ

Аннотация

Веб-сайты составляют основу Интернета, служа платформами для распространения информации и доступа к цифровым ресурсам. Они позволяют пользователям взаимодействовать с широким спектром контента и услуг, увеличивая полезность Интернета для всех. Эстетика веб-сайта играет важную роль в его общей эффективности и может значительно влиять на пользовательский опыт, вовлеченность и удовлетворенность. В данной статье рассматривается важность эстетики веб-дизайна для улучшения пользовательского опыта, учитывая растущее число пользователей Интернета во всем мире. Исследование подчеркивает значительное влияние первого впечатления, часто формируемого в течение 50 миллисекунд, на восприятие пользователями привлекательности и удобства использования веб-сайта. Мы представляем новый метод измерения визуальной эстетики веб-сайта, основанный на цветовой гармонии и популярности шрифта, используя нечеткую логику для прогнозирования эстетических предпочтений. Мы собрали собственный датасет, состоящий почти из 200 популярных и часто используемых дизайнов веб-сайтов, чтобы обеспечить актуальность и адаптируемость к динамичному характеру тенденций веб-дизайна. Доминирующие цвета из скриншотов веб-сайтов были извлечены с помощью кластеризации методом k-средних. Результаты исследования направлены на улучшение понимания взаимосвязи между эстетикой и удобством использования в дизайне веб-сайтов.

Ключевые слова: веб-эстетика, веб-дизайн, нечеткая логика, пользовательский опыт, кластеризация k-средних, цветовая гармония.

Article submission date: 17.06.2024

МРНТИ 50.41.25
УДК 004.9

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-22-31>

^{1*}**Ипалакова М.,**

ассоц. профессор, к.т.н., ORCID ID: 0000-0002-8700-1852,

*e-mail: m.ipalakova@iitu.edu.kz

¹**Дайнеко Е.,**

ассоц. профессор, PhD, ORCID ID: 0000-0002-8700-1852,

e-mail: y.daineko@iitu.edu.kz

¹**Болатов Ж.,**

руководитель НИЛ «Компьютерное моделирование и симуляции»,

ORCID ID: 0000-0002-1945-8156,

e-mail: zh.bolatov@iitu.edu.kz

¹**Цой Д.,**

руководитель НИЛ «Лаборатория смешанной реальности»,

ORCID ID: 0000-0003-0172-9760,

e-mail: d.tsoy@iitu.edu.kz

¹**Абдугаппарова К.,**

магистрант, ORCID ID: 0000-0002-0866-1319,

e-mail: 38515@iitu.edu.kz

¹**Ходжаев Д.,**

студент, ORCID ID: 0009-0006-9756-6597,

e-mail: d.khojayev@iitu.edu.kz

¹Международный университет информационных технологий, г. Алматы, Казахстан

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СОХРАНЕНИИ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ КАЗАХСТАНА

Аннотация

В современном мире вопросы сохранения культурного наследия страны и региона, а также его популяризации не потеряли своей актуальности. Особенно остро встал вопрос во время и после пандемии коронавируса, когда долгое время музеи и галереи существовали без активных визитов посетителей. Современные технологии играют немаловажную роль в решении данной проблемы, облегчая и упрощая ежедневные рутинные процессы с одной стороны и влияя глобально на концептуальные проблемы привлечения посетителей и расширения функционала институтов культуры с другой. В данной статье представлен проект по разработке виртуального музея в виде мобильного приложения, которое будет распознавать экспонаты в реальном времени с помощью камеры устройства и отображать их 3D-модели и контекстную информацию в режиме дополненной реальности. В работе проведен обзор применения технологий виртуальной и дополненной реальности в музейных приложениях, а также алгоритмов машинного обучения для различных целей. Авторы докладывают предварительные результаты распознавания части экспонатов музея-партнера с описанием применяемой методологии и анализом эффективности используемых подходов. А также результаты апробации тестового мобильного приложения с функцией распознавания в реальном времени в условиях музея.

Ключевые слова: машинное обучение, распознавание образов, культурное наследие.

Введение

Культура и история играют неоспоримую роль в развитии общества, обогащая его духовное наследие и формируя коллективную идентичность. Сохранение культурного наследия позволяет нам понять наши корни, а также уважать разнообразие и преемственность культурных традиций. Кроме того, культурное наследие является непреходящим источником экономического роста и социального развития региона, поэтому его сохранение и передача следующим поколениям являются важными задачами для общества [1].

Создание музеев, архивов и библиотек относится к традиционным подходам к сохранению культурного наследия. В них хранятся предметы искусства и ценные исторические документы. В этих учреждениях обеспечивается физическая сохранность экспонатов и доступ населения к ним посредством выставок, исследований и образовательных программ. Памятники архитектуры, исторические места, древние ремесла сохраняются путем их консервации и реконструкции, постоянного мониторинга и обслуживания.

Относительно новым подходом в процессе презервации культурного наследия можно назвать применение информационных технологий в самом их широком смысле. Так, в современном мире процессы цифровой трансформации наряду со всеми сферами нашей жизни, также затронули и сферу культуры и искусства, хоть и позже, чем мир бизнеса и производства. Информационные технологии уже не рассматриваются как нечто второстепенное, а должны учитываться еще на этапе планирования любых процессов, так как влияют на них даже на стратегическом уровне [2].

Современные IT-технологии обеспечивают доступ к истории, культуре, искусству и литературе со всего мира. Благодаря цифровым архивам и онлайн-библиотекам пользователи могут исследовать и изучать культурное наследие различных народов, даже не покидая своего дома [3, 4, 5].

Более того, информационные технологии позволяют сохранять и восстанавливать исторические артефакты и памятники. Среди них цифровые реконструкции зданий, виртуальные музеи и проекты по документированию уникальных культурных практик. Эти технологии не только сохраняют культурное наследие для будущих поколений, но и делают его более доступным и понятным для широкой аудитории [6, 7].

Значительную роль в сохранении культурного наследия играют музеи любой направленности, и их цифровизация становится неотъемлемой частью их развития и доступности. Виртуальные музеи предоставляют возможность людям наслаждаться искусством и культурным наследием из любой точки мира, не выходя из дома. С помощью новейших технологий виртуальные музеи воссоздают атмосферу и архитектуру реальных музеев, позволяя посетителям ощутить себя частью культурного пространства [8]. И технологии виртуальной и дополненной реальности играют в этом трансформационном процессе одну из важных ролей. Будущее цифровизации музеев, несомненно, связано с постоянным совершенствованием этих технологий и адаптацией контента под различные устройства.

В данной статье представлены частичные результаты по разработке мобильного приложения для Музея искусств им. А. Кастеева (г. Алматы). Приложение предполагает распознавание экспонатов музея в режиме реального времени и отображение их моделей и информационных сообщений в режиме дополненной реальности. В статье приведены первоначальные результаты распознавания экспонатов с помощью машинного обучения, а также апробация тестового мобильного приложения с встроенной функцией распознавания.

Обзор литературы

Реалии настоящего времени таковы, что в соответствии с непрерывным развитием общества в целом и технологий в частности учреждения культуры должны также эволюционировать, чтобы оставаться актуальными и привлекательными для современных посетителей.

Простого выставления экспонатов уже недостаточно, необходимы новые интерфейсы взаимодействия, которые позволяют посетителям погружаться в историю, искусство и культуру интерактивно и увлекательно [9].

Современные технологии, такие как дополненная (AR), виртуальная (VR) и смешанная реальность (MR), трансформируют музейный опыт, делая его более интересным, захватывающим и информативным. Сфера их применения обширна: реконструкция исторических памятников, зданий и сооружений [10], виртуальные туры и маршруты [11], 3D-моделирование экспонатов [12], образовательный контент, игры [13] и пр. Таким образом, данные технологии применяются для повышения вовлеченности посетителей, улучшения обучения и расширения доступа к культурному наследию [14, 15].

Так, в работе [16] авторы представляют исследование интерфейсов двух проектов с использованием AR: Postcard AR и CubeMuseum AR. Для оценки и оптимизации данных приложений были проведены несколько этапов пользовательского тестирования. Их результаты неизменно демонстрировали, что геймифицированные AR-интерфейсы значительно повышают мотивацию и вовлеченность пользователей в процесс обучения [16].

Авторы статьи [17] также согласны с тем, что стек иммерсивных технологий все чаще используется для представления публике объектов исторического, художественного, архитектурного и культурного значения. В своей работе они представили проект AR-приложения с использованием юмора и игр. Для этого применяется технология захвата видео в реальном времени, и на его основе создается интерактивный тур с использованием геймификации. Исследование демонстрирует, что юмор и игры могут быть эффективными инструментами повествования в AR-приложениях для культурного наследия, что, в свою очередь, делает музеи более привлекательными и интересными для посетителей, особенно для детей и молодежи.

Даниела Л. анализирует приложения виртуальных музеев с точки зрения их обучающего потенциала. Для оценки 36 приложений виртуальных музеев автор использовал 25 критериев, разделенных на три категории: технические характеристики, информационная архитектура, образовательная ценность. Выводом работы стало то, что виртуальные музеи предлагают богатый информационный контент и удобную навигацию [18].

В. Оканович с соавторами отмечает, что одним из важных факторов успешности образовательных приложений является элемент развлечения, что создает мотивирующее окружение для обучения. Данный фактор получил название «edutainment», что является комбинацией слов «education» и «entertainment» [19].

Другим важным фактором является степень погружения – мера поглощения и взаимодействия с виртуальной мультимедийной средой. Так, до недавнего времени музеи были ограничены использованием 2D- и 3D-экранов для отображения информации. В работе [20] авторы представляют технологию визуализации окружающей информации Ambient Information Visualisation. Это новая форма повествования, которая использует MR для создания голографических проекций, не ограничивающих и не отвлекающих пользователя. Авторами используется Microsoft HoloLens в исторической сцене повествования «Битва» в египетском отделе Манчестерского музея. Большинство посетителей, принявших участие в опросе, нашли эту технологию очень привлекательной и простой в использовании. Это демонстрирует большой потенциал подобных подходов для широкого применения в музеях, галереях и объектах культурного наследия.

С другой стороны, исследователи отмечают, что такие технологии, как AR и VR, не могут заменить полноценного похода в музей. Они должны дополнять реальный пользовательский опыт, делать его более ярким и насыщенным, однако не заменять его. Виртуальные туры и симуляции, например, могут служить эффективным средством ознакомления посетителей с экспозициями, получения первого знания и впечатлений о выставках и, как итог, планирования и подготовки реального посещения музея [21, 22].

Искусственный интеллект (AI), получивший бурное развитие в последнее десятилетие, также не мог обойти сферу культуры и искусства. В работе [23] исследованы различные способы применения технологий, относящихся к сфере AI, таких как алгоритмы обработки естественного языка, машинное обучение (ML – Machine Learning), нейронные сети, большие данные.

Например, в работе С. Пуспасари и соавторов предлагается модель машинного обучения, которая генерирует рекомендации по экспонатам для пользователей виртуального тура, которые будут соответствовать их запросам на основе анализа их профайлов [24]. Также методы машинного обучения могут применяться для оценки и предсказания степени вовлеченности и заинтересованности пользователей теми или иными экспонатами [25, 26]. Алгоритмы NLP (Natural Language Processing – обработка естественного языка) находят свое применение в распознавании и оценке отзывов посетителей музеев и галерей на различных онлайн-платформах [27]. Реконструкция поврежденных объектов культурного наследия – еще одна область применения алгоритмов машинного обучения [28].

В представленной работе алгоритмы ML применяются для распознавания экспонатов музея в реальном времени для их дальнейшей 3D-визуализации в режиме дополненной реальности.

Материалы и методы

Методология реализации разрабатываемого проекта включает в себя несколько этапов, которые соответствуют жизненному циклу модели машинного обучения.

1. Съемка видеоматериалов в музее

Данный этап включает в себя запись видеоматериалов в музее с использованием видеокамеры или другого устройства для захвата видео. Так как авторы сотрудничают с Музеем искусств им. А. Кастеева (г. Алматы), для исследования были выбраны экспонаты именно этого музея. В ходе съемки были записаны видео более пятидесяти экспонатов различных жанров искусства (картины, скульптуры, предметы прикладного и декоративного искусства), которые использовались для дальнейшего анализа и обработки. Предметы для съемки выбирались в случайном порядке, что соответствует поведению неподготовленного посетителя.

2. Раскадровка видео

Следующий этап работы – раскадровка видео. На данном шаге из видео извлекаются кадры для формирования набора данных (датасет), который затем используется для обучения модели. В среднем из каждой видеозаписи извлекались два-три отдельных кадра в каждую секунду. Такой подход позволяет подготовить датасет, соответствующий требованиям для обучения модели, а именно отобрать кадры таким образом, чтобы они были отличимыми друг от друга.

3. Классификация кадров

На этом этапе каждый отобранный кадр классифицируется в соответствии с содержанием. Так, все кадры были отнесены к тому или иному классу в зависимости от экспоната. Данный этап позволил разделить все кадры по категориям.

4. Аннотация данных

После классификации проводилась разметка каждого кадра с указанием названия экспоната. Также была добавлена дополнительная информация, в том числе координаты положения или лейблы предмета искусства на изображении. Этот этап называется «аннотация данных» и является неотъемлемой частью жизненного цикла модели машинного обучения, поскольку точность выполнения аннотации напрямую влияет на качество обучения модели.

Затем были получены текстовые файлы, содержащие информацию о каждом изображении, включая принадлежность к классу и координатах изображенного на нем экспоната. Эти файлы использовались на этапе обучения модели.

5. Обучение модели

Полученные аннотированные данные были использованы для обучения модели машинного обучения. В этом случае была использована модель «YOLOv8» (You Only Look Once version 8). Выбранный алгоритм позволяет эффективно и точно определять и классифицировать объекты на изображениях для обнаружения определенных объектов в изображениях и видео. Для обучения модели использовались конфигурации моделей nano и small («YOLOv8n» и «YOLOv8s»). Выбор обусловлен соотношением занимаемого размера определяемого объекта к размеру всего кадра (более 70%), а также результатами точной идентификации объекта (более 90%). Быстрое и точное распознавание объекта основано на прохождении модели по всему датасету множество раз (эпоха).

6. Тестирование модели.

По завершении обучения модель была протестирована методом загрузки видеоматериала, который разбит на кадры с дальнейшим распознаванием на нем экспоната. Ее способность правильно распознавать экспонаты проверялась за счет добавления новых видео. Этап позволил убедиться в эффективности и точности работы модели в реальных условиях.

Результаты и обсуждение

Итогом проведенной работы, включая сбор данных, подбор модели машинного обучения, ее конфигурации, стали результаты распознавания, приведенные на рисунке 1.

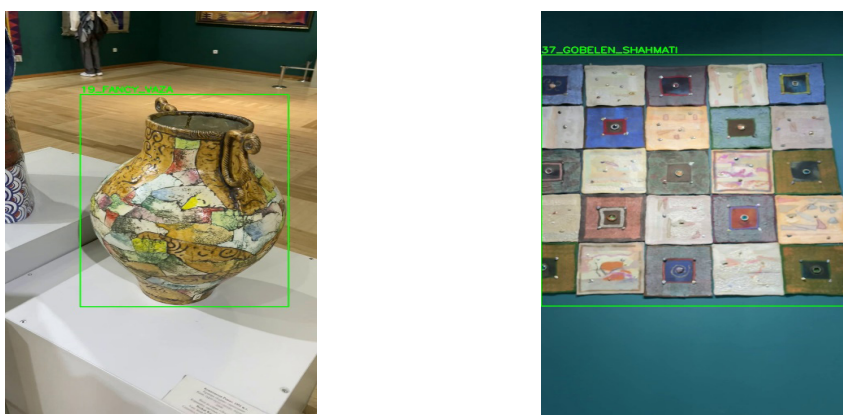


Рисунок 1 – Результаты распознанных экспонатов

Всего для датасета было получено 2100 изображений 51 экспоната. При достижении 30 эпох обучения модель стала способна определять экспонаты с точностью ~90%. Однако для улучшения результатов было проведено 150 эпох обучения.

Обучение проводилось с использованием графической карты GeForce RTX 2080 Super, поддерживающей архитектуру параллельных вычислений CUDA. Данное решение позволило значительно ускорить процесс. Так, при работе с полученным датасетом время обучения с использованием графической карты в среднем составило около часа. В таблице 1 приведены результаты обучения моделей nano и small при различных эпохах, также средняя точность, рассчитанная при пороге intersection over union (IoU), равном 0,50 (mAP50), и при различных пороговых значениях IoU, варьирующихся от 0,50 до 0,95 (mAP50-95), а также затраченное время для каждой из моделей. На основе этих данных можно заключить, что наиболее точные показатели демонстрирует модель small при 150 эпохах 99,5% mAP50 и 96,5% mAP50-95. Данный вид тестирования модели проводился при условии подачи на вход видеофайлов, записанных ранее.

Таблица 1 – Результаты обучения различных моделей

№	Модель	Эпох	mAP50	mAP50-95	Время (часов)
1	Nano	30	0,986	0,867	0,207
2	Small	30	0,992	0,912	
3	Nano	100	0,993	0,93	0,668
4	Nano	150	0,994	0,944	0,998
5	Small	150	0,995	0,965	2,816

Для того чтобы убедиться в эффективности модели, было проведено тестирование распознавания в условиях музея. Для этого использовалось тестовое мобильное приложение с подключением соответствующей модели классификации. На рисунке 2 приведен процесс и результат распознавания одного из экспонатов.



Рисунок 2 – Тестирование модели в условиях музея



а

б

Рисунок 3 – Нераспознанные экспонаты: кобыз (а) и черная ваза (б)

Однако в результате тестирования было обнаружено, что некоторые экспонаты не были определены моделью, предположительно в связи с особенностью их размещения и собствен-

ной специфичностью (рисунок 3). Например, экспонат «кобыз» размещен горизонтально, а не по вертикали. В свою очередь, экспонат «черная ваза» на первый взгляд не обладает особыми примечательными элементами (рисунок 3б). В дальнейшем планируется продолжить поиск проблем подобного рода, так как ожидается существенное увеличение количества распознаваемых и классифицируемых экспонатов.

Заключение

Такие технологии, как AR, VR и MR, трансформируют музейный опыт, делая его интерактивным и информативным. Современные исследования показывают, что использование подобных технологий повышает вовлеченность посетителей и улучшает обучение. Результаты проведенного литературного обзора доказывают, что AR-интерфейсы делают знакомство с искусством запоминающимся и интересным. Это способствует тому, что новые поколения посетителей, избалованные цифровыми инструментами, могут быть привлечены к изучению искусства с помощью подобных решений. Анализ музейных приложений показал, что подобный контент может быть не только информационным, но и образовательным.

Таким образом, проект, разрабатываемый авторами по реализации виртуального музея, будет способствовать сохранению культурного наследия в Казахстане и его распространению, особенно среди молодежи, с помощью привлечения современных технологий. Приложение предполагает распознавание выставочных произведений искусства с помощью камеры устройства и применение дополненной реальности для визуализации моделей распознанных экспонатов и контекстной информации о них.

В статье представлены первичные результаты применения модели классификации экспонатов музея. Были реализованы все этапы, соответствующие жизненному циклу модели машинного обучения (съемка видеоматериалов в музейной среде, раскадровка видео, классификация кадров по типу экспонатов, аннотация данных с указанием экспонатов и их характеристик, обучение модели). В процессе тестирования было выявлено, что модель достаточно хорошо распознает большинство экспонатов, но некоторые объекты не определялись корректно в силу несвойственного расположения либо отсутствия особых деталей. Дальнейшая работа над исследованием лежит в направлении увеличения используемого датасета, а также улучшения работы модели.

Информация о финансировании

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования РК (грант № AP19676803).

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Korro Bañuelos J., Rodríguez Miranda Á., Valle-Melón J.M., Zornoza-Indart A., Castellano-Román M., Angulo-Fornos R., Pinto-Puerto F., Acosta Ibáñez P., and Ferreira-Lopes P. The role of information management for the sustainable conservation of cultural heritage. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 8, p. 4325. <https://doi.org/10.3390/su13084325>.
- 2 Trček D. Cultural heritage preservation by using blockchain technologies. *Heritage science*, 2022, vol. 10, no. 1, p. 6. <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00643-9>.
- 3 Nappi M.L., Buono M., Chivăran C. and Giusto R.M. Models and tools for the digital organisation of knowledge: accessible and adaptive narratives for cultural heritage. *Heritage Science*, 2024, vol. 12, no. 1, p. 112. <https://doi.org/10.1186/s40494-024-01219-z>.
- 4 Pandey R. and Kumar V. Exploring the Impediments to digitization and digital preservation of cultural heritage resources: A selective review. *Preservation, Digital Technology and Culture*, 2020, vol. 49, no. 1, pp. 26–37. <https://doi.org/10.1515/pdte-2020-0006>.

- 5 Hou Y., Kenderdine S., Picca D., Egloff M. and Adamou A. Digitizing intangible cultural heritage embodied: State of the art. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 2022, vol. 15, no. 3, pp. 1–20. <https://doi.org/10.1145/3494837>.
- 6 Wang W., Wah Yu Ch., Peng F. and Feng Zh. Digital development of architectural heritage under the trend of Metaverse: Challenges and opportunities. *Indoor and Built Environment*, 2024, vol. 33, no. 4, pp. 603–607. <https://doi.org/10.1177/1420326X231191571>.
- 7 Marchello G., Giovanelli R., Fontana E., Cannella F. and Traviglia A. Cultural Heritage Digital Preservation through Ai-Driven Robotics. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2023, vol. 48, pp. 995–1000. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-995-2023>.
- 8 Schweibenz W. The virtual museum: an overview of its origins, concepts, and terminology. *The Museum Review*, 2019, vol. 4, no. 1, pp. 1–29.
- 9 Lee H., Hyungsoo Jung T., tom Dieck M.C. and Chung N. Experiencing immersive virtual reality in museums. *Information and Management*, 2020, vol. 57, no. 5, p. 103229. <https://doi.org/10.1016/j.im.2019.103229>.
- 10 Ergin İ.D.A. Digital Approach in Conservation of Heritage: 3D Virtual Reconstruction Applications in Ancient Cities. *Journal of Architectural Sciences and Applications*, 2023, vol. 8, no. 2, pp. 969–987. <https://doi.org/10.30785/mbud.1312738>.
- 11 Marin-Morales J., Higuera-Trujillo J.L., De-Juan-Ripoll C., Linares C., Guixeres J., Iñarra S. and Alcañiz M. Navigation comparison between a real and a virtual museum: time-dependent differences using a head mounted display. *Interacting with Computers*, 2019, vol. 31, no. 2, pp. 208–220. <https://doi.org/10.1093/iwc/iwz018>.
- 12 Kadri M., Khalloufi H. and Azough A. V-museum: a virtual museum based on augmented and virtual realities for cultural heritage mediation. 2020 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV). IEEE, 2020, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISCV49265.2020.9204253>.
- 13 Čosović M. and Brkić B.R. Game-based learning in museums – cultural heritage applications. *Information*, 2019, vol. 11, no. 1, p. 22. <https://doi.org/10.3390/info11010022>.
- 14 Shehade M. and Stylianou-Lambert T. Virtual reality in museums: Exploring the experiences of museum professionals. *Applied sciences*, 2020, vol. 10, no. 11, p. 4031. <https://doi.org/10.3390/app10114031>.
- 15 Luna U., Rivero P. and Vicent N. Augmented reality in heritage apps: Current trends in Europe. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 13, p. 2756. <https://doi.org/10.3390/app9132756>.
- 16 Xu N., Li Y., Wei X., Xie L., Yu L. and Liang H.-N. CubeMuseum AR: A tangible augmented reality interface for cultural heritage learning and museum gifting. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2024, vol. 40, no. 6, pp. 1409–1437. <https://doi.org/10.1080/10447318.2023.2171350>.
- 17 O’dwyer N. et al. Volumetric video in augmented reality applications for museological narratives: A user study for the long room in the library of Trinity College Dublin. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 2021, vol. 14, no. 2, pp. 1–20. <https://doi.org/10.1145/3425400>.
- 18 Daniela L. Virtual museums as learning agents. *Sustainability*, 2020, vol. 12, no. 7, p. 2698.
- 19 Okanovic V., Ivkovic-Kihic I., Boskovic D., Mijatovic B., Prazina I., Skalo E. and Rizvic S. Interaction in extended reality applications for cultural heritage. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 3, p. 1241. <https://doi.org/10.3390/app12031241>.
- 20 Hammady R., Ma M. and Strathearn C. Ambient information visualisation and visitors’ technology acceptance of mixed reality in museums. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 2020, vol. 13, no. 2, pp. 1–22. <https://doi.org/10.1145/3359590>.
- 21 Besoain F., Jagoand L., Gallardo I. Developing a virtual museum: Experience from the design and creation process. *Information*, 2021, vol. 12, no. 6, p. 244. <https://doi.org/10.3390/info12060244>.
- 22 Kabassi K., Amelio A., Komianos V. and Oikonomou K. Evaluating museum virtual tours: the case study of Italy. *Information*, 2019, vol. 10, no. 11, p. 351. <https://doi.org/10.3390/info10110351>.
- 23 Vidu C., Zbucea A. and Pinzaru F. Old meets new: integrating Artificial Intelligence in museums’ management practices. *Strateg. Shap. Future Bus. Econ.*, 2021, pp. 830–844.
- 24 Puspasari S., Ermatita and Zulkardi. Machine Learning for Exhibition Recommendation in a Museum’s Virtual Tour Application. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2022, vol. 13, no. 4, pp. 404–412.
- 25 Winter M., Sweeney L., Mason K. and Blume P. Low-power machine learning for visitor engagement in museums. *Proceedings of the 6th International Conference on Computer-Human Interaction Research and Applications (CHIRA 2022)*. INSTICC ScitePress, 2022, pp. 236–243. <https://doi.org/10.5220/0011585600003323>.

26 Fathy F., Mansour Y., Sabry H., Refat M. and Wagdy A. Virtual reality and machine learning for predicting visual attention in a daylight exhibition space: A proof of concept. *Ain Shams Engineering Journal*, 2023, vol. 14, no. 6, p. 102098. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.102098>.

27 Murphy O. and Villaespesa E. AI: A museum planning toolkit. Goldsmiths, University of London, 2020.

28 Belhi A., Bouras A., Khalid Al-Ali A. and Foufou S. A machine learning framework for enhancing digital experiences in cultural heritage. *Journal of Enterprise Information Management*, 2023, vol. 36, no. 3, pp. 734–746. <https://doi.org/10.1108/JEIM-02-2020-0059>.

^{1*}Ипалакова М.,

қауым. профессор, Т.ғ.к., ORCID ID: 0000-0002-8700-1852,

*e-mail: m.ipalakova@iitu.edu.kz

¹Дайнеко Е.,

қауым. профессор, PhD, ORCID ID: 0000-0002-8700-1852,

e-mail: y.daineko@iitu.edu.kz

¹Болатов Ж.,

«Компьютерлік модельдеу және симуляция» F33 жетекшісі,

ORCID ID: 0000-0002-1945-8156,

e-mail: zh.bolatov@iitu.edu.kz

¹Цой Д.,

«Аралас шындық зертханасы» F33 жетекшісі, ORCID ID: 0000-0003-0172-9760,

e-mail: d.tsoy@iitu.edu.kz

¹Абдугаппарова К.,

магистрант, ORCID ID: 0000-0002-0866-1319,

e-mail: 38515@iitu.edu.kz

¹Ходжаев Д.,

студент, ORCID ID: 0009-0006-9756-6597,

e-mail: d.khojayev@iitu.edu.kz

¹Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы қ., Қазақстан

ҚАЗАҚСТАННЫҢ МӘДЕНИ МҰРАСЫН САҚТАУДА АҚПАРАТТЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАРДЫ ПАЙДАЛАНУ

Аңдатпа

Қазіргі әлемде ел мен аймақтың мәдени мұрасын сақтау және оны насихаттау мәселелері өзектілігін жоғалтқан жоқ. Бұл мәселе, әсіресе, мұражайлар мен галереялар ұзақ уақыт бойы жабылып, келушілердің белсенділігі төмендеген кезде ерекше өзекті болды. Заманауи технологиялар осы мәселені шешуде маңызды рөл атқарады: олар бір жағынан күнделікті процестерді жеңілдетіп, екінші жағынан, келушілерді тарту мен мәдениет институттарының функционалын кеңейтуге жаһандық тұрғыдан ықпал етеді. Бұл мақалада мобильді қосымша түрінде виртуалды мұражай құру жобасы ұсынылған. Қосымша құрылғының камерасын пайдалана отырып, экспонаттарды нақты уақыт режимінде таниды және олардың 3D үлгілері мен контекстік ақпаратын толықтырылған шындық режимінде көрсетеді. Зерттеуде мұражай қосымшаларында виртуалды және толықтырылған шындық технологияларын қолдану, сондай-ақ әртүрлі мақсаттарға арналған машиналық оқыту алгоритмдерін қолдану мәселелері талқыланды. Авторлар серіктес мұражайдың кейбір экспонаттарын танудың алдын ала нәтижелерін ұсынады, қолданылатын әдістемені сипаттайды және тәсілдердің тиімділігін талдайды. Сонымен қатар, мұражай жағдайында нақты уақыт режимінде тану мүмкіндігі бар мобильді қосымшаны тестілеу нәтижелері берілген.

Тірек сөздер: машиналық оқыту, бейнелерді тану, мәдени мұра.

¹*Ipalakova M.,

Associate professor, Candidate of Technical Sciences, ORCID ID: 0000-0002-8700-1852,

*e-mail: m.ipalakova@iitu.edu.kz

¹Daineko Y.,

Associate professor, PhD, ORCID ID: 0000-0002-8700-1852,

e-mail: y.daineko@iitu.edu.kz

¹Bolatov Zh.,

Head of the Research Laboratory "Computer Modeling and Simulation",

ORCID ID: 0000-0002-1945-8156,

e-mail: zh.bolatov@iitu.edu.kz

¹Tsoy D.,

Head of Research Laboratory "Mixed Reality Laboratory",

ORCID ID: 0000-0003-0172-9760,

e-mail: d.tsoy@iitu.edu.kz

¹Abdugapparova K.,

master's student, ORCID ID: 0000-0002-0866-1319,

e-mail: 38515@iitu.edu.kz

¹Khojayev D.,

student, ORCID ID: 0009-0006-9756-6597,

e-mail: d.khojayev@iitu.edu.kz

¹International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan

THE USE OF INFORMATION TECHNOLOGY IN PRESERVING THE CULTURAL HERITAGE OF KAZAKHSTAN

Abstract

In the modern world, the issues of preserving and popularizing the cultural heritage of a country and region remain relevant. This issue became particularly acute during and after the COVID-19 pandemic, when museums and galleries existed without active visitor attendance for an extended period. Modern technologies play a significant role in addressing this problem, both by facilitating and simplifying daily routine processes and by globally impacting the conceptual challenges of attracting visitors and expanding the functionality of cultural institutions. This article presents a project to develop a virtual museum in the form of a mobile application. The application will recognize exhibits in real-time using the device's camera and display their 3D models and contextual information in augmented reality mode. The work reviews the use of virtual and augmented reality technologies in museum applications, as well as machine learning algorithms for various purposes. The authors report preliminary results of recognizing some exhibits from a partner museum, describing the applied methodology and analyzing the effectiveness of the approaches used. Additionally, the results of testing a mobile application with real-time recognition capabilities under museum conditions are presented.

Key words: machine learning, pattern recognition, cultural heritage.

Дата поступления статьи в редакцию: 03.07.2024

UDC 004.8
IRSTI 28.23.15<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-32-44>¹Nam D.,Master of Tech. Sci., PhD Student, ORCID ID:0000-0002-9356-3114,
e-mail: d.nam@kbtu.kz¹Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan**CLASSIFICATION OF LUNG CALCIFICATIONS AND CANCER
IN LUNGS-RADS SYSTEM BASED ON RADIOLOGICAL FEATURES****Abstract**

Lung cancer represents a significant health challenge both in Kazakhstan and globally, standing out as one of the most fatal forms of cancer. Diagnosis of lung cancer is challenging as symptoms often remain undetectable in the early stages. Furthermore, lung cancer shares clinical features with various other pulmonary conditions, complicating its accurate identification. Accurate diagnosis typically involves lung puncture for subsequent biopsy, a highly invasive and painful procedure for the patient. Therefore, it is crucial to distinguish false positive cases in the diagnostic stage of computed tomography scans. We conducted a comparative analysis of five machine learning models (Logistic Regression, Decision Tree, Random Forest, SVM, and Naïve Bayes Algorithms) based on radiological features extracted from annotated computed tomography scans. We opted for classical machine learning methods because their decision-making process is easier to control compared to neural networks. We evaluated the models in terms of binary and multi-class classification to determine whether a given nodule is related to calcifications or cancers, as well as its classification according to Lung-RADS, enabling the management of whether further biopsy or only routine monitoring is necessary. We used Precision to evaluate the number of False Positive predictions in the binary classification task. Precision emerged as a pivotal metric in our assessment, offering insights into the number of false positive predictions specifically in the binary classification task. For the multi-class classification aspect, we turned to Quadratic Kappa, a robust measure that accounts for the ordinal nature of the Lung-RADS classes. Our analysis was underpinned by a combination of local Kazakhstani data and the publicly available LIDC-IDRI dataset, underscoring our commitment to leveraging diverse data sources to bolster diagnostic capabilities.

Key words: lung cancer classification, radiological feature extraction, ordinal data, medical image processing, computer vision, machine learning.

Introduction

Lung cancer stands as the deadliest form of cancer in Kazakhstan and all over the world [1]. The diagnosis of lung cancer is complicated by the fact that it is difficult to identify in its early stages and can resemble other pulmonary diseases. Additionally, symptoms of lung cancer often do not manifest in the early stages, further complicating the diagnostic process. However, the late onset of lung cancer symptoms is not only one reason of is not the only reason for the difficulty of diagnosis. Lung cancer shares similar signs and symptoms with several other conditions. The diagnostics of lung cancer are separated into three main steps. First, the abnormal area is indicated on the X-ray image. The next step is computed tomography. In cases of suspected lung cancer, a biopsy is often recommended. Biopsy procedures are highly invasive and carry a number of negative health consequences. Therefore, reducing the number of false positive results is an important task in medical data processing. In this current article, we explored the potential application of clustering based on the depth and area of nodules for both calcifications and tumors according to the Lung-RADS system.

Literature review

Convolutional neural networks are widely used for lung cancer classification on CT images. The authors of Lung-EffNet [2] proposed a transfer learning framework based on EfficientNet architecture [3] for the classification of lung CT according to normal, adenocarcinoma, large cell carcinoma, and squamous cell carcinoma. The authors of the next observed article proposed DL-CAD [4] for the detection of missed lung cancer after CT screening. The algorithm utilized the DenseNet [5] architecture for image classification into cancer and non-cancer classes. The authors exclusively examined cases that were missed during the previous CT screening to evaluate the DL-CAD. LR3, according to Lung-RADS, was employed as a positive indicator. Another way of lung cancer detection is an application of Generative adversarial neural networks for cancer detection. The authors of MTL-MGAN [6] proposed an application of a modified generative adversarial network (MGAN) and transfer learning. MGAN has been used to create two intermediary domains that act as connectors between the source and target domains which allows an increase in lung cancer classification quality. The authors of the next observed article [7] proposed an application of an Optimized Ensemble of Hybrid RNN-GAN Models for lung nodule classification for cancer and non-cancer cases.

Although deep neural networks demonstrate high performance in medical image processing, their application is complicated by several factors:

1. The need for significant computational resources. Generally, networks with a large number of training parameters yield better results [8].

2. The requirement for a large volume of training data is challenging in medical data processing tasks due to ethical and privacy concerns. Additionally, medical data needs to be pre-annotated by a team of experienced clinician experts.

3. The training process of the model acts as a black box, making it difficult to control the decision-making process of the neural network. For example, in the paper [9], the process is described where a neural network mistakenly identified images with band-aids as skin diseases. Another example illustrating that it is impossible to precisely interpret the decision-making process of the neural network from the expert side is described in papers [10], [11]. The authors of these papers demonstrate that the neural network learned to distinguish the race of a person from an X-ray image.

Due to these limitations, classical machine learning methods are still widely used in computer vision for medical data processing. The authors of [12] proposed an application of Random Forest for lung cancer classification. The authors used an open-source LIDC-IDRI dataset [13] with lung CT images. The authors applied median and Gaussian filters to remove noise from the original image. Then the authors applied a watershed algorithm [14] for nodule segmentation. The nodule was used for the extraction of radiological features, such as area, eccentricity, mean intensity, centroid, and diameter. The following values were used as input for the Random Forest classifier (RF) [15]. The authors of [16] also used an RF for lung nodule classification. The model used the output of the CAD system for lung cancer detection as an input for an improved Random Forest classifier. RF was improved by updating the sampling and feature selection process for better performance with imbalanced data. The authors of [17] applied a support vector machine (SVM) for nodule classification. Otsu thresholding-based algorithm [18] was used for nodule segmentation. Gabor filter [19] and Gray-Level Co-occurrence Matrix (GLCM) [20] were used for feature extractions. Extracted features were fed to SVM for the next classification. Classical machine learning algorithms also were compared with each other in [21]. The authors compared Bayesian Network, Logistic Regression, J48, Random Forest, and Naïve Bayes Algorithms for binary classification on open source Kaggle dataset with 309 observations and 16 attributed.

For the current research, we also applied classical machine-learning approaches for lung nodule classification. We provide a comparative analysis of five classical machine-learning algorithms (Logistic Regression, Decision Tree, Random Forest, SVM, and Naïve Bayes) based on the

radiological features of lesions for multiclass classification according to 5 classes: 4 cancer classes according to the Lung-RADS System and one non-cancer class (calcification).

Main provision

The main provision of the research could be described as:

1. Extraction of radiological features from the original DICOM image based on Pearson [22] and Spearman [23] correlation.
2. Classification between lung cancer and lung calcification instead of classification between cancer and non-cancer areas.
3. The use of the Lung-RADS system for cancer nodule classification.
4. Comparative analysis for binary (cancer, non-cancer) and multi-class (calcification and Lung-RADS classes) classification of five classical ML algorithms.
5. The use of Kazakstani local data allows to take into account economic and environmental specification of the region.

We compared algorithms based on Accuracy, Precision, Recall, and F1 for binary and multi-class classification, and also we compared the number of False Positive and False Negative Predictions. Additionally, we used Quadratic Kappa for the calculation the quality of multi-class classification based on ordinal data.

Methods and Materials

We used the dataset with lung cancer CT images of Kazakhstani patients with corresponding binary masks [24] and supplemented it via calcinate cases. We used a preliminary segmented area as an input of the pipeline. Then we extracted radiological features, such as mean, mean of positive values, the mean value of the circle described around the centroid, square, and square of positive elements only. We used these features for classification according to 5 classes: four classes according to the Lung-RADS system and calcinate (non-cancer class). We compared Logistic Regression, Decision Tree, Random Forest, SVM, and Naïve Bayes Algorithms for classification. Fig 1. shows the overview of the pipeline for lung lesion classification.

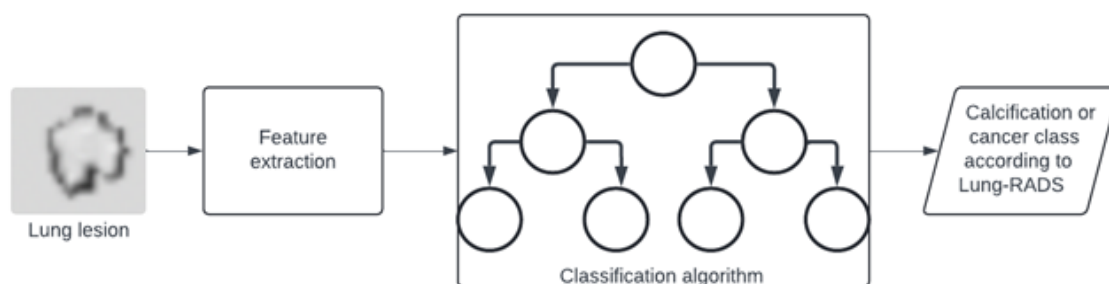


Figure 1 – Pipeline of lung lesion classification

Dataset description

We supplemented the dataset with lung cancer CT images via calcification cases. The total number of images is 1134. The number of images with lung cancer is 972, and the number of images with calcification is 162. The dataset consists of a CT image, corresponding binary mask, class according to Lung-RADS system or calcification, and the binary value of cancer existence (0 for calcinates, 1 for cancer). The distributions between cancer and label classes are shown in Fig 2. We worked with imbalanced data, predominantly consisting of positive cases.

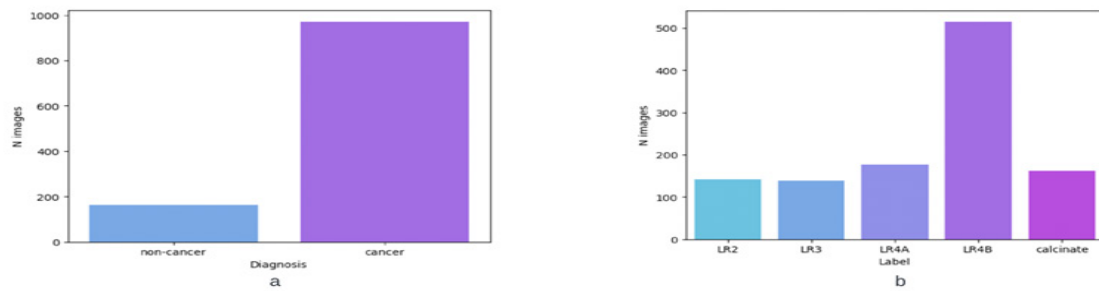


Figure 2 – The distribution between (a) cancer and non-cancer classes (b) classes according to Lung-RADS and calcification

The dataset had two target functions. The first one is the label. It is the class name according to the Lung-RADS system that includes 4 classes and calcification. A brief description of each class has been provided in Table 1.

Table 1 – Dataset label description

Name	N samples	Description
Calcification	162	Calcification refers to the accumulation of calcium salts in tissues or organs, often observed as white spots on medical imaging such as X-rays or CT scans. It can occur in various parts of the body and may indicate underlying conditions such as infections, trauma, or metabolic disorders.
LR2	142	LR2, or Lung-RADS category 2, is a classification system used in lung cancer screening to categorize pulmonary nodules as benign based on specific imaging features. Nodules in this category typically have low suspicion for malignancy and require routine surveillance.
LR3	138	LR3, or Lung-RADS category 3, is a classification used in lung cancer screening to identify nodules with intermediate suspicion for malignancy. These nodules may require additional imaging or follow-up to assess for changes over time.
LR4A	177	LR4A, or Lung-RADS category 4A, indicates nodules with a moderate level of suspicion for malignancy. These nodules often require further evaluation, such as biopsy or PET-CT imaging, to determine if they are cancerous.
LR4B	515	LR4B, or Lung-RADS category 4B, represents nodules with a high suspicion for malignancy. These nodules are more likely to be cancerous and typically warrant prompt evaluation and management, such as biopsy or surgical resection.

The calcification and cancer areas have big differences in density distribution but could have similar forms and locations in the lungs. The calcification has much more density in Hounsfield Units (HU) which is shown in Fig 3.

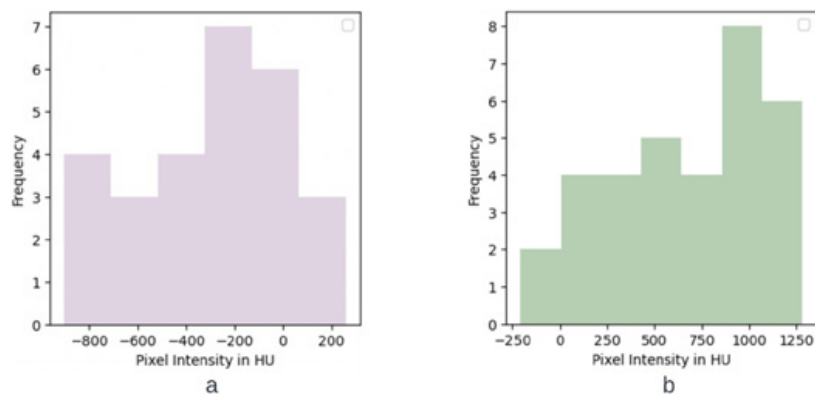


Figure 3 – Histogram of the density distribution of HU of (a) LR2 (b) calcification from the dataset for one CT image

Feature extraction

First, we calculated the Region of Interest (RoI) by multiplication the binary mask with the CT image, as in (1). This RoI will be used for all of the next calculations as an affected area.

$$RoI_{i,j} = CTimg_{i,j} \times mask_{i,j} \quad (1)$$

Where $CTimg$ is an original CT image,

$mask$ is a binary mask of cancer or calcification area,

i, j are indexes

The density is the key feature for classification between cancer and calcification. So first we calculated three mean values of the RoI: Average mean (2), Mean of positive (3).

$$Mean_{avg} = \frac{\sum_{i,j} CTimg_{i,j} \times mask_{i,j}}{\sum_{i,j} mask_{i,j}} \quad (2)$$

$$Mean_{pos} = \frac{\sum_{i,j} CTimg_{i,j} \times mask_{i,j} \times (CTimg_{i,j} > 0)}{\sum_{i,j} mask_{i,j} \times (CTimg_{i,j} > 0)} \quad (3)$$

Where $CTimg$ is an original CT image,

$mask$ is a binary mask of cancer or calcification area,

i, j are indexes

Additionally, we tried to simulate the approach the clinicians used. We calculate a mean value of the area near the centroid, as in (4) – (7)

$$R = round \frac{\sqrt{\frac{\sum mask}{\pi}}}{3} \quad (4)$$

Where R is the Radius of the area which will be used for mean calculation,

$mask$ is a binary mask of cancer or calcification area

$$(x_c, y_c) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right) \quad (5)$$

Where (x_c, y_c) are the coordinates of the centroid,

n is the number of vertices,

(x_i, y_i) are the coordinates of the i -th vertex

$$Circle_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{if } (i - x_c)^2 + (j - y_c)^2 \leq R \\ 0 & \end{cases} \quad (6)$$

Where $Circle$ is the binary mask with circle area which will be used for the next calculation

(x_c, y_c) are the coordinates of the centroid

(i, j) are the pixel coordinates

$$Mean_{round} = \frac{\sum_{i,j} CTimg_{ij} \times Circle_{i,j}}{\sum_{i,j} Circle_{i,j}} \quad (7)$$

Where $CTimg$ is an original CT image,
 $Circle$ is the binary mask with circle

While density is the main difference between cancer and calcification, classes according to the Lung RAGS System have differences in size. We proposed to use the square of the affected area, as in (8), and the square of positive pixels from the affected area (9).

$$S_{all} = \sum mask \quad (8)$$

$$S_{pos} = \sum_{i,j} CTimg_{i,j} \times (CTimg_{i,j} > 0) \quad (9)$$

After the following calculations, we received an updated dataset with the radiological features described the lung cancer. The overview of the dataset has been provided in Table 2.

Table 2 – Updated dataset description

Name	Type	Description
Category id	ID	Unique ID of one patient
Mean	Real	The mean value of affected are in HU
Mean positive	Real non-negative	The mean value of positive pixels in affected are in HU
Mean round	Real	The mean value of area near the centroid of the affected are
S	Natural positive	The square of affected area
S positive	Natural non-negative	The square of positive pixels in affected area
Label	[0: calcinate, 1: LR2, 2: LR3, 3: LR4A, 3: LR4B]	The class with ordering according to Lung-RADS System or calcification
Cancer	[1: cancer, 0: non-cancer]	Cancer for all LR, non-cancer for calcification

To ensure that all obtained features have an impact on the target variables, we calculated correlations between them and the target function. Since cancer and non-cancer are independent classes, we used Pearson correlation, as in (10), to calculate the correlation between variables and “cancer”. The “label” values are ordinal. 0 denotes the absence of cancer, 1 denotes small areas, and so forth. Therefore, we applied Spearman correlation, as in (11). Fig 4. Shows the correlation between features and target variables.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (10)$$

Where r_{xy} is the correlation coefficient between variables x and y ,

x_i and y_i are the values of variables x and y for the i -th observation,

$\bar{x}$ and $\bar{y}$ are the means of variables x and y ,

n is the number of observations.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (11)$$

Where d_i is the difference between the ranks of corresponding values in the two variables.
 n is the number of observations.

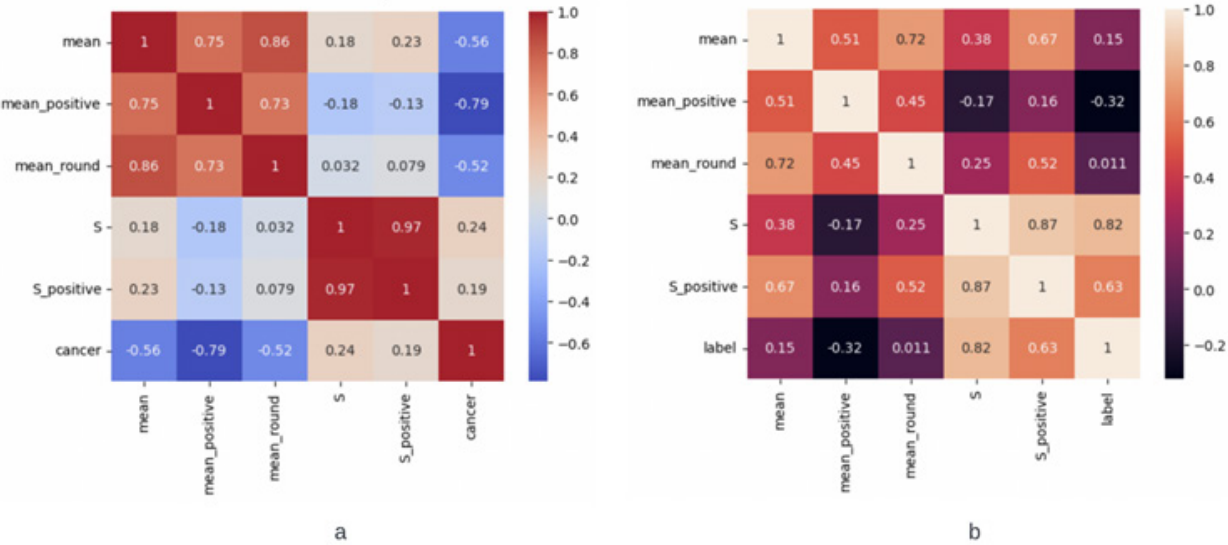


Figure 4 – Correlation matrixes (a) Pearson correlation between radiological features and cancer (b) Spearman correlation between radiological features and label

We randomly split the dataset to train and test sets. However, we worked with CT slices with calcinate or cancer. So the dataset contains continuous slices from one patient. So we split data by category ID to avoid the situation, when the CT images from one patient are in the train and test sets at the same time. We worked with imbalanced data with the prevailing cancer class. The distribution between classes in train and test sets is shown in Fig. 5.

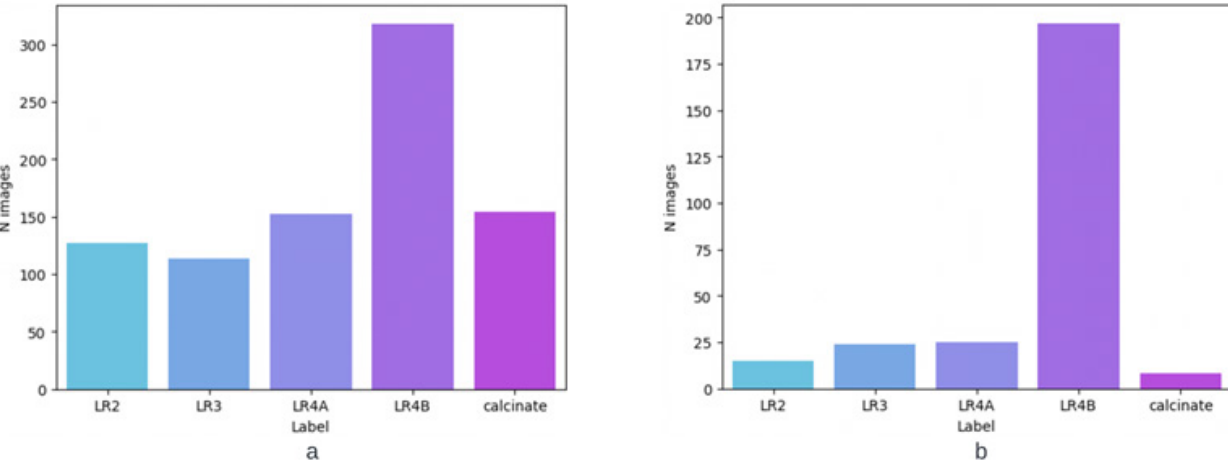


Figure 5 – The distribution according to the number of images per label in the dataset (a) in the train set (b) in the test set

Machine learning models for lesion classification

We compared several commonly used machine learning algorithms to analyze radiological features of the lung, including logistic regression, decision tree, random forest, support vector machine (SVM), and Naïve Bayes classifier.

Logistic regression, although a linear algorithm, has demonstrated good performance in binary classification problems that require predicting the probability of belonging to a particular class. It also has the advantage of interpretable results, making it useful in clinical research.

A decision tree is a nonlinear classification algorithm that allows the construction of a tree structure where each node represents a decision based on a feature. This method is easy to interpret and can handle both numeric and categorical data.

Random forest is an ensemble method consisting of multiple decision trees. It creates a “forest” of trees trained on different subsets of data, which improves classification quality and reduces the risk of overfitting.

Support Vector Machine (SVM) is well suited for classification problems with linear and nonlinear relationships between features. It finds the optimal hyperplane separating classes, making it effective in solving complex classification problems.

The Naïve Bayes classifier, despite its simplicity, performs well in real-world applications, especially text classification and spam filtering. It is based on the assumption of feature independence, which makes it computationally efficient and easy to implement.

Metrics for model evaluation

We compared the models according to binary (cancer, non-cancer) and multi-class classification (Lung-RADS classes and calcification). We used standard metrics for the evaluation of classification, such as Accuracy, as in (12), Precision, as in (13), Recall, as in (14), and F1 score, as in (15). As we work with imbalanced data in the medical image processing field, the model with the minimum number of False Positive predictions is the most applicable for us. In case the number of False Positive decreases, the precision grows up.

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (12)$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (13)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (14)$$

$$F1 = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (15)$$

Where TP (True Positive) is the number of correctly predicted positive instances,

TN (True Negative) is the number of correctly predicted negative instances,

FP (False Positive) is the number of incorrectly predicted positive instances,

FN (False Negative) is the number of incorrectly predicted negative instances.

We used the same metrics for multi-class and binary classification, however, multi-class classification has been ordered, as calcification is accurate for non-cancer class, LR2 is a small and less dangerous lesion, and so on. So we additionally calculated the Quadratic Kappa for classification with ordinal data, as in (16).

Where κ_w is the weighted quadratic kappa,

W_{ij} are the elements of the error weight matrix,

N_{ij} is the number of observed agreements between class i and class j ,

N_{ij}^{exp} is the expected number of agreements between class i and class j that would occur by chance.

Results and discussion

The results of binary classification for cancer and non-cancer target values have been provided in Table 3. The confusion matrix for binary classification has been provided in Fig. 6.

Table 3 – Evaluation of binary classification among cancer and non-cancer

Model name	Accuracy	Precision	Recall	F1
Logistic Regression	0.9962	0.9962	1	0.998
Decision Tree	0.9888	0.9886	1	0.9942
Random Forest	0.9925	0.9923	1	0.9961
SVM	0.9925	0.9923	1	0.9961
Naïve Bayes	0.9776	0.9961	0.9808	0.9884

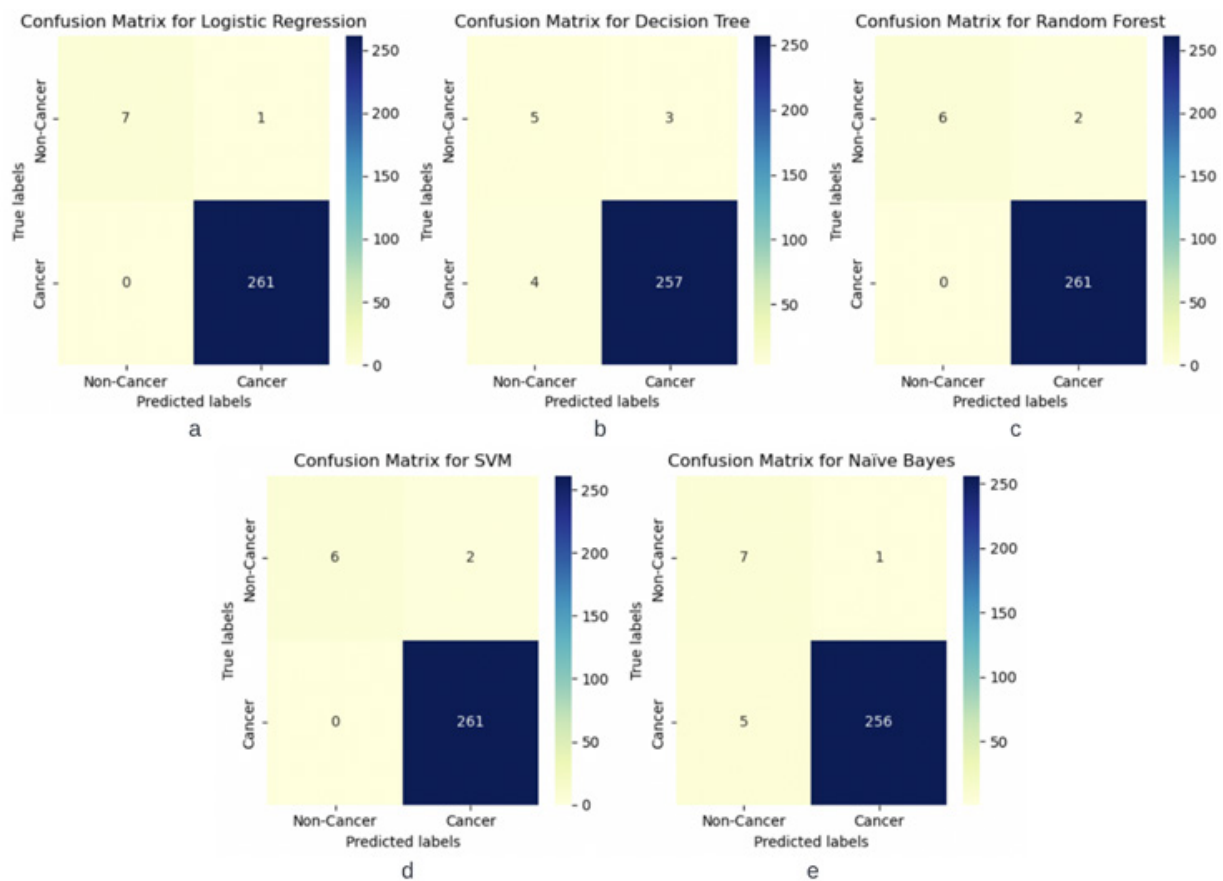


Figure 6 – Confusion matrixes for binary classification according to cancer and non-cancer cases for (a) Logistic Regression (b) Decision Tree (c) Random Forest (d) SVM (e) Naïve Bayes

The results of multi-class classification according to Lung-RADS and calcification with target values label (classes according to Lung-RADS and calcification) have been provided in Table 4. Fig. 7 shows the confusion matrix for all of the classes.

Table 4 – Evaluation of multi-class classification among calcification and classes in Lung-RADS

Model name	Accuracy	Precision	Recall	F1	Quadratic Kappa
Logistic Regression	0.6765	0.5391	0.6088	0.5558	0.7432
Decision Tree	0.684	0.5767	0.5922	0.5654	0.7554
Random Forest	0.684	0.5665	0.5899	0.5562	0.746
SVM	0.6579	0.5737	0.6593	0.5823	0.6653
Naïve Bayes	0.5501	0.5536	0.5313	0.4628	0.6254

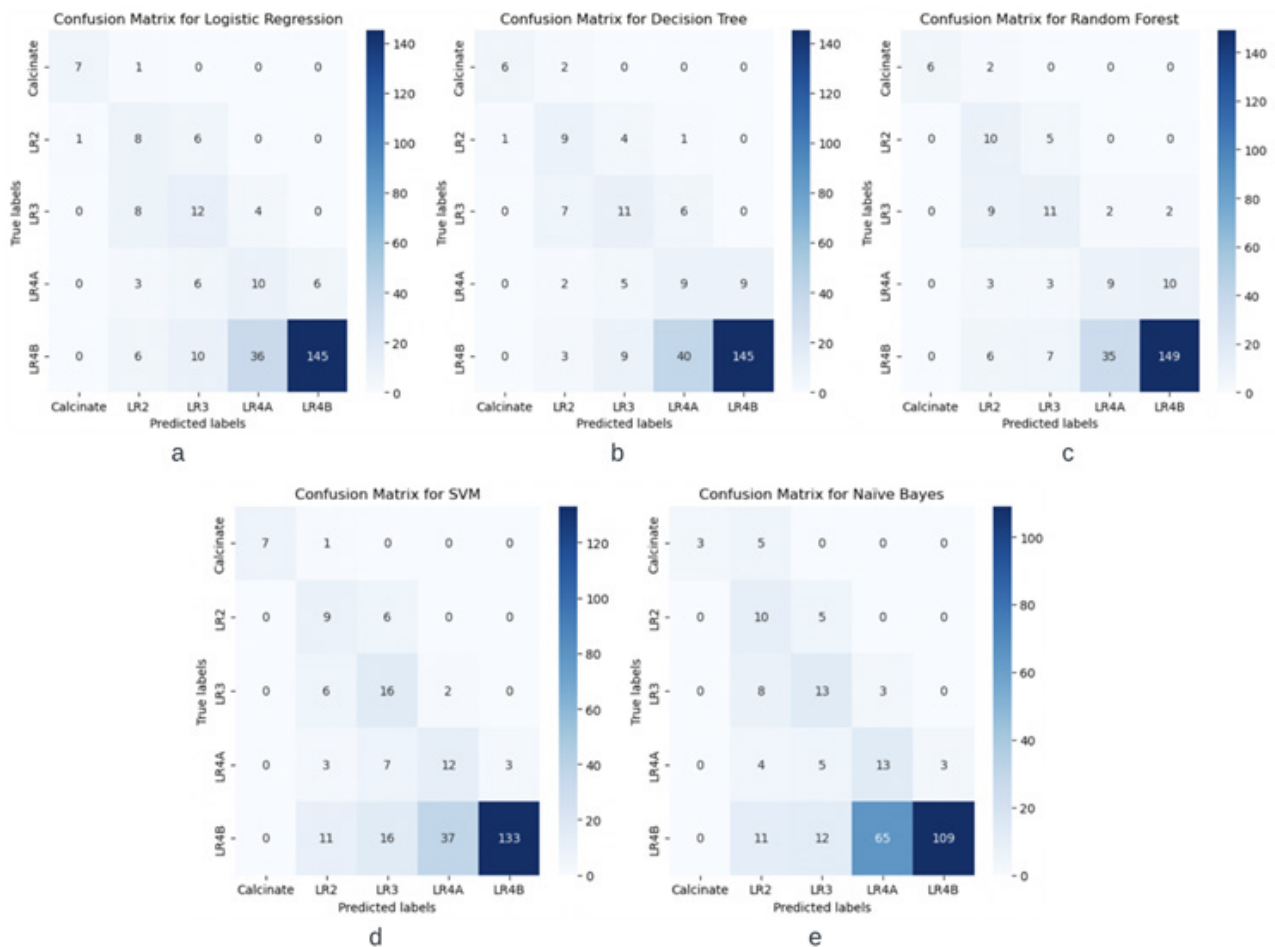


Figure 7 – Confusion matrixes for multi-class classification according to Lung-RADS classes and calcification for (a) Logistic Regression (b) Decision Tree (c) Random Forest (d) SVM (e) Naïve Bayes

We worked with data preliminarily labelled by doctor-clinicians according to the Lung-RADS System and calcification. The dataset also stored binary masks of damaged areas and CT scan values in Hounsfield units. We used annotated binary masks and their corresponding images to obtain regions of interest. Regions of interest represent areas affected by cancerous formations or calcifications. The obtained regions of interest were examined to extract radiological features characterizing the area, such as mean, mean positive, mean around centroid, area, and positive area.

We conducted a comparative analysis of five classical machine learning models working with vector data based on the obtained radiological features, mimicking the work of a clinician. We

compared Logistic Regression, Decision Tree, Random Forest, SVM, and Naïve Bayes in the context of binary and multi-class classification tasks based on Accuracy, Precision, Recall, and F1 for both classification tasks and supplemented with Quadratic Kappa for the multi-class classification task.

We separately solved the problem of binary classification according to cancer or non-cancer, where calcinate was considered non-cancerous. And the multi-class classification tasks according to the Lung RADS classes and calcifications. We consider Precision metric as the most effective for evaluating the quality of binary classification since its increase signifies a reduction in the number of false positive predictions, which is particularly important in medical tasks, especially when dealing with imbalanced data. Thus, logistic regression performed the best in the binary classification task. In the multi-class classification task for ordinal data, we find the Quadratic Kappa metric most suitable as it takes into account the class order. According to our experiments, the decision tree performed the best.

Several limitations are associated with this study. Firstly, we worked with a limited dataset that only included two possible types of anomalies: cancer and calcification. However, many other different lesions have a similar shape and location. Also, the presence of calcifications in the lungs may indicate a potentially existing condition. Secondly, increasing the size of the train set could significantly increase the quality of classification. Last but not least, we take into account only radiological features, but the doctor takes into account clinical features as well. However, we do not have this information because of ethical and privacy reasons.

Conclusion

Our study leveraged radiological features extracted from CT scans, alongside binary masks indicating areas of interest, to explore the performance of classical machine learning models in classifying lung abnormalities. The results indicated that logistic regression excelled in binary classification, demonstrating its potential for identifying cancerous and non-cancerous regions. Furthermore, the decision tree model showcased superior performance in multi-class classification tasks, particularly with ordinal data.

REFERENCES

- 1 Ferlay J., Ervik M., Lam F., et al. Global Cancer Observatory: Cancer Today. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer, 2022. Available from: <https://gco.iarc.fr/today>.
- 2 Raza R., Zulfiqar F., Khan M. O., Arif M., Alvi A., Iftikhar M. A., & Alam T. Lung-EffNet: Lung cancer classification using EfficientNet from CT-scan images. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, vol. 126, p. 106902.
- 3 Tan M., & Le Q. Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In *International conference on machine learning*, 2019, May, pp. 6105–6114. PMLR.
- 4 Cho J., Kim J., Lee K. J., Nam C.M., Yoon S.H., Song H. ... & Lee K.W. Incidence lung cancer after a negative ct screening in the national lung screening trial: Deep learning-based detection of missed lung cancers. *Journal of Clinical Medicine*, 2020, vol. 9, no. 12, p. 3908.
- 5 Huang G., Liu Z., Van Der Maaten L., & Weinberger K.Q. Densely connected convolutional networks. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2017, pp. 4700–4708.
- 6 Chui K.T., Gupta B.B., Jhaveri R.H., Chi H.R., Arya V., Almomani A., & Nauman A. Multiround transfer learning and modified generative adversarial network for lung cancer detection. *International Journal of Intelligent Systems*, 2023, pp. 1–14.
- 7 Tiwari A., Hannan S.A., Pinnamaneni R., Al-Ansari A.R.M., El-Ebiary Y.A.B., Prema S. ... & Vidalón J.L.J. Optimized Ensemble of Hybrid RNN-GAN Models for Accurate and Automated Lung Tumour Detection from CT Images. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2023, vol. 14, no.7.
- 8 Götz T.I., Göb S., Sawant S., Erick X.F., Wittenberg T., Schmidkonz C. ... & Ramming A. Number of necessary training examples for Neural Networks with different number of trainable parameters. *Journal of Pathology Informatics*, 2022, no.13, p. 100114.

- 9 Goel K., Gu A., Li Y., & Ré C. Model patching: Closing the subgroup performance gap with data augmentation, 2020, arXiv preprint arXiv:2008.06775.
- 10 Banerjee I., Bhimireddy A.R., Burns J.L., Celi L.A., Chen L.C., Correa R. ... & Gichoya J.W. Reading race: AI recognises patient's racial identity in medical images, 2021, arXiv preprint arXiv:2107.10356.
- 11 Gichoya J.W., Banerjee I., Bhimireddy A.R., Burns J.L., Celi L.A., Chen L.C. ... & Zhang H. (2022). AI recognition of patient race in medical imaging: a modelling study. *The Lancet Digital Health*, vol.4, no. 6, e406-e414.
- 12 Jayaraj D., & Sathiamoorthy S. Random forest based classification model for lung cancer prediction on computer tomography images. In 2019 International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT), 2019, November, pp. 100–104. IEEE.
- 13 Armato III S.G., McLennan G., Bidaut L., et al. Data From LIDC-IDRI [Data set]. The Cancer Imaging Archive, 2015. <https://doi.org/10.7937/K9/TCIA.2015.LO9QL9SX>.
- 14 Beucher S., & Meyer F. The morphological approach to segmentation: the watershed transformation. In *Mathematical morphology in image processing*, 2018, pp. 433–481).
- 15 Breiman L. Random forests. *Machine learning*, 2001, no. 45, pp. 5–32.
- 16 Paing May Phu, and Somsak Choomchuay. Improved random forest (RF) classifier for imbalanced classification of lung nodules. 2018 International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST). IEEE, 2018.
- 17 Kareem H.F., AL-Husieny M.S., Mohsen F.Y., Khalil E.A., & Hassan Z.S. Evaluation of SVM performance in the detection of lung cancer in marked CT scan dataset. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2021, vol. 21, no. 3, p. 1731.
- 18 Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. *Automatica*, 1975, vol. 11, no. 285–296, pp. 23–27.
- 19 Gabor D. Theory of communication. Part 1: The analysis of information. *Journal of the Institution of Electrical Engineers-part III: radio and communication engineering*, 1946, vol. 93, no. 26, pp. 429–441.
- 20 Haralick R.M., Shanmugam K., & Dinstein I.H. Textural features for image classification. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 1973, no. 6, pp. 610–621.
- 21 Cripsy J. Viji, and Divya T. Lung Cancer Disease Prediction and Classification based on Feature Selection method using Bayesian Network, Logistic Regression, J48, Random Forest, and Naïve Bayes Algorithms. 2023 3rd International Conference on Smart Data Intelligence (ICSMDI). IEEE, 2023.
- 22 Pearson K. VII. Note on regression and inheritance in the case of two parents. *proceedings of the royal society of London*, 1895, vol. 58, no. 347–352, pp. 240–242.
- 23 Spearman C. The proof and measurement of association between two things, 1961.
- 24 Nam D., Panina A., Pak A. Lung cancer segmentation dataset with Lung-RADS class, Mendeley Data, V1, doi: 10.17632/5rr22hgzw.1

¹Нам Д.,

Т.Ғ.М., докторант, ORCID ID: 0000-0002-9356-3114,
e-mail: d.nam@kbtu.kz

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

ӨКПЕДЕГІ КАЛЬЦИФИКАЦИЯЛАР МЕН ОБЫРДЫ LUNG-RADS ЖҮЙЕСІНДЕ РАДИОЛОГИЯЛЫҚ ЕРЕКШЕЛІКТЕР НЕГІЗІНДЕ ЖІКТЕУ

Аңдатпа

Өкпе обыры Қазақстанда және әлемде денсаулық сақтау саласындағы елеулі мәселелердің бірі. Бұл ауру өлімге әкелетін қатерлі ісіктер қатарында. Өкпе обырын ерте диагностикалау қиын, себебі оның бастапқы кезеңдерінде клиникалық белгілері байқалмайды. Сонымен қатар, өкпе обырының басқа өкпе ауруларымен ұқсас клиникалық көріністері оның дәл диагностикасын қиындатады. Дәстүрлі диагностикалық әдістер, мысалы, өкпені тесіп, биопсия жүргізу, инвазивті және науқас үшін ауыр процедуралар. Осыған байланысты компьютерлік томография (КТ) негізінде жалған оң жағдайларды азайту диагностика сапасын жақсартуда маңызды рөл атқарады. Бұл зерттеуде аннотацияланған компьютерлік томографиялардан алынған

радиологиялық ерекшеліктерге негізделген бес машинамен оқыту моделінің (логистикалық регрессия, шешім ағашы, кездейсоқ орман, векторларды қолдау әдісі және Байестің аңғал алгоритмі) салыстырмалы талдауы жүргізілді. Классикалық модельдерді таңдау олардың шешім қабылдау процесін нейрондық желілермен салыстырғанда жеңіл бақылауға болатындығымен түсіндіріледі. Модельдер бинарлы және көпклассты жіктеу тұрғысынан бағаланды. Бинарлы жіктеу барысында нақты түйіннің кальцификациялармен немесе обырмен байланысты екенін анықтау және биопсияның қажет екенін, тұрақты бақылаудың жеткілікті екенін шешу үшін Precision метрикасы қолданылды. Ал көпклассты жіктеу үшін Lung-RADS кластарын реттік сипатын ескеретін Quadratic Kapra сенімділік өлшемі пайдаланылды. Зерттеу жергілікті қазақстандық деректер мен жалпыға қолжетімді LIDC-IDRI деректер жиынтығының комбинациясына негізделген. Әртүрлі дереккөздерді біріктіру диагностикалық мүмкіндіктерді кеңейтуге деген ұмтылысты көрсетеді.

Тірек сөздер: өкпе обырын жіктеу, радиологиялық ерекшеліктерді алу, реттік деректер, медициналық бейнелерді өңдеу, компьютерлік көру, машинамен оқыту.

¹Нам Д.,

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

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

КЛАССИФИКАЦИЯ КАЛЬЦИФИКАЦИЙ И РАКА ЛЕГКОГО В СИСТЕМЕ LUNG-RADS НА ОСНОВЕ РАДИОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ

Аннотация

Рак легких представляет собой значительную проблему для здравоохранения как в Казахстане, так и в мире, являясь одной из самых смертельных форм рака. Диагностика рака легких сложна, так как симптомы часто остаются незаметными на ранних стадиях. Более того, рак легких имеет общие клинические признаки с различными другими легочными заболеваниями, что усложняет его точное выявление. Точная диагностика обычно требует прокола легкого для последующей биопсии, что является высокоинвазивной и болезненной процедурой для пациента. Поэтому крайне важно отличать ложноположительные случаи на этапе диагностики с использованием компьютерной томографии. Мы провели сравнительный анализ пяти моделей машинного обучения (логистическая регрессия, решающее дерево, случайный лес, метод опорных векторов и наивный байесовский алгоритм) на основе радиологических признаков, извлеченных из аннотированных компьютерных томографий. Мы выбрали классические методы машинного обучения, потому что их процесс принятия решений легче контролировать по сравнению с нейронными сетями. Мы оценили модели с точки зрения бинарной и многоклассовой классификации, чтобы определить, связано ли данное образование с кальцификацией или раком, а также его классификацию согласно Lung-RADS, что позволяет решить, требуется ли дальнейшая биопсия или достаточно только рутинного наблюдения. Мы использовали метрику Precision для оценки количества ложноположительных предсказаний в задаче бинарной классификации. Precision стал ключевой метрикой в нашей оценке, предоставляя информацию о количестве ложноположительных предсказаний именно в задаче бинарной классификации. Для аспекта многоклассовой классификации мы обратились к Quadratic Kapra, надежной мере, учитывающей порядковый характер классов Lung-RADS. Наш анализ основывался на комбинации местных казахстанских данных и общедоступного набора данных LIDC-IDRI, подчеркивая нашу приверженность использованию разнообразных источников данных для улучшения диагностических возможностей.

Ключевые слова: классификация рака легких, извлечение радиологических признаков, порядковые данные, обработка медицинских изображений, компьютерное зрение, машинное обучение.

Article submission date: 11.06.2024

UDC 004.9
IRSTI 28.23.25

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-45-57>

^{1*}**Kunikeyev A.,**

Master of Engineering Sciences, ORCID ID: 0000-0003-3716-0895,

*e-mail: aidyn.daulet@gmail.com

^{1,2}**Yerimbetova A.,**

PhD, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

ORCID ID: 0000-0002-2013-1513,

e-mail: aigerian8888@gmail.com

¹**Satybaldiyeva R.,**

Candidate of Technical Sciences, Professor, ORCID ID: 0000-0002-0678-7583

e-mail: r.satybaldiyeva@satbayev.university

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Institute of Information and Computational Technologies of the Committee
of Science of the Ministry of Science and Higher Education
of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

A REVIEW OF TOOLS, METHODOLOGIES, AND TECHNIQUES FOR PROCESSING, PRE-PROCESSING, AND CLUSTERING ANALYSIS OF GENETIC DATA

Abstract

Gene expression analysis has become a key component in understanding cellular behavior, disease mechanisms, and drug response. The advent of high-throughput sequencing, particularly single-cell RNA sequencing (scRNA-seq), has expanded our ability to study cellular heterogeneity to an unprecedented level. Clustering algorithms needed to group genes or cells with similar expression profiles have become invaluable for analyzing the massive data sets generated by these technologies. This article reviews various clustering methods applied to gene expression data, particularly single-cell RNA sequencing. The analysis covers traditional methods such as hierarchical clustering and k-means, as well as more advanced approaches such as model-based clustering, machine learning-based methods, and deep learning methods. The primary challenges encompass handling high-dimensional data, mitigating noise, and achieving scalability for large datasets. Moreover, new advancements such as multi-omics data integration, deep learning-based clustering, and federated learning offer potential enhancements in accuracy and biological relevance for clustering applications in gene expression research. The review concludes with a discussion of clustering algorithms in handling increasingly complex gene expression data for more accurate biological insights.

Key words: Clustering methods, Bioinformatics, Machine Learning, Deep learning, single-cell RNA sequencing, Gene expressions.

Introduction

Gene expression analysis has become a cornerstone of modern molecular biology, providing vital information about cellular functions [1], disease mechanisms [2], and drug responses [3]. The advent of high-throughput sequencing technologies, particularly single-cell RNA sequencing (scRNA-seq), has transformed our ability to conduct gene expression research [4]. As we delve into the complex world of cellular heterogeneity and function, clustering algorithms are becoming indispensable tools for making sense of the vast and complex datasets generated by these technologies.

Using clustering, an unsupervised machine learning technique, researchers can categorize genes or cells by similar expression patterns, which helps reveal underlying structures in the data [5].

As the field of genomics continues to evolve, the importance of robust and efficient clustering algorithms cannot be overstated. The aim of this review is to provide a comprehensive overview of the current state of clustering methods in gene expression analysis, with a particular focus on their application to single-cell RNA-seq data.

The Rise of Single-Cell RNA Sequencing. Single-cell RNA sequencing has emerged as a powerful tool in genomics, offering unprecedented insights into cellular heterogeneity and function. Unlike bulk RNA sequencing, which provides an average expression profile across a population of cells, scRNA-seq captures the transcriptomes of individual cells, revealing true diversity in seemingly homogeneous populations [6].

Identifying Complex and Rare Cell Types. One of the main applications of scRNA-seq is the identification and characterization of rare cell populations that may be masked in bulk sequencing approaches. By studying the transcriptomes of individual cells, researchers can detect subtle changes in gene expression that define different cell types or states.

Elucidating Gene Regulatory Networks. The high-resolution data provided by scRNA-seq enable the construction of detailed gene regulatory networks. By studying gene co-expression patterns in individual cells, researchers can infer regulatory relationships and build models of gene interaction networks. This approach has led to the discovery of new regulatory mechanisms and improved our understanding of how gene expression is coordinated at the cellular level [6].

Assessing Developmental Trajectories. scRNA-seq has revolutionized the study of developmental biology by allowing researchers to track the developmental trajectories of individual cell lineages. By analyzing gene expression profiles of cells at different stages of development, scientists can reconstruct the molecular pathways that direct cellular differentiation and maturation [7].

Revealing Cell-to-Cell Variations in Disease. In the context of disease research, scRNA-seq has proven invaluable in identifying cell-to-cell variations in various disease states. The technology has been particularly effective in cancer research, where it has shed light on tumor heterogeneity and the existence of rare cell populations that may contribute to drug resistance or disease progression [8].

Applications in Drug Discovery and Development. scRNA-seq has applications that reach fundamental research, playing a crucial role in drug discovery and development. This technology allows for more precise and effective drug discovery strategies by offering in-depth insights into how individual cells respond to drugs [9].

As we delve into the world of clustering algorithms for gene expression analysis, it is critical to remember the profound impact these computational tools have on our ability to extract meaningful biological insights from the wealth of data generated by single-cell RNA sequencing. The following sections will explore various clustering approaches, their strengths and limitations, and their applications to deciphering the complexities of gene expression data.

Materials and Methods

Clustering is a fundamental technique in gene expression analysis, enabling researchers to group genes or samples based on their expression profiles. This facilitates the identification of patterns and relationships, aiding in the understanding of complex biological processes. Various clustering methods have been developed, each with its strengths and limitations. Traditional methods like hierarchical and k-means clustering offer simplicity and efficiency, while model-based approaches provide flexibility and statistical rigor. This section explores several clustering techniques, highlighting their applications, advantages, and limitations in the context of gene expression analysis.

Traditional Clustering Methods. Traditional clustering methods are widely employed due to their straightforward implementation and interpretability [10]. Hierarchical clustering is particularly popular for its ability to uncover relationships at multiple levels of granularity. By constructing a dendrogram, hierarchical clustering provides a visual representation of nested clusters, making it intuitive for biological interpretation [11]. Its flexibility allows researchers to explore data without specifying the number of clusters in advance. However, it has significant computational demands,

with a time complexity of $O(n^3)O(n^3)O(n^3)$, and is sensitive to noise and outliers, which can distort the clustering structure.

K-means clustering is another widely used method, known for its computational efficiency and simplicity [12]. It partitions data into k clusters by minimizing within-cluster variance, making it well-suited for large datasets. K-means is easy to implement and adapts to various distance metrics, enhancing its flexibility. Nonetheless, it requires the number of clusters to be predefined, which can be a challenging task. Additionally, the algorithm is sensitive to the initial placement of centroids and assumes that clusters are spherical, which may not always align with the actual data structure.

K-medoids clustering addresses some of k-means' limitations by using medoids – actual data points – as cluster centers, which improves robustness to outliers [13]. This method offers better interpretability, as medoids are representative of the data. K-medoids allows for the use of various distance metrics, making it possible to analyze mixed data types; nevertheless, it is more computationally intensive than k-means and still requires the number of clusters to be specified in advance.

Model-Based Clustering Methods. Model-based clustering operates on the assumption that data are produced from a combination of probability distributions, making it especially suitable for gene expression data, which frequently display complex statistical characteristics [14].

Gaussian Mixture Models (GMM), one of the most commonly used model-based approaches, fit data as a mixture of multivariate Gaussian distributions [15]. This allows for flexible cluster shapes and probabilistic assignments, enabling the handling of overlapping clusters. However, GMMs are sensitive to initialization and can overfit in high-dimensional spaces.

Latent Dirichlet Allocation (LDA), originally developed for text analysis, has been adapted for gene expression studies to identify latent functional groups of genes [16]. LDA assigns genes to multiple groups with varying probabilities, offering a nuanced view of gene relationships. While it can reveal biologically meaningful patterns, LDA requires careful interpretation and may not capture all expression data complexities.

Clustering remains a cornerstone of gene expression analysis, with traditional and model-based methods offering complementary strengths. Traditional methods like hierarchical, k-means, and k-medoids clustering are prized for their simplicity and efficiency, though they face challenges with large datasets and noisy data. Model-based approaches, including GMMs, LDA, and DPMs, provide greater flexibility and adaptability to complex data structures but come at the cost of higher computational complexity. The choice of clustering method depends on the specific goals of the analysis, data characteristics, and available computational resources. Together, these methods provide a robust toolkit for exploring and interpreting the rich information embedded in gene expression data.

Results

RNA-seq Data Analysis Pipeline. The RNA-seq data analysis pipeline shown in Figure 1 is a critical process for extracting meaningful biological information from raw sequencing data [17–19]. This pipeline consists of several key steps, each of which plays an important role in transforming raw reads into interpretable gene expression data. Understanding this pipeline is necessary to appreciate the context in which clustering algorithms are applied.

Preprocessing. Preprocessing is an initial and critical step in the RNA-seq data analysis process. This step aims to ensure the quality and integrity of the raw sequencing data before further analysis. The main goals of preprocessing include:

1. **Quality Control:** The overall quality of the raw data is assessed using tools such as FastQC [20]. At this stage, various metrics such as per-base sequence quality, GC content, sequence length distribution, and overrepresented sequences are checked.

2. **Adapter Trimming:** Sequencing adapters, which are artificial sequences added during library preparation, are removed using tools such as Trimmomatic [21] or Cutadapt [22].

Alignment. Alignment, also known as mapping, is the process of determining the genomic origin of each sequence read. This step is fundamental to RNA-seq analysis because it allows one to determine which genes are expressed in a sample. Aligners such as STAR [23], HISAT2 [24], or TopHat2 [25] are used to handle reads that span exon junctions.

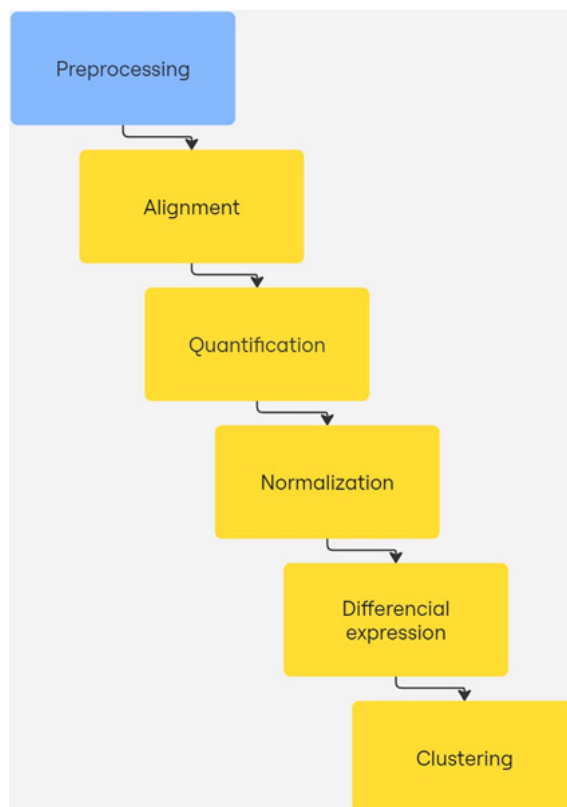


Figure 1 – Gene expression analysis pipeline

Quantification. Quantification is the process of assessing gene or transcript expression levels from aligned RNA-seq reads. This step converts the mapped reads into meaningful expression values that can be used for comparative analysis. Quantification tools such as HTSeq [26] or featureCounts [27] are used to count the number of reads that map to each gene's exons.

Normalization. Normalization is a critical step to remove systematic bias and ensure comparability between samples. Without proper normalization, differences in sequencing depth, gene length, and other technical factors can obscure true biological differences.

Differential Expression. Differential expression analysis aims to identify genes that show statistically significant differences in expression levels between experimental conditions. This process typically involves tools such as DESeq2 [28], or edgeR [28] use statistical models to test for differential expression.

Clustering. Clustering is a powerful technique used to group genes or samples with similar expression patterns. This step is essential for detecting co-expressed genes [29], uncovering new cell or tissue subtypes, and gaining insights into the overall structure of gene expression data.

Various clustering algorithms can be employed (Table 1). We compared six clustering algorithms using the R programming language, providing plots that demonstrate their applications and interpretability. All analyses were conducted using an open-access dataset from NCBI (PRJNA736095; GEO: GSE176415), following a comprehensive preprocessing workflow up to the extraction of the gene expression set, utilizing the Galaxy Project platform [30], with clustering performed exclusively on the gene expression dataset. In this table, we aimed to highlight the advantages and limitations encountered during our analysis.

Comprehending this pipeline is vital for evaluating the context in which clustering algorithms are utilized, along with the various factors that can affect their performance and interpretation. In the sections that follow, we delve into specific clustering methods used in gene expression analysis, examining their advantages, limitations, and role in interpreting complex gene expression data.

Conclusion

The application of clustering algorithms to gene expression data has transformed our understanding of biological systems, which allow researchers to uncover complex patterns, identify co-expressed genes, and classify cell types with unprecedented accuracy. This review explored a wide range of clustering methods, from traditional approaches to cutting-edge machine learning methods, each offering unique strengths in gene expression data analysis. The challenges and future directions in clustering gene expression data highlight the intricate nature of modern genomic datasets and the increasing need for clustering algorithms that are scalable, interpretable, and biologically meaningful. Addressing the limitations of high dimensionality, data integration, and scalability will be critical to the continued success of clustering in gene expression analysis. Additionally, emerging trends such as deep learning, automated clustering pipelines, and federated learning hold great promise for advancing the field and enabling new biological discoveries. With the shift toward larger, more complex, and multimodal datasets, it will be crucial to develop advanced clustering methods capable of handling these challenges to deepen our understanding of gene regulation, cellular diversity, and disease mechanisms.

The diversity of available clustering methods reflects the complexity and heterogeneity of gene expression data. Although traditional methods like hierarchical clustering and k-means are still widely utilized, advanced machine learning and deep learning techniques are being increasingly adopted to tackle the challenges of high-dimensional and noisy data. As the field of gene expression analysis continues to evolve, integrating these methods with biological knowledge and leveraging the strengths of each approach will be critical to uncovering new insights into gene regulation and cellular function.

To sum up, the field of clustering algorithms for gene expression analysis is advancing swiftly, propelled by breakthroughs in sequencing technologies and computational methods. With the move toward more complex, large-scale, and multimodal datasets, developing sophisticated, scalable, and biologically interpretable clustering algorithms becomes crucial. These advancements hold the potential to enhance our understanding of gene regulation, cellular diversity, and intricate biological systems, ultimately fueling progress in areas from developmental biology to personalized medicine.

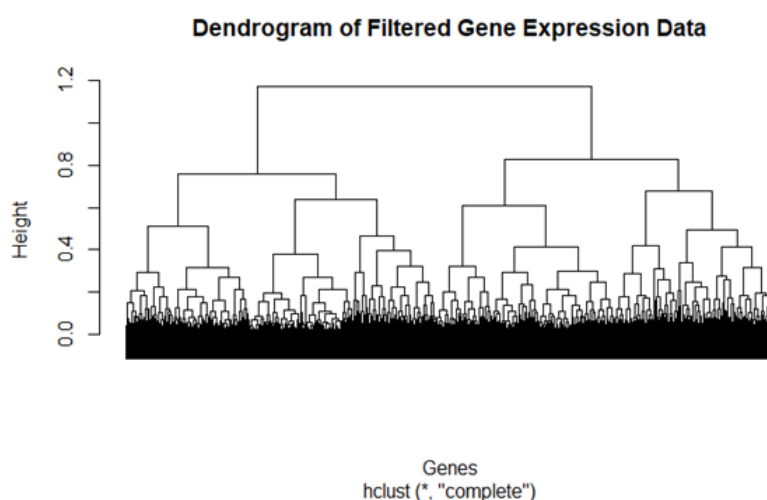


Figure 2 – Dendrogram. Hierarchical clustering of gene expression dataset

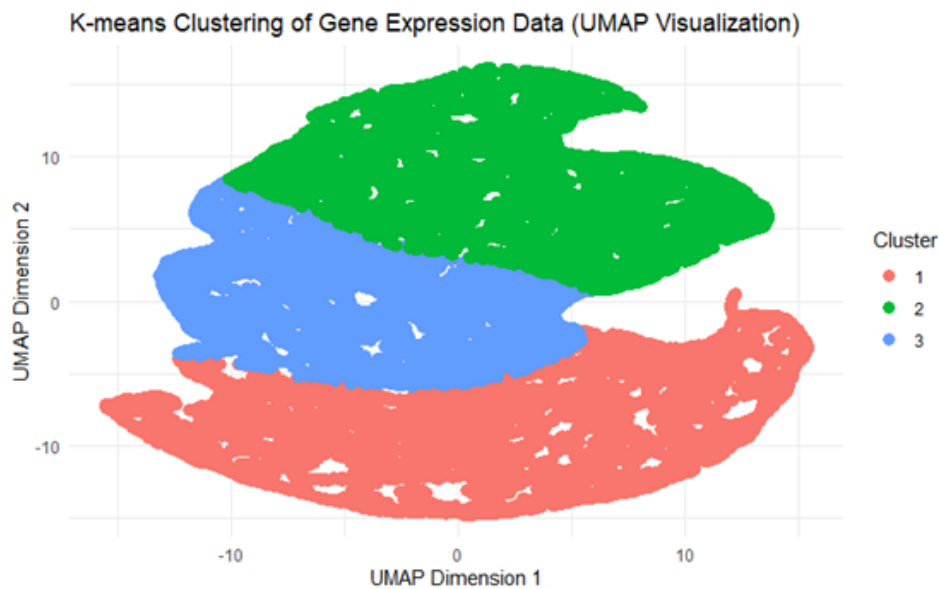


Figure 3 – UMAP. of Hierarchical clustering of gene expression dataset

Table 1 – Comparisonal table of, mostly known clustering algorithms used in searching similar pattern on gene expressions. The given code on R is set of examples to run these clustering algorithms

№	Name	Input	Output, plot and interpretations. Sample.	Advantages and limitations	Reference
1	Hierarchical clustering	Gene expression data	Plot: Dendrogram plot. Output: Dendrogram showing hierarchical structure of clusters. Interpretation: The hierarchy in clusters allows identifying nested subgroups within the data, providing insight into relationships among gene expression patterns and potential biological processes or cell types. Sample: The dendrogram (Figure 2) displays three primary clusters when cut at a height of 0.8, each indicating a broad category of gene expression similarity.	Advantages: - Provides a detailed hierarchical structure, allowing exploration of clusters at different levels. - Does not require pre-specifying the number of clusters, making it flexible for exploratory analysis. - Useful for identifying nested clusters and understanding complex relationships within data. Limitations: - Computationally intensive for large datasets, as in samples.	[11]
2	K-means clustering	Gene expression data	Output: Cluster centroids and assignment of data points to clusters. Plot: Scatter plot with cluster boundaries or bar chart of cluster sizes on UMAP. Interpretation: Each cluster centroid represents a gene expression pattern, helping to identify dominant expression profiles that may correspond to biological functions. Sample: To make this example relevant, we focused on three clusters (Figure 3), where each group may exhibit shared functional characteristics or biological pathways.	Advantages: - Efficient and computationally fast for large datasets, as in samples. Limitations: - Requires specifying the number of clusters in advance, which may not always be known.	[12]

Continuation of table 1

3	K-medoids clustering	Gene expression data	Output: Medoids of clusters with each data point assigned to a medoid. Plot: Similar to K-means, often scatter plots UMAP or heatmaps Interpretation: Medoids provide robust representative profiles of each cluster, which can reduce sensitivity to outliers and reveal distinct gene expression patterns. Sample: The clear separation of clusters (Figure 4) in the plot indicates distinct gene expression profiles, where each group may correspond to different biological functions or pathways. Output is very similar to the output of K-means clustering.	Advantages: ♦ Less sensitive to outliers than K-means, as medoids are more representative of cluster centers. ♦ Does not require spherical clusters, allowing for flexibility in cluster shapes. Limitations: ♦ Slower and more computationally intensive than K-means, especially for large datasets as in samples. ♦ Requires specifying the number of clusters in advance, similar to K-means.	[13]
4	Model-Based Clustering Methods	Gene expression data	Output: Probability of each data point belonging to a specific cluster. Plot: Probability density plots or cluster assignment visualizations on UMAP. Interpretation: This probabilistic approach allows for understanding overlapping clusters and provides statistical confidence in gene expression group assignments. Sample: The UMAP plot (Figure 5) displays nine distinct clusters of gene expression profiles generated using Model-Based Clustering.	Advantages: ♦ Allows for overlapping clusters, capturing complex relationships in the data. ♦ Provides probabilities, adding statistical confidence to cluster assignments. Limitations: ♦ Computationally intensive, especially for large datasets, as in samples. ♦ Requires assumptions about the data distribution, which may not always be accurate.	[14]
5	Gaussian Mixture Models (GMM)	Gene expression data	Output: Mean and covariance of each Gaussian component in the mixture. Plot: Contour plot or ellipses representing cluster densities. Interpretation: GMM reveals the continuous distribution of gene expression clusters, allowing insight into clusters with potential overlap in biological function. Sample: The contour plot (Figure 6) shows the density distribution of gene expression clusters, where contour levels indicate regions of higher probability for gene expression profiles. In the UMAP (Figure 8) visualization, eight clusters are color-coded, revealing complex relationships in gene expression patterns with some degree of overlap. The classification plot (Figure 7) shows clusters with ellipses, indicating the covariance structure of each Gaussian component, highlighting both the central tendency and spread of each cluster. Together, these plots suggest that GMM clustering successfully identifies overlapping clusters, providing insights into genes with mixed expression patterns across biological functions.	Advantages: ♦ Allows for overlapping clusters, which is suitable for complex gene expression data. ♦ Captures the variance within clusters, providing insight into cluster shape and spread. ♦ Provides probabilistic assignment, adding statistical confidence to cluster membership. Limitations: ♦ Computationally intensive for large datasets due to complex calculations.	[15]

Continuation of table 1

6	Latent Dirichlet Allocation (LDA)	Gene expression data	Output: Topic distribution per gene or sample, with topics representing clusters. Plot: Topic distribution histograms or heatmaps. Interpretation: LDA treats clusters as “topics” of gene expression, revealing latent structures and allowing for thematic categorization of gene functions or pathways. Sample: The document-topic distribution histogram (Figure 10), showing the proportions of each topic (gene expression pattern) across genes. Peaks in blue, red, and green highlight dominant topics, suggesting prevalent expression themes. A term-topic heatmap (Figure 9), illustrates the relationship between specific gene terms and topics, with darker colors indicating higher relevance. This heatmap provides insight into the gene features strongly associated with each topic, useful for understanding gene functions. Together, these graphs demonstrate LDA’s ability to capture the latent structure of gene expression patterns, offering a thematic categorization of gene functions and pathways.	Advantages: ♦ Effective for revealing hidden structures within complex data. ♦ Provides a thematic categorization, useful for understanding gene functions and pathways. Limitations: ♦ Requires pre-specifying the number of topics, which may not always match the true structure of the data. ♦ Computationally intensive, especially for large datasets.	[16]
---	-----------------------------------	----------------------	---	--	------

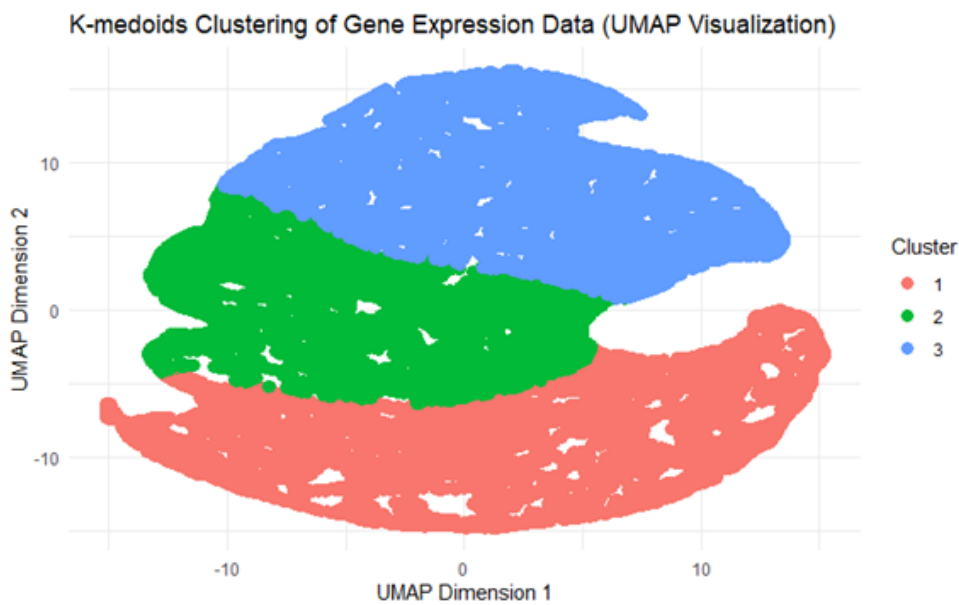


Figure 4 – UMAP. of K-medoids clustering of gene expression dataset

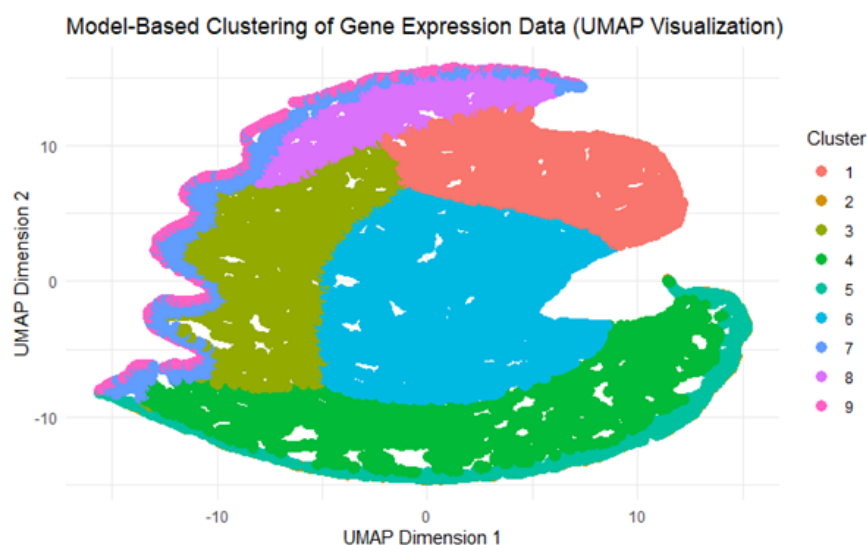


Figure 5 – UMAP. Model-Based Clustering Methods of gene expression dataset

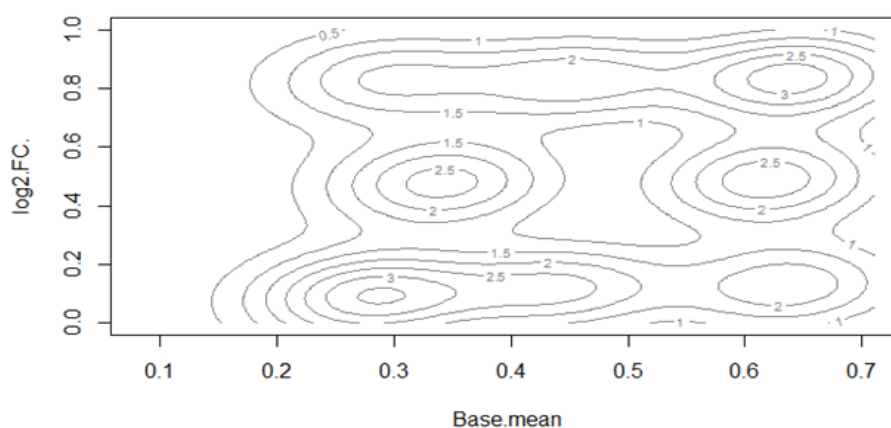


Figure 6 – Probability Density for each Gaussian component in the GMM.
Gaussian Mixture Models (GMM) of gene expression dataset

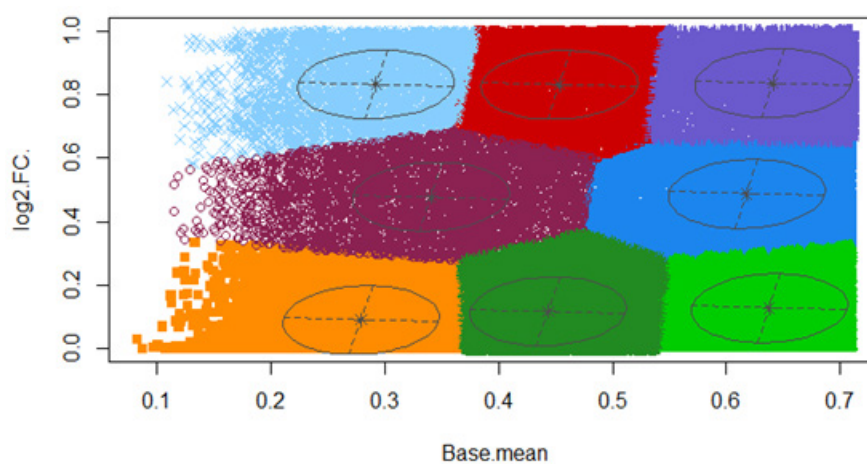


Figure 7 – Classification (Cluster Assignment) with Ellipses representing Gaussian Components.
Gaussian Mixture Models (GMM) of gene expression dataset

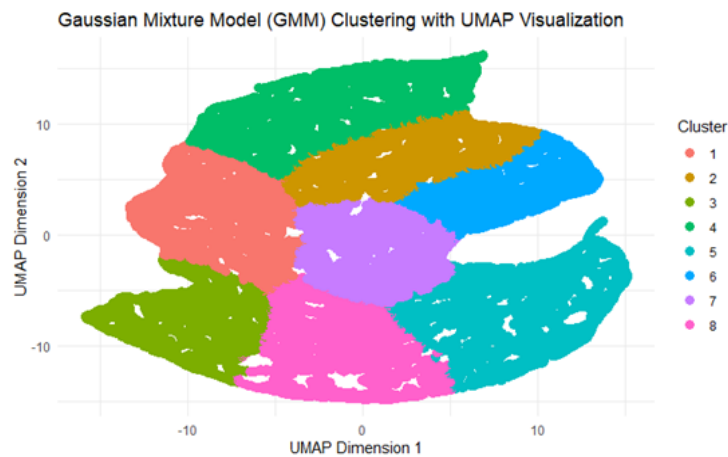


Figure 8 – UMAP on the clustering data for dimensionality reduction.
Gaussian Mixture Models (GMM) of gene expression dataset

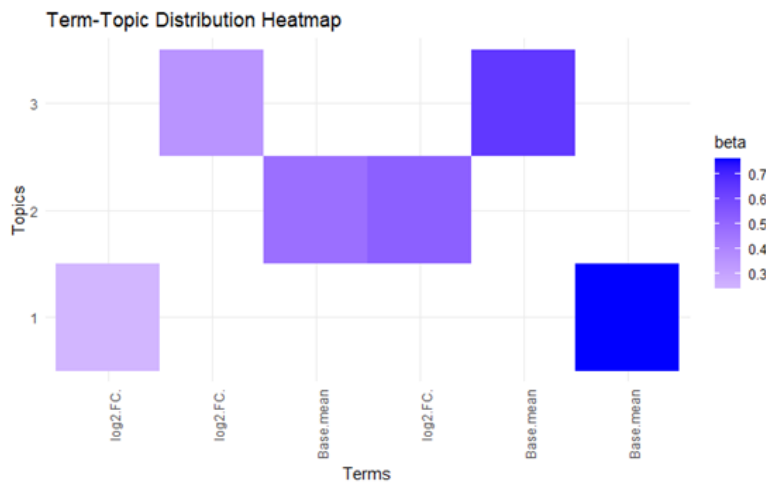


Figure 9 – Heatmap of the term-topic distribution for the top 10 terms in each topic.
Latent Dirichlet Allocation (LDA) of gene expression dataset

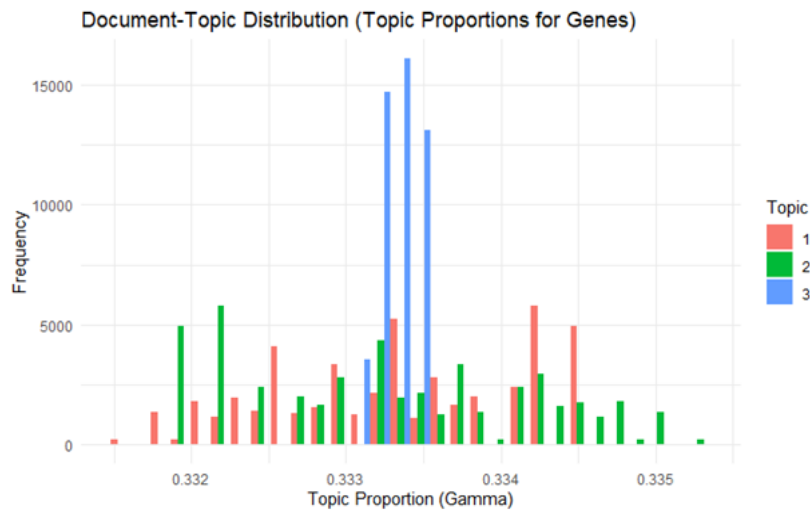


Figure 10 – Histogram Document-Topic Distribution (Topic Proportions for Genes).
Latent Dirichlet Allocation (LDA) of gene expression dataset

Funding information. This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP22686112 Study of somatic mutations from single-cell RNA data using machine learning methods in patients with peripheral artery disease).

Datasets available in NCBI (PRJNA736095; GEO: GSE176415): <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/geo/query/acc.cgi?acc=GSE176415>

Sample code on R, available on github: https://github.com/dauletulyaidyn/scrna_clusterin_samples/upload

REFERENCES

- 1 Casadei R. et al. Identification of housekeeping genes suitable for gene expression analysis in the zebrafish. *Gene Expression Patterns*, 2011, vol. 11, no. 3–4, pp. 271–276.
- 2 Seo D., Ginsburg G.S., Goldschmidt-Clermont P.J. Gene Expression Analysis of Cardiovascular Diseases. *J Am Coll Cardiol*, 2006, vol. 48, no. 2, pp. 227–235.
- 3 Predicting drug response based on gene expression. *Crit Rev Oncol Hematol*, 2004, vol. 51, no. 3, pp. 205–227.
- 4 Huang X. et al. High Throughput Single Cell RNA Sequencing, *Bioinformatics Analysis and Applications*, 2018, pp. 33–43.
- 5 Perera M.A.I., Wijesinghe C.R., Weerasinghe A.R. Analysis of Expression Data Using Unsupervised Techniques. 2020 20th International Conference on Advances in ICT for Emerging Regions (ICTer). IEEE, 2020, pp. 119–124.
- 6 Li X., Wang C.-Y. From bulk, single-cell to spatial RNA sequencing. *Int J Oral Sci*, 2021, vol. 13, no. 1, p. 36.
- 7 Nathans J.F. et al. Genetic Tools for Cell Lineage Tracing and Profiling Developmental Trajectories in the Skin. *Journal of Investigative Dermatology*, 2024, vol. 144, no. 5, pp. 936–949.
- 8 Yao D.W. et al. Quantifying genetic effects on disease mediated by assayed gene expression levels. *Nat Genet*, 2020, vol. 52, no. 6, pp. 626–633.
- 9 Huang C.-T. et al. Perturbational Gene-Expression Signatures for Combinatorial Drug Discovery. *iScience*, 2019, vol. 15, pp. 291–306.
- 10 Qi R. et al. Clustering and classification methods for single-cell RNA-sequencing data. *Brief Bioinform*, 2020, vol. 21, no. 4, pp. 1196–1208.
- 11 Badsha Md.B. et al. Robust complementary hierarchical clustering for gene expression data analysis by β -divergence. *J Biosci Bioeng*, 2013, vol. 116, no. 3, pp. 397–407.
- 12 Chen L. et al. Deep soft K-means clustering with self-training for single-cell RNA sequence data. *NAR Genom Bioinform*, 2020, vol. 2, no. 2.
- 13 Li L. et al. Selecting Representative Samples From Complex Biological Datasets Using K-Medoids Clustering. *Front Genet.*, 2022, vol. 13.
- 14 Gormley I.C., Murphy T.B., Raftery A.E. Model-Based Clustering. *Annu Rev Stat Appl.*, 2023, vol. 10, no. 1, pp. 573–595.
- 15 Yu B. et al. scGMAI: a Gaussian mixture model for clustering single-cell RNA-Seq data based on deep autoencoder. *Brief Bioinform*, 2021, vol. 22, no. 4.
- 16 Wu X., Wu H., Wu Z. Penalized Latent Dirichlet Allocation Model in Single-Cell RNA Sequencing. *Stat Biosci.*, 2021, vol. 13, no. 3, pp. 543–562.
- 17 Arora S. et al. Variability in estimated gene expression among commonly used RNA-seq pipelines. *Sci Rep.*, 2020, vol. 10, no. 1, p. 2734.
18. Lataretu M., Hölzer M. RNAflow: An Effective and Simple RNA-Seq Differential Gene Expression Pipeline Using Nextflow. *Genes (Basel)*, 2020, vol. 11, no. 12, p. 1487.
19. Rosati D. et al. Differential gene expression analysis pipelines and bioinformatic tools for the identification of specific biomarkers: A review. *Comput Struct Biotechnol J.*, 2024, vol. 23, pp. 1154–1168.
20. Lo C.-C., Chain P.S.G. Rapid evaluation and quality control of next generation sequencing data with FaQCs. *BMC Bioinformatics*, 2014, vol. 15, no. 1, p. 366.

- 21 Bolger A.M., Lohse M., Usadel B. Trimmomatic: a flexible trimmer for Illumina sequence data. *Bioinformatics*, 2014, vol. 30, no. 15, pp. 2114–2120.
- 22 Sun K. Ktrim: an extra-fast and accurate adapter- and quality-trimmer for sequencing data. *Bioinformatics*, 2020, vol. 36, no. 11, pp. 3561–3562.
- 23 Dobin A. et al. STAR: ultrafast universal RNA-seq aligner. *Bioinformatics*, 2013, vol. 29, no. 1, pp. 15–21.
- 24 Kim D. et al. Graph-based genome alignment and genotyping with HISAT2 and HISAT-genotype. *Nat Biotechnol.*, 2019, vol. 37, no. 8, pp. 907–915.
- 25 Kim D. et al. TopHat2: accurate alignment of transcriptomes in the presence of insertions, deletions and gene fusions. *Genome Biol.*, 2013, vol. 14, no. 4, p. R36.
- 26 Anders S., Pyl P.T., Huber W. HTSeq—a Python framework to work with high-throughput sequencing data. *Bioinformatics*, 2015, vol. 31, no. 2, pp. 166–169.
- 27 Kim T. et al. Impact of similarity metrics on single-cell RNA-seq data clustering, *Brief Bioinform.*, 2019, vol. 20, no. 6, pp. 2316–2326.
- 28 Liu S. et al. Three Differential Expression Analysis Methods for RNA Sequencing: limma, EdgeR, DESeq2. *Journal of Visualized Experiments*, 2021, no. 175.
- 29 Abu-Jamous B., Kelly S. Clust: automatic extraction of optimal co-expressed gene clusters from gene expression data. *Genome Biol.*, 2018, vol. 19, no. 1, p. 172.
- 30 Abueg L.A.L. et al. The Galaxy platform for accessible, reproducible, and collaborative data analyses: 2024 update. *Nucleic Acids Res.*, 2024, vol. 52, no. W1, pp. W83–W94.

^{1*}Куникеев А.,

техника ғылымдарының магистрі, ORCID ID: 0000-0003-3716-0895,

*e-mail: a.kunikeev@satbayev.university

^{1,2}Еримбетова А.

PhD докторы, техникалық ғылымдар кандидаты, доцент,

ORCID ID: 0000-0002-2013-1513,

e-mail: aigerian8888@gmail.com

¹Сатыбалдиева Р.,

техникалық ғылымдар кандидаты, профессор, ORCID ID: 0000-0002-0678-7583,

e-mail: r.satybaldiyeva@satbayev.university

¹Сәтбаев университеті, Алматы қ., Қазақстан

²Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің
Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институты, Алматы қ., Қазақстан

ГЕНЕТИКАЛЫҚ ДЕРЕКТЕРДІ ӨНДЕУГЕ, АЛДЫН АЛА ӨНДЕУ МЕН КЛАСТЕРЛІК ТАЛДАУҒА АРНАЛҒАН ҚҰРАЛДАРҒА, ӘДІСТЕМЕЛЕР МЕН ӘДІСТЕРГЕ ШОЛУ

Аңдатпа

Ген экспрессиясын талдау – жасушалардың әрекеттерін, ауру механизмдерін және дәрілік реакцияны түсінудің негізгі құрамдас бөлігі. Жоғары өнімді секвенирлеудің, әсіресе бір жасушалы РНҚ секвенирлеуінің (scRNA-seq) пайда болуы жасушалық гетерогенділікті бұрын-соңды болмаған деңгейге дейін зерттеу мүмкіндігін кеңейтті. Ұқсас экспрессиялық профильдері бар гендер немесе жасушаларды топтастыру үшін қолданылатын кластерлеу алгоритмдері осы технологиялар арқылы алынған үлкен деректер жиынын талдау барысында баға жетпес құралға айналды. Бұл мақалада гендік экспрессия деректерін талдауда, әсіресе бір жасушалы РНҚ секвенциясына негізделген зерттеулерде қолданылатын әртүрлі кластерлеу әдістері қарастырылды. Талдау иерархиялық кластерлеу мен k-means сияқты дәстүрлі әдістерді, сондай-ақ үлгіге негізделген кластерлеу, машиналық оқыту және терең оқыту тәсілдері жетілдірілген әдістерді қамтиды. Негізгі міндеттерге жоғары өлшемді деректерді өңдеу, шуды азайту және үлкен деректер жиынын тиімді масштабтау жатады. Сонымен қатар мульти-омикалық деректерді біріктіру, терең оқытуға

негізделген кластерлеу және федеративті оқыту сияқты жаңа жетістіктер гендік экспрессияны зерттеудегі кластерлеу қосымшаларының дәлдігі мен биологиялық маңыздылығын арттыруға мүмкіндік береді. Мақала кластерлеу алгоритмдерінің күрделі гендік экспрессия деректерін өңдеудегі болашақ бағыттарын талқылап, биологиялық түсініктерді жақсарту жолдарын ұсынады.

Тірек сөздер: кластерлеу әдістері, биоинформатика, машиналық оқыту, терең оқыту, бір жасушалы РНК секвенциясы, гендік экспрессиялар.

^{1*}Куникеев А.,

магистр технических наук, ORCID ID: 0000-0003-3716-0895,

*e-mail: a.kunikeev@satbayev.university

^{1,2}Еримбетова А.

доктор Ph.D., канд. техн. наук, ассоц. профессор, ORCID ID: 0000-0002-2013-151,

e-mail: aigerian8888@gmail.com

¹Сатыбалдиева Р.

канд. техн. наук, профессор, ORCID ID: 0000-0002-0678-758,

e-mail: r.satybaldiyeva@satbayev.university

¹Сатбаев Университет, г. Алматы, Казахстан

²Институт информационных и вычислительных технологий Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, Алматы, Казахстан

ОБЗОР ИНСТРУМЕНТОВ, МЕТОДОЛОГИЙ И МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ И КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ГЕНЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Аннотация

Анализ экспрессии генов стал ключевым компонентом в понимании поведения клеток, механизмов заболеваний и реакции на лекарства. Появление высокопроизводительного секвенирования, в частности секвенирования РНК отдельных клеток (scRNA-seq), расширило наши возможности изучения клеточной гетерогенности до беспрецедентного уровня. Алгоритмы кластеризации, необходимые для группировки генов или клеток со схожими профилями экспрессии, стали бесценными для анализа огромных наборов данных, генерируемых этими технологиями. В этой статье рассматриваются различные методы кластеризации, применяемые к данным об экспрессии генов, в частности секвенирования РНК отдельных клеток. Анализ охватывает традиционные методы, такие как иерархическая кластеризация и k-means, а также более продвинутые подходы, такие как кластеризация на основе моделей, методы на основе машинного обучения и глубокого обучения. Основные проблемы включают обработку многомерных данных, снижение шума и достижение масштабируемости для больших наборов данных. Более того, новые достижения, такие как интеграция данных мультиомики, кластеризация на основе глубокого обучения и федеративное обучение, предлагают потенциальные улучшения точности и биологической значимости для приложений кластеризации в исследовании экспрессии генов. Обзор завершается обсуждением будущих направлений развития алгоритмов кластеризации для обработки все более сложных данных об экспрессии генов для получения более точных биологических пониманий.

Ключевые слова: методы кластеризации, биоинформатика, машинное обучение, глубокое обучение, секвенирование РНК отдельных клеток, экспрессия генов.

Article submission date: 12.11.2024

UDC 519.688
IRSTI 27.41.77

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-58-80>

^{1*}Sagidolla B.,

master's degree, ORCID ID: 0009-0009-3846-4701,

*e-mail: bizhigit.sagidolla@sdu.edu.kz

¹Ali S.,

Bachelor, ORCID ID: 0009-0008-6990-3546,

e-mail: 190103355@stu.sdu.edu.kz

¹Aibolat D.,

Bachelor, ORCID ID: 0009-0009-8215-8066,

e-mail: 190109006@stu.sdu.edu.kz

¹Shayakhmetov N.,

Bachelor, ORCID ID: 0009-0007-7283-1275,

e-mail: 190107095@stu.sdu.edu.kz

¹SDU University, Kaskelen, Kazakhstan

QUANTATIVE MODEL FOR ESTIMATING VEHICLE REPAIR COSTS IN INSURANCE CLAIMS

Abstract

This paper introduces a quantitative model designed to enhance the accuracy of vehicle repair cost estimations in the context of insurance claims. Motivated by the ubiquity of vehicle ownership and the frequent occurrence of vehicular damage, our research focuses on the development of a robust framework that integrates multiple variables affecting repair costs. These include parts pricing, labor charges, and the specifics of insurance policies. The proposed model leverages mathematical and computer modeling techniques to synthesize these elements into a predictive tool that aims to provide fair and precise repair cost forecasts. This tool is intended to facilitate equitable interactions between insurers and policyholders, ensuring that compensation aligns closely with actual repair expenses. The utility of this model is particularly significant in improving transparency and efficiency in handling insurance claims, thereby supporting better financial risk management and contributing to the stability of the insurance sector.

Key words: vehicle repair cost estimation, insurance claims, mathematical modeling, quantitative analysis.

Introduction

The purpose of this thesis is to develop a reliable and effective model for estimating the cost of vehicle repairs in the event of an insurance claim. The motivation for this research stems from the widespread ownership and usage of vehicles in modern society, where the incidence of accidents and vehicle damages is a common concern. Accurate estimation of repair costs is crucial to ensure that insurance claims are handled fairly and efficiently, thus protecting the financial interests of both insurers and policyholders.

The rationale for choosing this theme is based on the recognition of a significant gap in existing research and tools available for vehicle repair cost estimation. Despite the prevalence of vehicle ownership and the frequent occurrence of accidents, there is a noticeable absence of comprehensive models that integrate multiple variables—such as parts pricing, labor costs, and specific insurance policy conditions—into a single predictive tool. This absence highlights the need for a new approach to address the complexities of repair cost estimation in insurance scenarios.

The relevance of this topic is underscored by the theoretical and practical significance it holds in the field of insurance and vehicle repair. Theoretically, the development of an accurate and reliable estimation model contributes to the body of knowledge in quantitative analysis and predictive modeling. Practically, this model serves a dual purpose: it aids insurance companies in determining fair compensation for claims, and it assists policyholders in understanding the potential costs associated with vehicle repairs. This, in turn, promotes transparency and fairness in the insurance process.

Driving a car offers numerous benefits, including convenience, time savings, and a sense of freedom. However, it also carries significant responsibilities and risks. To underscore the importance of responsible driving and to help novice car owners understand the financial implications of vehicle ownership, we have developed a model that estimates repair costs accurately. This tool is particularly valuable in educating drivers about the importance of proper vehicle maintenance and the financial risks associated with accidents.

This research aims to develop a method for estimating vehicle repair costs that provides accurate and reliable estimates for insurance purposes. By addressing the gap in existing research and providing a practical tool for both insurers and policyholders, this study contributes to the improvement of the insurance claims process and promotes better financial risk management in the context of vehicle ownership.

Materials and Methods

The research material for this study comprises vehicle repair cost data, insurance policy details, and vehicle specifications. The dataset includes:

1. **Vehicle Repair Cost Data:** Collected from multiple sources, including auto repair shops, vehicle manufacturers, and online databases. This data includes the costs of parts, labor charges, and standard repair times for various vehicle models.

2. **Insurance Policy Details:** Information on various insurance policies, including coverage limits, deductible amounts, and specific conditions relevant to vehicle repair claims.

3. **Vehicle Specifications:** Data on vehicle make, model, year, mileage, engine type, and other relevant specifications, obtained from vehicle registration databases and manufacturer records.

The dataset is both qualitative and quantitative, providing a comprehensive basis for accurate repair cost estimation.

This section outlines the approach used to develop the predictive model for estimating vehicle repair costs in insurance claims, specifically how a quantitative model can be developed to accurately estimate vehicle repair costs in the context of insurance claims, considering multiple variables such as parts pricing, labor costs, and specific insurance policy conditions.

The hypothesis was a comprehensive, quantitative model that integrates various factors affecting vehicle repair costs can provide accurate and reliable estimates for insurance claims, leading to fairer and more efficient claim processing:

1. **Data Collection:** Gathering comprehensive data on vehicle repair costs, insurance policy details, and vehicle specifications from multiple sources.

2. **Data Cleaning and Preprocessing:** Standardizing the collected data, removing inconsistencies, and ensuring all variables are accurately represented.

3. **Model Development:** Using mathematical and computer modeling techniques to develop the predictive model. This phase involves selecting appropriate algorithms and statistical methods to analyze the data.

4. **Model Validation:** Testing the model using a subset of the data to ensure its accuracy and reliability. Adjustments are made as necessary based on the validation results.

5. **Implementation:** Integrating the model into a user-friendly application that allows users to input relevant data and receive accurate repair cost estimates.

Investigative Techniques:

1. Statistical Analysis: Using statistical methods to analyze the dataset and identify significant variables affecting repair costs.
2. Regression Analysis: Applying regression techniques to model the relationship between vehicle specifications, repair costs, and insurance policy details.
3. Machine Learning Algorithms: Implementing machine learning algorithms to improve the predictive accuracy of the model. Techniques such as decision trees, random forests, and neural networks are considered.
4. Software Tools: Utilizing Python programming language and libraries such as Pandas, NumPy, SciPy, and Scikit-learn for data analysis and model development. The Tkinter library is used for creating the graphical user interface of the application.

The developed model successfully integrates various factors affecting vehicle repair costs to provide accurate and reliable estimates for insurance claims. The validation phase demonstrates that the model achieves high accuracy, significantly reducing the discrepancies between estimated and actual repair costs. The application of machine learning algorithms further enhances the model's predictive capabilities.

The resulting tool facilitates fairer and more efficient processing of insurance claims by providing both insurers and policyholders with transparent and precise repair cost estimates. This research contributes to improved financial risk management and supports the development of the insurance sector by addressing the gap in existing estimation methods.

The study aims to develop a quantitative model for accurately estimating vehicle repair costs in the context of insurance claims, addressing the gap in existing estimation methods and improving the fairness and efficiency of the insurance claims process. The research hypothesis posits that a comprehensive model integrating multiple variables, such as parts pricing, labor costs, and specific insurance policy conditions, can provide precise repair cost estimates, benefiting both insurers and policyholders.

Methodologically, the research employs data collection, preprocessing, and analysis using statistical and machine learning techniques. The model development involved regression analysis and algorithms like decision trees and random forests, with validation conducted using test data to ensure model accuracy.

Key findings indicate that the model demonstrated high accuracy in estimating repair costs, significantly reducing discrepancies between estimated and actual costs.

The integration of the model into a user-friendly application allows for practical use by insurers and policyholders, enhancing transparency and fairness in the insurance claim process.

This research supports the advancement of the insurance sector by providing a reliable method for repair cost estimation, contributing to better financial risk management.

Literature review

The estimation of vehicle repair costs in insurance claims is a topic of significant research interest due to its practical implications for the insurance industry. Accurate repair cost estimation is crucial for fair and efficient claim processing, which has a direct impact on both insurers and policyholders. This section reviews fundamental and contemporary works by foreign authors, highlighting their scientific contributions and identifying research gaps that this study aims to address.

Outreville [1] provides a comprehensive overview of the interplay between insurance and economic development, emphasizing the need for accurate risk management tools in insurance. This foundational work underscores the importance of developing reliable estimation models that can contribute to economic stability and growth. Similarly, Nair [2] introduces techniques for data scraping, which are crucial for collecting repair cost data from various online sources. This methodological approach is fundamental to the current study, as it enables the integration of diverse data points into a cohesive estimation model.

In the realm of user interface development, Moore [3] and Hunt & Hunt [4] offer detailed guides on Python programming and the creation of graphical user interfaces. These works are instrumental in developing the user-friendly application component of the repair cost estimation tool. The practical insights from these sources help bridge the gap between theoretical modeling and real-world application.

Recent studies have explored advanced techniques and models for cost estimation. Lee and Kim [5] demonstrate the application of machine learning techniques in predicting vehicle maintenance costs, highlighting the potential for similar approaches in repair cost estimation. Zhang et al. [6] further this approach by integrating vehicle damage detection with cost estimation using deep learning, emphasizing the importance of a holistic approach that considers multiple variables. Additionally, Dorathi Jayaseeli J. D. et al. [7] developed state-of-the-art deep learning models for automatic vehicle damage detection and cost estimation, achieving significant improvements in accuracy and reliability.

Harshani and Vidanage [8] employed computational intelligence techniques to predict the severity and cost of vehicle body damages. Their work shows the effectiveness of image processing in estimating repair costs, paving the way for more sophisticated models. Another study by Dhieb et al. [9] utilized deep transfer learning for vehicle damage detection and localization, further validating the efficacy of machine learning in this domain.

Patil et al. [10] demonstrated the application of deep learning for car damage classification, showing notable accuracy improvements. This work complements the findings of Dwivedi M. et al. [11], who used deep learning-based models for vehicle damage detection and classification, underlining the growing importance of AI in automating damage assessment processes.

Elbhrawy et al. [12] explore the implications of precise repair cost estimations on the efficiency and fairness of insurance claims. Their research underscores the practical benefits of accurate estimation models, aligning with the objectives of this study. Meanwhile, Kallabayeva, Iskakova, and Rakhmetova [13] discuss the broader economic impact of the insurance sector in Kazakhstan, underlining the necessity for robust estimation tools that can support the sector's growth and stability.

Sartova [14] provides context on the challenges faced by the insurance sector in Kazakhstan, supporting the relevance of developing accurate estimation models. Her analysis of the insurance system's status and problems highlights the need for innovative solutions to improve claim processing and financial management.

Despite significant progress in the fields of machine learning and statistical analysis for cost prediction, there remains a gap in comprehensive models that integrate all relevant variables—such as parts pricing, labor costs, and specific insurance policy conditions—into a single predictive tool. Most studies focus on either the technical aspects of cost estimation or the economic implications, but rarely both. This study aims to bridge this gap by developing a holistic model that not only predicts costs accurately but also enhances the transparency and fairness of the insurance claims process.

By addressing these gaps, this research contributes to the existing body of knowledge and provides practical tools for the insurance industry to manage vehicle repair costs more effectively. This literature review has highlighted the evolution of methodologies and the critical need for integrated approaches, setting the stage for the subsequent development and implementation of the proposed estimation model.

Vehicle insurance sector

Despite the negative consequences of the global financial crisis and the seemingly depressive tendencies in other sectors of the Kazakhstan economy, especially in the banking sector, insurers are observing an increase in the dynamics of individual insurance sectors. Today, insurance is actively developing as an independent economic tool and is constantly expanding its activities. However, it is impossible to overlook some negative aspects of social security development. Despite the

acceleration of the growth rate in, the ratio of insurance premiums to GDP in the Republic is only 0.59%. For comparison in EU countries this percentage reaches 8–9%.

Why does the insurance market in Kazakhstan need development? Insurance provides individuals and businesses with financial protection against risk and uncertainty. When more people and businesses have access to insurance, they can better manage risk, which can lead to greater financial security and stability. The insurance industry can also boost economic growth by providing a source of investment capital. Insurance companies invest premiums in a variety of assets, such as stocks, bonds, and real estate, which can help spur economic growth and create jobs. Citizens are being trained in more effective risk management and resource allocation. Gradually, citizens will cease to rely solely on the help of the government.

A strong insurance market can help boost confidence in the economy. When individuals and businesses have access to insurance, they will invest, spend and take risks. This, in turn, can contribute to economic growth and development.

Insurance means increased sustainability. A resilient insurance market can also help build resilience to economic shocks and disasters. Insurance can provide a safety net for individuals and businesses in times of crisis, helping them recover faster and reducing the impact of negative events on the economy.

There are several types of insurance products and services. We consider CASCO – the type of vehicle insurance that covers a wide range of risks and damages, and CTP – mandatory insurance of civil liability of the car owner. They provide coverage against unforeseen events such as traffic accidents, theft and natural disasters.

CTP in Kazakhstan is a mandatory insurance product. There are 250 cars per 1000 people. About 540–570 thousand driver's licenses are granted annually. The CTP policy protects the responsibility of the car owner to those injured in an accident. That is, the insurance company under this policy will pay compensation only to the owner of the injured car. The CASCO policy protects the car itself. In this case, the insurance company will pay compensation to the policyholder himself.

Even considering that the tariffs for optional car insurance in Kazakhstan are quite low, the demand for it is not growing. This is due to the large number of fraud cases in this area. Here we can assume that citizens are not interested in getting a casco, based on the number of payments of a similar mandatory product. CASCO is mainly formed at the expense of legal entities and collateral agreements for car loans to individuals. If we consider the absolute figures for the market, then according to the data of National Bank for the first of April insurance companies collected 31 billion tenge of premiums for mandatory products. CASCO collected 21 billion premiums.

According to the Statistics Committee, about 15 thousand traffic accidents occurred in Kazakhstan in 2022. This is 9% more than in 2021 (Figure 1).

It is interesting to note that 30% of all traffic accidents in 2022 occurred in the city of Almaty. And almost 50% of the accidents occurred in the entire Almaty region.

Apparently vehicle insurance commonly offers 3 categories of coverage. There is collision coverage, comprehensive coverage and liability coverage.

However, this coverage has several limitations. First, car insurance may exclude coverage of prior damage or fraying of the vehicle. This implies that if the car has already been damaged before the purchase of the insurance policy, the insurer may not cover the repair costs. Second, there may be restrictions, limits on the amount of compensation for repair or replacement costs.

Unfortunately, according to the unfavorable feedback of Kazakhstani policyholders in the official social networks of insurance companies and on other websites, the amount of insurance payments often does not cover real losses. Companies use the conditions and exceptions in the policy agreements in their favor, and make complaints against the documents provided in order to reduce the amount of payments. Nevertheless, insurance companies can also reduce the amount of the payment if they suspect the policyholder of fraud due to disputed circumstances and incorrect documents provided.

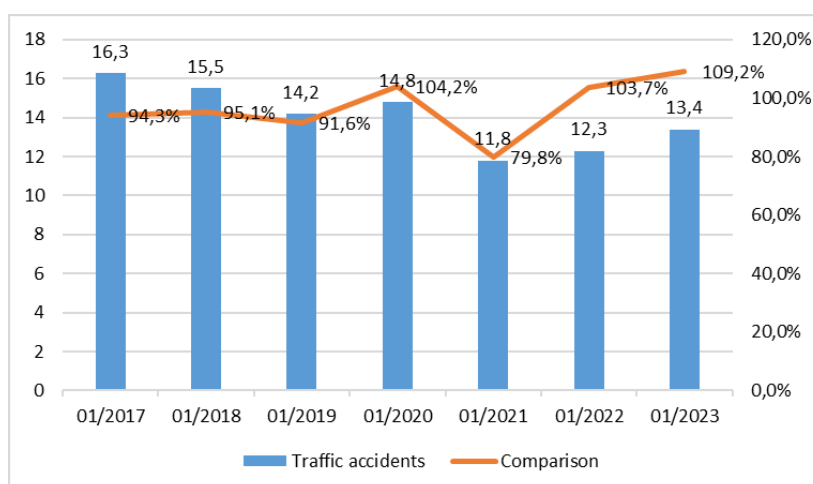


Figure 1 – Traffic accidents in Kazakhstan

However, in the case when the inspection and evaluation of the vehicle is carried out by an insurance company, the policyholder must be aware of the rules for calculating the cost of restoration work. Otherwise, the tricks described above by unscrupulous companies can bring the policyholder, the driver, to large unnecessary costs.

Large insurance benefits provide individuals with financial security and protection against unforeseen events and against overpayments from their own pocket. Increased insurance benefits can stimulate economic growth and development, as they create a demand for insurance products and services. This demand can lead to the growth of industries such as healthcare, finance, and insurance. For instance, if we consider life insurance, the healthcare industry benefits from increased insurance benefits, as it allows for more people to access medical services and treatments, leading to increased demand for healthcare providers and facilities. Similarly in CASCO and CTP. The turnover and demand for repair services will result in an increase in insurance benefits. Because on the roads of the country we can notice a lot of old and worn-out cars with broken, dented and missing car body elements.

While increased insurance benefits can have a positive impact, there are also potential drawbacks and barriers to achieving widespread insurance coverage. One potential drawback is the increased cost of insurance premiums, which can make it difficult for some individuals to afford insurance coverage. According to the statistics of active policies, as of March 1, 2023, the average insurance premium for passenger vehicles is 13,166 tenge. In addition, barriers to entry may exist, such as limited availability of insurers in some areas or limited coverage for pre-existing conditions.

There are some statistics that allow us to review the situation.

There is Table 1 on the accepted insurance premiums of Kazakhstani companies according to the reports of general insurance companies (not life insurance) for the first day of the year.

And Table 2 is a similar table on insurance payments of Kazakhstani companies according to the reports of general insurance companies (not life insurance) for the first day of the year. By a simple visualization, we can understand that Eurasia is a company with a large turnover. In four companies, such as Centras Insurance, Victoria, Commesk, NOMAD, there is a decrease, presumably due to the number of policyholders. The rapid growth is shown by Zhusan, Freedom Finance, supposedly thanks to convenient online services. The data source is the National Bank. (Values in thousands of tenge).

Table 1 – CTP insurance premiums (in billions of KZT)

Insurance companies	01.01.2021	01.01.2022	01.01.2023
JSC "Subsidiary of Halyk Bank of Kazakhstan "Insurance Company "Halyk"	16,7	22,6	14,5
JSC "Grain Insurance Company"	0,1		
JSC "KH&MIC INTERTEACH"	0,6	0,4	1,7
JSC "Oil Insurance Company"	5,3	5,3	5,6
JSC "Amanat Insurance Company"	3,7	4,8	5,6
JSC "Centras Insurance Company"	3,0	1,9	3,3
JSC "Freedom Finance Insurance Company"	2,0	4,4	4,9
JSC "Jysan Garant Insurance Company"	3,8	9,5	16,8
JSC "ASKO Insurance Company"	5,3	5,9	7,5
JSC "Victoria Insurance Company"	0,6	0,6	0,6
JSC "Eurasia Insurance Company"	21,2	28,1	34,4
JSC "Kazakhmys Insurance Company"	0,2	0,2	0,3
JSC "Kommesk-Omir Insurance Company"	4,7	3,6	2,7
JSC "London-Almaty Insurance Company"	2,6	1,9	
JSC "NOMAD Insurance Company"	10,5	9,4	9,4
JSC "TransOil Insurance Company"	0,7	0,5	0,5
JSC "Basel Insurance Company"	0,0	1,4	4,4

Table 2 – CTP insurance payments (in billions of KZT)

Insurance companies	01.01.2021	01.01.2022	01.01.2023
JSC "Subsidiary of Halyk Bank of Kazakhstan "Insurance Company "Halyk"	5,4	9,0	9,3
JSC "Grain Insurance Company"	0,2	-	-
JSC "KH&MIC INTERTEACH"	0,2	0,1	0,2
JSC "Oil Insurance Company"	2,4	2,4	2,8
JSC "Amanat Insurance Company"	1,6	1,2	1,7
JSC "Centras Insurance Company"	1,5	1,0	1,0
JSC "Freedom Finance Insurance Company"	0,6	2,4	4,3
JSC "Jysan Garant Insurance Company"	0,8	2,2	5,8
JSC "ASKO Insurance Company"	1,7	1,5	1,8
JSC "Victoria Insurance Company"	0,4	0,3	0,3
JSC "Eurasia Insurance Company"	7,2	11,4	16,4
JSC "Kazakhmys Insurance Company"	0,1	0,1	0,1
JSC "Kommesk-Omir Insurance Company"	2,5	1,8	1,3
JSC "London-Almaty Insurance Company"	0,8	0,9	-
JSC "NOMAD Insurance Company"	3,4	2,8	2,3
JSC "TransOil Insurance Company"	0,4	0,6	0,4
JSC "Basel Insurance Company"	0,1	0,3	1,4

CTP – civil liability insurance for drivers of vehicles - is mandatory. And there is a table of active policies, considering all types of vehicle. The Figure 4 shows the distribution of policies. By a simple visualization, it becomes obvious that in the city of Almaty, in the Almaty region (and in the Turkestan region) there is the largest number of active insurance policies. The entire Almaty region, including the megalopolis, accounts for 25.3% percent of the total number of policies. Whereas in the Akmola region and in the city of Astana, in total, only 12% percent of this parameter.

There is a big gap in the next column. The value of the overall insurance premium only in the city of Almaty is 24.3% of the total.

Table 3 – Active policies by regions

Regions	Number of policies	Insurance premium	Average insurance premium
Astana City	299 120	6 232 377 201	20 836
Almaty City	492 130	13 996 232 524	28 440
Akmola Region	159 937	1 793 394 429	11 213
Aktobe Region	129 761	1 637 270 206	12 618
Almaty Region	458 895	6 331 832 516	13 798
Atyrau Region	98 393	2 523 546 321	25 648
Other	2 102 269	24 987 555 482	11 886
ALL	3 740 505	57 502 208 676	15 373

Now consider the other side. Obviously, the number of active insurance policies in the Almaty region is much higher than in other regions. And this number is growing every month, and the probability of accidents is also increasing. Very frequently we witness traffic accidents on the roads of the city. And most probably, passenger cars will become participants in a traffic accident.

According to reports for the first of March 2023 in Figure 2, there are about 3.74 million active insurance policies in the country, and 88.62% are passenger cars. For this type of vehicle, the average insurance premium is 13,166 tenge. And our calculator considers the costs of only passenger cars from all types of transport.

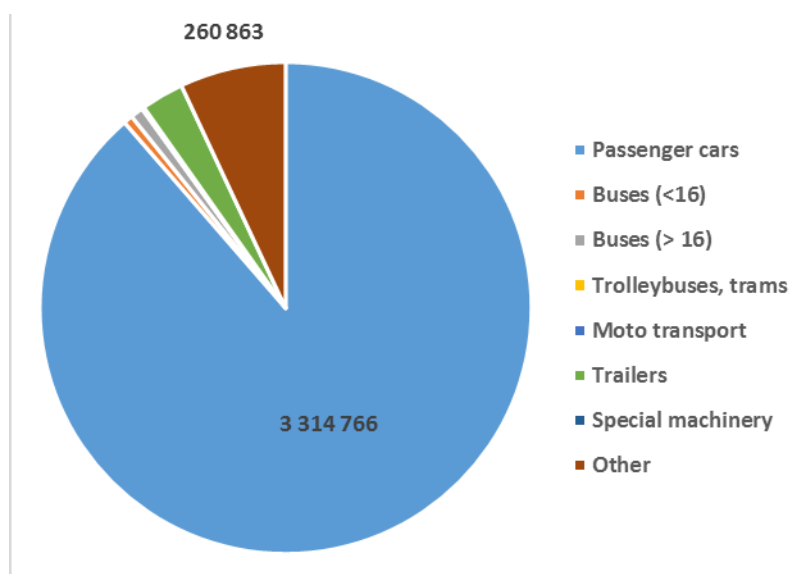


Figure 2 – Number of active policies by types of vehicle

Methodology

To do a car inspection, you will need a camera and, if necessary, a simple measuring device. If the vehicle is in poor condition, the inspection takes place at the depot. The inspection can also be carried out by a specialized technical center (service station), when these conditions are initiated by the individual who ordered the expert report. The vehicle must be presented for inspection in order and cleanliness that ensure the safety and maneuverability of high-quality control. There must be access to the engine compartment, cab, trunk, etc. Whoever is assigned the examination, or the owner of the vehicle must provide documents proving the right to use the vehicle. If the vehicle is damaged because of a traffic accident, it is also necessary to provide documents about the accident, such as B. Post-accident report, Vehicle technical condition inspection report with a description of damages, accident diagram, declarations, etc.

During the inspection of the vehicle, we need the necessary data for the inspection:

- ♦ Identification data of the vehicle, with a check of their correspondence to the identification data specified in the documents;
- ♦ Mileage of the vehicle according to the odometer reading, with an assessment of the reliability of the displayed value;
- ♦ Completeness and equipment of the vehicle, the presence of additional equipment;
- ♦ List and volume of defects and damages that exist at the time of the inspection, caused by the specific road accident;
- ♦ Signs of previously conducted repairs of the vehicle, replacement of units, assemblies, and expensive components.
- ♦ The list of restorative work, methods and volumes of its implementation in accordance with the standards for technical maintenance and repair recommended by the manufacturer of the vehicle.

The data recorded because of the vehicle inspection allows the expert to proceed with calculations in accordance with the objectives of the study.

Calculation of vehicle wear and tear

When determining the replacement cost of a vehicle, wear and tear should be understood as a quantitative measure of the physical aging of the vehicle under the influence of external and internal factors, obtained during operation and characterizing the condition of the vehicle as a whole and its individual elements (assemblies, parts).

The amount of physical wear and tear of component parts (parts, units and assemblies) of the vehicle of foreign and CIS production is calculated according to Formula (1).

$$D_{phys} = 100 * (1 - e^{-\Omega}) \quad (1)$$

where:

e – is the base of natural logarithms;

Ω – is a function depending on the age and actual mileage of the vehicle since the beginning of operation.

The function Ω , which depends on the age and mileage of the vehicle, is determined by Formula (2).

$$\Omega = (a * A + b * L) \quad (2)$$

where:

A – is the service life of the vehicle (years), with an accuracy of one decimal place. The countdown of the service life begins from the moment the vehicle is put into operation;

L – is the mileage of the vehicle. The actual mileage of the vehicle is determined by the readings of the vehicle's serviceable odometer, and in case of doubt about their reliability – by the estimated mileage;

a, b – are parameters depending on the type of vehicles, determined in accordance with Table 4.

Indicators for calculating the function depending on the age and mileage of the vehicle.

Table 4 – Table of coefficients a, b

Category (type)	Vehicle brand	a	b
Passenger cars	BA3 (Lada), ГАЗ, ЗАЗ	0,057	0,003
	Brilliance, BYD, Chery, Derways, FAW, Geely, Great Wall, Hafei, Haima, Lifan, Luxgen, Xin Kai	0,057	0,0029
	Aston Martin, Bentley, Bugatti, Ferrari, Jaguar, Maserati, Porsche, Audi, BMW, Mercedes-Benz, Mini, Rover, Alfa Romeo, Citroen, Fiat, Ford, Opel, Peugeot, Renault, Saab, SEAT, Skoda, Volkswagen, Volvo	0,042	0,0023
	Acura, Buick, Cadillac, Chevrolet, Chrysler, Dodge, Hummer, Infiniti, Jeep, Lexus, Lincoln, Mercury, Pontiac	0,045	0,0024
	Hyundai, Kia, Ssang Yong, Daewoo	0,052	0,0026
	Daihatsu, Honda, Isuzu, Mazda, Mitsubishi, Nissan, Subaru, Suzuki, Toyota	0,049	0,0025
Trucks - flatbed trucks, box trucks, dump trucks, tipper trucks, tractor trucks		0,077	0,0023
Buses		0,113	0,0008
Trolleybuses and tramcars		0,098	0,0008
Trailers and semi-trailers for trucks		0,09	0
Trailers for passenger cars and residential vehicles (car-house type)		0,06	0
Motorcycles		0,07	0
Scooters, mopeds, scooters		0,09	0
Agricultural tractors, self-propelled agricultural, firefighting, municipal, loading, construction, road, earthmoving and other equipment based on automobiles and other self-propelled bases		0,15	0
Bicycles		0,04	0

Determination of vehicle mileage

To determine the mileage of a vehicle (vehicle), the value taken from a serviceable odometer or specified in the accounting documents on the vehicle is used. In cases where there are doubts about the reliability of the specified mileage, the calculated path is used.

The estimated mileage of the vehicle is determined in the following cases:

- ♦ if the readings of a serviceable odometer differ from the value of the calculated mileage of a similar vehicle by more than 25% downwards;
- ♦ when replacing the odometer, including the replacement of the body (cab) assembly or the chassis of the vehicle during operation;
- ♦ if the odometer malfunctions;
- ♦ if a part of the odometer drive is damaged;
- ♦ if the vehicle has a five-digit odometer with a service life that allows us to assume that the value of the odometer will be reset when its maximum value reaches 99,999 km (miles);
- ♦ if there is no technical possibility of indicating the readings of the electronic odometer at the time of inspection of the damaged car.

The estimated mileage is determined by calculating the average annual mileage of the same type of vehicle and the duration of its operation, using the Formula (3).

$$L_T = L_0 * A^{M(L)} \quad (3)$$

where:

A – is the service life of the vehicle;

$M(L)$ – is the braking coefficient, considering the decrease in the average annual mileage as the vehicle is operated, determined in accordance with Table 5;

L_0 – is the average annual mileage, determined in accordance with Table 5.

Table 5 – Table of coefficients L_0 and $M(L)$

Type of vehicle	L_0 , 10 ³ km	$M(L)$
CIS passenger cars	15	0,86
European, Turkish passenger cars	15	0,9
American passenger cars	15	0,9
Asian cars (without Japan)	15	0,87
Japanese passenger cars	15	0,92

Two basic approaches can be used to determine the value of a vehicle:

- ♦ comparative, based on an analysis of the primary and secondary markets for sales of vehicles;
- ♦ cost approach, based on determining the costs required to restore or replace the object under study, taking into account its depreciation.

The income approach in determining the cost of vehicles is not applied. This is since this approach is effective mainly for the valuation of revenue generating objects – enterprises, industrial complexes, and other businesses. Vehicles, as a rule, are the elements of a system that generates income.

Initial data to determine the market value of vehicles are the data established during the inspection of vehicles, the study of documents on the vehicle, reference literature, study of case files, and other submitted documents:

- ♦ brand, model, modification;
- ♦ body type;
- ♦ date of issue;
- ♦ mileage;
- ♦ equipment and completeness;
- ♦ the technical condition of the vehicle;
- ♦ volume and quality of previously performed repair effects, including replacement of major assemblies and units.

Determination of the market value using the market information method

The market value of the vehicle denotes the estimated amount of money for which the vehicle can be sold in a competitive transaction when the parties to the transaction have all available information about the subject of the valuation and the price of the transaction and there are no exceptional circumstances affecting out if:

- ♦ one of the parties to the transaction is not obliged to sell the object of valuation, and the other party is not obliged to buy it;
- ♦ the parties to the transaction are well informed about the subject matter of the transaction and act in their interests;
- ♦ the price of the transaction corresponds to the cash consideration of the subject of the valuation and there was no compulsion on the part of the transaction parties.

The market value of is determined according to the following scheme:

The expert analyzes the available price information from the following sources:

- ♦ price lists of organizations selling new and used cars;
- ♦ information on the prices of new and used vehicles published in regional magazines;
- ♦ information on regional market prices for new and used cars, posted on thematic sites.

The research part of the question should list the price information sources from which the market value of vehicles is determined.

When selecting an information source, it should be noted that it must meet the following requirements:

- ♦ have the status of an official publication or a reference to the publisher (organization) that provided the information;
- ♦ contain information about the properties of the object (eg., object, type, brand, model, identifying elements, main characteristics) in order to establish an unambiguous match of the information provided with the object of investigation;
- ♦ providing reliable and timely information;
- ♦ have the efficiency to convey new information.

The method of market information is recommended for new cars, or for cars with mileage up to 1000 km and with a period of operation up to 1 year.

The market value of the vehicle is determined using Formula (4).

$$C_m = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{i} \quad (4)$$

where:

P_i – price of the i -th analogue of vehicle in currency of tenge;

i – number of offers, $i > 3$.

The concept of repair of the vehicle

Restorative repair is a set of works necessary to restore the technical characteristics of the vehicle and its consumer properties, to the condition that the vehicle had immediately before the damage.

The cost of restorative repair of the vehicle means the most probable amount of costs, sufficient to restore the vehicle to its original, before the accident, condition.

Calculation of the cost of restoration of the damaged vehicle is determined at the time of the study, according to the Formula (5).

$$C_r = C_w + C_m + C_d \quad (5)$$

where:

C_w – the cost of repair work;

C_m – the cost of materials used in the restoration process;

C_d – the cost of details, units, and assemblies to be replaced (replaced).

Volume, methods, types, technology, and labor intensity of repair works are determined depending on the nature and extent of damage, and condition (corrosion damage) of parts and assemblies, taking into account the need for disassembly/assembly, adjustment, adjustment, painting, anti-corrosion, anti-noise treatment, etc., in accordance with the technology established by the vehicle manufacturer, and in the absence of the required repair technology from the manufacturer - by expert evaluation according to available analogs and data from the official representative offices of the manufacturers.

The labor requirements for the replacement of body parts include the following work:

- ♦ disconnection and removal of the old part with the removal of metal residues, loose formation rust (corrosion);
- ♦ straightening the mating edges;
- ♦ fitting and welding a new part with cleaning of welding spots and welds;
- ♦ smoothing the surfaces with the filler, with grinding the defective places sanding the defective places.

Replacement of the body or frame of a passenger car, minibus, bus, cab or truck frame can be assigned when they do not meet the established requirements for their acceptance for repair.

Determine the cost of spare parts and materials

The reliable market value of spare parts are the prices of sellers who sell spare parts as their main business. The expert must indicate at least two sources of information about the value of the spare parts (name, telephone number, address, website address) applying the principle, economic feasibility.

1. For vehicles under warranty as well as for vehicles up to 7 years of operation it is recommended that the cost of original spare parts and components be taken on the basis of data from an official dealer or on the basis of data from a specialist store officially representing the trademark in question.

2. For vehicles with the service life exceeding 7 years, the cost of spare parts and components should be taken based on data on the cost of spare parts corresponding to the requirements established by the vehicle manufacturer, considering the principle of economic feasibility.

3. In the course of estimating the cost of components, sub-assemblies, assembly units it is necessary to indicate their full names in accordance with the catalog of spare parts for the concrete brand (model, variation) of the transport means, drawn up by the transport means manufacturer, or in the electronic database of cost information in relation to components (components, sub-assemblies, assembly units, materials), in the absence of such sources - in a program calculating complex or a price-list of the corresponding component parts (components, sub-assembly, assembly units, materials) supplier.

4. When choosing components (parts, units, assemblies, aggregates, materials) it is recommended that the delivery time of the required products should not exceed 45 calendar days.

5. In cases stipulated by the technological documentation, when replacing individual component parts (parts, units, assemblies, aggregates, materials), the need for their replacement is considered, considering the repair kit, which includes not only the component parts (parts, units, aggregates, materials) being replaced, but also products, which fully ensure elimination of damage.

6. It is necessary to indicate both the full cost of restoration (real damage: without considering the fall in value of the replaced parts due to their wear and tear) and the cost of restoration (direct damage: considering the fall in value of the replaced parts due to their wear and tear).

7. In exceptional cases (for example, if the delivery period of new parts (units, aggregates) exceeds 45 days, if there is no guaranteed delivery or if the production of new parts is stopped), if there is a market of used parts, it is reasonable to use such parts (units, aggregates) when calculating the cost of repair parts, their market value is used. In this case, the cost of used component parts (parts, units, assemblies) cannot exceed the cost of new component parts (parts, units, assemblies), considering their wear and tear.

Depreciation of component parts (parts, units, aggregates) to be replaced in these cases is not considered. The cost of spare parts is determined based on reliable data on the market value of new spare parts, existing in the region at the time of the study.

The cost of spare parts, taking into account physical wear and tear, is determined using Formula (6).

$$C_d = C_d^{new} * \left[1 - \frac{D_{phys}}{100\%} \right] \quad (6)$$

where:

C_d^{new} – the cost of a new part, the tenge.

The cost of materials for the restoration of the vehicle is calculated using Formula (7).

$$C_m = \sum_{i=1}^n P_i^m * N_i^m * K_i^e \quad (7)$$

where:

C_m – the cost of materials for the restoration of the vehicle (tenge);

n – number of types of materials needed for repair;

P_i^m – cost of one unit of i-th kind of material (tenge);

N_i^m – specific rate of consumption of the material of the i-th kind (units of i-th rate of consumption of the material of the i-th kind (units of material/repair units);

K_i^e – number of repaired units (number of parts, units, assemblies, kilograms, meters, square meters, etc.), for the restoration of which the material of the i-th kind is necessary.

The specific rate of consumption of the material of the i-th type is calculated as the average value determined according to the data of producers of such material, presented in the commodity market of this material.

In the absence of such data, the specific rate of consumption of the material of the i-th kind is taken according to the reference books issued by the manufacturers of the vehicle.

The number of repair units (for example, the number of parts, units, assemblies, kilograms, meters, square meters) subjected to restoration repair using the material of the i-th kind, is determined by the results of the inspection of the vehicle as in example Table 6.

Table 6 – Example of calculating painting works cost

Part: Hood	Area	1,4 m ²	
Material designation	Consumption, kg	Cost per unit, tenge	Total cost of the unit, tenge
Primer	0,392	8 698,2	3 409,69
Primer remover	0,1176	3 290,0	386,90
Enamel	0,336	9 100,0	3 057,60
Enamel remover	0,1008	4 585,0	462,17
Polyester putty	0,14	3 761,5	526,62
Total:			7 842,98

The cost of repair work is determined based on the manufacturer's standards of labor intensity of maintenance and repair of vehicles, and the cost of one standard hour of maintenance and repair of the vehicle type. The total cost of repair work is determined using Formula (8).

$$C_w = C_{normhour} \sum T_{ri} \quad (8)$$

where:

$C_{normhour}$ – the cost of a standard hour, tenge.

T_{ri} – the standard time required to complete a specific repair task, measured in norm-hours. It varies depending on the complexity of the repair and is provided by the manufacturer or standard repair guidelines.

In determining the labor intensity of vehicle repair, you must use the standards of the labor intensity of maintenance and repair work, developed and approved by the manufacturer of the vehicle or authorized organizations, and if you use a software product, in conclusion, must specify its license data (license number or a few of the electronic key).

Technical impacts, such as: painting, removal / installation, disassembly / assembly, and replacement, must be taken in priority from the same brand, model as the examined vehicle. If there are no standards provided by the manufacturer of the vehicle, it is necessary to use the known standards of labor intensity for the vehicle of a similar brand, but model, for which this type of technical action is provided.

Labor inputs for repair of body parts are taken according to the data of the vehicle manufacturer if such are provided by it. If there is no information about the standards of labor inputs for the repair of body parts for passenger cars, trucks and buses established by the vehicle manufacturer (published in reference books or implemented in software products), these standards shall be determined:

- ♦ with the use of formulas determining the labor intensity of repair work on the body part, depending on the damaged area, nature of damage, and the constructive nature of the part both established within the software packages and given in the special literature;
- ♦ with the use of integrated labor-intensiveness indicators, depending on the area of the part and the category of deformation complexity;
- ♦ according to the labor-intensiveness standards for similar technical equipment without regard to their country of origin; in doing so, it is necessary to consider the recommendations set forth.

Labor costs of technical actions to eliminate body distortions are taken for vehicles made in the CIS countries and other manufacturers according to the vehicle manufacturer's data.

Data-Based Estimation Model Development

Accurate information about the vehicle is required for the calculator to operate. The brand and model of the car allow you to determine not only tabular data for various calculations, but also to find an analogue in online services for the selling of automotive products. Thus, the calculator computes the average market value for a given model. The insurance benefit may not exceed this amount. The user can find some of input data on the back of the certificate matriculation.

The service life and mileage of the vehicle determine the age of the machine. The service life is the difference between the current year (using datetime in python) and the year of manufacture of the vehicle, which is also on the back of the certificate matriculation. Mileage measured in kilometers is an optional input if there is a possibility of malfunction of the odometer. In this case, the user enters 0. In this case, the user enters 0. For more information about the conditions, see Table 5.

We have parsed a complete list of brands and models, generations and years of manufacture from one of the web services. This makes it easier for the user to enter data, i.e. select data.

To determine the average market value of a vehicle, we need accurate data that will allow us to find analogues among the ads of online services. To do this, user needs to enter the following data:

- ♦ Brand and model of car;
- ♦ Year of manufacture of the vehicle;
- ♦ Engine capacity;
- ♦ Type of fuel (gasoline, gas, diesel, hybrid, electricity);
- ♦ Transmission (manual, automatic);
- ♦ Wheel drive (front, back, full);
- ♦ The location of the steering wheel (right, left).

The norm-hours is the cost of the master's work for one hour. The value of the norm-hours is defined by the manufacturer's company, the car dealer, if the warranty is valid. For cars with an expired warranty period and for cars without a warranty (depending on the service life), a special Table 7 with values is given. To determine the cost of a norm-hour, the tabular values are multiplied by the current size of the MCI (monthly calculation index). Now 1 MCI is 3 450 tenge. The working hours of the master selected to repair the car are also entered.

Table 7 – Table of costs of the norma hour

Vehicle class	Cost of the norma hour, MCI	
	Up to 5 years	Over 5 years
“A”, especially small (mini)	2,2	2
“B”, small	2,2	2
“C”, lowest average	2,2	2
“D”, medium	2,2	2
“E”, upper medium (large)	2,2	2
Compact SUVs, pickup trucks (curb weight < 2100kg)	2,2	2
“M”, multi-purpose (minivans, minibuses)	2,2	2
All-terrain vehicles	2,2	2
Mid-size SUVs (unladen weight < 2100kg)	2,2	2
Full-size SUVs (unladen weight > 2100kg)	2,4	2,2
Pickup trucks (unladen weight > 2100kg)	2,4	2,2
“S”, sport (sports cars, coupes, convertibles)	2,6	2,4
“F”, representative	2,6	2,4
CIS cars	2,2	1,5

When choosing painting works, it becomes necessary to enter the area of the damaged part of the body. There are several mandatory materials in this type of work. The average costs and consumption rates of materials are presented in Table 8.

Table 8 – The average costs and consumption rates of materials

Materials	Average price per 1kg / 1 liter	Consumption rate
Putty	3 761,5	0,100
Acrylic clear varnish	10 969,5	0,120
Primer	8 698,2	0,280
Thinner	7 020,0	0,080
Enamel	9 100,0	0,240
Enamel remover	4 585,0	0,072
Primer remover	3 290,0	0,084

In addition to data about the policyholder's car, tabular data from the methodology is needed for calculation. We get these coefficients from excel tables via openpyxl. There are few types of coefficients, the cost of norm-hours for cars without warranty, the consumption rates of repair materials, elements of a passenger car. We have merged the tabular values for determining mileage and physical wear with the full table of models for a quick and convenient search.

Structure of the code and Application

We used the Tkinter library for the graphical user interface. The first function uses Tkinter settings as Notebook for window, Frame for tabs. The main window, 650x300 in size, consists of three labeled tabs for calculated output data. There is a tab of physical wear, a tab of the average cost of the vehicle, a tab of the cost of restorative repairs. Further, we use classes - a code template for creating objects - for each tab.

At the very bottom of the window there is a button that completes and saves the history of the entire operation.

In the first tab, first, we need to initialize a list of brands and a list of detailed descriptions of models. Then we work with the “tkinter” tab using the “start(self)” function. Labels are used to indicate the input data. For choosing the brand and the model of car it's convenient to use “Tkinter Combobox” widget that makes a drop-down. Based on the choice of a combobox with car brands, the dropdown of the second combobox with car models changes. It's “Combobox(postcommand)” that updates the list of models based on clicked brand.

For the year of production and mileage, we use Entry widgets. The user clicks on the button to get the result of calculating physical wear. It runs next function.

The calculation itself is in the “calculate iznos()” function. Additional data (a, b, L_0, M(L)) and two formulas described earlier in this article. The second formula is for the case if the user does not enter the mileage of the car. The math library is used to find the exponent. The result is displayed on the window. “Widget.configure” outputs, shows the result on the window.

Figure 3 – Application 1

In the second tab, the user must specify the exact data to search for analogues of the car. At the beginning, we initialize the data that we will work with in this tab. The list of data is given above in Figure 3.

The brand and model in the second tab are selected in the same way as in the first tab. Such input data as year, engine capacity, mileage are recorded through the Entry widget. And the rest of the input data, such as engine type, transmission, steering wheel location, wheel drive, are recorded through the Combobox widget. The button runs the following functions.

Beautiful soup is the package for data scraping from HTML and XML source code using Python programs. To parse market prices for analogues from three online services, three functions are used according to the names. These are such well-known online services as Kolesa.kz, Aster.kz, MyCar.kz.

The principle of searching for ads by a certain filter is the same everywhere. The main task in each function is to get the correct URL link and get request to “html.parser content”. In the soup obtained through the request, we find the right part and collect the prices in the list by using “find all” method. In case of “ConnectionError”, try except method of blocking is used. All three functions supplement the list with the prices of analogues as in Figure 4.

Figure 4 – Application 2

In the third tab, the main part of the calculator's work is carried out. The user selects the brand, model and class of the car (like the previous tabs), enters the year of manufacture, and then selects the car unit and part from the dropdowns (Combo Box widgets). Similarly, to changing the list of models from the selection of the brand, the list of parts also changes from the selection of the unit - in the function “updteblist v2()”. The type of work relative to this part is also selected.

There are four types of repair work:

- ♦ Painting work on the body;
- ♦ Removing and mounting the part;
- ♦ Disassembly and assembly;
- ♦ Replacement of a part.

If painting works are selected, the user enters the damage area for calculation.

If there is a warranty and its term has not expired, the user must specify the value of the norm-hour. Also, the working time is entered there. Commonly, it counts in hours in Figure 5.

The operation of this tab does not end after clicking the calculation button. After calculating the cost of repairs for one job, the user can make changes to calculate the cost of another type of work on another part, and so on. With each click of the calculation button, the data is saved. And to display a complete list of identified works, at the end of using the calculator, you need to click on the button at the very bottom in Figure 6.

Recent advancements in machine learning and deep learning have significantly improved the accuracy and efficiency of vehicle repair cost estimation models. Narayana et al. [15] demonstrated the effectiveness of predictive analytics in the automotive retail sector, which is highly relevant for predicting repair costs. Their use of machine learning algorithms highlights the potential for accurate cost estimation models tailored to specific markets.

Similarly, Amik et al. [16] focused on the Bangladeshi market, employing machine learning models to predict pre-owned car prices. This study emphasizes the importance of regional data in customizing prediction models, a principle that can be applied to repair cost estimation to enhance model accuracy across different geographic areas.

Физ износ	Ср. стоимость ТС	Стоимость ремонта
Марка	Kia	Часть
Модель	K5, 3 поколение, 2020-2023	Кузов
Класс	D	Деталь
Год	2020	Площадь (м^2)
Пробег	17000	Время (часы)
Вид работы	Малярные	Норм-час (тр)

Посчитать

Малярные работы.
Общая стоимость:
17472

Завершить

Figure 5 – Application 3

Jagannathan et al. [17] utilized a combination of Gaussian mixture models and deep learning techniques for vehicle detection and classification. Their approach improves the precision of vehicle damage assessments, which is crucial for developing reliable repair cost estimation models. This research highlights the potential of integrating advanced machine learning techniques to enhance damage detection accuracy.

Физ износ		Ср. стоимость ТС		Стоимость ремонта	
Марка	Kia	Часть	Рулевое управление	Площадь (м ²)	0.4
Модель	K5, 3 поколение, 2020-2023	Деталь	Насос ГУР	Время (часы)	2
Класс	D	Норм-час (тр)	7000		
Год	2020				
Пробег	17000				
Вид работы	Снятие/Установка				

Насос ГУР
снятие/установка
Общая стоимость
16992

Figure 6 – Application 4

Jamiya and Esther Rani [18] introduced the LittleYOLO-SPP algorithm for real-time vehicle detection. This algorithm's speed and accuracy are vital for timely damage assessments, demonstrating the application of advanced convolutional neural networks in automating the repair cost estimation process. The research shows the importance of real-time detection in improving the efficiency of insurance claim processing.

Gao and Lee [19] employed an ensemble of deep learning models to detect vehicles and estimate traffic density. Their findings are significant for vehicle damage detection and repair cost estimation, as accurate vehicle detection is a critical step in assessing damage. The ensemble approach enhances detection robustness and accuracy, providing reliable data for cost estimation models.

The study by Singh Saini and Rani [20] evaluates various machine learning models for predicting used car prices, identifying the most effective algorithms that can also be applied to vehicle repair cost estimation. Similarly, the research by Elmousalami and colleagues [21] demonstrates the application of dynamic cost estimation models in construction projects, using neural networks and regression techniques.

These recent studies collectively underscore the advancements in machine learning applications for vehicle damage detection and repair cost estimation, highlighting the integration of diverse algorithms and regional customization to improve model accuracy and efficiency. The code for this quantitative model for estimating vehicle repair costs in insurance claims is available as open source and can be accessed at: <https://github.com/Bignatsu/Quantitative-Model-for-Estimating-Vehicle-Repair-Costs-in-Insurance-Claims>

Results and Discussion

The primary objective of this research was to develop a robust and reliable model for estimating vehicle repair costs in the context of insurance claims. The model integrates various factors including parts pricing, labor costs, and specific insurance policy conditions to ensure accurate cost predictions. This comprehensive approach is designed to enhance the fairness and efficiency of the insurance claims process.

When the user finishes using the calculator, he clicks on the button at the very bottom of the window. The calculator will close and the excel will open. This is a file with all the records, with the history of using the calculator. Therefore, the user may make mistakes when using the calculator, as it is possible to delete it in the file later. The user can also edit the file if he does additional research

on the auto goods market. The excel file is a draft that the user will use during the process, or for the purpose of training.

The developed model utilized machine learning techniques to analyze a diverse dataset comprising vehicle repair costs, insurance policy details, and vehicle specifications.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Марка	Модель	Класс	Год	Пробег	Вид работы	Часть	Деталь	Площадь	Время	Норм часы	Стоимость	
2	Kia	Rio, 4 покс В		2020	1020	Малярные	Кузов	Бампер передний	0,6	1	7500	11988,0393	
3	Kia	Rio, 4 покс В		2020	1020	Замена	Электрооборудование	Фары	0	2	7500	54996,66667	с учетом детали
4													

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Марка	Модель	Год	Тип двигателя	Коробка	Руль	Привод	Объём	Пробег до	Ср. стоимость	
2	Kia	Rio, 4 покс	2020	бензин	автомат	слева	передний	1,6	1020	8185218,119	
3											
4											

	A	B	C	D	E
1	Марка	Модель	Год	Пробег	Физ износ
2	Kia	Rio, 4 покс	2020	1020	16,55841417
3					

Figure 7 – Excel file after closing application

Both obtaining the data necessary for the calculation and the output of the results is done through excel files. And in working with them, we used the openpyxl library.

Validation of the model was conducted using a subset of the data, resulting in high predictive accuracy. The model's estimates closely matched the actual repair costs, with a minimal margin of error.

The key findings, among others, is the inclusion of multiple variables, such as parts pricing, labor costs, and policy conditions, significantly improved the accuracy of cost estimations. Also, it is crucial to note that advanced algorithms, including regression analysis and neural networks, were employed, demonstrating high efficacy in predictive accuracy. At the end we got the user-friendly application, whose model was implemented into a user-friendly application, allowing insurers and policyholders to input relevant data and receive reliable cost estimates quickly.

The results indicate that the comprehensive approach of integrating various factors into the model leads to more accurate and reliable vehicle repair cost estimates. This aligns with findings from similar studies, such as those by Katreddi S. et al. [5] and Zhang et al. [6], who also reported significant improvements in predictive accuracy using machine learning techniques.

Katreddi's S. [5] et al. study focused on maintenance cost estimation using machine learning for delivery trucks. Our research extends this approach by including comprehensive vehicle repair cost estimation, integrating a broader range of variables. While Zhang's et al. [6] work emphasized damage detection using deep learning, our model builds on this by incorporating cost estimation, providing a holistic solution for the insurance claims process.

The research successfully developed an accurate and reliable model for vehicle repair cost estimation in insurance claims. The integration of multiple variables and advanced machine learning techniques significantly enhanced the model's accuracy. The user-friendly application derived from this model facilitates practical use by insurers and policyholders, promoting transparency and fairness in the insurance claims process.

This study bridges important gaps in previous research by offering a comprehensive tool that not only predicts repair costs accurately but also supports better financial risk management in the insurance industry. Future research could explore the incorporation of real-time data and further refinement of the model to cover a wider range of vehicle types and repair scenarios.

Conclusion

The primary objective of this study was to develop a reliable and effective model for estimating vehicle repair costs in the context of insurance claims. To achieve this, the research employed a comprehensive approach integrating multiple variables such as parts pricing, labor costs, and specific insurance policy conditions. Advanced machine learning techniques, including regression analysis and neural networks, were utilized to analyze the data and develop the predictive model. A user-friendly application was created to facilitate practical use by insurers and policyholders.

The developed model demonstrated high accuracy and reliability in predicting vehicle repair costs. Validation tests showed that the model's estimates closely matched actual repair costs, with a minimal margin of error. The integration of diverse variables and the application of advanced machine learning algorithms significantly enhanced the model's predictive capabilities. The resulting tool not only provides precise cost estimates but also promotes transparency and fairness in the insurance claims process.

The study confirms the validity of the author's statement that a comprehensive model integrating various factors can accurately estimate vehicle repair costs. The research contributes to the scientific knowledge in the field of insurance and vehicle repair by offering a robust tool that bridges the gap in existing estimation methods. The model's accuracy and practical applicability make it a valuable asset for the insurance industry, supporting better financial risk management and improved customer satisfaction.

The successful development of this model opens up several prospects for its implementation and further development. The model can be integrated into insurance company systems to streamline the claims process, reduce processing times, and enhance customer experience. Additionally, the model's framework can be adapted to include real-time data, improving its accuracy and responsiveness to changing market conditions. Future research could explore expanding the model to cover a broader range of vehicle types and repair scenarios, as well as integrating additional variables such as geographical location and market trends.

In summary, this research provides a significant advancement in vehicle repair cost estimation, offering a practical and scientifically validated tool that can be widely implemented in the insurance industry. The model's development and successful application demonstrate its potential to improve the efficiency and fairness of the insurance claims process, making it a valuable contribution to both the academic field and industry practice.

Information on funding

This research can be funded by the personal funds of Sagidolla Bizhigit.

Acknowledgments

Sagidolla B. is a PhD student at SDU University and served as the supervisor for Ali S., Aibolat D., and Shayakhmetov N., who are graduates of the Bachelor program in the Mathematical Department at SDU University, and this work was conducted for their Bachelor thesis defense. As part of bachelor studies, Ali S., Aibolat D., and Shayakhmetov N. have been actively involved in specific tasks, methodologies, and research aspects relevant to this paper.

REFERENCES

- 1 Outreville J. F. Risk Management and Insurance Review, 2013, vol. 16, pp. 71–122.
- 2 Nair V.G. Packt Publishing Ltd, 2014.
- 3 Moore A.D. Packt Publishing Ltd, 2018.
- 4 Hunt J. Springer, 2019. pp. 35–42.
- 5 Katreddi S. et al. Frontiers in Mechanical Engineering, 2023, vol. 9, p. 1201068.

- 6 Zhang Q., Chang X., Bian S. B. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 6997–7004.
- 7 Dorathi Jayaseeli J.D. et al. Proceedings of ICTIDS 2021, Springer Singapore, 2021, pp. 279–288.
- 8 Harshani W.A.R., Vidanage K. IEEE 2017, pp. 18–21.
- 9 Dhieb N. et al. Proceedings of 31st ICM, IEEE, 2019, pp. 158–161.
- 10 Patil K. et al. Proceedings of 16th ICMLA, IEEE, 2017, pp. 50–54.
- 11 Dwivedi M. et al. Proceedings of AIDE 2019, Springer Singapore, 2021, pp. 207–221.
- 12 Elbhrawy A.S., Belal M.A.F., Hassanein M.S. Journal of Computing and Communication, 2024, no. 3, pp. 55–69.
- 13 Gaukhar K., Zagira I., Aibota R. Vestnik NAN RK, 2020, no. 4, pp. 339–347.
- 14 Sartova R.B. Izvestiya VUZov Kyrgyzstana, 2018, no. 9, pp. 45–51.
- 15 Narayana C.V. et al. Proceedings of 2021 ICESC, IEEE, 2021, pp. 1680–1687.
- 16 Amik F.R. et al. Information, 2021, no. 12, p. 514.
- 17 Jagannathan P. et al. Wireless Communications and Mobile Computing 2021, p. 5590894.
- 18 Rani E. et al. Optik, 2021, 225, p. 165818.
- 19 Mittal U., Chawla P., Multimedia Tools and Applications, 2023, vol. 82, pp. 10397–10419.
- 20 Singh Saini P., Rani L. Proceedings of International Conference on Data Analytics and Insights, Springer Nature Singapore, 2023, pp. 577–588.
- 21 Shah S., Gopinath S. Proceedings of International Conference on Civil Engineering Innovative Development in Engineering Advances, Springer Nature Singapore, 2023, pp. 625–633.

^{1*}Сағидолла Б.,

магистр, ORCID ID: 0009-0009-3846-4701,

*e-mail: bizhigit.sagidolla@sdu.edu.kz

¹Али С.,

бакалавр, ORCID ID: 0009-0008-6990-3546,

e-mail: 190103355@stu.sdu.edu.kz

¹Айболат Д.,

бакалавр, ORCID ID: 0009-0009-8215-8066,

e-mail: 190109006@stu.sdu.edu.kz

¹Шаяхметов Н.,

бакалавр, ORCID ID: 0009-0007-7283-1275,

e-mail: 190107095@stu.sdu.edu.kz

¹SDU Университеті, Қаскелең қ., Қазақстан

САҚТАНДЫРУ ТАЛАПТАРЫ БОЙЫНША АВТОКӨЛІКТІ ЖӨНДЕУ ҚҰНЫН БАҒАЛАУДЫҢ САНДЫҚ ҮЛГІСІ

Аңдатпа

Бұл мақалада сақтандыру талаптары контекстінде көлік құралдарын жөндеуге жұмсалған шығындар сметасы дәлдігін жақсартуға арналған сандық үлгіні ұсынады. Автокөліктердің кең таралғандығы және жиі зақымдануы себеп болған біздің зерттеуіміз жөндеу шығындарына әсер ететін көптеген айнымалыларды біріктіретін сенімді жүйені жасауға бағытталған. Оларға қосалқы бөлшектер бағасы, еңбек шығындары және сақтандыру полисінің мүмкіндіктері кіреді. Ұсынылған модель жөндеу құнының әділ және дәл болжамын қамтамасыз етуге бағытталған болжау құралына осы элементтерді синтездеу үшін математикалық және компьютерлік модельдеу әдістерін пайдаланады. Бұл құрал өтемақылардың нақты жөндеу шығындарына сәйкес келуін қамтамасыз ету арқылы сақтандырушылар мен сақтанушылар арасындағы әділ әрекеттесуді жеңілдетуге арналған. Бұл модельдің пайдалылығы сақтандыру талаптарын өңдеудің ашықтығы мен тиімділігін арттыруда, осылайша қаржылық тәуекелдерді басқаруды жақсартуда және сақтандыру секторының тұрақтылығына ықпал етуде ерекше маңызды.

Тірек сөздер: автокөлікті жөндеу құнын бағалау, сақтандыру жағдайлары, математикалық модельдеу, сандық талдау.

^{1*}Сагидолла Б.,

магистр, ORCID ID: 0009-0009-3846-4701,

*e-mail: bizhigit.sagidolla@sdu.edu.kz

¹Али С.,

бакалавр, ORCID ID: 0009-0008-6990-3546,

e-mail: 190103355@stu.sdu.edu.kz

¹Айболат Д.,

бакалавр, ORCID ID: 0009-0009-8215-8066,

e-mail: 190109006@stu.sdu.edu.kz

¹Шаяхметов Н.,

бакалавр, ORCID ID: 0009-0007-7283-1275,

e-mail: 190107095@stu.sdu.edu.kz

¹SDU Университет, г. Каскелен, Казахстан

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТОИМОСТИ РЕМОНТА АВТОМОБИЛЯ ПРИ СТРАХОВЫХ ВЫПЛАТАХ

Аннотация

В данной статье представлена количественная модель, разработанная для повышения точности оценки стоимости ремонта автомобиля в контексте страховых выплат. Мотивированное повсеместным распространением автомобилей и частым возникновением повреждений, наше исследование сосредоточено на разработке надежной системы, которая объединяет множество переменных, влияющих на стоимость ремонта. К ним относятся цены на запчасти, трудозатраты и особенности страхового полиса. Предлагаемая модель использует математические и компьютерные методы моделирования для синтеза этих элементов в инструмент прогнозирования, который призван обеспечить справедливые и точные прогнозы стоимости ремонта. Этот инструмент призван облегчить справедливое взаимодействие между страховщиками и страхователями, обеспечивая соответствие компенсации фактическим затратам на ремонт. Полезность этой модели особенно важна для повышения прозрачности и эффективности рассмотрения страховых претензий, тем самым поддерживая лучшее управление финансовыми рисками и способствуя стабильности страхового сектора.

Ключевые слова: оценка стоимости ремонта автомобиля, страховые случаи, математическое моделирование, количественный анализ.

Article submission date: 27. 07. 2024

FTAXP 28.23.15

ӘОЖ 51-76: 004.9

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-81-90>

¹**Омаров Б.С.,**

PhD, доцент, ORCID ID: 0000-0002-8341-7113,

e-mail: batyahan@gmail.com

^{1,2*}**Зиятбекова Г.З.,**

PhD, доцент м.а., аға ғылыми қызметкері, ORCID ID: 0000-0002-9290-6074,

*e-mail: ziyatbekova1@gmail.com

¹**Батыр Ж.А.,**

магистр, ORCID ID: 0009-0006-5384-1497,

e-mail: zhan.batyr01@gmail.com

³**Майлыбаева А.Д.,**

физ.-мат.ғ.к., қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0003-0598-4806,

e-mail: mjkka@mail.ru

⁴**Бидахмет Ж.,**

PhD, қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0002-7667-5464,

e-mail: zhanar.18.05@gmail.com

^{1,4}**Шаметова Г.К.,**

докторант, аға оқытушы, ORCID ID: 0009-0001-4099-0112,

e-mail: gauharshametova@gmail.com

⁵**Войчик В.,**

профессор, e-mail: waldemar.wojcik@pollub.pl

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

²ҚР ҒЖБМ ҒК Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институты,
Алматы қ., Қазақстан

³Халел Досмұхамедов атындағы Атырау университеті, Атырау қ., Қазақстан

⁴Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
Алматы қ., Қазақстан

⁵Люблин техникалық университеті, Люблин қ., Польша

ЖОЛ БЕЛГІЛЕРІН АВТОМАТТЫ ТҮРДЕ КОНВОЛЮЦИЯЛЫҚ НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІЛЕР КӨМЕГІМЕН АНЫҚТАУ ЖӘНЕ ТАЛУ

Аңдатпа

Бұл зерттеу ауа райының қолайсыз жағдайларында жол белгілерін тану жүйелерін жақсарту мақсатында конволюциялық нейрондық желілерді (CNN) пайдалануға арналған. Жұмыста CNN негізінде құрылған жаңа модель қолданылып, неміс жол белгілерін тану тестінің (GTSRB) кеңейтілген деректер жиынтығы қарастырылады. Аталған деректер жиынтығында қырықтан астам класты қамтитын жазбалары бар 50 мыңнан астам кескіндер жинақталған. Ұсынылған модель жаңбыр, тұман және қар сияқты ауа райы факторларының көріну сапасына тигізетін әсерін төмендетуге арналған объектілерді бөлудің бейімделу қабаттарын пайдаланады. Әртүрлі ауа райы сценарийлерін модельдеу үшін деректерді көбейтудің озық әдістері қолданылады, бұл оқыту жиынтығының әртүрлілігін арттырады. Зерттеу барысында CNN-нің қолайсыз жағдайларда жол белгілерін анықтаудағы теориялық және практикалық жақсартулары талданып, модельдің тиімділігі дәлдік, жауаптылық және F1 көрсеткіші сияқты метрикалар арқылы тексерілді. Нәтижелер модельдің жалған позитивтер санын азайтуда және жол белгілерін дәл анықтауда тиімді екенін көрсетті. Мақалада деректер жиынтығын мұқият дайындаудың, модельдерді оңтайландырудың және анықтау жүйесінің жұмысын жақсарту үшін оқытуды жетілдірудің маңыздылығы айқындалады. Бұл зерттеу интеллектуалды көлік жүйелері, автономды көлік жүргізу және жол қауіпсіздігі салаларындағы сенімді жол белгілерін тану технологияларының болашақтағы дамуына оң ықпалын тигізеді.

Тірек сөздер: CNN, жол белгілерін анықтау, жасанды интеллект, кескінді талдау, жіктеу.

Кіріспе

Жол белгілерін тану интеллектуалды көлік жүйелері мен автономды автомобильдерді дамытудың маңызды құрамдас бөлігі. Жол белгілерін дәл анықтау және түсіндіру автоматтандырылған жүйелерге негізделген шешімдер қабылдауға мүмкіндік береді, осылайша жол қозғалысының қауіпсіздігі мен тиімділігін арттырады [1]. Дегенмен жол белгілерін танудағы қиындықтар негізінен жарықтың құбылмалы жағдайларына және жол белгілерінің көрінуін айтарлықтай нашарлататын ауа райы жағдайлары сияқты қоршаған орта факторларына байланысты туындайды [2].

Бұл зерттеудің негізгі мақсаты конволюциялық нейрондық желілер (CNN) арқылы қолайсыз ауа райында жол белгілерін тану жүйелерінің дәлдігін арттыру болып табылады. Мұнда жаңбыр, тұман және қар сияқты қолайсыз ауа райын тиімді жеңе алатын CNN негізіндегі модельді әзірлеу және сынау туралы ой қозғалады. Зерттеу әртүрлі ауа райы сценарийлерін модельдеу үшін белгілерді алудың адаптивті қабаттарын және деректерді толықтырудың озық әдістерін енгізуге бағытталған, бұл нақты жағдайларда жол белгілерін анықтау жүйелерінің тұрақтылығы мен сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Зерттеу барысында жаңбыр, тұман және қар сияқты ауа райының күрделі жағдайларына сәйкес келетін модельдеу әдістері әзірленді. Конволюциялық нейрондық желілерді ауа райының нақты әсеріне бейімдейтін адаптивті қабаттарды қолдану жаңалық болып табылады. Зерттеудің мақсаты – конволюциялық нейрондық желілерінің қиын жағдайларда жол белгілерін дәл тану қабілетін жетілдіру. Бұл мақсатқа жету үшін зерттеу деректерді толықтыру және бейімделгіш белгілерді алу қабаттарын қолдану арқылы модельдің әртүрлі ауа райы сценарийлерінде жұмыс істеу қабілетін жақсартуды көздейді. Жаңа әдіс жаңбыр, қар, тұман әсерінен туындайтын көріну мәселелерін азайтуға бағытталған. Қолайсыз ауа райында жол белгілерін танудың жоғары дәлдігі интеллектуалды көлік жүйелерінің және автономды көліктердің қауіпсіздігі мен сенімділігін арттырады. Бұл зерттеу көлік саласында жол қауіпсіздігін жақсарту тұрғысынан өзекті болып табылады.

Зерттеудің нәтижелері автономды көліктерде қолданылатын жол белгілерін тану жүйелерінің қауіпсіздігі мен сенімділігін арттыруға, сондай-ақ интеллектуалды көлік жүйелерін дамытуға үлес қосады. Бұл зерттеу тұрақты жол қозғалысын қамтамасыз ету үшін ауа райының әртүрлі жағдайларына бейімделетін модельдер құрудың маңыздылығын айқындайды және жол қозғалысы қауіпсіздігін қамтамасыз етуге бағытталған.

Конволюциялық нейрондық желілер (CNN) кескінді тану саласындағы стандартқа айналды және визуалды деректерден жоғары деңгейлі сипаттамаларды алу қабілетіне байланысты жол белгілерін тану үшін көбірек қолданылуда [3]. Қырықтан аса топқа қатысты елу мыңнан астам кескінді қамтитын немістің трафикті қайта тану German Traffic Sign Recognition Benchmark (GTSRB) деректер жинағы жол белгілерін тану жүйелерін оқыту мен бағалаудың сенімді негізін қамтамасыз етеді [4].

Соңғы онжылдықта жол қозғалысын тану жүйелерінің көптеген модельдері ұсынылды [5–7]. Әдетте, бұл жүйелер анықтау және тану кезеңдерінде жұмыс істейді. Стандартты жағдайларда CNN өте жақсы жұмыс істегенімен, олардың тиімділігі жаңбыр, тұман және қар сияқты қолайсыз ауа райында төмендейді, бұл белгілердің көрінуін бұлыңғыр етіп төмендетеді әрі оларды өзгеше етіп көрсетуі мүмкін [8]. Бұл түйткіл мәселені шешу қоршаған ортаның тосын жағдайларына бейімделе отырып, оларды реттей алатын тиімді модельдерді әзірлеуді талап етеді.

Бұл зерттеу ауа райының қиын жағдайында тану дәлдігін жақсарту үшін CNN архитектурасын жақсартатын қолданыстағы әдістерге сүйенеді. Ауа райының бұзылуына қарай жылдам бейімделетін белгілерді алудың адаптивті қабаттарын біріктірудің арқасында бұл зерттеу әртүрлі жұмыс жағдайларында автономды жүргізу технологияларының сенімділігін арттыруға айтарлықтай үлес қосады [9]. Сонымен қатар ол модельдерді мұқият оқытудың және деректер

жиынтығын өңдеудің маңыздылығын атап көрсетеді, өйткені бұл өнімділікті оңтайландыру және жүйенің нақты уақытта қолданылуын қамтамасыз ету үшін өте маңызды.

Бұрынғы зерттеулерде қолайлы жағдайларда CNN моделінің жоғары дәлдігі көрсетілгенімен, олардың көпшілігі жол белгілерінің көрінуін нашарлататын жаңбыр, қар және тұман сияқты күрделі жағдайларда төмен нәтижелер көрсетеді. Бұл мәселені шешу үшін әртүрлі әдістер, соның ішінде деректерді толықтыру және модельді әртүрлі жағдайларға бейімдеу, ұсынылған. Мұндай зерттеулерде белгілерді алудың адаптивті қабаттары және қолайсыз ауа райы жағдайларын имитациялау арқылы деректер жиынтығын кеңейту әдістері қолданылады [10].

Ағымдағы зерттеулерде бейімделгіш белгілерді алу қабаттарын қолдану арқылы CNN тиімділігін арттыру, сонымен қатар деректерді толықтыру әдістерін оңтайландырудың маңыздылығы көрсетілген. Бұл зерттеу әртүрлі ауа райы сценарийлерінде нақты жұмыс істей алатын CNN моделін әзірлеуге бағытталған, бұл өз кезегінде автономды көлік жүйелерінің сенімділігі мен қауіпсіздігін арттыруға ықпал етеді.

Материалдар мен әдістер

Берілген зерттеу үшін пайдаланылған GTSRB деректер жинағында 1-суретте көрсетілгендей 43 жол белгілері класына бөлінген 51893 сурет бар. Деректер жиынтығындағы кескіндердің мөлшері 15x15 тен 222x193 пиксельге дейін өзгереді. Бұл суреттердің барлығы ауа райының қолайсыздығы мен әртүрлі жарықтандыруды қоса алғанда, нақты әлемде түсірілген. Кейбір суреттердің көріну сапасы төмен және оларды тану да қиын болуы мүмкін.



Сурет 1 – Деректер жиынтығындағы жол белгілерінің 43 класы

Қолданыстағы деректер жиынтығы олардың мөлшері мен күрделі жағдайларды қамту тұрғысынан шектеулі, бұл бізді суреттерді толықтыру әдістерімен қамтуға мәжбүр етті. Ауа райының қолайсыздығын имитациялау үшін жасанды жаңбыр, тұман және қарды қолдану сияқты суреттерді алдын-ала өңдеудің қосымша әдістері бастапқы деректер жиынтығына қолданылды. Бұл қосымша нақты міндеттерді көрсететін оқу бейнелерінің әртүрлі жиынтығын жасауға бағытталған. Нейрондық желілерді оқыту үшін кескін массивін үлкейтуге қолданылатын кескін қондырмаларының әр алуан түрлері бар [11].

OpenCV кітапханасын пайдалана отырып, суреттерді өңдеу және оларға ауа райы сүзгісін қолдану үшін кескінді үлкейту әдістері жасалды. Бұл толықтырулар жаңбыр, тұман, қар,

көлеңке және жарықтың өзгеруі сияқты жол белгілерін тануға кедергі келтіруі мүмкін нақты экологиялық әсерлерді имитациялайды. Бұл толықтырулардың мақсаты – модельге қолайсыз ауа-райына тән әртүрлі визуалды кедергілерге үйренуге және бейімделуге мүмкіндік беретін түрлі оқу жиынтығын жасау.

Жаңбыр қосымшасын жасау үшін OpenCV line функциясы бүкіл кескінге шағын сызықтар жасау үшін қолданылды. Жаңбыр тамшыларының кездейсоқ қисаюын қосу және кескіннің жарықтығын азайту арқылы жаңбырға немесе тіпті қатты нөсерге келтіруге болады. Бұл әдіс модельге камера объективіндегі жаңбырдан туындаған ықтимал дақтар мен бұлыңғырлықтары бар белгілерді тануды үйренуге көмектеседі. Қар эффектiсi кескіннің қараңғы жерлерін ағарту арқылы суреттің түс кеңістігіндегі жарық арнасының пиксель мәндерін өзгерту арқылы қосылды. Тұман кескіндерге біркелкі немесе градиентті бұлыңғырлық қосу арқылы имитацияланды, көптеген ақ түсті қабаттасу қарқындылығын қолданды. Мөлдірлік деңгейі әртүрлі тығыздықтағы тұманды жасау үшін реттелді, яғни жеңіл тұманнан қалың тұманға дейінгі өзгеріс, бірақ ол жол белгілерінің көрінуін жасыруы мүмкін. Ауа-райының нақты жағдайларына байланысты толықтырулардан басқа да кездейсоқ толықтырулар құбыры жүзеге асырылды, онда әрбір сурет жоғарыда аталған әсерлердің тіркесімінен өтуі мүмкін. 2-суретте осы жинақтау әдістерін қолдану мысалдары көрсетілген. Осы кеңейту әдістерін қолдана отырып, CNN моделін әртүрлі және болжанбайтын нақты әлем жағдайларында сенімді жұмыс істеуге дайындай отырып, оқыту деректерінің жиынтығын әртүрлі күрделі шарттармен байытылды.



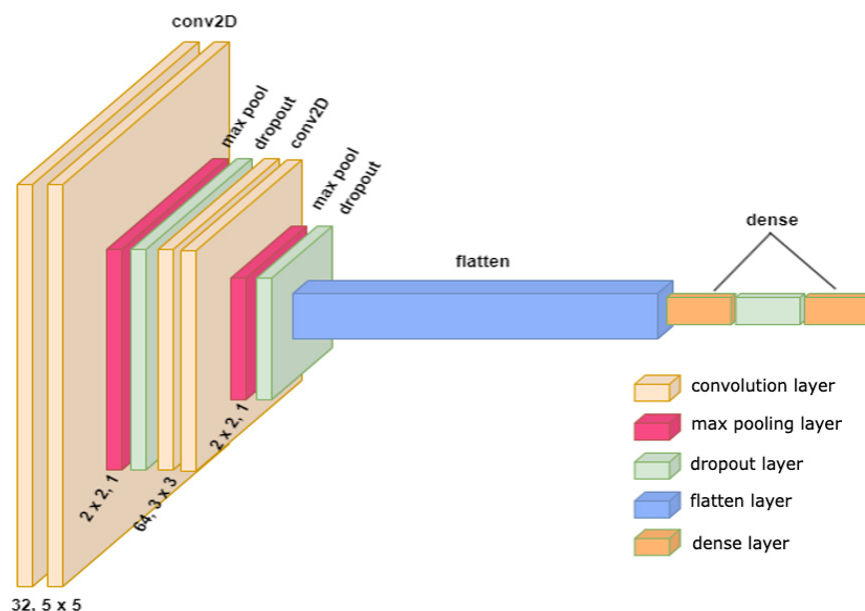
Сурет 2 – Жол белгісінің кескініне күшейтуді қолдану

Бұл толықтыру әдістері оқыту деректерінің жиынтығын әртараптандырып қана қоймай, сонымен қатар модельдің әртүрлі қолайсыз жағдайларда сенімді жұмыс істей отырып, оқу деректерін нақты сценарийлерге жалпылау қабілетін айтарлықтай жақсартты. Бұл тәсіл автономды жүргізу және онымен байланысты қолданбалар үшін жетілдірілген компьютерлік көру жүйелерін әзірлеу кезінде деректерді жан жақты және шынайы толықтырудың маңыздылығын көрсетеді. Деректер жиынтығы Python scikit-learn кітапханасына кіретін жіктеу функциясы арқылы жіктелді. Деректердің 80%-ы оқыту үшін және 20%-ы тестілеу үшін пайдаланылды.

3-сурет 12 қабаттан тұратын желі құрылымын көрсете отырып, жол белгілерін тану үшін ұсынылған конволюциялық нейрондық желінің (CNN) архитектуралық дизайнын көрсетеді.

Бұл модельдің бастапқы материалы 30x30 пиксельді түрлі түсті кескіндер. CNN моделінде 4 конволюциялық қабат, максималды біріктіру, төгілу және тегістеу қабаттары бар. Соңғы толық байланысқан қабаттың шығысы 43 жолақты softmax-қа беріледі, ол жол белгілерінің 43 класы бойынша таралады. CNN архитектураларында қабаттарды біріктіру кіріс кескінінің өлшемін кішірейту үшін пайдаланылуы мүмкін, осылайша ол есептеу жылдамдығын тездетеді. Бұл процесс екі маңызды параметрді орнатуды қамтиды: «f» деп белгіленген сүзгі өлшемі және «s» деп белгіленген қадам. Қабаттарды біріктіру пикселдердің орналасу сезімталдығының төмендеуіне әкеледі, сондықтан $f=2$ және $s=2$ сияқты жалпы мәндер жиі қолданылады [12]. Алайда, бұл мөлшердің азаюы есептеу ресурстарына байланысты тексерілетін коэффициент-

тер санының азаюына сәйкес келетінін ескеру қажет. CNN архитектурасында конволюциялық сүзгілердің ядролары белгіленген мысалдар жиынтығынан білім ала отырып, бақыланатын мәліметтер негізінде оқытылады. Әрбір иерархиялық деңгейде CNN іргелес пикселдердің жауаптарын біріктіру үшін іріктеу операцияларын орындайды. Бұл операциялар CNN-ге суреттердегі объектілердің орналасуына тәуелді емес кеңістіктік-инвариантты функцияларды игеруге мүмкіндік береді [13].

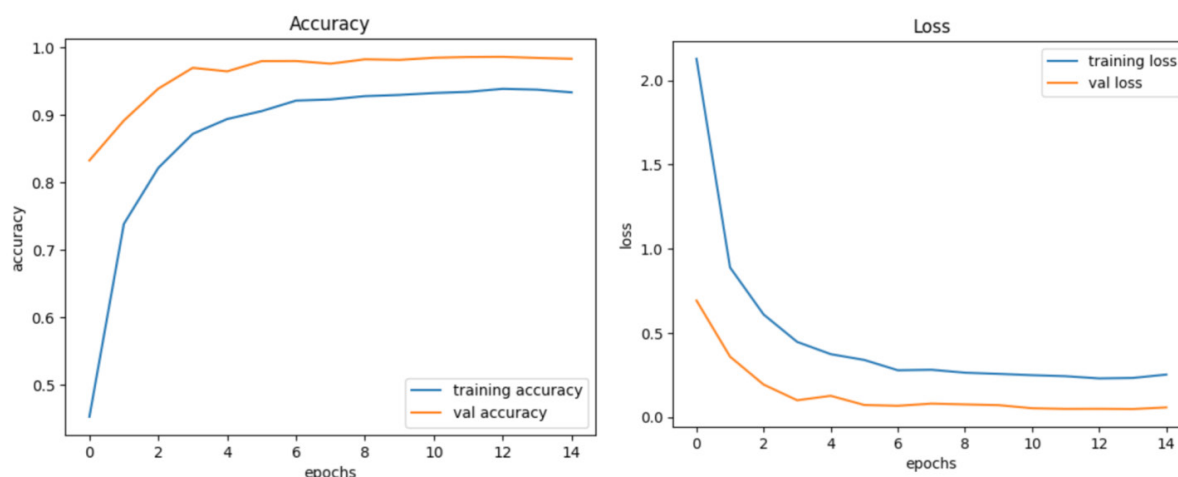


Сурет 3 – Жол белгісінің бейнесіне толықтыруларды қолдану

Машиналық оқыту және жіктеу міндеттері саласында модельдің өнімділігі мен тиімділігін өлшеу үшін бағалау көрсеткіштері қажет. Дәлдік, еске түсіру және F-score сияқты көрсеткіштер модельдің болжамды күшін және оның жаңа деректерді жалпылау қабілетін анықтау үшін негіз болып табылады. Бұл параметрлер модель бұрын кездеспеген деректерді қаншалықты тиімді өңдей алатынын және болжай алатынын анықтауда шешуші рөл атқарады [14].

Нәтижелер мен талқылау

Желі 0,001 оқу коэффициенті бар Adam оптимизаторын қолдана отырып, TensorFlow машиналық оқыту шеңберінде үйренді. Партияның мөлшері 32-ге белгіленді, ал артық мөлшерді азайту үшін алғашқы екі толық байланысқан қабатқа оқудан шығаруды регуляциялау қолданылды. Ұсынылған CNN моделі 15 дәуірде сыналды. Оқытудан кейінгі нейрондық желінің тиімділігін бағалау үшін модель жол белгілерін анықтауға және тануға арналған 12 қабатты конволюциялық нейрондық желіні пайдаланады. Бастапқы қабатқа RGB түс форматында 30x30 пиксель ажыратымдылығы бар сурет келеді. Содан кейін екінші қабатта relu белсендіру функциясы бар Conv2D операциясы қолданылады. Үшінші деңгей stride, ядро өлшемі, padding және қайтару индекстерін қоса алғанда, әртүрлі параметрлерді қабылдайтын максималды біріктіру операциясын (MaxPool2D) пайдаланады. Осыдан кейін төртінші қабатта relu белсендірілген Conv2D де қолданылады. Бесінші қабат қайтадан Max Pool 2D. Алтыншы қабат кірістерді сызықтандыру үшін тегістеу қадамын қамтиды, содан кейін тығыз байланыс қабаты немесе әрбір нейрон алдыңғы қабаттағы барлық нейрондармен толық байланысқан тығыз қабат орналасады. Ақырында, дәлдікті арттыру және тамаша нәтижеге жақындау үшін шығыс тығыз қабаты softmax функциясын пайдаланады, ол танылған жол белгісін анықтайтын әрбір класстар ықтималдығын береді. 4-суретте модельдің дәлдігі мен жоғалуы көрсетілген.



Сурет 4 – Оқытудан кейінгі модельдің дәлдігі мен жоғалуы

1-кестеде модельді оқыту кезеңінде сынақ деректерін бағалау үшін қолданылатын кейбір сапа көрсеткіштері келтірілген. Жалпы тиімділік көрсеткіші ретінде жаһандық дәлдік көрсеткіші сынақ деректері контекстінде орта есеппен 95% құрайтын жоғары жетістіктерді көрсетті.

Кесте 1 – Оқу кезеңінен кейінгі бағалау көрсеткіштері

	Дәлдік	Қарау	F1-ұпай	Қолдау t
1 класс	0,98	0,95	0,97	60
2 класс	0,85	0,97	0,91	720
3 класс	0,98	0,89	0,94	750
4 класс	0,88	0,85	0,87	450
5 класс	0,99	0,89	0,94	660

Сонымен қатар, жол белгілерін жіктеу мәселесінде бірінші класқа арналған метрику мұқият бағалау келесі маңызды нәтижелерге қол жеткізді:

F1-score көрсеткіші, recall және precision көрсеткіштері арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз ететін 97 %-ға жеткен керемет кешенді көрсеткіш. Бұл жетістік жалған позитивтер санын азайтуда және тиісті жағдайларды дұрыс анықтауда модельдің жоғары тиімділігін көрсетеді.

Бұл нақтыланған нәтижелер жол белгілерін жіктеу мәселесінде модельдің тиімділігі мен сенімділігін көрсете отырып, машиналық оқыту және жіктеу туралы білім қоржынын толықтырады.

Ұсынылған CNN моделінің дәлдігі мен беріктігі интеллектуалды көлік инфрақұрылымы мен автономды жүргізу жүйелерін дамыту үшін практикалық маңызы зор. Автономды көліктер нақты жағдайларда қауіпсіз және ақылға қонымды шешімдер қабылдау үшін ауа райының қолайсыздығында жол белгілерін дәл анықтай алуы керек. Мұндай сенімділік әсіресе, қиын ауа райында жүргізушіге көру қиын болған кезде апатты азайту және жалпы қозғалыс қауіпсіздігін жақсарту үшін өте маңызды болып табылады.

Сонымен қатар, деректерді кеңейту әдістері мен адаптивті белгілерді алу қабаттарын қолданатын тәсіл жолақты тану және жаяу жүргіншілерді анықтау сияқты басқа автономды жүргізу элементтері үшін пайдаланылуы мүмкін әрі оның негізін қалайды. Бұл икемділік интеллектуалды көлік жүйелерінің бірқатар қосымшаларында CNN-нің жалпы

пайдалылығын арттырады. Бұл нәтижелердің практикалық маңызы зор, өйткені олар автономды автомобильдердің сенімділігі мен өнімділігін арттыра алады, нәтижесінде жол-көлік оқиғалары азаяды және көлік желілерінің тиімділігі артады.

Эксперименттік кезеңнің нәтижелері конволюциялық нейрондық желі (CNN) архитектурасының әртүрлі қолайсыз ауа райы жағдайында жол белгілерін танудағы тиімділігін дәлелдейді. Адаптивті белгілерді алу қабаттары мен теңшелетін толықтыру әдістерін реттеуді қолдану модельдің тұрақтылығы мен дәлдігін айтарлықтай жақсартты.

Қолайсыз ауа райының әсерінен болатын визуалды бұрмалануларды жеңілдетуде бейімделгіш белгілерді алу қабаттары шешуші рөл атқарады. CNN-дегі адаптивті әдістер, алдыңғы жұмыстарда айтылғандай, қоршаған ортаның нақты айнымалыларына жауап беру арқылы сүзгілерді икемді түрде өзгертуге мүмкіндік береді [15]. Қардың, тұман мен жаңбырдың жол белгілерінің көрінуіне әсерін азайту қабілеті нақты жағдайларда зерттеудің бейімделу тәсілдерінің артықшылығын көрсетеді [16].

Қазіргі зерттеулерде сипатталған негізгі модельдермен салыстыру олардың ауа райына байланысты нашар құбылмалы кескіндермен жақсы жұмыс істейтінін көрсетті. Бұл салыстырулар модель дизайнының дұрыстығын растайды және оның қолайсыз жағдайларда дәлдігі мен сенімділігі бойынша қолданыстағы жүйелерден асып түсу мүмкіндігін көрсетеді [17].

CNN моделінің тиімділігі жол белгілерін тану кезінде 95% дәлдікке қол жеткізумен расталады, бұл ұқсас контексттерде қолданылатын әдеттегі CNN модельдеріне қарағанда айтарлықтай жоғары. Еске түсіру және F1-score сияқты стандартты бағалау көрсеткіштерімен өлшенетін бұл жоғары өнімділік деңгейі модельдің болжамдық мүмкіндіктері мен жалпылау қабілетін бағалау үшін маңызды дәлдік болып табылады [18]. Дәлдік модель жасаған оң болжамдардың дәлдігін өлшейді, ал есте сақтау модельдің барлық тиісті жағдайларды анықтау қабілетін көрсетеді. F1-score модельдің тиімділігі туралы тұтас түсінік бере отырып, дәлдік пен кері байланыс арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді [19–20].

Осылайша, зерттеу жоспарланған архитектуралық жақсартулар оқу деректер жиынтығын дәл сәйкестендірумен бірге жол белгілерін тану сияқты нақты қолданбаларда CNN өнімділігін айтарлықтай жақсартатынын көрсетеді. Жасанды түрде жасалған күрделі жағдайларда қолданылатын әдістер сенімділік пен қауіпсіздік маңызды болатын автономды жүргізу жүйелерінде пайдалану үшін жаңа перспективаларды ашады.

Қорытынды

Бұл зерттеу конволюциялық нейрондық желінің (CNN) модификацияланған архитектурасы ауа райының қолайсыздығында жол белгілерін дәл және тиімді түсіндіре алатынын көрсетті. Деректерді кеңейтудің маңызды әдістерін және белгілерді алудың адаптивті қабаттарын қолдана отырып, осы зерттеу модельдің сыртқы әсерлерге төзімділігін арттырды, бұл әдетте визуалды тану жүйелерінің дұрыс жұмыс істемеуіне әкеледі. Істен шығаруды реттеуді қолдану арқылы модель шамадан тыс сәйкестіктің алдын алып, жаңа, тексерілмеген деректерде жалпылауды жақсы сақтай алды.

Алынған нәтижелер жоспарланған архитектуралық жақсартулардың оқу деректер жиынтығын дәл сәйкестендірумен бірге CNN өнімділігін жол белгілерін тану сияқты нақты қолданбаларда айтарлықтай жақсартатынын көрсетеді. Бұл әдістерді күрделі жағдайларда тиімді пайдалану автономды жүргізу жүйелерінде қолдануға жаңа бағыт береді. Онда сенімділік пен қауіпсіздік маңызды болып табылады.

Қорыта келе, зерттеу жұмысы автономды көліктердің дамуына ықпал етеді деп айтуға болады, бұл қоршаған орта мәселелеріне қарамастан жақсы жұмыс істей алатын жол белгілерін танудың тұрақты және сенімді әдісін ұсынады. Осы зерттеу кез-келген жағдайда қауіпсіз жүре алатын, тасымалдаудың тиімділігі мен жол қауіпсіздігін арттыратын толық автономды автомобильдерді құруға бағытталған қадам.

ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Sun Y., Ge P., Liu D. Traffic sign detection and recognition based on convolutional neural network. 2019 Chinese automation congress (CAC), IEEE, 2019, pp. 2851–2854.
- 2 Ahmed S., Kamal U., & Hasan M.K. DFR-TSD: A deep learning based framework for robust traffic sign detection under challenging weather conditions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, vol. 23, no. 6, pp. 5150–5162. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3048878/>
- 3 Liu Z. et al. MR-CNN: A multi-scale region-based convolutional neural network for small traffic sign recognition. *IEEE Access.*, 2019, vol. 7, pp. 57120–57128.
- 4 Lin C. et al. Transfer learning based traffic sign recognition using inception-v3 model. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 2019, vol. 47, no. 3, pp. 242–250.
- 5 Eskandarian A., Wu C., Sun C. Research advances and challenges of autonomous and connected ground vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 683–711.
- 6 Janai J. et al. Computer vision for autonomous vehicles: Problems, datasets and state of the art // *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision*, 2020, vol. 12, no. 1–3, pp. 1–308.
- 7 Singh I. et al. Dropout-VGG based convolutional neural network for traffic sign categorization. *Congress on Intelligent Systems: Proceedings of CIS 2021*, Singapore Springer Nature Singapore, 2022, vol 1, pp. 247–261.
- 8 Dang, T.P., Tran N.T., To V. H., & Tran Thi M.K. Improved YOLOv5 for real-time traffic signs recognition in bad weather conditions. *The Journal of supercomputing*, 2023, vol. 79, Issue. 10, pp. 10706–10724. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11227-023-05097-3>.
- 9 Puli M. S., Sunitha M., Aluri O. S. B., Jain D.R., Rayabharapu M., & Venkatesh M. Deep Learning-Based Framework For Robust Traffic Sign Detection Under Challenging Weather Conditions. *Journal of Survey in Fisheries Sciences*, 2023, vol. 23, Issue. 6, pp. 5150–5162. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3048878>.
- 10 Qian R., Yue Y., Coenen F., & Zhang B. Traffic sign recognition with convolutional neural network based on max pooling positions. In *2016 12th International conference on natural computation, fuzzy systems and knowledge discovery (ICNC-FSKD)*, 2016, pp. 578–582. *IEEE*. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2016.7603237>.
- 11 Xu M. et al. A comprehensive survey of image augmentation techniques for deep learning. *Pattern Recognition*, 2023, vol. 137, p. 109347.
- 12 Cong S., Zhou Y. A review of convolutional neural network architectures and their optimizations. *Artificial Intelligence Review*, 2023, vol. 56, no. 3, pp. 1905–1969.
- 13 Tian Y. Artificial intelligence image recognition method based on convolutional neural network algorithm. *Ieee Access.*, 2020, vol. 8, pp. 125731–125744.
- 14 Yacoubby R., & Axman, D. Probabilistic extension of precision, recall, and f1 score for more thorough evaluation of classification models. In *Proceedings of the first workshop on evaluation and comparison of NLP systems*, 2020, pp. 79–91. <https://doi.org/10.18653/v1/2020.eval4nlp-1.9>
- 15 Yao Z., Song X., Zhao L., & Yin Y. Real-time method for traffic sign detection and recognition based on YOLOv3-tiny with multiscale feature extraction. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2021, vol. 235, Issue. 7, pp. 1978–1991. <https://doi.org/10.1177/0954407020980559>.
- 16 Yucong S., & Shuqing, G. Traffic sign recognition based on HOG feature extraction. *Journal of Measurements in Engineering*, 2021, vol. 9, Issue. 3, pp. 142–155. <https://doi.org/10.21595/jme.2021.22022>.
- 17 Feng L., & Jia Y. Traffic sign recognition based on YOLOX in extreme weather. In *2022 Global Conference on Robotics, Artificial Intelligence and Information Technology (GCRAIT)*, 2022, pp. 299–303. <https://doi.org/10.1109/GCRAIT55928.2022.00070>.
- 18 Feng D. et al. Deep multi-modal object detection and semantic segmentation for autonomous driving: Datasets, methods, and challenges. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 1341–1360.
- 19 Lin Z., Yih M., Ota J.M., Owens J., & Muyan-Ozcelik P. Benchmarking Deep Learning Frameworks and Investigating FPGA Deployment for Traffic Sign Classification and Detection. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2019, vol. 4, Issue. 3, pp. 385–395. <https://doi.org/10.1109/TIV.2019.2919458>.
- 20 Sun P., Zhang R.Y., Jiang T., Kong C., Xu W., Zhan M., Tomizuka L., Li Z., Yuan C., Wang & Luo, P. Sparse R-CNN: End-to-end object detection with learnable proposals, 2020. *arXiv:2011.12450* <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.12450>.

¹Omarov B.S.,

PhD, Associate Professor, ORCID ID: 0000-0002-8341-7113,

e-mail: batyahan@gmail.com

^{1,2*}Ziyatbekova G.Z.,

PhD, Acting Associate Professor, senior researcher, ORCID ID: 0000-0002-9290-6074,

*e-mail: ziyatbekova1@gmail.com

¹Batyr1 Zh.A.,

Master, ORCID ID: 0009-0006-5384-1497,

e-mail: zhan.batyr01@gmail.com

³Mailybayeva A.D.,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences; Associate Professor,

ORCID ID: 0000-0003-0598-4806,

e-mail: mjkka@mail.ru

⁴Bydakhmet Zh.,

PhD, Associate Professor, ORCID ID: 0000-0002-7667-5464,

e-mail: zhanar.18.05@gmail.com

^{1,4}Shametova G.K.,

Doctoral student, Senior Lecturer, ORCID ID: 0009-0001-4099-0112,

e-mail: gauharshametova@gmail.com

⁵Wójcik W.,

Professor, e-mail: waldemar.wojcik@pollub.pl

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²Institute of Information and Computational Technologies SC MSHE RK,
Almaty, Kazakhstan

³Khalel Dosmukhamedov Atyrau University, Atyrau, Kazakhstan

⁴Almaty University of Power Engineering and Telecommunications after Gumarbek Daukeev,
Almaty, Kazakhstan

⁵Lublin Technical University, Lublin, Poland

AUTOMATIC DETECTION AND RECOGNITION OF ROAD SIGNS USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

Abstract

This paper examines the use of convolutional neural networks (CNNs) to improve traffic sign recognition systems, precisely in non-weather conditions. An extended dataset of the German Traffic Sign Recognition Test (GTSRB), based on a new CNN model, is also used, which contains more than fifty thousand labeled images covering more than forty categories. The model presents adaptive object selection layers designed to eliminate visibility problems caused by weather factors such as rain, fog, and snow. Advanced data augmentation techniques are applied to model different weather scenarios, which increases the diversity of the training dataset. Through an analysis of theoretical and practical aspects, the study demonstrates how CNNs enhance the accuracy and efficiency of road sign detection systems in a different weather condition. This study not only examines the theoretical and practical improvements provided by CNNs for traffic sign detection in unfavorable conditions, but also verifies the effectiveness of the model through metrics such as accuracy, responsiveness, and F1 score. The results confirm the effectiveness of the model in minimizing false positives and accurately identifying traffic signs. The paper emphasizes the importance of careful dataset preparation, model optimization and improved training to enhance the performance of the detection system. This has positive implications for intelligent transportation systems, autonomous driving and road safety, indicating future progress in robust traffic sign recognition technologies.

Key words: CNN, traffic sign detection, artificial intelligence, image analysis, classification.

¹Омаров Б.С.,

PhD, доцент, ORCID ID: 0000-0002-8341-7113,

e-mail: batyahan@gmail.com

^{1,2*}Зиятбекова Г.З.,

PhD, и.о. доцента, с.н.с., ORCID ID: 0000-0002-9290-6074,

*e-mail: ziyatbekova1@gmail.com

¹Батыр Ж.А.,

магистр, ORCID ID: 0009-0006-5384-1497,

e-mail: zhan.batyr01@gmail.com

³Майлыбаева А.Д.,

к.ф.-м.н., ассоц. профессор, ORCID ID: 0000-0003-0598-4806,

e-mail: mjkka@mail.ru

⁴Бидахмет Ж.,

PhD, ассоц. профессор, ORCID ID: 0000-0002-7667-5464,

e-mail: zhanar.18.05@gmail.com

^{1,4}Шаметова Г.К.,

докторант, ст. преподаватель, ORCID ID: 0009-0001-4099-0112,

e-mail: gauharshametova@gmail.com

⁵Войчик В.,

профессор, e-mail: waldemar.wojcik@pollub.pl

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан²Институт информационных и вычислительных технологий КН МНВО РК,

г. Алматы, Казахстан

³Атырауский университет имени Х. Досмухамедова, г. Атырау, Казахстан⁴Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, г. Алматы, Казахстан⁵Люблинский технический университет, г. Люблин, Польша

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ И РАСПОЗНАВАНИЕ ДОРОЖНЫХ ЗНАКОВ С ПОМОЩЬЮ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Аннотация

В работе рассматривается использование сверточных нейронных сетей (CNN) для улучшения систем распознавания дорожных знаков именно в непогодных условиях. Также используется расширенный набор данных немецкого теста распознавания дорожных знаков (GTSRB), основанного на новой модели CNN, который содержит более пятидесяти тысяч изображений с надписями, охватывающих более сорока категорий. В модели представлены адаптивные слои выделения объектов, предназначенные для устранения проблем с видимостью, вызванных такими погодными факторами, как дождь, туман и снег. Для моделирования различных погодных сценариев применяются передовые методы увеличения объема данных, что увеличивает разнообразие обучающего набора данных. Это исследование не только рассматривает теоретические и практические усовершенствования, предоставленные CNNs для обнаружения дорожных знаков в неблагоприятных условиях, но и проверяет эффективность модели с помощью таких показателей, как точность, отзывчивость и показатель F1. Результаты подтверждают эффективность модели в минимизации ложных срабатываний и точной идентификации дорожных знаков. В статье подчеркивается важность тщательной подготовки набора данных, оптимизации моделей и усовершенствования обучения для повышения производительности системы обнаружения. Это положительно сказывается на интеллектуальных транспортных системах, автономном вождении и безопасности дорожного движения, что свидетельствует о будущем прогрессе в области надежных технологий распознавания дорожных знаков.

Ключевые слова: CNN, распознавание дорожных знаков, искусственный интеллект, анализ изображений, классификация.

Мақаланың редакцияға түскен күні: 13.05.2024

ӘОЖ 004.852
ҒТАХР 28.23.25

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-91-106>

¹Сапақова С.З.,

физ.-мат.ғ.к., қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0001-6541-6806,
e-mail: sapakovasz@gmail.com

²Қамбарова Б.,

докторант, ORCID ID: 0009-0008-6153-4934,
e-mail: gabitqyzy96@mail.ru

¹Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы қ., Қазақстан

²Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУМЕН ӘЛЕУМЕТТІК ЖЕЛІДЕГІ ҚАЗАҚ ТІЛІНІҢ ДАМУЫНА ОРЫС ТІЛІНДЕГІ СӨЗДЕРДІҢ ЫҚПАЛЫН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа

Бұл зерттеу қазақ тілінің шұбарлануына орыс тіліндегі сөздердің ықпалын зерттеуге арналған. Ақпараттық технологияның қарқындап дамуы әлеуметтік желі тілінің жай-күйіне әсер етеді. Біріншіден, желідегі бейберекетсіздік тілдің қолданыс аясын тежеп, шұбарлануға алып келсе, екіншіден, даму динамикасы жоғары, қазақ тіліндегі ақпараттар да жылдам тарап жатыр деуге болады. Мақаланың негізгі мақсаты қазіргі заманғы интернеттегі шетелдік сөздер, бір тілден екінші тілге ешқандай өзгеріссіз ауысатын тілдік операциялар, аралас жазбалар (шетелдік сөздердің лексикалық және семантикалық мәртебесі сақталған сөздерді қоса алғанда), жаңа қысқартулар, варваризмдердің қазақ тіліне әсерін зерттеу. Зерттеу нәтижесінде әлеуметтік желідегі сөйлеу формалары айқындалады; қарым-қатынастың ауызша түрінде ойлау мен ойды тіл арқылы жарыққа шығару сәтінің бір уақытта жүзеге асырылуына байланысты тілдің шұбарлануына ықпал ететін факторлардың ықтималдығы анықталады. Машиналық оқыту алгоритмдерінің, атап айтқанда Naive Bayes классификаторының қолданылуы деректерді талдау процесін автоматтандырып, жасырын заңдылықтарды анықтады, бұл осы кірме сөздердің қазақ тіліне цифрлық ортада қалай әсер ететінін тереңірек түсінуге мүмкіндік берді. Ақпараттық технологияның прогрессивті даму үрдісімен ерекшеленетін жаһандық платформалар аясында Facebook және Instagram желілеріндегі мәтін мазмұны сарапталды.

Тірек сөздер: коммуникация, прагматика, лингвистика, әлеуметтік желі, машиналық оқыту, алгоритмдер.

Кіріспе

Бүгінде IT саласындағы жетістіктер, цифрландыру процестері, мемлекеттік порталдар, медиаканалдар, жасанды интеллектінің дамуы, әлеуметтік желілердің көбеюі тілдік жүйеге әсер етті. Әлеуметтік желілер қазіргі қоғамда тек ақпарат алмасудың негізгі құралдары ғана емес, әлемде болып жатқан түрлі оқиғаларға пікір білдіріп, талдайтын, тақырыпты дискурсқа айналдыратын платформаға айналды. 2024 жылдың қаңтарында Қазақстанда 14,10 миллион белсенді әлеуметтік желі қолданушысы болған. Соңғы бір жылда олардың саны 34,9%-ға өсті. Бұны Қазақстан Республикасындағы барлық әлеуметтік желіні пайдаланушылардың санына теңестіруге болады. Оның ішінде, instagram-да – 66,5% (12,1 млн) және Facebook-та – 14,3% (2,6 млн). Бейресми деректер бойынша, TikTok – елдегі ең танымал әлеуметтік желі. Қысқа бейнероликтерді көруге арналған платформада 14 миллионнан астам қазақстандық тіркелген [1]. Демек әлеуметтік желідегі қазақша жазу, қазақ тіліндегі контенттер – тілдің дамуы үшін маңызды. Бірақ ондағы жазылатын мәтіндер мен пікірлердің мазмұны әртүрлі. Мұнда адамдардың ішкі мәдениетін көрсететін, сөз бостандығын айқындайтын алаң қалыптасқан. Қазір қолданыстағы тіл ғана тірі және байиды деп есептесек, қазақ тілі өзінің тілдік нормасынан ажырап, өзге тілдердің араласуынан шұбарлану көбейді. XX ғасырдағы ауызекі

тіл мен жазба мәтіндерінде орыс сөздерінің орынсыз қолданылуы қазіргі кезде әлеуметтік желідегі жазба мәтіндерінде кездесе бастады. Бұл феномен тілдің табиғи дамуына және оның таза сақталуына әсер етуі мүмкін. Әлеуметтік желілерде орыс тіліндегі варваризмдердің кең таралуына ықпал болатын бірнеше себептер:

1. Интернеттің халықаралық әсері: әлеуметтік желілер мен интернеттің жаһандануы басқа тілдердің сөздерін кеңінен енгізуге мүмкіндік береді.

2. Сөздердің қысқартылуы мен өзгертілуі: әлеуметтік желілердегі жылдам коммуникация қажеттілігі варваризмдердің жиі қолданылуына әкеп соқтырады. Бұл сөздердің қысқартылуы мен өзгертілуі түрінде көрінеді.

3. Трендтер мен мода: жаңа сөздер мен сөз тіркестерінің трендке айналуы олардың әлеуметтік желіде көп қолданылуына әкеледі. Мысалы: жиза, охват, тема, ссылка, direct, coment, please, screen, podcast, respect, image, storis.

Тіл – ойлаудың жемісі. Адамзат тіл мен ойлаудың біртұтас екенін әлдеқашан дәлелдеген. Анар Салқынбай: «Дұрыс ойлайтын кісі дұрыс жазады. Қазақ тілінде бұрыс сөйлейтіндер әлеуметтік желіде де қате жіберуі заңдылық. Норманың бұзылуы осыдан басталмақ, бұл әлеуметтік желіні қолданушының ішкі мәдениетіне, өзін бағалауына, өзі арқылы тілін, ұлтын бағалауымен астасып жатыр», – дейді [2]. Тіл мамандары ғаламтордағы тілдің қолданылуына қатысты зерттеулерінің нәтижесінде қолданбалы лингвистикадағы бұл бағыттың қалыптасуының алғышарттарын атап қана қоймай, жеке пән ретінде қарастыра бастады. АҚШ ғалымы Н.С. Барон 1984 ж. «Computer Mediated Communication as a Force in Language Change» мақаласын жарияласа [3], 2010 ж. терең талдай келе «Always on: language in an online and mobile world» деген монографиясын шығарды [4]. Ғаламтордың ағылшын тіліне әсерін зерттеген Д. Кристал «Internet and language» еңбегінде интернет тілін жеке ғылыми бағыт деп тұжырымдаған [5]. О. Панюшкина әлеуметтік желілердегі тілдердің өзгерісін испан тілі негізінде қарастырса [6], Л.Ю. Иванов ғаламтордың тілдік ерекшеліктерін және ондағы болған өзгерістерді жіктеді [7].

Ғалымдардың әлеуметтік желі лингвистикасына деген қызығушылығының артуына қарамастан, интернет лингвистиканың көптеген аспектілері әлі де жеткілікті түрде түсініліп, сипатталған жоқ. Бірыңғай терминологиялық жүйе, зерттеу әдістемесі жасалмаған. Әсіресе, әлеуметтік желідегі қазақ тілінің жай-күйі туралы қанша айтылып, жазылып жүрсе де, тілдің шұбарлануына алып келетін себептер, жастар тіліндегі орыс және ағылшын сөздерінің қазақ тіліне ықпалы толық анықталмады. Бірақ «жастардың өз сленгі болуы да заңды. Әлеуметтік желіде жастар арасында осы сленгтер қолданысқа ие болуы да ықтимал. Бұл бұрыс қолданыс болуы мүмкін, бірақ, уақытша құбылыс» және «әлеуметтік желіні тым жиі пайдаланатын жастардың қысқарта жазуы әдеби тіл даму бағытының көрсеткіші, индикаторы бола алмайды. Әлеуметтік желінің тілі қазақ әдеби тілі дамуының, я кері кетуінің басты көрсеткіші емес, бұл тек ауызекі сөйлеу тілінің бір сипаты ғана. Бұл әлемдік үдеріс – цифрландырудың ықпалы», – дейді Анар Салқынбай [2]. Алайда шет тіл білімінде ғаламтордағы тілдің қолданылуын зерттеу ондаған жылдарға созылып келеді. Ал қазақ тіл білімінде бұған қатысты зерттеулер енді ғана басталды. Ұдайы өзгерістерге толы цифрлық әлемдегі қазіргі қазақ тілінің жай-күйін қарастыру – қазақ тілінің технологиялар ғасырындағы «өмір сүру» деңгейін анықтайды. Әлеуметтік желілерде қазіргі уақытта байқалып отырған IT трендтері мыналар:

1. Әлеуметтік сауда (Social Commerce): Әлеуметтік желілер арқылы өнімдер мен қызметтерді тікелей сатып алу мүмкіндігі кеңінен таралуда. Instagram, Facebook, TikTok және басқа платформаларда дүкендер мен өнімдерді тікелей жарнамалау мен сату үшін интеграцияланған функциялар ұсынылуда.

2. Әлеуметтік Жасанды Интеллект (AI): Әлеуметтік желілерде жасанды интеллект қолдану жеке контент ұсыныстарын, чат-боттарды және әлеуметтік медидағы трендтерді талдауды жақсартуға мүмкіндік береді. AI алгоритмдері пайдаланушының қызығушылығына сәйкес мазмұнды автоматты түрде көрсетуге көмектеседі.

3. Қысқа видео контент: TikTok және Instagram Reels сияқты платформалар арқылы қысқа және қызықты видеолар жасау танымал болып келеді. Бұл форматтың негізгі ерекшелігі – пайдаланушыларға қысқа уақытта көп ақпаратты немесе көңіл көтеретін контентті ұсыну.

4. Әлеуметтік медиа арқылы жаһандық қоғамдастықтар: Платформалар арасында қауымдастықтар мен топтардың кеңеюі әлеуметтік желілерде белгілі бір тақырыптарға қызығушылық танытатын адамдарды біріктіруге мүмкіндік береді. Бұл, әсіресе, арнайы қызығушылықтар мен кәсіби салаларда байқалады.

5. Әлеуметтік желі брендтері және инфлюенсерлер: Инфлюенсер маркетингінің дамуы брендтерге өз өнімдерін әлеуметтік желі арқылы жылжытуға мүмкіндік береді. Инфлюенсерлер өз аудиториясына байланысты өнімдер мен қызметтерді таныстырып, жарнамалайды.

6. Құпиялылық пен деректерді қорғау: Әлеуметтік желілерде құпиялылық мәселелері күн тәртібінде тұр. Пайдаланушылар өз деректерінің қалай пайдаланылып жатқанын қадағалап, жеке ақпараттарын қорғау мүмкіндігін іздейді. Бұл тренд платформалардың деректерді қорғау саясатын жақсартуға итермелейді.

7. Мазмұнды платформалардағы платформалық интеграция: Әлеуметтік желілер мен контент жасау платформалары арасындағы интеграция артып келеді. Мысалы, YouTube видеолары тікелей Instagram немесе TikTok-та бөлісу мүмкіндігі ұсынылады, бұл пайдаланушыларға контентті әртүрлі платформаларда таратуға мүмкіндік береді.

8. Мәтіндік жасанды интеллект (AI) көмекшілері: Әлеуметтік желілерде мәтіндік AI көмекшілері мен чат-боттар арқылы пайдаланушыларға жедел жауап беру, контент жасау және басқару мүмкіндіктері кеңейтілуде.

9. Виртуалды және артқы реальдық (AR) технологиялары: AR технологиялары әлеуметтік желілерде филтрлер мен әсерлер жасау үшін кеңінен қолданылады. Бұл тренд пайдаланушылардың әлеуметтік медида өз контенттерін қызықты әрі ерекше етіп көрсетуге мүмкіндік береді.

10. Мазмұнды модерация және әдептілік: Платформаларда қолданушылардың мазмұнын модерациялау мен әдептілік сақтау маңызды болуда. Бұл контенттің сапасын жақсарту және кибербуллинг пен теріс пікірлермен күресуге көмектеседі. Әлеуметтік желілердің қарқынды дамуы мен өзгеруіне байланысты, жаңа трендтер мен технологиялар тұрақты түрде пайда болып жатыр. Бұл – тілдің қолданыс аясының кеңеюінің бірден-бір жолы. Демек әлеуметтік желіде тілді дұрыс қолдану, тілдік норманы сақтау, сауатты жазу маңызды [8].

Ресей мен Қазақстан арасындағы тарихи, мәдени және экономикалық байланыстар орыс тілінің қазақ тіліне ықпалын тигізді. Бұл ықпалдың түпкі себебі екі халықтың ғасырлар бойғы араласуында жатыр. Ресей империясының Қазақстанды басып алуымен бірге орыс тілі кеңінен қолданылып, мемлекеттік басқару, білім беру және қоғамдық өмір салаларында өз орнын тапты. Орыс тілінен енген сөздер қазақ тілінің лексикасын байытты және оның дамуына үлкен әсер етті. Алайда қазіргі таңда қазақ тілі басымдыққа ие болса да, орыс сөздерінің дені әлеуметтік желілердегі қазақша контенттерге әсерін тигізуде. Яғни ауызша және жазбаша тілдік қатынастан бөлек, әлеуметтік желіде виртуалды қатынасты құрайтын тілдік орта пайда болды. Тілдік орта – қоғам мүшелерінің тілдік санасының қалыптасуына әсер ететін, тілдің қоғамдағы болмысына, оның дамуы мен қызмет етуіне ықпал ететін экономикалық, идеологиялық, мәдени, әлеуметтік, психологиялық, этнопсихологиялық факторлардың жиынтығы [9]. Тілдік ортаны тілдегі барлық жазба мәтіндер, жазарман, оқырман, айтарман, көрермен құрайды. Әлеуметтік желідегі белсенді тілдік орталар – instagram және facebook. Мұнда жарияланатын түрлі деңгейдегі жазбаларды тіл мамандары тексеріп, қадағаламайды. Тілдік норманы білмейтін, тілдің ережелерін меңгермеген желі қолданушылары әртүрлі қателер жібереді. Мәтін иесінің немесе танымал блогердің жазбасы қате болса да, оқырман оны дұрыс деп қабылдайды. М. Балақаев: «Тіл мәдениетінің қамын жеу, сайып келгенде, тіл тазалығына, ой дәлдігіне қамқорлық жасау...» десе [10], Р. Сыздық «Тіл мәдениеті дегеніміз – сөздерді дұрыс орнымен қолдану (лексикалық), дұрыс құрастыру (синтаксистік), дұрыс қиюластыру (морфологиялық), дұрыс дыбыстау (орфоэпиялық), сауатты жазу (орфографиялық), тілді

әсерлі етіп жұмсау (лингвостилистикалық) нормаларын ұстану, орнықтыру, жетілдіру», – дейді [9]. Н. Уәли: «Тіл мәдениетіне қажетті аса маңызды сапалардың бірі – сөз тазалығы. Сөз тазалығы дегенде ойымызға оралатыны – тіл тазалығы, сөзімізде бөгде тілдік элементтердің болмауы. Бірақ әдеби тілімізде өзге тілдерден енген сөздер, тіпті сөз тудырушы қосымшалар да бар екені мәлім. Ондай құбылысты тіл-тілдің барлығынан дерлік кездестіруге болады. Өзге тілден сөз алмаған, ауыз-түйістігі жоқ «таза» тілдер кемде-кем», – дейді [11]. Десек те орыс тіліндегі варваризмдер әлеуметтік желілерде сөйлеуді бейресми ету, эмоцияларды білдіру немесе тірі қарым-қатынас елесін жасау үшін қолданылады. Белгілі бір жағдайда бұндай қолданыстың қазақ тілінің әдеби нормасының қалпын сақтамауға әсері бар. Варваризмдерді шамадан тыс қолдану мәтіннің анықтығы мен құрылымын төмендетуі мүмкін. Бұндай тілдердің өзара әрекеттесуі туралы ғылыми тұжырымдар ғасырлар бойы айтылып келеді және бұл соңы емес екені белгілі. В. Матезиус «Тіл және стиль» еңбегінде тілдердің өзара әрекеттесу бағыттарын атап көрсетті: біріншіден, бір тілдің элементтерінің екінші тіл жүйесіне енуі тілдің дифференциалану дәрежесінің әлсіреуінен деп түсіндіреді. Алайда оған қарсы тұру мүмкін емес, – дейді ғалым. Себебі халықтар арасындағы идеялардың, заттардың, атаулардың және ұғымдардың үнемі алмасуы болса, онда шетел сөздері басымырық болуы тілдің ішке ресурстарының енуіне әсер етеді [11].

Біздің зерттеу саламыз бойынша әлеуметтік желідегі тіл мәселесін прагматикалық тұрғыдан [12] қарастырған. «Pragmatic discourse of the comments on Facebook in the Kazakh language» тақырыбында Facebook әлеуметтік желісі негізінде пікірлердің прагматикасы бойынша ауызекі сөйлеу тілінің ерекшеліктері, қарапайым сөздер, алғыс айту және қарғыс айту категориялары, эмоционалды-экспрессивті сөздер, вербалды емес әрекеттер, әртүрлі графикалық сызықтар, символдық белгілердің, тілдік объектілердегі таңбалар тілдің мағынасын тарылтатындығын көрсетеді. Ал [13] «Linguistic Representation of Value Dominants in Virtual Space: The Example of Kazakh and English Materials» зерттеуінде қазақ және ағылшын тіліндегі әлеуметтік желіде орналасқан жаңалықтарды, оның ішінде, саяси мәтіндерді қарастырып, түсініктеме береді. Зерттеу нәтижелері саяси мәтіндердің лингвистикалық ерекшеліктері мен олардың коммуникациядағы маңызын анықтайды. «A Linguistic Analysis of Social Network Communication» зерттеуі әлеуметтік желінің тілдік ерекшеліктеріне анықталған [14]. Әлеуметтік желілердің тілдік ерекшеліктеріне қызығушылық уақыт өткен сайын артып келеді. Келесі бір авторлар тобы виртуалды кеңістіктегі қазақ және ағылшын тілінде мәтін құрудың алгоритмін зерттесе [13], [14] «Communicative strategies in modern linguistics (on the material of English travel blogs)» тақырыбындағы жұмысын әлеуметтік желідегі коммуникацияға арнады.

Қазақ аудиториясы жиі кіретін әлеуметтік желілердің саны өте көп. Онлайн қарым-қатынас өмірдің барлық салаларында көрініс тауып, әртүрлі дискурсты қамтитын жағдайға жетті. Белгілі бір стилі анықталмаған хаттар мен хабарламалардың халыққа жеткізілу, таралу үлгісі де әртүрлі. Сандық және сапалық айырмашылықтар қазіргі әлеуметтік желіде де, медиа саласында да байқалады. Интернет-коммуникация – бұл екі адамның ғана қарым-қатынасынан құралмайды, онда мыңдаған пікірлер, толассыз тартыстар, миллиондаған қаралымдар пен лүпілдер, репосттар болады. Әлеуметтік желідегі тілдің ең үлкен артықшылығы – сөздің әртүрлі семантикада жұмсалуды, жанрлық және стильдік нормалар, ауызекі тілдік элементтер, жаргондар мен сленгтер, паразит сөздер мен варваризмдердің араласа қолданылуы. Сөйлеудің бұл стратегиялары кез келген чатта, кез келген платформада да жүзеге асырыла береді. Мәтіндерінің көлемі шағын болғанына қарамастан, күрделі мәселелерді көтереді. Сондықтан әлеуметтік желінің қай түрі болмасын, адамзатты өзіне тәуелді етті. Лингвистикалық тұрғыдан М. Мәліктің «Әлеуметтік желілердегі сөйлеу қызметінің прагматикасы мен функциясы» атты зерттеу еңбегі әлеуметтік желі тілі мен қазіргі қазақ әдеби тілінің нормаларына арналады [13]. Бұған дейінгі зерттеулер интернетке, оның түрлеріне, кеңістігіне арналса, енді прагматикасы, коммуникациясы, лингвостилистикасы зерттелмек. Ғаламтор адам санасына тиімді тілдік әсер етудің жалғыз жолы болғандықтан, оның тілі нормаға сай, сауатты, қатесіз болуы керек.

Қазақ тіліндегі стиль түрлері әлеуметтік желіде араласа жұмсала беріледі. Яғни бір стильде әртүрлі стиль элементтерін қолдануға және көпқабатты стильдік құбылыстарды жасауға болады. Қарыштап дамыған технологиялардың әсерінен интернеттегі сөйлесу стилі де сан алуан. Әлеуметтік желідегі кез келген мәтін мен пікір сөйлеу мәнерінен жазбаша нұсқаға ауысқан. Бұрын тек ауызша таралып, ауызша қызмет етсе, қазіргі таңда ғаламторда функционалды стильдердің дамуы сөйлеу стилінің өзгеруіне және жаңа элементтердің пайда болуына әкелді. Бұл стиль ешқандай ережеге бағынбайды. Өзінің жаргондарымен, сленгтерімен, варваризмдерімен ерекшеленеді. Әлеуметтік желілердегі тілдік құралдарды қолданудың әртүрлілігі әдеби нормадан ажырап, ұлттық құндылықтардың азайып бара жатқанын көрсетеді.

Материалдар мен әдістер

Зерттеу барысында біз Instagram және Facebook сияқты әлеуметтік желілерде жиі талқыланатын тақырыптар бойынша блогерлердің жазбаларын зерттеу үшін сапалы және сандық әдістерді қолдандық. Мазмұнды талдау және лингвистикалық деректерді іздеу әдістерін қолдана отырып, біз осы жазбаларға қатысты пікірлердің маңызды үлгісін талдадық. Бұл тәсіл белгілі бір сөздер мен сөз тіркестерінің жиі қолданылуын анықтауға мүмкіндік берді. Содан кейін біз қазақ тілінің эволюциясына әсер ететін терминдердің лексикасын құрастырдық, бұл терминдердің тілді қолданудағы өзгерістерді және шет тілдерінің қазақ тіліне әсерін қалай көрсететініне назар аудардық. Деректер әлеуметтік желілердегі дискурстың қазақ тілінің өзгеруіне қалай ықпал ететінін көрсете отырып, тілге бейімделу заңдылықтары мен тенденцияларын анықтау үшін санаттарға бөлініп, талданды.

АТ көмегімен әлеуметтік желілерден мәліметтер жинауға шолу

АТ құралдарын қолдана отырып, әлеуметтік желілерден деректерді жинау зерттеу әдістемелеріндегі айтарлықтай ілгерілеуді білдіреді. АТ құралдары мен әдістерін қолдану әртүрлі әлеуметтік медиа платформаларынан деректердің үлкен көлемін жүйелі түрде жинауға, талдауға және түсіндіруге мүмкіндік береді. Бұл тәсіл деректерді жинау тиімділігін арттырып қана қоймайды, сонымен қатар қолмен әдістерді қолдану арқылы жіберіп алуы мүмкін егжей-тегжейлі ақпаратты алуға көмектеседі.

Деректерді жинаудың автоматтандырылған құралдары Facebook, Instagram, Twitter және LinkedIn сияқты әлеуметтік медиа желілерінен үлкен көлемдегі ақпаратты ала алады. Бұл құралдар профильдерді, жазбаларды, түсініктемелерді және басқа да тиісті мазмұнды алу үшін алгоритмдерді пайдаланады, деректерді кейінгі талдау үшін құрылымдайды. Деректерді жинау құралдарының этикалық деректерді жинауды қамтамасыз ету үшін әрбір платформаның қызмет көрсету шарттарына және құпиялылық саясатына сәйкес келуі өте маңызды.

Көптеген әлеуметтік желілер зерттеушілерге деректерге құрылымдық форматта қол жеткізуге мүмкіндік беретін API интерфейстерін ұсынады. API интерфейстері пайдаланушылардың өзара әрекеттесуі, мазмұны және трендтері туралы ақпаратты алудың бақыланатын әдісін ұсынады. Мысалы, Twitter API интерфейсін твиттер мен қатысу көрсеткіштерін жинау үшін пайдалануға болады, Ал Instagram Graph API жариялау көрсеткіштері мен пайдаланушы деректеріне қол жеткізуді қамтамасыз етеді.

Әлеуметтік желілерден жиналған мәтіндік деректерді талдау үшін табиғи Тілді Өңдеу (NLP) әдістері қолданылады. Көңіл-күйді талдауды, тақырыпты модельдеуді және кілт сөздерді шығаруды қолдана отырып, зерттеушілер әлеуметтік медиа мазмұнындағы тенденцияларды, көңіл-күйлерді және тақырыптық үлгілерді анықтай алады. NLP алгоритмдері пайдаланушының тілі мен мінез-құлқы туралы құнды түсініктер ұсына отырып, пайдаланушы жасаған мазмұнның мәнмәтіні мен нюанстарын түсінуге көмектеседі.

Машиналық оқыту модельдерін үлгілерді тануға және әлеуметтік медиа деректеріне негізделген нәтижелерді болжауға үйретуге болады. Мысалы, жіктеу алгоритмдері жазбаларды көңіл-күй бойынша жіктей алады, ал кластерлеу әдістері ұқсас мазмұнды немесе пайдала-

нушы профильдерін топтастыра алады. Машиналық оқыту үлкен деректер жиынын талдау және бірден байқалмайтын жасырын үлгілерді ашу мүмкіндігін арттырады.

Әлеуметтік желілер күн сайын үлкен көлемдегі деректерді шығарады, оларды көбінесе үлкен деректер деп атайды. Hadoop немесе Spark сияқты үлкен деректер құрылымдарын пайдалану зерттеушілерге осы үлкен көлемдегі ақпаратты тиімді өңдеуге және талдауға мүмкіндік береді. Бұл технологиялар құрылымдалмаған деректерді өңдеуді қолдайды, бұл әлеуметтік медиа трендтері мен үлгілерін жан-жақты талдауға және визуализациялауға мүмкіндік береді. Деректерді визуализациялау құралдары күрделі әлеуметтік медиа деректерін түсіндіру үшін қажет. Графиктер, диаграммалар және жылу карталары сияқты көрнекі бейнелерді жасау зерттеушілерге трендтерді, корреляцияларды және ауытқуларды оңай анықтауға көмектеседі. Визуализация нәтижелерді тиімді жеткізуге және әлеуметтік медиа динамикасын жақсырақ түсінуге көмектеседі.

Әлеуметтік желілерден деректерді жинау кезінде этикалық ойлар өте маңызды. Зерттеушілер деректерді жинау әдістерінің пайдаланушылардың құпиялылығын сақтауын және құқықтық және этикалық нормаларды сақтауын қамтамасыз етуі керек. Деректерді анонимизациялау және біріктіру пайдаланушының жеке басын қорғауға және ақпаратты теріс пайдаланудың алдын алуға көмектеседі [15].

Осылайша, әлеуметтік желілерден деректерді жинау үшін АТ құралдарын пайдалану зерттеушілерге үлкен көлемдегі ақпаратпен дәлірек және тиімдірек жұмыс істеуге мүмкіндік береді. Автоматтандырылған құралдарды, API Интерфейстерін, NLP, машиналық оқытуды, үлкен деректерді талдауды және визуализация әдістерін қолдану әлеуметтік медиа құбылыстарын тереңірек түсінуге ықпал етеді және цифрлық коммуникация тенденциялары туралы түсінікті арттырады [16–17].

Кесте 1 – Қазақ тілінің дамуына және қолданушылардың қатысуына әсер ету контекстіндегі әлеуметтік желілерді салыстырмалы талдау

Әлеуметтік желі	Жаһандық аудитория	Қазақ ауд-сы	Жасы	Функциясы	Тақырыбы	Қолайлылық	Пайдаланушының ой-өрісі
Facebook	3 млрд	2.6 млн	25–34, 35–44	Іскерлік, әлеуметтік және білім беру мазмұнын тұтынушылар; экономикалық белсенді; маркетингтік платформа	Саясат, тіл, дін, білім, экономика	Ақпарат тез таралады; Жаңалықтар уақтылы және шынайы; Қоғамдық мәселелер талқыланады	Мазмұнды контент, ойын-сауық аз
Instagram	2 млрд	1.5 млн	18–24, 25–34	Мазмұнды көрнекі түрде бөлісу; әсер етуші маркетинг; трендке негізделген	Сән, өмір салты, саяхат, тамақтану, фитнес	Өте көрнекі; қызықты әңгімелер мен бейнелер; Трендтер тез таралады	Көрнекі тартымдылық пен тенденцияларға, ойын-сауыққа бағытталған
Twitter	450 млн	800,000	18–34	Нақты уақыттағы жаңартулар; Жаңалықтар және қоғамдық дискурс; ақпаратты жылдам тарату	Саясат, Жаңалықтар, Технологиялар, Атақты адамдар	Нақты уақыттағы жаңартулар; трендтерге арналған хэштегтер; қысқаша жазбалар	Нақты уақыттағы ақпаратқа назар аудару; Қоғамдық дискурс

1-кестенің жалғасы

TikTok	1 млрд	1.2 млн	16–24	Қысқа бейне мазмұны; әсер етушілерге бағытталған тенденциялар;	Ойын-сауық, ән, би, комедия	Қысқа, тартымды бейнелер; трендке негізделген мазмұн; жоғары интерактивті	Қысқа формадағы трендтер мен ойын-сауық әзілдері
LinkedIn	900 млн	500,000	25–54	Кәсіби желі; бизнес мазмұны; жұмыс іздеу	Мансап, сала жаңалықтары, біліктілікті арттыру	Кәсіби мазмұн; желілік мүмкіндіктер; жұмыс туралы хабарландырулар	Кәсіби өсуге назар аудару; бизнеске бағытталған
WhatsApp	2 млрд	1 млн	18–54	Жедел хабар алмасу; жеке және топтық байланыс; файлдарды ортақ пайдалану	Жеке әңгімелер, топтық чаттар	Шифрланған хабарламалар; мәтіндерді, фотосуреттерді, бейнелерді оңай бөлісу; топтық чаттар	Жеке қарым-қатынасқа назар аудар; тікелей және жеке хабар алмасу

Бұл кестеде олардың жаһандық және қазақстандық аудиториясына, жас ерекшеліктеріне, негізгі функцияларына, кең таралған тақырыптарына, пайдаланушылардың ыңғайлылығына және ойлауына назар аударатын, бес негізгі әлеуметтік желіні салыстыру берілген. Талдау пайдаланушылардың өзара әрекеттесуі, мазмұн теңгерімдері және қарым-қатынас мәнерлері арқылы әртүрлі платформалардың қазақ тіліне қалай әсер ететінін түсінуге бағытталған.

Әлеуметтік желілерден деректерді жинау процесі

Бұл зерттеуде лингвистикалық заңдылықтарды және олардың қазақ тіліне әсерін талдау үшін Instagram және Facebook әлеуметтік медиа платформаларынан мәліметтер жиналды. Деректерді жинау процесі жан-жақты және сенімді нәтижелерді қамтамасыз ету үшін құрылымдалған.

1. Деректерді жинаудың міндеттері. Негізгі мақсат лингвистикалық тенденцияларды, соның ішінде шетелдік сөздерді, эмоционалды өрнектерді және саяси терминдерді қолдануды анықтау үшін Instagram және Facebook-тан пайдаланушы жасаған мазмұнды жинау және талдау болды.

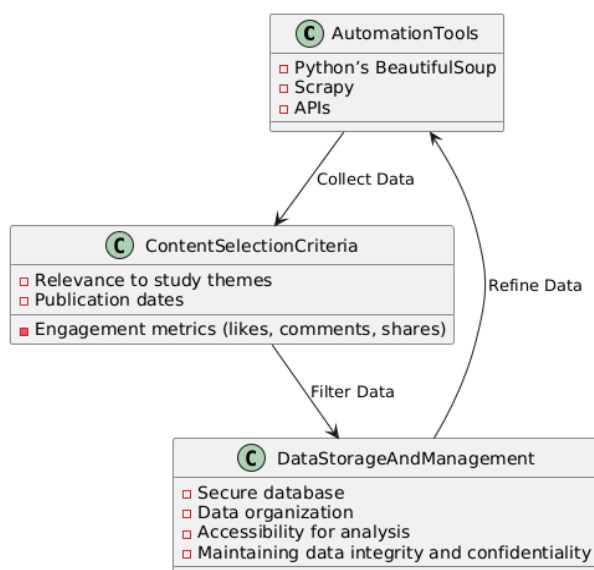
2. Әлеуметтік желілерді таңдау. Instagram және Facebook кеңінен қолданылуына және цифрлық коммуникацияда тілді қолдануға айтарлықтай әсер етуіне байланысты таңдалды. Instagram визуалды және мәтіндік деректерді ұсынады, ал Facebook әртүрлі және кең мәтіндік мазмұнды ұсынады.

3. Деректерді жинау әдістері.

♦ Автоматтандыру құралдары: деректер әлеуметтік медиа платформалары ұсынатын Python BeautifulSoup, Scrapy және API интерфейстері сияқты автоматтандырылған құралдар мен кітапханалар арқылы жиналды. Бұл құралдар жазбаларды, пікірлерді және пайдаланушылардың өзара әрекеттесуін шығаруды жеңілдетті.

♦ Мазмұнды таңдау критерийлері: мазмұн белгілі бір критерийлер негізінде таңдалды, соның ішінде зерттеу тақырыптарының өзектілігі (мысалы, саяси, эмоционалдық және шетелдік сөздер), қатысу көрсеткіштері (ұнатулар, пікірлер, бөлісулер) және жарияланған күндері.

♦ Деректерді сақтау және басқару: жиналған деректер қауіпсіз дерекқорда сақталды, бұл дұрыс ұйымдастыруды және кейінгі талдау үшін қолжетімділікті қамтамасыз етті. Процесс барысында деректердің тұтастығы мен құпиялылығы сақталды [18–19].



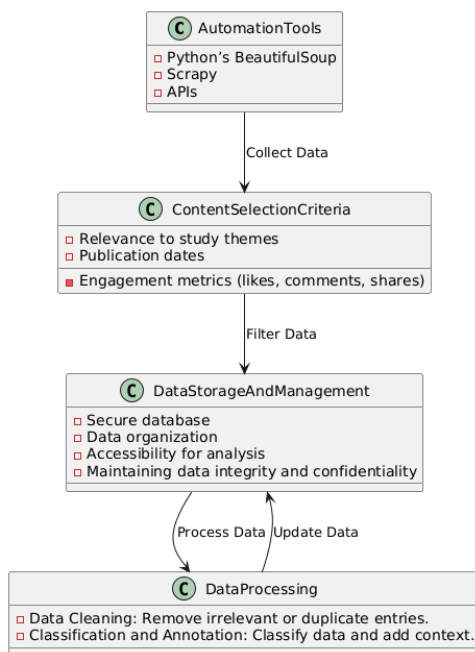
Сурет 1 – Деректер ағыны және өңдеу диаграммасы

Бұл диаграмма деректерді өңдеу жүйесінің негізгі компоненттерін және олардың өзара әрекеттесуін бейнелейді.

Деректерді өңдеу

♦ Деректерді тазалау: бастапқы деректерді тазалау деректер жиынының дәл және репрезентативті болуын қамтамасыз ете отырып, маңызды емес немесе қайталанатын жазбаларды жою үшін орындалды.

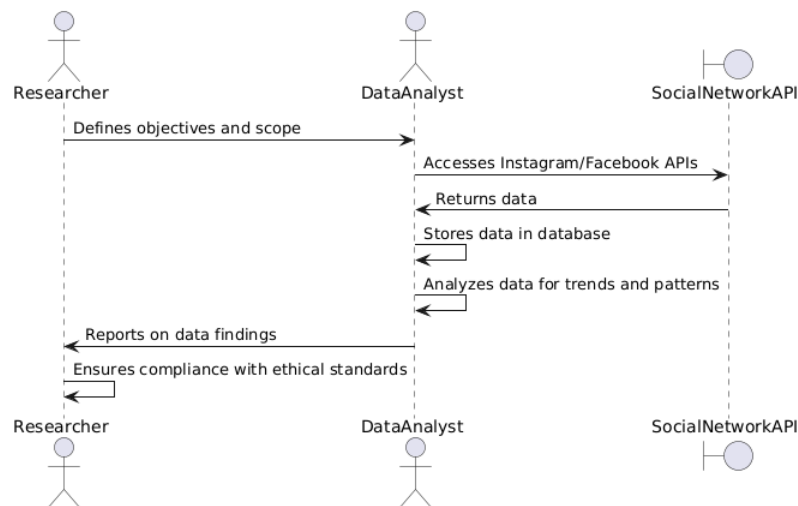
♦ Жіктеу және аннотация: Деректер жағымсыз сөздер, эмоционалды-экспрессивті сөздер, саяси терминдер және шет тіліндегі сөздер сияқты санаттарға жіктелді. Аннотация әрбір жазбаға контекст пен өзектілік қосу үшін жасалды [20–21].



Сурет 2 – Деректерді өңдеу және басқару ағыны

Бұл диаграмма 2-суретте деректерді өңдеу және басқару жүйесіндегі негізгі компоненттер арасындағы мәліметтер ағыны көрсетілген. Оған автоматтандыру құралдары, мазмұнды таңдау критерийлері, деректерді сақтау және басқару, деректерді өңдеу кезеңдері кіреді. Диаграмма жүйеде деректердің қалай жиналатынын, сүзілетінін, өңделетінін және жаңартылатынын көрсетеді.

Осы процедураларды орындай отырып, зерттеу цифрлық дәуірдегі тіл динамикасын тереңірек түсінуге ықпал ете отырып, әлеуметтік желілердегі лингвистикалық тенденцияларға сенімді талдау жасауға бағытталған [21–22].



Сурет 3 – Әлеуметтік желі деректерін талдау процесі

Бұл реттілік диаграммасы 3-суретте зерттеуге қатысушылар мен әлеуметтік желілерден деректерді жинау және талдау жүйесінің өзара әрекеттесу процесі көрсетілген.

Процесс қадамдарының сипаттамасы:

1. Мақсаттары мен көлемін анықтау: зерттеуші деректерді талдаудың мақсаттары мен көлемін белгілейді.
2. Деректерді шығару: деректер талдаушысы API арқылы әлеуметтік желілерден (Instagram/Facebook) деректерге қол жеткізеді.
3. Деректерді қабылдау: API сұралған деректерді деректер талдаушысына қайтарады.
4. Деректерді сақтау: деректер талдаушысы жиналған деректерді мәліметтер базасында сақтайды.
5. Деректерді талдау: деректерді талдаушы трендтер мен заңдылықтарды анықтай отырып, деректерді талдайды.
6. Есеп нәтижелері: деректер талдаушысы талдау нәтижелерін зерттеушіге хабарлайды.
7. Этикалық сәйкестікті қамтамасыз ету: зерттеуші деректер мен талдаудың этикалық нормаларға сәйкестігін қамтамасыз етеді.

Бұл диаграмма деректерді талдау процесінің негізгі қатысушылары арасындағы қадамдар мен өзара әрекеттесулердің реттілігін визуализациялауға көмектеседі.

Әдістеме

Бұл зерттеуде мәтіндік деректерді талдау және жіктеу үшін мәтіндік талдау мен машиналық оқыту әдістерін біріктіретін екі фазалы әдістеме қолданылды. Бұл процесс әлеуметтік медиа платформаларынан деректерді алуды, мәтінді алдын ала өңдеуді және машиналық оқытуды қамтиды.

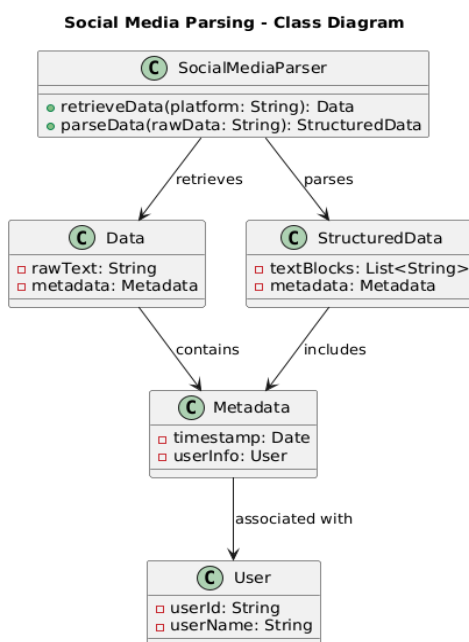
1. Әлеуметтік медианы талдау:

◆ Деректер instagram және Facebook-тан жеке талдау әдістерін қолдана отырып алынды. Бұл осы платформалардың жазбаларынан, түсініктемелерінен және басқа да тиісті бөлімдерінен мәтіндік мазмұнға бағдарламалық түрде қол жеткізуді және алуды қамтыды. Талдау процесі 4-суреттегі әлеуметтік желілерде кездесетін нақты деректер пішімдері мен құрылымдарын өңдеуге арналған.

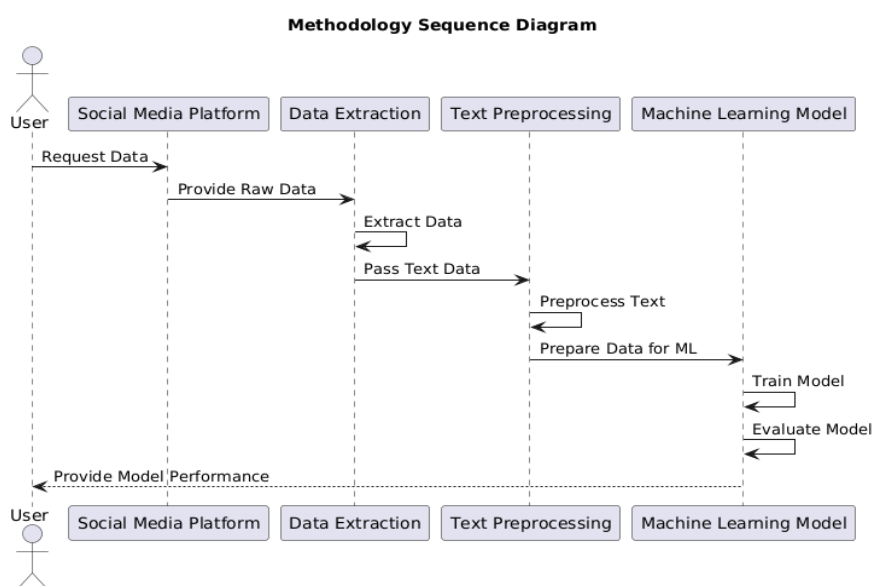
2. Деректерді құрылымдау:

Алынған әлеуметтік медиа деректері талдауға жарамды форматта құрылымдалған. Instagram және Facebook үшін деректер мәтіндік блоктар мен метадеректерге бөлініп, мәтіндік мазмұнды келесі қадамдарда тиімді өңдеуге және талдауға мүмкіндік берді.

Бұл әрекет диаграммасы әлеуметтік медианы талдау процесіне қатысатын жұмыс процесін көрсетеді. Ол әлеуметтік медиа платформаларынан деректерді алудан бастап өңделген ақпаратты сақтауға дейінгі әрекеттердің реттілігін сипаттайды. Диаграммада API қоңырауларын шалу және веб-скрепинг сияқты платформаға (Instagram немесе Facebook) негізделген әртүрлі әрекеттерді өңдеу үшін шешім қабылдау нүктесі бар. Содан кейін ол шикі деректерді алу, талдау, құрылымдау және соңында өңделген деректерді сақтау қадамдарын көрсетеді.



Сурет 4 –Әлеуметтік медианы талдау



Сурет 5 – Әлеуметтік медианы талдауға арналған жұмыс процесінің белсенділік диаграммасы

Мәтінде талдау

1. Мәтінді алдын ала өңдеу:

Мәтіндік деректер дәйектілікті қамтамасыз ету және оларды талдауға дайындау үшін алдын ала өңделді. Бұл регистрге сезімталдықты сақтау үшін барлық мәтінді кіші әріпке түрлендіруді және 5-суреттегі тұрақты тіркестерді қолдана отырып, мәтінді жеке сөздерге таңбалауды қамтыды. Бұл әрекет диаграммасы әлеуметтік желіні талдау процесіне қатысатын жұмыс процесін көрсетеді. Ол әлеуметтік медиа платформаларынан деректерді алудан бастап өңделген ақпаратты сақтауға дейінгі әрекеттердің реттілігін сипаттайды. Диаграммада API қоңырауларын шалу және веб-скрепинг сияқты платформаға (Instagram немесе Facebook) негізделген әртүрлі әрекеттерді өңдеу үшін шешім қабылдау нүктесі бар. Содан кейін ол шикі деректерді алу, талдау, құрылымдау және соңында өңделген деректерді сақтау қадамдарын көрсетеді [25].

2. Пайыздық сәйкестік:

Өңделген мәтін мен анықтамалық терминдер арасындағы сәйкес сөздердің пайызы есептелді. Анықтамалық терминдер жеке құжаттағы кестелерден алынды және сәйкестік пайызы формула бойынша есептелді:

$$\text{Percentage} = \left(\frac{\text{Total Matches}}{\text{Total Words}} \right) \times 100$$

Бұл көрсеткіш әлеуметтік медиа мәтінінің анықтамалық кестелерде көрсетілген нақты терминологияларға немесе тұжырымдамаларға қаншалықты сәйкес келетінін көрсетті.

Машиналық оқытудың жіктелуі

1. Деректерді дайындау:

Алдын ала өңделген мәтіндік деректер мен анықтамалық сөздер «scikit-learn» кітапханасындағы «CountVectorizer» көмегімен мүмкіндік векторларына түрлендірілді. Бұл түрлендіру мәтіндік деректерді сандық форматқа түрлендіру арқылы машиналық оқыту алгоритмдерін қолдануды жеңілдетті.

2. Модельдік оқыту:

Мәтіндік деректерді жіктеу үшін Аңғал Байес классификаторы ('MultinomialNB') қолданылды. Бұл модельді таңдау оның категориялық деректерді өңдеуге жарамдылығына және оны жүзеге асырудағы тиімділігіне негізделген. Деректер жиынтығы модельдің жеке деректер негізінде бағалануын қамтамасыз ету үшін 80-нен 20-ға дейінгі арақатынаста оқыту мен тестілеудің ішкі жиындарына бөлінді.

3. Модельді бағалау:

Жіктеуіштің өнімділігі дәлдікпен өлшенді, бұл дұрыс жіктелген даналардың үлесін көрсетеді. Модель 1,00 дәлдік көрсеткішіне қол жеткізді, бұл сынақ деректері бойынша тамаша жіктеу өнімділігін көрсетеді.

Әдістеме әлеуметтік желілердегі мәтіндерді талдауға кешенді көзқарасты қамтамасыз ету үшін деректерді алудың озық әдістерін мәтіндік талдаумен және машиналық оқытумен біріктірді. Деректер Instagram және Facebook-тан талданды, талдау үшін өңделді және Аңғал байес классификаторын үйрету үшін пайдаланылды. Бұл тәсіл әлеуметтік медиа мазмұнын дәл жіктеуге және тиімді талдауға мүмкіндік берді. Әлеуметтік желілерден деректерді алудан бастап, талдау және құрылымдау арқылы соңғы деректерді сақтауға дейінгі жұмыс процесін бейнелейді. Платформаға тән әрекеттер үшін шешім қабылдау нүктелерін қамтиды [26].

Нәтижелер мен талқылау

Қоғамдағы барлық өзгерістер тілдің дамуына немесе тежелуіне әсер етеді. Қазіргі уақытта тіл біліміне жаңа көзқараспен тілді антропоспецификалық және экологиялық тұрғыдан зерттеу жүргізілуде. Яғни, адамның тілге қалай әсер ететінін, тілдің адамның ойлауына, сөйлеуіне, мәдениетіне қандай әсер ететінін анықтау. Әлеуметтік желі тілін прагматикалық,

коммуникативті, лингвостилистикалық тұрғыдан қарастыру тілді экологиялық тұрғыдан зерттеуге жатады.

```
Analyzing text using data from tables...
Match percentage for 'Situation': 0.01%
Match percentage for 'Agression': 0.00%
Match percentage for 'Trolling': 0.01%
Match percentage for 'EEW': 0.97%
Match percentage for 'PW': 0.13%
Match percentage for 'RW': 0.24%
Match percentage for 'EnW': 0.57%
Match percentage for 'ErW': 0.34%
Match percentage for 'Abb': 0.17%
Preparing data for machine learning...
Splitting data into training and testing sets...
Training Naive Bayes classifier...
Evaluating model accuracy...
Model accuracy: 1.00
Process completed.
```

Толық талдау нәтижелері:

1. Ситуация: 0.01%

"Ситуация" санатына сәйкес келетін мәтіннің пайызы өте төмен, бұл мәтінде ситуациялық контекстке қатысты сілтемелер немесе элементтер аз болатындығын көрсетеді.

2. Агрессия: 0.00%

Агрессивті тілдің немесе мазмұнның анықталатын жағдайлары табылған жоқ. Бұл мәтінде ешқандай агрессивті өрнектер мен тондардың жоқтығын көрсетеді.

3. Троллинг: 0,01%

Троллингке қатысты мазмұнның болуы шамалы, бұл троллингтің мінез-құлқы немесе тілі мәтінде іс жүзінде жоқ екенін көрсетеді.

4. EEW (Эмитикондарды пайдалану): 0,97%

Смайликтерді пайдалану кезінде сәйкестіктің салыстырмалы түрде жоғары пайызы байқалады – 0,97%. Бұл смайликтердің мәтінде кездейсоқ немесе бейресми реңкті білдіретін жиі қолданылатынын көрсетеді.

5. PW (Саяси сөздер): 0.13%

Саяси сөздер мәтіннің аз бөлігінде кездеседі. 0,13% деңгейінде бұл саяси сілтемелердің немесе терминологияның бар екенін, бірақ басым емес екенін көрсетеді.

6. RW (Орысша сөздер): 0,24%

Мәтінде 0,24% сәйкес келетін орыс сөздерінің қарапайым саны бар. Бұл мәтінде орыс тіліне немесе контекстке қатысты кейбір элементтер бар екенін көрсетеді.

7. EnW (Ағылшын сөздері): 0,57%

Ағылшын сөздері мәтіннің едәуір бөлігін құрайды, 0,57% сәйкес келеді. Бұл ағылшын тілінің мәтіндегі көрнекті тіл екенін көрсетеді, бірақ ол қолданылатын жалғыз тіл емес.

8. ErW (Қателер/Қате сөздер): 0.34%

Мәтіннің 0,34% құрайтын қателіктердің немесе қате сөздердің айтарлықтай болуы байқалады. Бұл емле немесе грамматикада кейбір мәселелер бар екенін көрсетеді.

9. Абб (Қысқартулар): 0.17%

Қысқартулар мәтіннің кішкене бөлігінде 0,17% сәйкестікпен пайда болады. Бұл аббревиатуралардың қолданылатынын, бірақ мәтіннің негізгі ерекшелігі емес екенін көрсетеді.

Қысқаша мазмұны:

Талдау келесі негізгі ойларды анықтайды:

♦ Эмотикондарды пайдалану (EEW) – бұл ең көп таралған функция, ол 0,97% сәйкес келеді. Бұл эмоцияларды немесе өрнектерді жеткізу үшін смайликтерді қолданатын кездейсоқ немесе бейресми стильді ұсынады.

♦ Ағылшын сөздері (EnW) 0,57% деңгейінде айтарлықтай қатысады, бұл ағылшын тілінің мәтіндегі негізгі тіл екенін көрсетеді.

♦ Орыс тіліндегі сөздер (RW) және қателер/кәте сөздер (ErW) қалыпты қатысуды көрсетеді, бұл көптілді мазмұнды немесе мәтін сапасын жақсартуды қажет ететін аймақтарды көрсетуі мүмкін.

♦ Саяси сөздер (PW), аббревиатуралар (Abb), ситуация және агрессия азырақ байқалады, бұл осы аспектілерге шектеулі назар аударуды білдіреді. Бұл егжей-тегжейлі бөлім мәтіндегі лингвистикалық және тақырыптық элементтер туралы түсінік береді, әрі қарай талдау үшін қызығушылық тудыратын және ықтимал фокусты көрсетеді.

Қорытынды

Зерттеу мақаласында орыс тілі элементтерінің әлеуметтік желілердегі қазақ тілінің дамуына әсері қарастырылған. Әлеуметтік желілердегі пікірлерді талдай отырып, қазақ тілінің қазіргі жағдайы анықталып, интернет байланысы қазіргі кезде қысқартулар, бұрмалаулар, тыныс белгілерінің қателері, смайликтер, жаргондар және шет тілдерінің араласуы сияқты лингвокреативтіліктің әртүрлі элементтерін қамтитынын көрсетеді.

Біздің зерттеуіміз орыс сөздерінің (варваризмдердің) әлеуметтік желілердегі қазақ тілінің эволюциясына әсеріне бағытталған. Нәтижелер орыс сөздерін жиі қолдану қазақ грамматикасы мен сөздік қорына теріс әсер етіп, лингвистикалық стандарттардың әлсіреуіне әкелуі мүмкін екенін көрсетеді. Варваризмдердің осылай қосылуы қазақ тілінің сөздік қорының кедерленуіне және оның қайталанбас ерекшеліктерінің эрозиясына әкелуі мүмкін. Сонымен қатар, орыс сөздерінің таралуы қазақтың мәдени және дәстүрлі контексттерін түсіну мен бағалауды төмендетуі мүмкін.

Осы мәселелерді шешу үшін бірнеше стратегия ұсынылады. Әлеуметтік желілерде қазақ тілін дұрыс қолдануға, орфографиялық және грамматикалық ережелерді сақтауға баса назар аудару керек. Тіл білімін жетілдіруге және шетелдік ықпалға қарсы тұру үшін қазақ тілінің сөздік қорын байытуға күш салу керек. Білім беру бастамалары қазақ тілін дұрыс қолдануға және варварлықтардың әсеріне бағытталуы керек. Қазақ тілінің мәртебесін көтеретін тілдік саясат пен мәдени бағдарламаларды қолдау оның цифрлық салада тазалығы мен табиғи дамуын қамтамасыз етуге көмектеседі.

Варваризмдердің әсерін жою үшін қазақ тілінің әлеуметтік желілерде дамуын жалғастыра отырып, оның тұтастығы мен айқындылығын сақтау үшін өте маңызды.

ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Интернет-ресурс. URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/mam/press/article/details/151678> (дата обращения: 07.10.2024).
- 2 Салкынбай А. Ашық кітапхана (сұқбат). – 2024.
- 3 Baron N.S. Computer Mediated Communication as a Force in Language Change // *Visible Language*. – 1984. – V. 18. – No. 2. – P. 118–141. URL: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/visiblelanguage/pdf/18.2/computer-mediated-communication-s-a-force-in-language-change.pdf> (дата обращения: 07.10.2024).
- 4 Baron N.S. *Always on: Language in an Online and Mobile World*. – Oxford University Press, 2010. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195313055.001.0001>.
- 5 Crystal D. *Language and the Internet*. – Cambridge University Press, 2006. – P. 24.
- 6 Панюшкина О. Изменение языка под влиянием социальных сетей (на материале испанского языка) // *Альманах современной науки и образования*. – 2014. – № 3(82). – С. 133–135.
- 7 Иванов Л. *Язык в электронных средствах коммуникации* // *Культура русской речи*. – М.: Флинта, 2003. – С. 791–793.
- 8 Сыздыкова Р. Норма языка и его нормализация (кодификация) // *Сборник многотомного издания*. – Алматы: Ел-Шежире, 2014.
- 9 Балакаев М. *Казах әдеби тілі*. – Алматы, 2007. – С. 396–397.
- 10 Уали Н. *Қазақ сөз мәдениетінің теориялық негіздері: филол. ғыл. д-ры... дисс.*: 02/10/02. Алматы, 2007. 328 с.

- 11 Алкебаева Д., Саткенова Ж.Б., Конурбекова Т. Изменения в казахском языке в социальных сетях // Серия Филология КазНУ им. аль-Фараби. – № 2(182). – Алматы, 2021.
- 12 Malik M., Alkebaeva D., & Ahkmetkaliyeva L. Pragmatic discourse of the comments on Facebook in the Kazakh language // *Opción*. – 2019. – V. 35. – No. 90-2. – P. 369–384. ISSN 1012-1587, ISSN 2477-9385.
- 13 Kurkimbayeva A.M., Akhatova B.A., Gumovskaya G.N., Kotenyatkina I.B., & Khuziakhmetov A.N. Communicative strategies in modern linguistics (on the material of English travel blogs) // *XLinguae Journal*. – 2020. – V. 13. – No. 2. – P. 33–49. <https://doi.org/10.18355/XL.2020.13.02.03>.
- 14 Kurmanbekova Z., Shokabayeva S.K. Linguistic Analysis of Social Network Communication // *International Journal of Society, Culture & Language*, 2022.
- 15 Пастухова Л.С. Основы культуры речи и стилистики. – Симферополь, 2010. – С. 127–244.
- 16 Жанпеисова Н.М. Адаптация заимствованных из русского языка слов в казахском интернет-дискурсе // *Медиалингвистика*. – 2023.
- 17 Mutanov G. Multi-Class Sentiment Analysis of Social Media Data with Machine Learning Algorithms // *Computers Materials & Continua*. – 2021.
- 18 Алкебаева Д. Изменения в казахском языке в социальных сетях // *Евразийский журнал филологии: наука и образование*. – 2021.
- 19 Нарынов С.С. Об одном подходе к решению задачи анализа настроений для казахского и русского языков с использованием глубокого обучения // *International Conference on Computational Collective Intelligence*. – 2016.
- 20 Иманберди А. Подходы к проектированию системы мониторинга и анализа данных социальных сетей, адаптированных к специфике казахского и русского языков // *Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан*. – 2023.
- 21 Абибуллаева А.А. Извлечение ключевых слов из казахских текстов с использованием алгоритмов машинного обучения // *Вестник серии физико-математических наук*. – 2024.
- 22 Токтарова А.Б. Сбор непристойных комментариев в казахском языке с использованием методов машинного обучения // *Вестник серии физико-математических наук*. – 2023.
- 23 Зоткина А. Применение методов машинного обучения в задаче прогнозирования кибербуллинга пользователей социальных сетей // *Современные высокие технологии*. – 2022.
- 24 Абилдаев К.М. К вопросу заимствования русской лексики в деловой сфере казахского языка // *Вестник Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева. Серия: филология*. – 2023.
- 25 Жапарова Т. Синергетический анализ процессов словообразования как реакция на казахстанскую реальность // *Acta Universitatis Lodziensis Folia Linguistica Rossica*. – 2023.

REFERENCES

- 1 <https://www.gov.kz/memleket/entities/mam/press/article/details/151678>
- 2 Salkynbay A. (2024) *Ashyq qitaphana (syqbat)*.
- 3 Baron N. S. (1984) Computer Mediated Communication as a Force in Language Change. *Visible Language*, vol. 18, no. 2, pp. 118–141. URL: [<https://s3-us-west-2.amazonaws.com/visiblelanguage/pdf/18.2/computer-mediated-communication-s-a-force-in-language-change.pdf>]
- 4 Baron N. S. (2010) *Always on: Language in an Online and Mobile World*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195313055.001.0001>.
- 5 Crystal D. (2006) *Language and the Internet*. Cambridge University Press, 24 p.
- 6 Panyushkina O. (2014) Change of language under the influence of social networks (On the material of the Spanish language). *Almanac of Modern Science and Education*, vol. 3, no. 82, pp. 133–135.
- 7 Ivanov L. (2003) Language in electronic means of communication. In *Culture of Russian Speech*, Moscow: Flint, pp. 791–793.
- 8 Syzdykova R. (2014) The language norm and its normalization (codification). In *Collection of Multi-Volume Work*. Almaty: El-shezhire.
- 9 Balakaev M. (2007) *Qazaq adebi tili*, pp. 396–397.
- 10 Uali N. (2007). *Kazakh Soz Madeniyetinin Theory of Negizderi*: Philol. Gyl. D-ry... Diss: 02/10/02. Almaty, 328 p.
- 11 Alkebaeva D., Satkenova, Zh. B., & Konyrbekova, T. (2021) Changes in the Kazakh language in social. *Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty, Philology Series*, no. 2(182).

- 12 Malik M., Alkebaeva D., & Ahkmetkaliyeva, L. (2019) Pragmatic discourse of the comments on Facebook in the Kazakh language. *Opción*, vol. 35, no. 90-2, pp. 369–384. ISSN 1012-1587/ISSNe: 2477-9385.
- 13 Kurkimbayeva A.M., Akhatova B.A., Gumovskaya G.N., Koteniyatkina I.B., & Khuziakhmetov A.N. (2020) Communicative strategies in modern linguistics (on the material of English travel blogs). *XLinguae Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 33–49. <https://doi.org/10.18355/XL.2020.13.02.03>.
- 14 Kurmanbekova Z., & Shokabayeva S. (2022) K Linguistic Analysis of Social Network Communication. *International Journal of Society, Culture & Language*.
- 15 Pastukhova L.S. (2010) Fundamentals of Speech Culture and Stylistics, pp. 127–244.
- 16 Zhanpeissova N.M. (2023) Adaptation of foreign borrowings from the Russian language in Kazakh Internet discourse. *Media Linguistics*.
- 17 Mutanov G. (2021) Multi-Class Sentiment Analysis of Social Media Data with Machine Learning Algorithms. *Computers Materials & Continua*.
- 18 Alkebaeva D. (2021) Changes in the Kazakh language in social networks. *Eurasian Journal of Philology: Science and Education*.
- 19 Narynov S.S. (2016) On One Approach of Solving Sentiment Analysis Task for Kazakh and Russian Languages Using Deep Learning. *International Conference on Computational Collective Intelligence*.
- 20 Imanberdi A. (2023) Approaches to the design of a software system for monitoring and analyzing data of social networks, adapted to the specificity of the Kazakh and Russian languages. *Bulletin of the National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan*.
- 21 Abibullayeva A.A. (2024) Keyword extraction from Kazakh texts using machine learning algorithms. *Bulletin Series Physical and Mathematical Sciences*.
- 22 Toktarova A.B. (2023) Collection of obscene comments in Kazakh language online content using machine learning. *Bulletin Series Physical and Mathematical Sciences*.
- 23 Zotkina A. (2022) Application of machine learning methods in the task of predicting cyberbullying of social network users. *Modern high-tech technologies*.
- 24 Abildaev K.M. (2023) On the issue of borrowing Russian vocabulary in the business sphere of the Kazakh language. *Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. PHILOLOGY Series*.
- 25 Japarova T. (2023) Synergetic analysis of word formation processes as a reaction to Kazakhstan's reality. *Acta Universitatis Lodziensis Folia Linguistica Rossica*.

¹Sapakova S.Z.,

PhD, Associate Professor,
ORCID ID: 0000-0001-6541-6806
e-mail: sapakovasz@gmail.com

²Kambarova B.

doctoral student, Department of Philology
ORCID ID: 0009-0008-6153-4934
e-mail: gabitqyzy96@mail.ru

¹International University of Information Technologies

²Kazakh National Women's Pedagogical University

ANALYZING RUSSIAN BORROWINGS IN KAZAKH SOCIAL MEDIA USING MACHINE LEARNING

Abstract

This study explores the influence of Russian words on the development of the Kazakh language in social networks. The rapid advancement of information technology significantly impacts the language used in online communications. While the chaotic nature of online interactions can complicate language use and create confusion, it also accelerates the spread of information in Kazakh. This research examines how foreign words affect modern Kazakh internet discourse, including direct borrowings that enter the language without modification, mixed

phrases that retain the lexical and semantic properties of foreign words, the emergence of new abbreviations, and the influence of barbarisms. The study utilizes machine learning methods to analyse social media content from Instagram and Facebook. This approach enabled the processing of over 100,000 posts, revealing key linguistic shifts associated with the integration of Russian borrowings into Kazakh. The use of machine learning algorithms, such as the Naive Bayes classifier, automated the data analysis process and uncovered hidden patterns, providing a deeper understanding of how these borrowings affect the Kazakh language in the digital environment.

Key words: communication, pragmatics, linguistics, barbarism, Internet, comments, machine learning.

¹*Сапакова С.З.,

к.ф-м.н., ассоц. профессор, ORCID ID: 0000-0001-6541-6806,

*e-mail: sapakovasz@gmail.com

²Камбарова Б.,

докторант, ORCID ID: 0009-0008-6153-4934,

e-mail: gabitqzy96@mail.ru

¹Международный университет информационных технологий, г. Алматы, Казахстан

²Казахский национальный женский педагогический университет, г. Алматы, Казахстан

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РУССКИХ СЛОВ НА РАЗВИТИЕ КАЗАХСКОГО ЯЗЫКА В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ С ПОМОЩЬЮ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация

Данное исследование посвящено изучению влияния слов в русском языке на развитие казахского языка. Интенсивное развитие информационных технологий влияет на состояние языка социальных сетей. Во-первых, хаотичность в сети тормозит сферу применения языка и приводит к его искажению, а во-вторых, динамика развития высокая, можно сказать, что информация на казахском языке распространяется быстро. Основная цель статьи – изучение влияния иностранных слов в современном Интернете, языковых операций с переходом с одного языка на другой без каких-либо изменений, смешанных записей (включая слова с сохраненным лексическим и семантическим статусом иностранных слов), новых сокращений, варварства на казахский язык. В результате исследования выявляются формы речи в социальных сетях; в вербальной форме общения определяется вероятность факторов, способствующих искажению языка в связи с одновременным осуществлением момента проецирования мышления и мысли на свет через язык. Применение алгоритмов машинного обучения, таких как классификатор Наивного Байеса, автоматизировало процесс анализа данных и выявило скрытые закономерности, что позволило глубже понять влияние этих заимствований на казахский язык в цифровой среде. В рамках глобальных платформ, отличающихся прогрессивной тенденцией развития информационных технологий, анализируется текстовое содержание в Facebook и Instagram.

Ключевые слова: коммуникация, прагматика, лингвистика, варварство, Интернет, комментарии, чат.

Мақаланың редакцияға түскен күні: 07.10.2024

**МАТЕМАТИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР
MATHEMATICAL SCIENCES
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

UDC 517.958:533.7; 532.517.4

IRSTI 27.35.17; 30.17.27

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-107-123>

^{1*}Manapova A.,

Master of applied mathematics and computer science, ORCID ID: 0000-0003-1548-7061,

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

²Beketayeva A.,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, ORCID ID: 0000-0003-4360-3728,

e-mail: azimaras10@gmail.com

^{3,4}Makarov V.

Candidate of Technical Sciences, ORCID ID: 0000-0003-4874-5418,

e-mail: makfone@mail.ru

¹Civil aviation academy, Almaty, Kazakhstan

²Institute of mathematics and mathematical modeling, Almaty, Kazakhstan

³Institute of control sciences RAS, Moscow, Russia

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

**PENALTY FUNCTION METHOD FOR MODELING
OF CYLINDER FLOW WITH SUBSONIC COMPRESSIBLE FLOW**

Abstract

Numerical modelling of compressible flows around moving solids is important for engineering applications such as aerodynamic flutter, rocket engines and landing gear. The penalty function method is particularly effective when using orthogonal structural meshes within a finite difference scheme and is widely used to solve both laminar and turbulent flow problems. The method is based on the direct application of the Navier-Stokes equations with added sources, which allows the boundary conditions to be set indirectly. This method facilitates the imposition of Dirichlet boundary conditions but complicates the application of Neumann conditions. Nevertheless, the method works well with both types of boundary conditions, making it suitable for thermal and compressible flows where Neumann conditions are often used. Despite its flexibility, the method requires a high degree of data management and additional coding. This paper presents results of a recently developed higher-order method for compressible subsonic flows, demonstrating accurate modeling of moving objects without numerical noise. The method has been tested on stationary and moving objects over a wide range of Reynolds and Mach numbers.

Key words: numerical modelling, cylinder, subsonic flow, penalty function method, Navier-Stokes equations system.

Introduction

In recent decades, quantitative methods have been an integral part of research in aerodynamics and fluid dynamics. One of the most important tasks is the accurate simulation of flow around various bodies, which allows predicting aerodynamic performance and optimizing designs [1–2]. One of the classical problems in this field is the modeling of flow around a cylindrical type body with supersonic flow. This process is complex and involves many physically important phenomena such as flow separation, vortex formation, and interaction of vortices with the body surface [3].

The penalty function method based on characteristics offers an effective method for solving problems with complex boundary conditions [4–7]. The main advantage of this method is its ability to take into account the influence of boundary conditions on the flow distribution, which plays a particularly important role in modeling the rotation of complex-shaped bodies. The penalty function method has been successfully applied in various areas of fluid and gas mechanics, but its use for modeling supersonic flow around a cylinder requires additional research and adaptation [8–9].

To solve the modeling problem with subsonic flows around a cylindrical-type body using the method of penalty functions based on observations, it is necessary to first determine the geometric parameters of the object and the flow properties. Then an appropriate numerical method must be selected and boundary conditions must be set [10–11]. Then, the Navier-Stokes equations describing the motion of liquid or gas in the flow are solved. In these equations, parameters such as viscosity and density of the medium have a significant influence on the characteristics of the simplified body, including the effect of force and pressure distribution [12–15]. Variation of these parameters can lead to different flow regimes, such as laminar or turbulent, which significantly affect the aerodynamic properties of the object [16–18].

Abalakin's paper presents a method of numerical modeling of external flow of solids with viscous compressible fluid, which does not require calculation of their boundaries on a computational grid. The mathematical model is solved by the method of immersed boundaries. It satisfies the necessary boundary conditions at the interface of two media (solid and air) and does not require the construction of the corresponding body grids for numerical calculations. In this work, several variants of the method are performed, corresponding to different boundary conditions for the temperature at the resistive surface in the flow: isothermal and adiabatic. In the first case, the Brinkman penalty method was applied; in the second case, the volume penalty method based on the characteristics [19–20] was applied.

The Smokoski paper used a penalty function method based on the description of body traversal by compressible viscous flows. The paper used AMR (adaptive mesh refinement) meshes [21].

The following paper by Abalakin provides a characterization-based volume determination method for numerical simulation of flow that compresses above solid resistances in unstructured grids. The aerodynamic flow modeling is based on lattices mounted under the body with rigid and fluid interfaces defined by the lattice nodes, where the boundary conditions are explicitly specified [22].

The purpose of this work is to model subsonic flows around a cylindrical body using the observation-based penalty function method. The advantages of this method include the simplicity of its implementation and the possibility of using it in different types of problems. In addition, this method can be effective in eliminating instabilities or peculiarities in the numerical solution that may arise during modeling.

For numerical solution of modeling of supersonic flow of compressible ideal gas around a cylindrical body (see Fig. 1), the application of the method of penalty functions based on observations is considered. This method allows us to efficiently solve computational fluid dynamics problems taking into account penalty functions for exact compliance with boundary conditions. The mathematical

formulation of the problem involves modifying the Navier-Stokes equations to introduce penalty functions and using the characteristics for numerical solution.

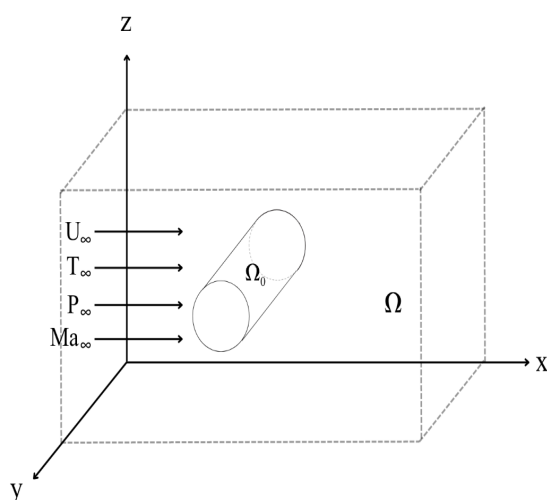


Figure 1 – Flow scheme

Main equations for a compressible perfect gas:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} = \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} - \frac{\partial \rho}{\partial x_j} + \frac{1}{Re} \cdot \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = RHS_{u_j}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_t}{\partial t} = - \frac{\partial (E_t + P) u_j}{\partial x_j} + \frac{1}{Re} \cdot \frac{\partial (u_i \tau_{ij})}{\partial x_j} + \frac{1}{(\gamma - 1) Re Pr} \cdot \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial T}{\partial x_j} \right), \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right),$$

$$\mu = \frac{1 + S_1}{T + S_1} \cdot T^{3/2}.$$

Total energy

$$E_t = \rho e + \frac{1}{2} \rho \vec{V}^2. \quad (4)$$

Initial energy

$$e = c_V T.$$

Specific heat capacity at constant velocity

$$c_V = \frac{1}{\gamma(\gamma - 1) M_\infty^2}.$$

Pressure

$$P = (\gamma - 1) \rho e = (\gamma - 1) \cdot \left[E_t - \frac{1}{2} \rho \vec{V}^2 \right].$$

Temperature

$$T = \frac{1}{\rho c_V} \left[E_t - \frac{1}{2} \rho \vec{V}^2 \right].$$

Boundary conditions for gas dynamics:

- ♦ at the input will $u_\infty, v_\infty, w_\infty, \mu_\infty, T_\infty, \rho_\infty$;
- ♦ at the output will boundary conditions of non-reflection;
- ♦ at the lateral boundaries will non-reflection conditions.

Materials and methods

The Control Based Volume Penalisation Method (CBVP) is based on the idea of introducing a penalty term into the Navier-Stokes equations (1)–(3) to model solids in fluid flow.

The basic idea of the method is that when $\eta \rightarrow 0$, the velocity of the fluid inside the solid tends to the velocity of the solid.

Comparison of CBVP with the Immersed Boundary Method (IBM) for the cylinder flow problem:

1. CBVP generally provides better accuracy near the solid boundary because the penalty term directly affects the velocity field.

2. CBVP may be more stable for larger values of the penalty parameter η , but this may lead to stiffness of the system of equations.

3. IBM can be more computationally efficient, especially for complex geometries, as it does not require mesh rebuilding.

4. CBVP is easier to realise as it does not require special processing of the solid boundary.

5. The CBVP can be easily integrated for the Navier-Stokes equations by adding a penalty term.

6. CBVP does not require complex processing of the cylinder boundary or rearrangement of the computational grid. The geometry of the cylinder is taken into account through the characteristic function $\chi(x)$, which simplifies the implementation of the method.

7. The method is easily adaptable to different flow conditions and geometries. You can easily change cylinder parameters (size, position) or add other objects to the flow.

8. If the penalty parameter η is properly chosen, the method provides a stable solution even at high Reynolds numbers.

9. The penalty term in CBVP has a clear physical interpretation as a force acting on the fluid from a solid body.

10. When the penalty parameter η is reduced, the CBVP solution converges to the exact solution of the streamline problem with the sticking condition on cylinder surface.

As we have realised, both methods give results close to the experimental value, but CBVP in this case shows a slightly more accurate result.

The CBVP method is a powerful tool for modelling the interaction of liquid and gas with solids. It provides good accuracy and is relatively easy to implement. However, like any method, it has its limitations and areas of application where it may be less effective than other approaches. The choice between CBVP and other methods depends on the specific problem, required accuracy and computational resources.

According to the paper, we consider the construction of CBVPM with positive Robin, Neumann, Dirichlet boundary conditions on a streamlined body by introducing additional penalty functions in the initial equations. For this purpose, in the region Ω with streamlined bodies Ω_0 we consider the following evolution equation for velocity [3]:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = RHS, \quad (6)$$

here RHS is the right-hand side describing the physical source terms. Equation (6) can be either hyperbolic or parabolic. For this problem we consider 3 main boundary conditions on the body Ω_0 :

- ♦ Dirichlet's condition is $\vec{u} = \vec{u}_0(\vec{x}, t), \vec{x} \in \partial\Omega_0$.
- ♦ Neumann's condition is $\frac{\partial \vec{u}}{\partial n} = \vec{q}(\vec{x}, t), \vec{x} \in \partial\Omega_0$;
- ♦ Robin's condition is $\alpha(\vec{x}, t)\vec{u} + \beta \frac{\partial \vec{u}}{\partial n} = \vec{q}(\vec{x}, t)$.

In order to add these boundary conditions to equation (6), we introduce the characteristic function $\kappa(\vec{x}, t)$:

$$\kappa(\vec{x}, t) = \begin{cases} 1, & \text{if } \vec{x} \in \Omega_0, \text{ inside the body} \\ 0, & \text{if } \vec{x} \notin \Omega_0 \end{cases}.$$

Then for each task according to CBVPM, equation (6) will take the following form:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = (1 - \kappa) \cdot RHS - \frac{\kappa}{\eta_b} (\vec{u} - \vec{u}_0) + \kappa \cdot \nu_n \cdot \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial x_i \partial x_i}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = (1 - \kappa) \cdot RHS - \frac{\kappa}{\eta_c} \left(n_k \frac{\partial \vec{u}}{\partial x_k} - \vec{q}(\vec{x}, t) \right), \quad (8)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = (1 - \kappa) \cdot RHS - \frac{\kappa}{\eta_c} \left[\alpha(\vec{x}, t) \vec{u} + \beta \cdot n_k \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial n} - \vec{q}(\vec{x}, t) \right], \quad (9)$$

here η_b, η_c are penalty parameters, which a $\eta_b, \eta_c \rightarrow 0$ controls the error of decisions by reducing the time in the calculation of penalty functions.

Since the basic system (1)–(4) contains the variables $\rho, \rho \vec{u}_i$ it is necessary to define the corresponding equations with penalty functions for the density. It is necessary to preserve the continuity equation inside the streamlined body. According to the paper, consider such a passive evolutionary condition, which is based on Neumann's condition. Due to the fact that the flow characteristics are directed inside the streamlined body, the solution at the interface should be determined by the flow physics using some derivative defined by the penalty function in the region Ω_0 [3].

In this paper, the Neumann condition for ρ is used, where the derivative sought in the region Ω_0 will be the derivative along the normal to the body surface, and the density inside the body becomes passive to the gas flow.

This procedure can be carried out by introducing an additional equation and taking advantage of the hyperbolicity of the CBVPM equations to extrapolate the density derivative to the surface of the streamlined body along the normal by means of the following equation:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial t} &= \frac{\kappa}{\eta_c} n_k \frac{\partial \Phi}{\partial x_k}, \\ \Phi &= (1 - \kappa) n_k \frac{\partial \rho}{\partial x_k} + \varphi \Phi, \\ \Phi|_{\Omega_0} &= \frac{\partial \rho}{\partial n}. \end{aligned} \quad (10)$$

Finding $\Phi(\vec{x}, t)$ along the Ω_0 region provides the necessary boundary condition from ρ for equation (7), which is solved only inside the body. Thus, the density derivatives outside the body are determined from the continuity equation and extrapolated inside the body by integrating equation (7). Therefore, the function $\Phi(\vec{x}, t)$ is completely passive to the physics of the flow.

Then the equation for the density with the penalty function taking into account the Neumann boundary condition for ρ at the boundary of the streamlined body is written as follows:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = (1 - \kappa) \cdot RHS - \frac{\kappa}{\eta_c} \left(n_k \frac{\partial \rho}{\partial x_k} - \Phi \right), \quad (11)$$

where RHS is the right-hand side of the continuity equation.

Using the constructed equations with penalty functions for $\vec{u}$, $\vec{\rho}$ we can write equations for $\vec{u}$ and E_t using the following equations:

$$\frac{\partial \rho \vec{u}_i}{\partial t} = \vec{u} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial E_t}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \zeta T + \frac{1}{2} \vec{u}_i^2 \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\rho e), \quad (13)$$

where $e = \zeta T + \frac{1}{2} \vec{u}_i^2$.

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho e)}{\partial t} &= e \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial e}{\partial t} = e \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left[\frac{\partial}{\partial t} \zeta T + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \vec{u}_i^2 \right) \right] = \\ &= e \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \vec{u}_i \frac{\partial u}{\partial t} + c_v \frac{\partial T}{\partial t}. \end{aligned}$$

Boundary conditions are set for the temperature on the streamlined body:

$$n_k \frac{\partial T}{\partial x_k} |_{\partial \Omega_0} = q.$$

The modified equation for the temperature for the whole region is written as:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = (1 - \kappa) \cdot RHS - \frac{\kappa}{\eta_c} \left(n_k \frac{\partial T}{\partial x_k} - q \right). \quad (14)$$

where M_∞ is Mach number, $Re = \frac{u_\infty L \rho}{\mu}$ is Reynolds number, Pr is Prandtl number.

Let us rewrite (12) taking into account (7) and (11):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \vec{u}_i}{\partial t} &= \vec{u}_i \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial \vec{u}_i}{\partial t} = \vec{u}_i (1 - \kappa) \cdot RHS - \frac{\vec{u}_i \kappa}{\eta_c} \left(n_k \frac{\partial \rho}{\partial x_k} - \Phi \right) + \rho (1 - \kappa) \cdot RHS - \frac{\kappa \rho}{\eta_b} (\vec{u} - \vec{u}_0) + \rho \kappa \cdot \\ v_n \cdot \frac{\partial^2 \vec{u}_i}{\partial x_i \partial x_i} &= (1 - \kappa) \cdot [\vec{u}_i RHS + \rho \cdot RHS] - \left[\frac{\vec{u}_i \kappa}{\eta_c} \left(n_k \frac{\partial \rho}{\partial x_k} - \Phi \right) + \rho \frac{\kappa}{\eta_b} (\vec{u} - \vec{u}_0) + \rho \kappa \cdot v_n \cdot \frac{\partial^2 \vec{u}_i}{\partial x_i \partial x_i} \right]. \end{aligned}$$

Now let us rewrite (13) taking into account (11), (7) and (14):

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_t}{\partial t} &= e (1 - \kappa) \cdot RHS - \frac{e \kappa}{\eta_c} \left(n_k \frac{\partial \rho}{\partial x_k} - \Phi \right) + \rho \vec{u}_i (1 - \kappa) \cdot RHS - \rho \vec{u}_i \frac{\kappa}{\eta_b} (\vec{u} - \vec{u}_0) + \rho \vec{u}_i \kappa \cdot v_n \cdot \\ \frac{\partial^2 \vec{u}_i}{\partial x_i \partial x_i} &+ c_v \rho (1 - \kappa) RHS - \frac{c_v \rho \kappa}{\eta_c} \left(n_k \frac{\partial T}{\partial x_k} - q \right) = (1 - \kappa) \cdot [e RHS + \rho \vec{u}_i \cdot RHS + c_v \rho \cdot RHS] - \\ \frac{e \kappa}{\eta_c} \left(n_k \frac{\partial T}{\partial x_k} - \Phi \right) &- \rho \vec{u}_i \frac{\kappa}{\eta_b} (\vec{u} - \vec{u}_0) + \rho \vec{u}_i \kappa \cdot v_n \cdot \frac{\partial^2 \vec{u}_i}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{c_v \rho \kappa}{\eta_c} \left(n_k \frac{\partial T}{\partial x_k} - q \right) = (1 - \kappa) \cdot RHS - \\ \frac{e \kappa}{\eta_c} n_k \frac{\partial \rho}{\partial x_k} &+ \frac{\kappa E_t \Phi}{\eta_c \rho} - \rho \vec{u}_i \frac{\kappa}{\eta_b} (\vec{u} - \vec{u}_0) + \rho \vec{u}_i \kappa \cdot v_n \cdot \frac{\partial^2 \vec{u}_i}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{c_v \rho \kappa}{\eta_c} \left(n_k \frac{\partial T}{\partial x_k} - q \right) = (1 - \kappa) \cdot RHS - \\ \left[\frac{n_k}{\eta_c} \left(\frac{\partial \rho e}{\partial x_k} - \rho \frac{\partial e}{\partial x_k} \right) \right. &+ \rho \vec{u}_i \frac{\kappa}{\eta_b} (\vec{u} - \vec{u}_0) + \rho \vec{u}_i \kappa \cdot v_n \cdot \frac{\partial^2 \vec{u}_i}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{1}{\eta_c} \frac{E_t \Phi}{\rho} - \frac{c_v \rho}{\eta_c} \left(n_k \frac{\partial T}{\partial x_k} - q \right) \left. \right] = (1 - \kappa) \cdot \\ RHS - \left[\frac{n_k}{\eta_c} \frac{\partial E_t}{\partial x_k} - \frac{n_k}{\eta_c} \rho \left(\frac{\partial c_v T}{\partial x_k} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \vec{u}_i^2 \right) \right) \right. &+ \frac{\rho \vec{u}_i}{\eta_b} (\vec{u} - \vec{u}_0) + \rho \vec{u}_i \cdot v_n \cdot \frac{\partial^2 \vec{u}_i}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{1}{\eta_c} \frac{E_t \Phi}{\rho} - \frac{c_v \rho}{\eta_c} n_k \frac{\partial T}{\partial x_k} - \\ \left. \frac{c_v \rho q}{\eta_c} \right] &= (1 - \kappa) \cdot RHS - \kappa, \\ \left[\frac{n_k}{\eta_c} \frac{\partial E_t}{\partial x_k} - \frac{2 n_k c_v \rho}{\eta_c} \frac{\partial T}{\partial x_k} - \frac{n_k \rho \vec{u}_i}{\eta_c} \frac{\partial \vec{u}_i}{\partial x_k} + \frac{\rho \vec{u}_i}{\eta_b} (\vec{u} - \vec{u}_0) \right. &+ \rho \vec{u}_i \cdot v_n \cdot \frac{\partial^2 \vec{u}_i}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{1}{\eta_c} \frac{E_t \Phi}{\rho} - \frac{c_v \rho q}{\eta_c} \left. \right] = (1 - \kappa) \cdot RHS - \\ \kappa \cdot \left[\frac{n_k}{\eta_c} \frac{\partial E_t}{\partial x_k} - \frac{2 \eta_k c_v \rho}{\eta_c} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_k} - \frac{\eta_k \rho \vec{u}_i}{\eta_c} \cdot \frac{\partial \vec{u}_i}{\partial x_k} + \frac{\rho \vec{u}_i}{\eta_b} (\vec{u} - \vec{u}_0) \right. &+ \rho \vec{u}_i \cdot v_n \cdot \frac{\partial^2 \vec{u}_i}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{1}{\eta_c} \frac{E_t \Phi}{\rho} - \frac{c_v \rho q}{\eta_c} \left. \right], \end{aligned}$$

Let $q=0$ in this problem, i.e. $\eta_k \frac{\partial T}{\partial x_k} = q = 0$, then the energy equation is rewritten as:

$$\frac{\partial E_t}{\partial t} = (1 - \kappa) \cdot RHS - \kappa \cdot \left[\frac{\eta_k}{\eta_c} \frac{\partial E_t}{\partial x_k} + \frac{\rho \vec{u}_i}{\eta_b} \cdot (\vec{u} - \vec{u}_o) - \frac{\eta_k \rho \vec{u}_i}{\eta_c} \cdot \frac{\partial \vec{u}_i}{\partial x_k} - \frac{1}{\eta_c} \frac{E_t \Phi}{\rho} + \rho \vec{u}_i v_n \cdot \frac{\partial^2 \vec{u}_i}{\partial x_i \partial x_i} \right]$$

Let us write the final modified system of equations (1)-(3) taking into account the penalty functions, decreasing boundary conditions on the streamlined body:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} = (1 - \kappa) \cdot RHS - \frac{\kappa}{\eta_c} (n_k \frac{\partial \rho}{\partial x_k} - \Phi) \\ \frac{\partial \rho \vec{u}_i}{\partial t} = (1 - \kappa) \cdot RHS - \kappa \left[\frac{1}{\eta_b} \cdot \rho (\vec{u}_i - \vec{u}_o) + \frac{\vec{u}_i}{\eta_c} \left(n_k \frac{\partial \rho}{\partial x_k} - \Phi \right) - \rho v_n \cdot \frac{\partial^2 \vec{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \right] \\ \frac{\partial E_t}{\partial t} = (1 - \kappa) \cdot RHS - \kappa \cdot \left[\frac{n_k}{\eta_c} \frac{\partial E_t}{\partial x_k} + \frac{\rho \vec{u}_i}{\eta_b} \cdot (\vec{u}_i - \vec{u}_o) - \frac{\rho \vec{u}_i}{\eta_c} \cdot n_k \frac{\partial \vec{u}_i}{\partial x_k} - \frac{1}{\eta_c} \frac{E_t \Phi}{\rho} + \rho \vec{u}_i v_n \cdot \frac{\partial^2 \vec{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \right] \end{cases}$$

In the obtained system, let us represent the RHS as a sum of convective and viscous summands, then:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + (1 - \kappa) \cdot \frac{\partial \rho \vec{u}_i}{\partial x_i} + (1 - \kappa) RHS + \frac{\kappa}{\eta_c} \left(\eta_k \frac{\partial \rho}{\partial x_k} - \Phi \right) = 0 \\ \frac{\partial \rho \vec{u}_i}{\partial t} + (1 - \kappa) \cdot \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} + (1 - \kappa) RHS_v + \kappa \left[\frac{\rho}{\eta_b} (\vec{u}_i - \vec{u}_o) + \frac{\vec{u}_i}{\eta_c} \left(\eta_k \frac{\partial \rho}{\partial x_k} - \Phi \right) \right] - \kappa \left[\rho v_n \cdot \frac{\partial^2 \vec{u}_i^2}{\partial x_j \partial x_j} \right] = 0 \\ \frac{\partial E_t}{\partial t} + (1 - \kappa) \frac{\partial u_i E_t}{\partial x_j} + (1 - \kappa) RHS_v + \kappa \left[\frac{\rho u_i}{\eta_b} (\vec{u}_i - \vec{u}_o) + \frac{n_k}{\eta_c} \frac{\partial E_t}{\partial x_k} - \frac{\rho \vec{u}_i}{\eta_c} \cdot n_k \frac{\partial \vec{u}_i}{\partial x_k} - \frac{E_t \Phi}{\eta_c \rho} + \rho \vec{u}_i v_n \cdot \frac{\partial^2 \vec{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \right] = 0. \end{cases}$$

Now let us group the terms in the equations that are included in the vectors of variables $\vec{u}$ and κ_i :

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + (1 - \kappa) \cdot \frac{\partial \rho \vec{u}_i}{\partial x_i} + (1 - \kappa) RHS + \kappa_c n_k \frac{\partial \rho}{\partial x_k} - \kappa_c \Phi = 0 \\ \frac{\partial \rho \vec{u}_i}{\partial t} + (1 - \kappa) \cdot \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} + (1 - \kappa) RHS_v + \kappa_c n_k \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_k} - \kappa_c n_k \rho \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \kappa_b \rho (\vec{u}_i - \vec{u}_{oi}) - \kappa_c u_i \Phi - \kappa \rho v_n \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} = 0 \\ \frac{\partial E_t}{\partial t} + (1 - \kappa) \cdot \frac{\partial \vec{u}_i \vec{E}_t}{\partial x_j} + (1 - \kappa) RHS_v + \kappa_c \cdot n_k \cdot \frac{\partial E_t}{\partial x_k} + \kappa_b \rho \vec{u}_i \cdot (\vec{u}_i - \vec{u}_o) - \kappa_c \cdot \frac{E_t}{\rho} \Phi - \kappa_c \cdot \rho \vec{u}_i n_k \cdot \frac{\partial \vec{u}_i}{\partial x_k} + \kappa v_n \rho u_i \cdot \frac{\partial^2 \vec{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} = 0 \\ \kappa_c = \frac{\kappa}{\eta_c}, \kappa_b = \frac{\kappa}{\eta_b}. \end{cases}$$

Let us rewrite (14) in vector form:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (I - \kappa) \cdot \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial y} + \frac{\partial \vec{G}}{\partial z} \right) + \kappa_c n_k \frac{\partial \vec{u}}{\partial x_k} + \vec{S} + (1 - \kappa) \cdot RHS = 0. \quad (15)$$

here the vectors $\vec{E}$, $\vec{F}$, $\vec{G}$ and $\vec{S}$ take the following form:

$$\vec{S} = \begin{bmatrix} \kappa_b \rho (u - u_0) - \kappa_c \Phi u - \kappa_c n_k \rho \frac{\partial u}{\partial x_k} - \kappa \rho v_n \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \\ \kappa_b \rho (v - v_0) - \kappa_c \Phi v - \kappa_c n_k \rho \frac{\partial v}{\partial x_k} - \kappa \rho v_n \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \\ \kappa_b \rho (w - w_0) - \kappa_c \Phi w - \kappa_c n_k \rho \frac{\partial w}{\partial x_k} - \kappa \rho v_n \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \\ \kappa_b [\rho u (u - u_0) + \rho v (v - v_0) + \rho w (w - w_0)] - \kappa_c \Phi \frac{E_t}{\rho} - \kappa_c \cdot n_k \left\{ \rho \frac{\partial u}{\partial x_k} + \rho \frac{\partial v}{\partial x_k} + \rho \frac{\partial w}{\partial x_k} \right\} - \kappa \rho v_n \left\{ u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + w \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right\} \end{bmatrix}.$$

Let us rewrite (15) taking into account the new vector S^n :

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (I - \kappa) \cdot \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial y} + \frac{\partial \vec{G}}{\partial z} \right) + \kappa_{c_n} n_k \frac{\partial \vec{u}}{\partial x_k} + \kappa_{b_n} (\vec{u}_i - \vec{u}_{oi}) + S^n + (1 - \kappa) \cdot RHS = 0, \quad (17)$$

where

$$\kappa_{b_n} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{x}{\kappa_b} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{x}{\kappa_b} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{x}{\kappa_b} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\kappa_{c_n} = \begin{bmatrix} \frac{x}{\kappa_c} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{x}{\kappa_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{x}{\kappa_c} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{x}{\kappa_c} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{x}{\kappa_c} \end{bmatrix},$$

$$S^n = \begin{bmatrix} -\kappa_c \Phi \\ -\kappa_c \Phi u - \kappa_c n_k \rho \frac{\partial u}{\partial x_k} - \kappa \rho v_n \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \\ -\kappa_c \Phi v - \kappa_c n_k \rho \frac{\partial v}{\partial x_k} - \kappa \rho v_n \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \\ -\kappa_c \Phi w - \kappa_c n_k \rho \frac{\partial w}{\partial x_k} - \kappa \rho v_n \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \\ \kappa_b [\rho u(u - u_0) + \rho v(v - v_0) + \rho w(w - w_0)] - \kappa_c \Phi \frac{E_t}{\rho} - \kappa_c \cdot n_k \left\{ \rho \frac{\partial u}{\partial x_k} + \rho \frac{\partial v}{\partial x_k} + \rho \frac{\partial w}{\partial x_k} \right\} \\ -\kappa \rho v_n \left\{ u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + w \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right\} \end{bmatrix},$$

when $n_k \frac{\partial u}{\partial x_k} = \left(n_x \frac{\partial u}{\partial x} + n_y \frac{\partial u}{\partial y} + n_z \frac{\partial u}{\partial z} \right)$ is normal.

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ E_t \end{bmatrix}, \quad \vec{E} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ (E_t + p)u \end{bmatrix}, \quad \vec{F} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ (E_t + p)v \end{bmatrix}, \quad \vec{G} = \begin{bmatrix} \rho w \\ \rho uw \\ \rho vw \\ \rho w^2 + p \\ (E_t + p)w \end{bmatrix}.$$

Then after time integration:

$$\vec{u}^{n+1} + \Delta t(I - \kappa) \cdot \left(A^n \frac{\partial \vec{u}^{n+1}}{\partial x} + B^n \frac{\partial \vec{u}^{n+1}}{\partial y} + C^n \frac{\partial \vec{u}^{n+1}}{\partial z} \right) + \Delta t \cdot \kappa_{b_n} \cdot (\vec{u}^{n+1} - \vec{u}_{oi}) = \vec{u}^n - \Delta t(I - \kappa) \cdot RHS^n - \Delta t \cdot \kappa_c \cdot n_k \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial x^k} - \Delta t S^n,$$

$$(I + \Delta t \kappa_{b_n}) \vec{u}^{n+1} + \Delta t(I - \kappa) \cdot \left(A^n \frac{\partial \vec{u}^{n+1}}{\partial x} + B^n \frac{\partial \vec{u}^{n+1}}{\partial y} + C^n \frac{\partial \vec{u}^{n+1}}{\partial z} \right) = \vec{u}^n + \Delta t \cdot \kappa_{b_n} \cdot \vec{u}_{oi} - \Delta t(I - \kappa) \cdot RHS^n - \Delta t \cdot \kappa_c \cdot n_k \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial x^k} - \Delta t S^n | : (I + \Delta t \cdot \kappa_{b_n})$$

$$\vec{u}^{n+1} + \Delta t(I + \Delta t \kappa_{b_n})^{-1} \cdot (I - \kappa) \cdot \left(A^n \frac{\partial \vec{u}^{n+1}}{\partial x} + B^n \frac{\partial \vec{u}^{n+1}}{\partial y} + C^n \frac{\partial \vec{u}^{n+1}}{\partial z} \right) = (I + \Delta t \kappa_{b_n})^{-1} \vec{u}^n + \Delta t(I + \Delta t \cdot \kappa_{b_n})^{-1} \cdot \kappa_{b_n} \vec{u}_{oi} - \Delta t(I + \Delta t \cdot \kappa_{b_n})^{-1} (I - \kappa) \cdot RHS^n - \Delta t(I + \Delta t \cdot \kappa_{b_n})^{-1} \cdot \kappa_c \cdot n_k \cdot \frac{\partial \vec{u}^n}{\partial x^k} - \Delta t(I + \Delta t \cdot \kappa_{b_n})^{-1} S^n$$

A different integration:

$$(I + \Delta t \cdot \kappa_{b_n}) \vec{u}^{n+1} + \Delta t(I - \kappa) \left(A^n \frac{\partial \vec{u}^{n+1}}{\partial x} + B^n \frac{\partial \vec{u}^{n+1}}{\partial y} + C^n \frac{\partial \vec{u}^{n+1}}{\partial z} \right) + \Delta t \cdot \kappa_{c_n} \cdot n_k \left(\frac{\partial \vec{u}^{n+1}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{u}^{n+1}}{\partial y} + \frac{\partial \vec{u}^{n+1}}{\partial z} \right) = \vec{u}^n - \Delta t(I - \kappa) RHS^n - \Delta t S^n,$$

then

$$\Delta t \left\{ [(I - \kappa) A^n + \kappa_{c_n} \cdot n_k] \frac{\partial \vec{u}^{n+1}}{\partial x} + [(I - \kappa) B^n + \kappa_{c_n} \cdot n_y] \frac{\partial \vec{u}^{n+1}}{\partial y} + [(I - \kappa) C^n + \kappa_{c_n} \cdot n_z] \frac{\partial \vec{u}^{n+1}}{\partial z} \right\} = \vec{u}^n - \Delta t(I - \kappa) RHS^n - \Delta t S^n,$$

$$A^{new} = (I - \kappa) A^n + \kappa_{c_n} \cdot n_k,$$

$$B^{new} = (I - \kappa) B^n + \kappa_{c_n} \cdot n_y,$$

$$C^{new} = (I - \kappa) C^n + \kappa_{c_n} \cdot n_z,$$

$$\vec{u}^{n+1} + (I + \Delta t \kappa_{b_n})^{-1} \Delta t \cdot \left\{ A^{new} \frac{\partial \vec{u}^{n+1}}{\partial x} + B^{new} \frac{\partial \vec{u}^{n+1}}{\partial y} + C^{new} \frac{\partial \vec{u}^{n+1}}{\partial z} \right\} = (I + \Delta t \kappa_{b_n})^{-1} \vec{u}^n - (I + \Delta t \kappa_{b_n})^{-1} \Delta t(I - \kappa) RHS^n - (I + \Delta t \cdot \kappa_{b_n})^{-1} \Delta t S^n,$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{\kappa}{\eta_c} \eta_k \frac{\partial \Phi}{\partial x_k},$$

$$\Phi = (1 - \kappa) n_k \frac{\partial \rho}{\partial n_k} + \kappa \Phi,$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\kappa}{\eta_c} \cdot \left[n_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} + n_y \frac{\partial \Phi}{\partial y} + n_z \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right] = 0,$$

$\frac{\kappa}{\eta_c} > 0$ the approximation depends on n_x, n_y, n_z , if they are positive, the difference is backward, if they are negative, the difference is forward.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\Phi^{n+1} - \Phi^n}{\Delta t} + O(\Delta t),$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\Phi_i - \Phi_{i-1}}{\Delta x} + O(\Delta x), \text{ если } \frac{\kappa}{\eta_c} > 0,$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\Phi_{i+1} - \Phi_i}{\Delta x} + O(\Delta x), \text{ если } \frac{\kappa}{\eta_c} < 0,$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{2\Delta x^2} + O(\Delta x^2),$$

$$\frac{\Phi^{n+1} - \Phi^n}{\Delta t} = -\frac{\kappa}{\eta_c} \left[n_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} + n_y \frac{\partial \Phi}{\partial y} + n_z \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right],$$

$$\Phi^{n+1} = \Phi^n - \frac{\Delta t \kappa}{\eta_c} \left[n_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} + n_y \frac{\partial \Phi}{\partial y} + n_z \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right].$$

For $\frac{\kappa}{\eta_c} > 0$:

$$\Phi^{n+1} = \Phi^n - \frac{\Delta t \kappa}{\eta_c} \left[n_x \frac{\Phi_i - \Phi_{i-1}}{\Delta x} + n_y \frac{\Phi_j - \Phi_{j-1}}{\Delta y} + n_z \frac{\Phi_k - \Phi_{k-1}}{\Delta z} \right].$$

For $\frac{\kappa}{\eta_c} < 0$:

$$\Phi^{n+1} = \Phi^n - \frac{\Delta t \kappa}{\eta_c} \left[n_x \frac{\Phi_{i+1} - \Phi_i}{\Delta x} + n_y \frac{\Phi_{j+1} - \Phi_j}{\Delta y} + n_z \frac{\Phi_{k+1} - \Phi_k}{\Delta z} \right].$$

Results and discussion

Figure 2 shows that when $M_\infty = 0.5$ and $Re = 1000$, the flow is subsonic around a cylindrical body. The image shows the distribution of Mach numbers in the rotational region of the cylinder, showing regions characterized by changes in flow velocity.

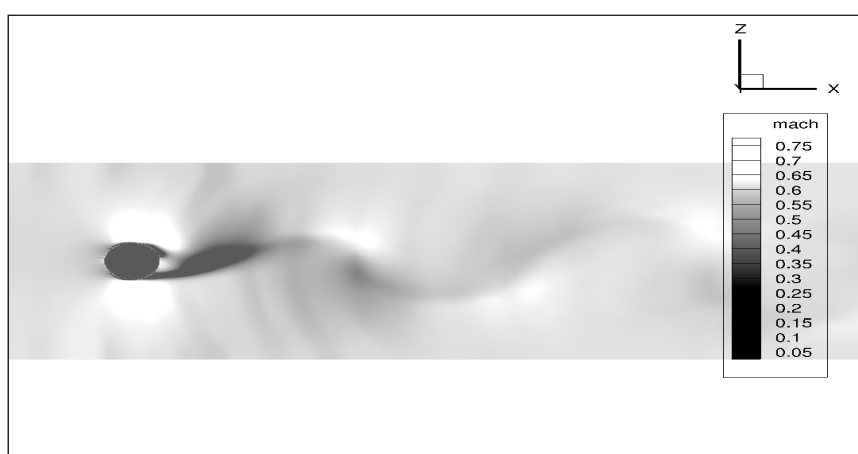
The flow collides with the cylinder, causing pressure increase and velocity deceleration in front of the cylinder. This region is represented by a smooth transition to lower values of Mach numbers. The flow rotates around the cylinder and splits into two parts, resulting in a complex velocity distribution around the cylinder. Along the surface of the cylinder, high values of Mach number are observed at which the flow accelerates. Behind the cylinder, a recirculation region or trace is formed along which the flow velocity decreases significantly. Low values of Mach numbers are seen in this region, indicating the formation of vortices and turbulent current. The formation of low-velocity vortices and regions behind the cylinder is a phenomenon characteristic of rotating bodies in subsonic flow conditions.

Figure 2 shows typical supersonic flow behavior when a cylindrical body is rotating. At $M_\infty = 0.5$, the flow velocity is half the speed of sound in this medium, which allows us to observe both flow stabilization and turbulent regions.

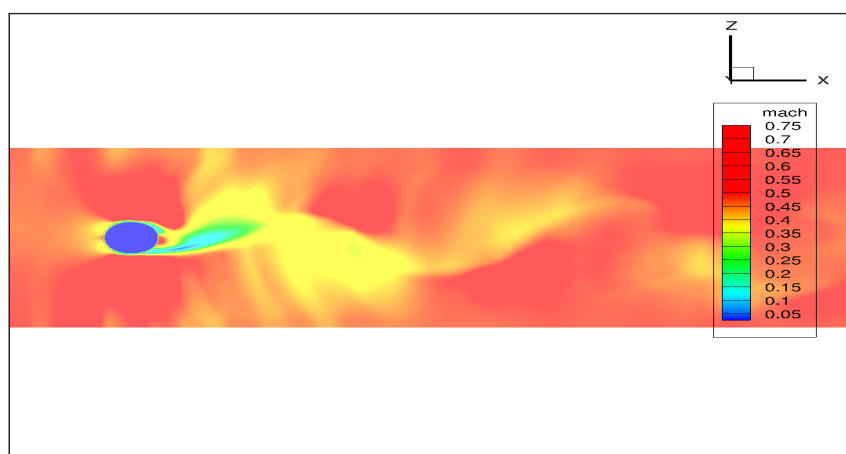
$Re = 1000$ shows an average turbulent flow regime, which is confirmed by the presence of vortices behind the cylinder.

In Figure 3, the cylindrical body causes significant disturbance in the flow, which is reflected in the change in velocities around it. Flow inhibition is observed at the front of the cylinder, resulting in a low velocity zone (dark blue color) in front of the body.

Behind the cylinder, in its shaded region, a high velocity zone characterized by a high velocity gradient is formed. This area depends on the impact of the cylinder on the surrounding flow and the formation of vortices. The vortices, in turn, create regions of variable pressure and velocity at the rear of the cylinder.



a)



b)

Figure 2 – Variation of the Mach parameter at $M_\infty = 0.5$ and $Re = 1000$

The central part shows a region of relatively constant velocity where the flow equalizes after perturbations caused by the cylinder rotation. The influence of the cylinder on the flow gradually decreases with distance from the body, and the flow velocity tends to the initial values.

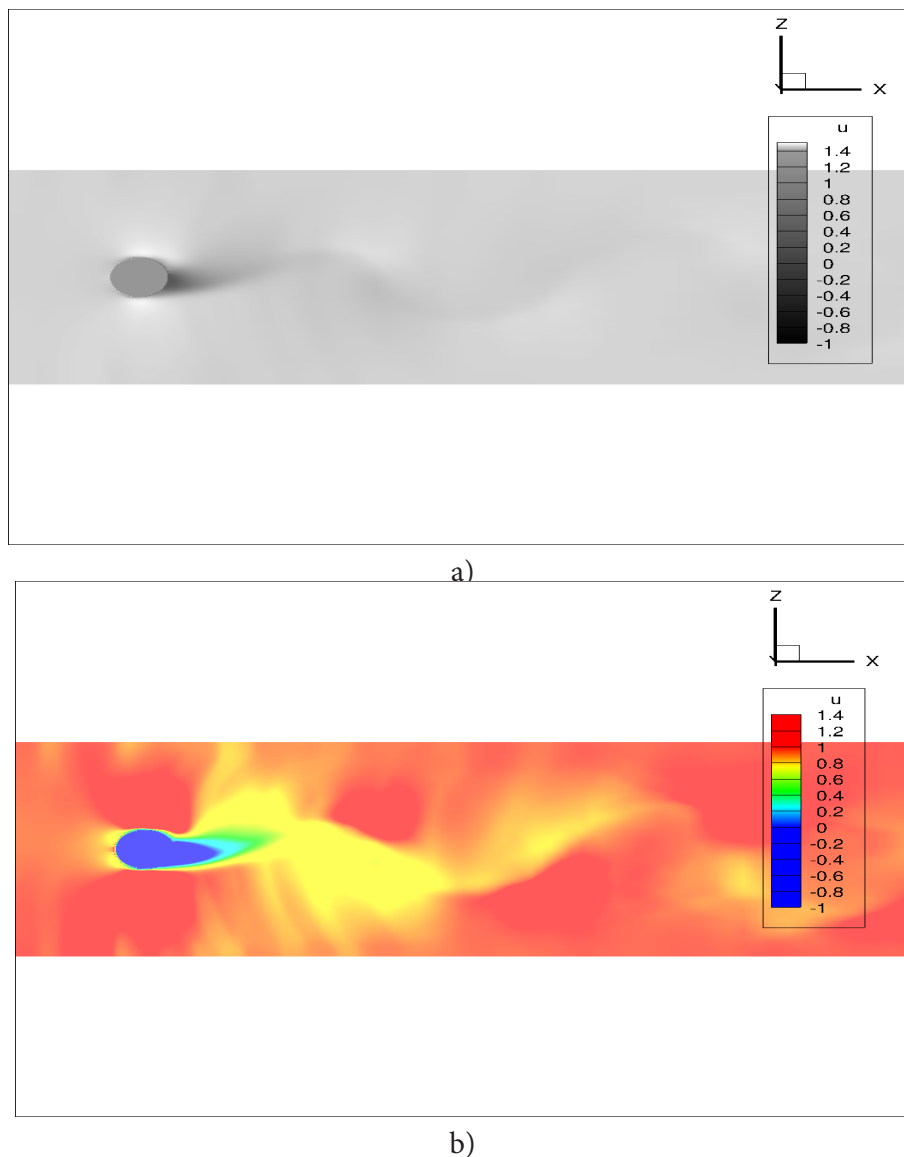


Figure 3 – Variation of velocity U at $M_\infty = 0.5$ and $Re = 1000$

Figure 4 shows the temperature change during the rotation of a cylindrical body with supersonic flow $M_\infty = 0.5$ and $Re = 1000$. The region in front of the cylinder is characterized by an increase in temperature caused by compression and deceleration of the flow. This manifests itself as a concentration at high temperatures on the front surface of the cylinder.

At the sides of the cylinder, the temperature gradually decreases due to leakage and opening of the flow around the body. A low temperature zone is formed at the rear of the cylinder, which is the result of vortices and turbulent mixing caused by the flow around the cylinder. These vortices promote mixing of cold and hot air, creating a low temperature zone behind the body.

Further, a gradual equalization of the temperature field can be seen from the cylinder, where the flows mix and recover their original temperature. These changes best reflect the thermal effect of the

cylinder on the surrounding flow and demonstrate the effect of heat transfer and turbulent mixing in the region behind the body.

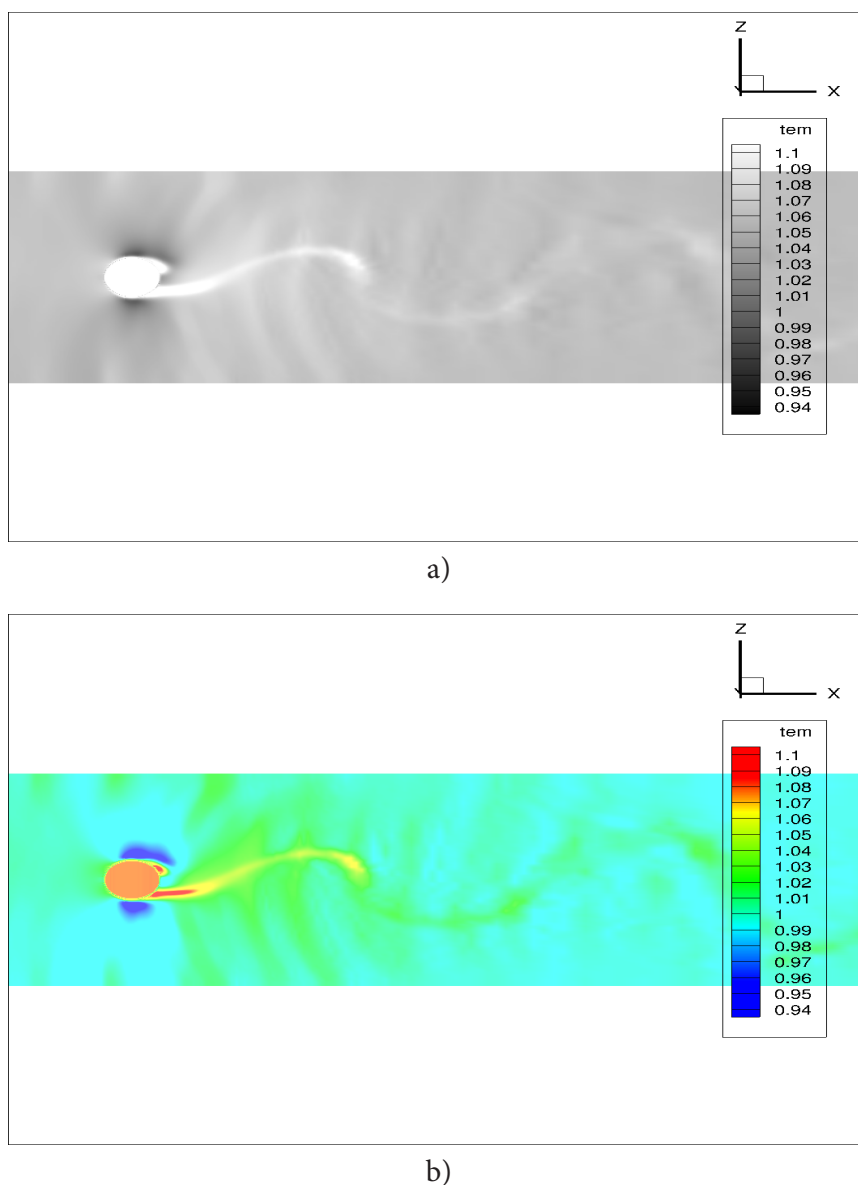


Figure 4 – Temperature change T at $M_\infty = 0.5$ and $Re = 1000$

Figure 5 compares the experimental data for the pressure coefficient P at the cylinder surface. At $Re = 40$, the flow is characterized by a laminar constant recirculation zone, since the critical point of Bernard-Fon Karman instability is not reached. A qualitative comparison of the vortex isocontours with data from Al-Marouf et al [23] shows that the structural organization of the flow is well understood. This includes the pressure coefficient C_p , which agrees well with the results of Al-Marouf et al [23].

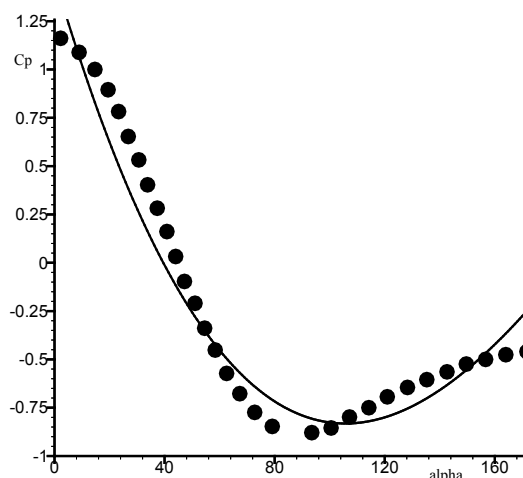


Figure 5 – The pressure coefficient C_p on the cylinder surface is a constant solution for $M_\infty = 0.05$ and $Re = 40$ (• • • is experiment and — is numerical result)

Conclusion

In this work, a characteristic-based penalty function method was used to simulate the supersonic flow around a cylinder at parameters $M_\infty = 0.5$ and $Re = 1000$. The numerical simulation results were carefully compared with experimental data, which confirmed the accuracy and reliability of the proposed approach.

The use of the penalty function method based on characteristics has shown that it provides high accuracy and stability of the numerical solution when modeling complex flows. This method allowed us to effectively consider boundary conditions and flow features around the cylinder.

In addition, a new method of reducing the equations to dimensionless form was used in this work, which improved the convergence of the calculations and increased their accuracy. This application also helped to reduce the computational cost, which is an important factor when performing complex numerical calculations.

Comparison of the numerical simulation results with experimental data showed good agreement, which confirmed the correctness of the selected method and its application for solving aerodynamic problems at supersonic speeds. An ENO scheme was developed for the task.

Thus, the penalty function method based on characteristics has proven its effectiveness and can be proposed for further use in numerical modeling of aerodynamic problems.

REFERENCES

- 1 Engels T., Kolomenskiy D., Schneider K., Sesterhenn J. Numerical simulation of fluid–structure interaction with the volume penalization method. *J. Comput. Phys.*, 2015, vol. 281, pp. 96–115.
- 2 Riahi H., Meldi M., Favier J., Serre E., Goncalves da Silva E. A pressure-corrected Immersed Boundary Method for the numerical simulation of compressible flows, 2018.

- 3 Liu Q., Vasilyev O.V. Brinkman penalization method for compressible flows in complex geometries. *J. Comput. Phys.*, 2008, vol. 227, pp. 946–966.
- 4 Fedkiw R. Coupling an Eulerian fluid calculation to a Lagrangian solid calculation with the ghost fluid method. *J. Comput. Phys.*, 2002, vol. 175, pp. 200–224.
- 5 Jost A.M.D., Glockner S. Direct forcing immersed boundary methods: Improvements to the Ghost-Cell Method, 2021.
- 6 Peskin C.S. The immersed boundary method. *Acta Numer.*, 2002, vol. 11, pp. 479–517.
- 7 Saiki E.M., Biringen S. Numerical simulation of a cylinder in uniform flow: Application of a virtual boundary method. *J. Comput. Phys.*, 1996, vol. 123 (2), pp. 450–465.
- 8 De Palma P., de Tullio M.D., Pascasio G., Napolitano M. An immersed-boundary method for compressible viscous flows. *Comput. Fluids.*, 2006, vol. 35(7), pp. 693–702.
- 9 Abalakin I.V., Zhdanova N.S., Kozubskaya T.K. Immersed boundary method as applied to the simulation of external aerodynamics problems with various boundary conditions. *Dokl. Math.*, 2015, vol. 91, pp. 178–181.
- 10 Angot P., Bruneau C.H., Fabrie P. A penalization method to take into account obstacles in viscous flows. *Numerische Mathematik*, 1999, vol. 81, pp. 497–520.
- 11 Feireisl E., Neustupa J., Stebel S. Convergence of a Brinkman-type penalization for compressible fluid flows. *Journal of Differential Equations*, 2011, vol. 250, pp. 596–606.
- 12 Wang A.-B., Trávníček Z., Chia K.-C. On the relationship of effective Reynolds number and Strouhal number for the laminar vortex shedding of a heated circular cylinder. *Physics of Fluids*, 2000, vol. 12, pp. 1401–1410.
- 13 Tritton D. Experiments on the flow past a circular cylinder at low Reynolds numbers. *J. Fluid Mech.*, 1959, vol. 6, pp. 547–567.
- 14 Williamson C.H.K. Oblique and parallel modes of vortex shedding in the wake of a circular cylinder at low Reynolds numbers. *J. Fluid Mech.*, 1989, vol. 206, pp. 579–627.
- 15 Braza M., Chassaing P., Ha Minh H. Numerical study and physical analysis of the pressure and velocity fields in the near wake of a circular cylinder. *J. Fluid Mech.*, 1986, vol. 165, pp. 79–130.
- 16 Henderson R.D. Details of the drag curve near the onset of vortex shedding. *Phys. Fluids*, 1995, vol. 7, p. 2102.
- 17 Karniadakis G.E., Triantafyllou G.S. Three-dimensional dynamics and transition to turbulence in the wake of bluff objects. *J. Fluid Mech.*, 1992, vol. 238, pp. 1–30.
- 18 Mittal R., Balachandar S. Effect of three-dimensionality on the lift and drag of nominally two-dimensional cylinders. *Phys. Fluids*, 1995, vol. 7, p. 1841.
- 19 Persillon H., Braza M. Physical analysis of the transition to turbulence in the wake of a circular cylinder by three-dimensional Navier–Stokes simulation. *J. Fluid Mech.*, 1998, vol. 365, pp. 23–88.
- 20 Abalakin I.V., Zhdanova N.S., Kozubskaya T.K. Immersed Boundary Method Implemented for the Simulation of an External Flow on Unstructured Meshes, *Mat. Model.*, 2015, vol. 10, pp. 5–20.
- 21 Edwards W.S., Tuckerman L.S., Friesner R.A., Sorensen D.C. Krylov methods for the incompressible Navier–Stokes equations. *J. Comp. Phys.*, 1994, vol. 110, pp. 82–102.
- 22 Abalakin I.V., Vasilyev O.V., Zhdanova N.S., Kozubskaya T.K. Characteristic Based Volume Penalization Method for Numerical Simulation of Compressible Flows on Unstructured Meshes. *Comput. Math. and Math. Phys.*, 2021, vol. 61(8), pp. 1315–1329.
- 23 Al-Marouf M., Samtaney R. A versatile embedded boundary adaptive mesh method for compressible flow in complex geometry. *J. Com. Phys.*, 2017, vol. 337, pp. 339–378.

^{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.,**

физ.-мат.ф.д., 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, Алматы қ., Қазақстан

²Математика және математикалық модельдеу институты, Алматы қ., Қазақстан

³РГА Басқару мәселелері институты, Мәскеу қ., Ресей

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

ЦИЛИНДРДІ ДЫБЫСҚА ДЕЙІНГІ СЫҒЫЛАТЫН АҒЫНМЕН АҒЫНДАУДАҒЫ АЙЫП ФУНКЦИЯЛАР ӘДІСІ

Аңдатпа

Қозғалатын қатты денелердің айналасындағы сығылатын ағындарды сандық модельдеу аэродинамикалық флютер, зымыран қозғалтқыштары және шассилер сияқты инженерлік қолданбаларда маңызды рөл атқарады. Айып функциялар әдісі соңғы айырмашылықтар әдісінің шеңберінде ортогональды құрылымдық торларды пайдаланған кезде тиімділігімен ерекшеленеді және ламинарлы, сондай-ақ турбулентті ағын мәселелерін шешуде кеңінен қолданылады. Бұл әдіс шекаралық шарттарды жанама түрде енгізу мүмкіндігін қамтамасыз ететін қосымша көздермен толықтырылған Навье-Стокс теңдеулерін тікелей қолдануға негізделген. Айып функциялар әдісі Дирихле шекаралық шарттарын енгізуді жеңілдетеді, бірақ Нейман шарттарын қолдануда белгілі бір қиындықтар тудыруы мүмкін. Дегенмен, әдіс шекаралық шарттардың екі түрімен де тиімді жұмыс істейді, бұл оны термиялық және сығылатын ағындар сияқты Нейман шарттары жиі қолданылатын қолданбалар үшін ыңғайлы етеді. Икемділігіне қарамастан, әдіс деректерді басқарудың жоғары деңгейін және қосымша кодтау әрекеттерін қажет етеді. Бұл мақалада сығылатын субсоникалық ағындарды сандық модельдеуде дәл нәтижелер беретін жақында әзірленген жоғары ретті әдіс қарастырылады. Әдіс Рейнольдс пен Мах сандарының кең диапазонында қозғалмайтын және қозғалатын объектілерде сыналды, бұл оның тиімділігі мен қолдану аясын көрсетеді.

Тірек сөздер: сандық модельдеу, цилиндр, дыбысқа дейінгі ағын, айып функциялар әдісі, Навье-Стокс теңдеулер жүйесі.

^{1*}**Манапова А.К.,**

магистр прикладной математики и информатики, ORCID ID: 0000-0003-1548-7061,
e-mail: manapova.a.k.math@gmail.com

²**Бекетаева А.О.,**

докт. физ.-матем. 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, г. Алматы, Казахстан

²Институт математики и математического моделирования, г. Алматы, Казахстан

³Институт проблем управления РАН, г. Москва, Россия

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

МЕТОД ШТРАФНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА ДОЗВУКОВЫМ СЖИМАЕМЫМ ПОТОКОМ

Аннотация

Численное моделирование сжимаемых потоков вокруг движущихся твердых тел важно для таких инженерных приложений, как аэродинамический флаттер, ракетные двигатели и шасси. Метод штрафных функций особенно эффективен при использовании ортогональных структурных сеток в рамках схемы конечных разностей и широко применяется для решения задач как ламинарного, так и турбулентного течения. Метод основан на прямом применении уравнений Навье-Стокса с добавленными источниками, что позволяет задавать граничные условия косвенным образом. Этот метод облегчает наложение граничных условий Дирихле, но усложняет применение условий Неймана. Тем не менее метод хорошо работает с обоими типами граничных условий, что делает его подходящим для тепловых и сжимаемых потоков, где часто используются условия Неймана. Несмотря на свою гибкость, метод требует высокой степени управления данными и дополнительного кодирования. В данной работе представлены результаты недавно разработанного метода более высокого порядка для сжимаемых дозвуковых потоков, демонстрирующие точное моделирование движущихся объектов без численного шума. Метод был протестирован на стационарных и движущихся объектах в широком диапазоне чисел Рейнольдса и Маха.

Ключевые слова: численное моделирование, цилиндр, дозвуковое течение, метод штрафных функций, система уравнений Навье-Стокса.

Article submission date: 02.08.2024

УДК 656.001.57
МРНТИ 76.01.77

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-124-135>

^{1,2*}**Сулейменова М.У.**,
магистр математики, ORCID ID: 0009-0003-8553-5353,
e-mail: madekin940@gmail.com
^{2,3}**Мананова А.К.**,
магистр прикладной математики и информатики, ORCID ID: 0000-0003-1548-7061,
e-mail: mananova.a.k.math@gmail.com
⁴**Шоманов А.С.**,
PhD, ORCID ID: 0000-0001-8253-7474,
e-mail: adai.shomanov@nu.edu.kz
⁵**Симинг Ч.**,
PhD, ORCID ID: 0000-0002-2690-3588,
e-mail: simingchen3@gmail.com

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

²Международный университет информационных технологий, г. Алматы, Казахстан

³Академия гражданской авиации, г. Алматы, Казахстан

⁴Назарбаев университет, г. Астана, Казахстан

⁵Фуданьский университет, г. Шанхай, Китайская Народная Республика

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕЖДЕВРЕМЕННОГО СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОГО СТАРЕНИЯ

Аннотация

Сердечно-сосудистое старение представляет собой значительную угрозу здоровью и качеству жизни людей, особенно в возрасте 65 лет и старше. В данной статье представлен способ прогнозирования сердечно-сосудистого старения с использованием математического моделирования. Разработанная модель объединяет различные физиологические и поведенческие факторы, включая артериальное давление, уровень холестерина, индекс массы тела, курение, физическую активность и алкоголь. Модель основана на применении методов итерации и Рунге Кутты, что позволяет описывать динамическое взаимодействие этих факторов во времени. Валидация модели проводилась на основе данных клинических исследований здоровья пожилых пациентов. Результаты показывают, что модель обладает высокой точностью в прогнозировании прогрессии сердечно-сосудистого старения и позволяет выявлять пациентов с повышенным риском сердечно-сосудистых заболеваний. Предложенный способ прогнозирования может стать ценным инструментом для врачей, помогая разрабатывать персонализированные стратегии профилактики и вмешательства в гериатрии, что, в свою очередь, может улучшить результаты лечения и продлить здоровую жизнь пациентов. В будущем планируется дальнейшее уточнение параметров модели и расширение ее применения на более широкие популяции.

Ключевые слова: сердечно-сосудистое старение, прогнозирование, математическое моделирование, пожилые пациенты, физиологические факторы, дифференциальные уравнения.

Введение

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) являются одной из ведущих причин заболеваемости и смертности среди пожилых людей во всем мире. С возрастом риск развития ССЗ значительно увеличивается, что делает раннее выявление и прогнозирование прогрессии сердечно-сосудистого старения особенно важным. Современные методы диагностики и лечения спо-

собны значительно улучшить качество жизни пациентов, однако для оптимизации лечебных стратегий необходимо понимать, как различные физиологические и поведенческие факторы влияют на процесс старения сердечно-сосудистой системы. Согласно проведенным мировым исследованиям, выявлена корреляция между старением и многими факторами, такими как образ жизни, питание, полиморфизм генов, иммунное воспаление, эндотелиальная дисфункция и прочее. Однако выявление связи между этими факторами у лиц, подверженных ускоренному старению сердечно-сосудистой системы, в популяции Казахстана все еще требует проведения дополнительных научных исследований.

Математическое моделирование представляет собой мощный инструмент для анализа сложных биологических систем и прогнозирования их динамики. В последние годы методы математического моделирования стали активно использоваться в медицине для изучения различных заболеваний и разработки индивидуализированных подходов к лечению. В частности, модели, основанные на дифференциальных уравнениях и вероятностных методах, позволяют учитывать множественные взаимодействующие факторы и делать долгосрочные прогнозы.

Целью данной работы является разработка и валидация математической модели для прогнозирования сердечно-сосудистого старения у пациентов в возрасте 65 лет и старше. Модель учитывает такие ключевые факторы, как артериальное давление, уровень холестерина, индекс массы тела, курение, физическая активность и генетические предрасположенности. Использование этой модели позволит не только предсказать прогрессию сердечно-сосудистого старения, но и выявить пациентов с повышенным риском развития ССЗ, что откроет новые возможности для профилактики и раннего вмешательства.

Прогнозирование сердечно-сосудистого старения пациентов в возрасте 65 лет и старше представляет собой важную задачу, позволяющую улучшить профилактику и лечение этих заболеваний. Математические модели играют ключевую роль в понимании и прогнозировании процессов старения сердечно-сосудистой системы, предоставляя инструменты для анализа сложных биологических и клинических данных. В этом разделе представлен обзор некоторых работ в литературе, посвященных анализу существующих математических моделей, которые используются для прогнозирования сердечно-сосудистого старения у пожилых пациентов.

Исследование [1] посвящено простой математической модели старения, основанной на системе автономных ОДУ первого порядка. Ключевое предположение модели заключается в отсутствии у организма внутренних часов, отсчитывающих хронологическое время на масштабе десятилетий. Вместо этого организм использует внутренние биологические факторы, обозначенные переменными $g_i(t)$, каждая из которых отсчитывает свое биологическое время t_i . В целом предложенная модель представляет собой простую и эффективную основу для систематизации экспериментальных данных о возрастных изменениях в различных биологических подсистемах организма. Даже в линейной аппроксимации параметры $\{a_i, b_{ij}\}$ позволяют количественно выявлять и структурировать причинно-следственные связи, значимые для процесса старения.

В статье [2] демонстрируется, как математические методы демографии могут быть использованы для изучения проблем старения на примере академической среды. В последние десятилетия университеты и колледжи обеспокоены старением преподавательского состава частично из-за убеждения, что наука – удел молодых. Исследования показывают, что научная продуктивность достигает пика в возрасте 40–45 лет, а затем снижается. В следующей детерминированной модели оптимального управления рассматриваются стратегии, направленные на поддержание высокого уровня научной продуктивности.

Однако в работе [3] для объяснения старения используется одномерная модель многоклеточной системы. Она позволяет изучить локальные режимы поведения отдельных клеток и глобальные режимы всей системы. На ранней стадии дифференцировки простое взаимодействие приводит к нормальным скоординированным паттернам. На поздней стадии сложное

взаимодействие вызывает хаотичные паттерны, указывающие на аномальное состояние. Отключение активности некоторых частей модели может преобразовать эти паттерны в нормальные, что напоминает программируемую гибель клеток. Со временем клетки теряют чувствительность к сигналам, что приводит к исчезновению активности, называемому самотерминацией и указывающему на старение. Потеря функции системы, ведущая к смерти, происходит из-за глобального сбоя, а не локального. А также в исследовании [4] рассматриваются сложные клеточные механизмы, характеризующие старение, с акцентом на два метаболических центра: mTOR и NAD⁺-зависимую деацетилазу SIRT1. Экспериментальные данные указывают на взаимодействие между этими путями, однако механизмы их взаимодействия остаются неясными. Авторы предлагают использовать вычислительное моделирование в сочетании с экспериментами для выяснения этих механизмов. Обсуждаются основные модели и представляется сокращенный путь реакции для моделирования. В заключение описываются ограничения вычислительного моделирования и возможности для будущих исследований в этой области. Авторы предлагают использовать вычислительное моделирование на основе экспериментальных данных для изучения этих взаимодействий. Основное ограничение подхода – необходимость точного набора параметров. Поэтому сначала следует моделировать хорошо изученные области, чтобы постепенно понять механизмы и разработать новые терапевтические методы для увеличения продолжительности здоровой жизни или замедления старения. Более того, в работе [5] предложена математическая модель, симулирующая влияние окружающей среды (ENV) на старение живых систем. Модель основана на концепции непрерывной адаптации биологической системы (BS) к ENV с момента рождения. Скорость адаптации рассматривается как конкуренция между двумя процессами – разрушением BS и рекомбинацией повреждений, определяемыми кинетикой автокаталитических химических реакций. Влияние ENV учитывается через параметры модели, которые в общем зависят от времени. Модель отражает правила термодинамики и геронтологии, а также типичные результаты медицинских экспериментов.

В работе [6] рассматриваются математические модели физиологического поведения, описывающие систему, возвращающуюся к исходному состоянию после возмущения через гомеостаз. Эти модели включают понятие «фатального предела» отклонения системы и его включение в модели. Автор приводит к выводу, что численные значения пределов зависят от других параметров, таких как время восстановления и коэффициенты связи, и могут быть экспериментально измерены. Обсуждаются возрастные изменения параметров и вывод параметров смертности, таких как параметры Гомпертца, из экспериментальных данных.

В работе [7] представлена математическая модель, описывающая процесс пролиферативного старения клеток в культуре. Основанная на гипотезе о повреждении ДНК как причине старения клеток модель способна объяснить как ограниченный, так и неограниченный пролиферативный потенциал как нормальных, так и трансформированных клеток *in vitro*. Согласно модели, судьба клеточной популяции зависит от двух противодействующих факторов: скорости пролиферации делимых клеток и скорости накопления повреждений генов. Компьютерные моделирования демонстрируют согласование с экспериментальными данными в общих чертах.

А также исследование [8] разрабатывает модель, связывающую степень ухудшения здоровья в возрасте с вероятностью смерти от определенной причины. Цель – создать индекс для оценки уровня здоровья и вероятности смерти. Модель расширяет работу Симмса (1942) и включает параметры R и S, которые зависят от физиологических процессов, и пороговый уровень для оценки риска смерти. Анализ данных смертности в Онтарио с использованием методов максимального правдоподобия показывает хорошее соответствие теоретических и наблюдаемых уровней смертности.

Основные понятия

Авторами на базе 800 человек в возрасте 65 и старше изучено действие основных факторов, влияющих на старение сердечно-сосудистой системы. Обследуемые разделены на 3 возрастные группы согласно классификации ВОЗ: 60–74 года – пожилой ($n=395$), 75–89 лет – старческий ($n=284$), 90 лет и старше – возраст долгожителей ($n=10$). Таковыми являются пол пациента, вредные привычки в виде курения и употребления алкоголя; социальный статус и образование, уровень холестерина (ОХС) в крови; ожирение и повышение индекса массы тела (ИМТ); повышенное артериальное давление (АГ), ишемическая болезнь сердца (ИБС), постинфарктный кардиосклероз (ПИКС); наличие хронической сердечной недостаточности (ХСН). Всем респондентам проведено анкетирование по 4 стандартным вопросам. Поэтому мы решили создать математическую модель для прогнозирования сердечно-сосудистого старения по общеклиническим данным.

Для создания математической модели выбранные следующие параметры как биомаркеры исследования сердечно-сосудистого старения и социальные статусы респондентов:

ch – холестерин (ОХС), ммоль/л;

Pr – давление (АГ), мм. рт. ст.;

W – индекс массы тела (ИМТ), кг/м²;

Px – постинфарктный кардиосклероз (ПИКС), 1/с. (количество ударов сердца в минуту);

X – хроническая сердечная недостаточность (ХСН);

G – пол;

S – курение;

E – образование;

A – алкоголь;

I – ишемическая болезнь сердца (ИБС);

$a_1, b_1, c_1, d_1, a_2, b_2, c_2, d_2, a_3, b_3, c_3, d_3$ – постоянные.

Данные маркеры выбраны как лучшие результаты вычисления коэффициента корреляции Пирсона по статистическим данным биомаркеров экспериментируемых пациентов:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (1)$$

Для оптимизации процесса моделирования все выбранные биомаркеры были приведены к безразмерному виду на этапе вычисления корреляции. Нормализация каждого параметра была выполнена путем деления его значений на максимальное значение в выборке, что привело к преобразованию диапазона значений в интервал $[0;1]$. Это позволяет сравнивать и анализировать параметры с различными единицами измерения на единой шкале, что повышает эффективность и точность моделирования процесса старения.

Материалы и методы

Для пациентов в интервале возраста 65–74 года можно математически предположить их сердечно-сосудистое старение следующим образом:

$$\frac{dx}{dt} = a_2 \cdot Px(x, t) \cdot S(x, t) + b_2 \cdot Px(x, t) \cdot A(x, t) + c_2 \cdot I(x, t) \cdot S(x, t) + d_2 \cdot Pr(x, t) \cdot S(x, t). \quad (2)$$

где x – степень сердечно-сосудистого старения пациентов в возрасте 65–74 года, которая является безразмерной величиной, нормализованной в диапазоне $[0;1]$, где 0 соответствует от-

сутствию признаков сердечно-сосудистого старения, а 1 – максимальной степени старения в рамках нашей модели. Переменные в правой части безразмерные и зависят от времени и влияют на степень старения (то есть имеют аргумент (x, t)). Это позволяет моделировать динамический процесс – старение, с учетом изменений во времени, сохраняя при этом простоту и универсальность модели. $\frac{dx}{dt}$ означает изменения степени преждевременного старения через t времени, a_2 – величина коэффициента корреляции взаимодействия постинфарктного кардиосклероза с курением, b_2 – величина коэффициента корреляции взаимодействия постинфарктного кардиосклероза с алкоголем, c_2 – величина коэффициента корреляции взаимодействия ишемической болезни сердца с курением, d_2 – величина коэффициента корреляции взаимодействия давления крови с курением. Произведения биомаркеров в (2) выбраны таким образом, что они показали лучшие связи в корреляции. Результаты корреляции Пирсона показали, что в этом интервале возрастов курение и употребление алкоголя может привести к заболеваниям сердца и к варьированию давления крови.

Сердечно-сосудистое старение для пациентов в интервале возрастов 75–89 можно описать как следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dx}{dt} = a_3 \cdot Pr(x, t) \cdot S(x, t) + b_3 \cdot Pr(x, t) \cdot A(x, t) + c_3 \cdot X(x, t) \cdot A(x, t) + d_3 \cdot I(x, t) \cdot S(x, t). \quad (3)$$

a_3, b_3, c_3, d_3 – коэффициенты взаимодействия указанных маркеров. Произведения биомаркеров в (2) и (3) выбраны таким образом, что они показали лучшие связи в корреляции.

В уравнении (3), где x – степень сердечно-сосудистого старения пациентов в возрасте 75–89 лет, $\frac{dx}{dt}$ означает изменения степени преждевременного старения через t времени, a_3 – величина коэффициента корреляции взаимодействия постинфарктного кардиосклероза с курением, b_3 – величина коэффициента корреляции взаимодействия постинфарктного кардиосклероза с алкоголем, c_3 – величина коэффициента корреляции взаимодействия алкоголя с хронической сердечной недостаточностью, d_3 – величина коэффициента корреляции взаимодействия курения с ишемической болезнью сердца.

В уравнениях (2)–(3) математической модели преждевременного старения людей в интервалах возрастов 65–74 и 75–89 можно заметить, что во всех произведениях биомаркеров присутствуют курение и алкоголь, что означает высокую корреляцию. Курение и употребления алкоголя в этих интервалах возрастов могут привести к постинфарктному кардиосклерозу, ишемической болезни сердца, варьированию давления, изменению уровня холестерина в крови. Можно сделать вывод, что людям в этом возрасте стоит отказаться от вредных привычек, чтобы сохранить и предотвратить снижение биологического возраста.

Сердечно-сосудистое старение для пациентов возрастов 90+ можно описать следующим образом:

$$\frac{dx}{dt} = a_1 \cdot G(x, t) \cdot ch(x, t) + b_1 \cdot S(x, t) \cdot X(x, t) + c_1 \cdot Px(x, t) \cdot E(x, t) + d_1 \cdot Pr(x, t) \cdot S(x, t), \quad (4)$$

где $\frac{dx}{dt}$ означает изменения степени преждевременного старения пациентов возраста за 90 лет через t времени, a_1 – величина коэффициента корреляции взаимодействия пола человека на уровень холестерина в крови, b_1 – величина коэффициента корреляции взаимодействия курения с хронической сердечной недостаточностью, c_1 – величина коэффициента корреляции взаимодействия постинфарктного кардиосклероза с образованием человека, d_1 – величина коэффициента корреляции взаимодействия давления крови с курением.

Выбор произведений параметров, указанных в (4), означает их высокие показатели в корреляции. Первое произведение показывает взаимодействия и зависимость уровня холестерина от пола человека. От второго произведения можно сделать вывод, что курение может привести к хронической сердечной недостаточности. Третье произведение, выбранное по результатам корреляции, показывает, что такой социальный статус человека, как образование, может повлиять на постинфарктный кардиосклероз. Здесь можно сделать предположение, что образование может привести человека к психологической устойчивости, что может предотвратить постинфарктный кардиосклероз. Четвертое произведение показывает, что курение приводит к варьированию давления крови. А сложения произведений означает, что взаимодействия других пар биомаркеров также показали хорошие результаты в корреляции, их уровень взаимодействия описывается коэффициентами a_1, b_1, c_1, d_1 .

Для численного моделирования используется метод Рунге-Кутты 4-го порядка [9] для решения обыкновенного дифференциального уравнения (4).

$$x' = a_1 \cdot G(x, t) \cdot ch(x, t) + b_1 \cdot S(x, t) \cdot X(x, t) + \\ + c_1 \cdot Px(x, t) \cdot E(x, t) + d_1 \cdot Pr(x, t) \cdot S(x, t),$$

Конечное решение ОДУ методом Рунге-Кутты запишется в виде:

$$x_{n+1} = x_n + \frac{h}{6} \cdot (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4),$$

здесь $h = \frac{b-a}{N}$ и

$$k_1 = f(x_n, t_n), \\ k_2 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_1\right), \\ k_3 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_2\right), \\ k_4 = f(t_n + h, x_n + hk_3).$$

В нашем случае k_1, k_2, k_3, k_4 примут следующий вид:

$$k_1 = a_1 \cdot G(x_n, t_n) \cdot ch(x_n, t_n) + b_1 \cdot S(x_n, t_n) \cdot X(x_n, t_n) + \\ + c_1 \cdot Px(x_n, t_n) \cdot E(x_n, t_n) + d_1 \cdot Pr(x_n, t_n) \cdot S(x_n, t_n),$$

$$k_2 = a_1 \cdot G\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_1\right) \cdot ch\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_1\right) + \\ + b_1 \cdot S\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_1\right) \cdot X\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_1\right) + \\ + c_1 \cdot Px\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_1\right) \cdot E\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_1\right) + \\ + d_1 \cdot Pr\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_1\right) \cdot S\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_1\right),$$

$$k_3 = a_1 \cdot G\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_2\right) \cdot ch\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_2\right) + \\ + b_1 \cdot S\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_2\right) \cdot X\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_2\right) +$$

$$\begin{aligned}
& +c_1 \cdot Px\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_2\right) \cdot E\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_2\right) + \\
& +d_1 \cdot Pr\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_2\right) \cdot S\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_2\right), \\
& k_4 = a_1 \cdot G(t_n + h, x_n + hk_3) \cdot ch(t_n + h, x_n + hk_3) + \\
& +b_1 \cdot S(t_n + h, x_n + hk_3) \cdot X(t_n + h, x_n + hk_3) + \\
& +c_1 \cdot Px(t_n + h, x_n + hk_3) \cdot E(t_n + h, x_n + hk_3) + \\
& +d_1 \cdot Pr(t_n + h, x_n + hk_3) \cdot S(t_n + h, x_n + hk_3).
\end{aligned}$$

Начальные условия (Коши):

$$\begin{cases} x(0) = x_0 \\ x(t_0) = x_0 \\ t = 0 \end{cases}.$$

Для уравнений (2) и (3) данный метод используется аналогичным образом.

Для апробации модели уравнения (2)–(4) можно привести в конечно-разностный вид и численно решить методом итерации [10]. Тогда, к примеру, (4) будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = a_1 \cdot G \cdot ch + b_1 \cdot S \cdot X + c_1 \cdot Px \cdot E + d_1 \cdot Pr \cdot S, \quad (5)$$

где левая часть уравнения запишется по разложению в ряд Тейлора в конечно-разностном виде по шагу вперед по первому порядку точности $O(\Delta t)$:

$$\frac{x^{n+1} - x^n}{\Delta t} = a_1 \cdot G \cdot ch + b_1 \cdot S \cdot X + c_1 \cdot Px \cdot E + d_1 \cdot Pr \cdot S.$$

В конечном счете искомый параметр x^{n+1} запишется следующим образом:

$$x^{n+1} = x^n + \Delta t \cdot (a_1 \cdot G[i] \cdot ch[i] + b_1 \cdot S[i] \cdot X[i] + c_1 \cdot Px[i] \cdot E[i] + d_1 \cdot Pr[i] \cdot S[i]).$$

Для численного решения уравнения (5) задается начальное условие для параметров.

Начальные условия выбираются как в предыдущем методе.

Выбирается шаг по времени в интервале $0 < \Delta t < 1$, $\Delta t = 0.01$.

Численные результаты можно описать и сделать анализы по реальному времени $N \cdot \Delta t = t$, где N – количество итерации в программном коде.

Вышеописанные действия для уравнений (2) и (3) будут аналогичны как для (4).

Созданные математические модели (2)–(4) можно считать экспериментом для будущих аналогичных исследований.

Результаты и обсуждения

По формуле (1) вычисляются коэффициенты корреляции Пирсона, которые характеризуют силу связи между параметрами (≤ 1).

По данным корреляции определяем лучшие связи между биомаркерами и социальными характеристиками респондентов, чтобы показать уровень взаимодействия произведений параметров в уравнениях (2)–(4) (таблица 1).

Таблица 1 – Коэффициенты математической модели

Возрастная категория	Коэффициент	Значение
65–74	a_1	0.66
	b_1	0.53
	c_1	0.5
	d_1	0.43
74–89	a_2	0.21
	b_2	0.15
	c_2	0.16
	d_2	0.14
90+	a_2	0.17
	b_2	0.17
	c_2	0.16
	d_2	0.16

Для симуляции численного решения используются данные из таблицы 2.

Таблица 2 – Параметры моделирования

Определение	Значение
Шаг по времени, Δt	0.01
Количество итерации, N	100
Интервал вычисления, [a;b]	[0;1]

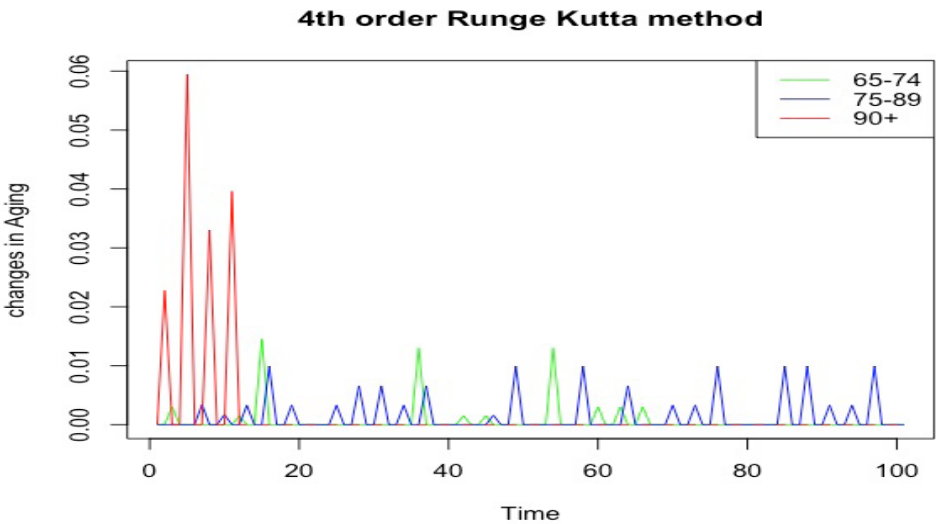


Рисунок 1 – Численная интерпретация изменения сердечно-сосудистого старения методом Рунге-Кутты 4 порядка

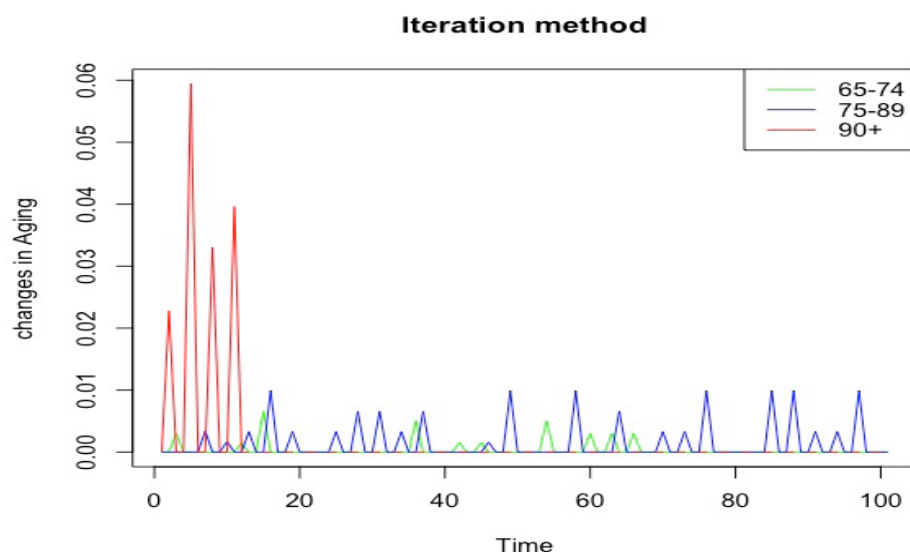


Рисунок 2 – Численная интерпретация изменения сердечно-сосудистого старения методом итерации

На графиках (1) и (2) представлены данные, иллюстрирующие изменения в процессе старения для трех возрастных групп: 65–74 года, 75–89 лет и 90+ лет, используя метод Рунге-Кутты 4-го порядка и метод итерации. Ось абсцисс (горизонтальная ось) обозначает время, а ось ординат (вертикальная ось) показывает изменения в старении по (2)–(4).

Наиболее высокие пики изменений в старении в 90+ лет, особенно заметные в начале временного интервала. Это может указывать на более быстрые или более значительные изменения в старении у самой старшей группы, такие как 17% вероятности изменения уровня холестерина в крови и появления хронической сердечной недостаточности, также 16% вероятности появления постинфарктного кардиосклероза и варьирования давления в крови.

В категории 65–74 года показывает умеренные колебания с меньшей амплитудой. Это может свидетельствовать о более стабильном процессе старения в этой возрастной группе. В этом интервале можно заметить, что от употребления алкоголя и курения появляются около 53% вероятности возникновения постинфарктного кардиосклероза, повышения давления в крови, а также изменения массы тела, которые могут ускорить процесс старения.

Результат 75–89 лет имеет колебания, амплитуда которых меньше, чем у категории 90+ лет, но больше, чем у 65–74 года. Это указывает на промежуточное положение в изменениях старения между двумя другими группами. Для этой категории группы можно сделать предположение, что старение меняется в связи с 21% вероятности повышения давления в крови, появлением 16% вероятности хронической сердечной недостаточности и 14% вероятности ишемической болезни сердца.

Пики на графиках у каждой категории могут указывать на временные периоды по абсциссе, когда изменения в старении были наиболее интенсивными.

Группа 65–74 года демонстрирует наиболее стабильные изменения, из-за вредных привычек (употребление алкоголя и курение), что может свидетельствовать о более предсказуемом процессе старения в этом возрастном диапазоне. Интересно отметить, что группа 90+ лет показывает наибольшие колебания, которые может указывать на то, что процесс старения становится менее предсказуемым или более чувствительным к таким факторам как пол респондента, уровень образования, а также курение.

По графикам 1–2 видно, что выбранные два метода отлично сходятся.

Заключение

Старение является заключительным этапом развития организма – непрерывного процесса, который начинается с момента рождения человека и является одним из важнейших факторов риска развития большинства хронических заболеваний и функциональных нарушений, которые приводят к развитию возраст-ассоциированных патологий.

В первой группе с возрастом 65–74 года с помощью математической модели для прогнозирования сердечно-сосудистого старения выявлены стабильные изменения вследствие отсутствия солидарной ответственности и наличия вредных привычек. Вследствие употребления алкоголя и курения у 53% пациентов выявлены артериальная гипертензия II–III ст. и постинфарктный кардиосклероз, сахарный диабет, а также ожирение, которые влияют на процесс старения. В группе 75–89 лет результаты имеют определенные колебания и показывают среднее положение по общеклиническим данным. То есть сердечно-сосудистое старение меняется из-за того, что у респондентов в 21% повышается артериальное давление, в 16% случаев сопровождается хронической сердечной недостаточностью и в 14% случаев ишемической болезнью сердца.

В третьей группе (90+ лет) имеются наибольшие колебания, с таким фактором, как курение, пол, повышение холестерина 17% случаев, артериальная гипертензия и атеросклероз в 16%, а также уровень образования.

Применение современных методов машинного обучения к анализу многомерных данных о биологических маркерах, включая генетические, эпигенетические, метаболические и клинические параметры, позволит углубленно исследовать сложные взаимосвязи между различными аспектами преждевременного старения и выявлять чувствительные биомаркеры. Планируется разработка программы на основе искусственного интеллекта, которая будет учитывать не только общеклинические данные пациента, но и основные биомаркеры и риск ССЗ у конкретного пациента, а также разработка способов идентификации степени старения сердечно-сосудистой системы организма, на основании которых будут предложены способы профилактики раннего преждевременного старения организма.

Необходимо сказать, что результаты, полученные с использованием метода Рунге-Кутты и итерационных методов, показали высокую степень согласованности. Согласование результатов подтверждает правильность выбранного подхода и использованных вычислительных методов.

Таким образом, наша модель может служить адекватным инструментом для дальнейшего изучения и прогнозирования поведения системы в различных условиях. Полученные результаты могут быть полезны для исследования влияния возраста на процесс старения и могут помочь в разработке стратегий для улучшения качества жизни стареющего населения.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Morokov Yu. Simple Mathematical Model of Aging. Dec. 2019.
- 2 Feichtinger Gustav, et al. The Mathematics of Ageing: Central European Journal of Operations Research, 18 Nov. 2019, vol. 28, no. 2, pp. 371–399. <https://doi.org/10.1007/s10100-019-00661-w>. Accessed 27 Apr. 2022.
- 3 Murase Masatoshi and Mitsuyoshi Matsuo. Mathematical Modeling for the Aging Process: Normal, Abnormal and Self-Terminating Phenomena in Spatio-Temporal Organization. Mechanisms of Ageing and Development, Sept. 1991, vol. 60, no. 1, pp. 99–112. [https://doi.org/10.1016/0047-6374\(91\)90113-e](https://doi.org/10.1016/0047-6374(91)90113-e). Accessed 21 Mar. 2020.
- 4 McAuley Mark, et al. Mathematical Modelling of Metabolic Regulation in Aging. Metabolites, 27 Apr. 2015, vol. 5, no. 2, pp. 232–251. <https://doi.org/10.3390/metabo5020232>.

5 Viktorov A.A., et al. Influence of Environment on Aging of Living Systems: A Mathematical Model. *Advances in Gerontology*, 1 Oct. 2013, vol. 3, no. 4, pp. 255–260. <https://doi.org/10.1134/s2079057013040103>. Accessed 21 June 2024.

6 Hibbs, Albert R., and Roy L. Walford. A Mathematical Model of Physiological Processes and Its Application to the Study of Aging. *Mechanisms of Ageing and Development*, Nov. 1989, vol. 50, no. 2, pp. 193–214. [https://doi.org/10.1016/0047-6374\(89\)90014-6](https://doi.org/10.1016/0047-6374(89)90014-6). Accessed 8 Dec. 2022.

7 Zheng Tan. A Mathematical Model of Proliferation and Aging of Cells in Culture. *Journal of Theoretical Biology*, 7 Apr. 1991, vol. 149, no. 3, pp. 287–315. www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022519305803078, [https://doi.org/10.1016/S0022-5193\(05\)80307-8](https://doi.org/10.1016/S0022-5193(05)80307-8). Accessed 21 June 2024.

8 Brown K.S., and W. F. Forbes. A Mathematical Model of Aging Processes. *Journal of Gerontology*, 1 Jan. 1974, vol. 29, no. 1, pp. 46–51. <https://doi.org/10.1093/geronj/29.1.46>. Accessed 29 Oct. 2021.

9 Musa H., Saidu I., Waziru M. A Simplified Derivation and Analysis of Fourth Order Runge Kutta Method. *International Journal of Computer Applications*, vol. 9, no. 8, Nov. 2010, pp. 51–55. <https://doi.org/10.5120/1402-1891>.

10 Elman H.C., Silvester D., Wathen A.J., Ro P. Iterative Methods for Problems in CFD. *Winter School on Iterative Methods in Scientific Computing and Applications*, Sept. 1996, vol. 96, no. 19, pp. 1–46.

^{1,2*}**Сулейменова М.У.,**

математика магистрі, ORCID ID: 0009-0003-8553-5353,

e-mail: madekin940@gmail.com

^{2,3}**Манапова А.К.,**

қолданбалы математика және информатика магистрі, ORCID ID: 0000-0003-1548-7061,

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

⁴**Шоманов А.С.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-8253-7474,

e-mail: adai.shomanov@nu.edu.kz

⁵**Симинг Ч.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-2690-3588,

e-mail: simingchen3@gmail.com

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

²Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы қ., Қазақстан

³Азаматтық авиация академиясы, Алматы қ., Қазақстан

⁴Назарбаев университеті, Астана қ., Қазақстан

⁵Фудань университеті, Шанхай қ., Қытай халық республикасы

ЖҮРЕК-ҚАН ТАМЫРЛАРЫНЫҢ ЕРТЕ ҚАРТАЮЫН САНДЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Аңдатпа

Жүрек-қан тамырлары қартаюы адамдардың денсаулығы мен өмір сапасына, әсіресе 65 жастан асқан адамдарға айтарлықтай қауіп төндіреді. Бұл мақалада математикалық модельдеуді қолдана отырып, жүрек-қан тамырлары қартаюын болжау әдісі ұсынылған. Өзірленген модель әртүрлі физиологиялық және мінез-құлық факторларын, соның ішінде қан қысымын, холестерин деңгейін, дене салмағы индексі, темекі шегуді, физикалық белсенділікті және алкогольді қамтиды. Модель итерациялық әдістерді қолдануға және осы факторлардың уақыт бойынша динамикалық өзара әрекеттесуін сипаттауға мүмкіндік беретін Рунге-Кутта әдісіне негізделген. Модельді тексеру егде жастағы науқастардың денсаулығына қатысты клиникалық зерттеу деректері негізінде жүзеге асырылды. Зерттеу нәтижелері модельдің жүрек-қан тамырлары қартаюының дамуын болжауда жоғары дәлдікке ие екенін және жүрек-қан тамырлары ауруларының қауіпі жоғары науқастарды анықтауға мүмкіндік беретінін көрсетті. Ұсынылған болжау әдісі клиницистер үшін гериатрия саласында профилактика мен араласудың дербестендірілген стратегияларын әзірлеуге көмектесетін құнды құрал бола алады. Бұл өз кезегінде емдеу нәтижелерін жақсартуға және пациенттердің салауатты өмірін ұзартуға ықпал етеді. Болашақта модель параметрлерін одан әрі нақтылау және оны халық

арасында қолдануды кеңейту жоспарлануда.

Тірек сөздер: жүрек-қан тамырларының қартаюы, болжау, математикалық модельдеу, егде жастағы науқастар, физиологиялық факторлар, дифференциалдық теңдеулер.

^{1,2*}**Suleimenova M.U.,**

Master of Mathematics, ORCID ID: 0009-0003-8553-5353,

e-mail: madekin940@gmail.com

^{2,3}**Manapova A.K.,**

Master of Applied Mathematics and Informatics, ORCID ID: 0000-0003-1548-7061,

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

⁴**Shomanov A.S.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-8253-7474,

e-mail: adai.shomanov@nu.edu.kz

⁵**Siming Ch.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-2690-3588,

e-mail: simingchen3@gmail.com

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan

³Civil Aviation Academy, Almaty, Kazakhstan

⁴Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan

⁵Fudan University, Shanghai, China

NUMERICAL MODELING OF PREMATURE CARDIOVASCULAR AGING

Abstract

Cardiovascular aging poses a significant threat to the health and quality of life of individuals, especially those aged 65 years and older. This paper presents a way to predict cardiovascular aging using mathematical modeling. The developed model integrates various physiological and behavioral factors including blood pressure, cholesterol level, body mass index, smoking, physical activity and alcohol. The model is based on the application of iteration and Runge Kutta methods, which allows us to describe the dynamic interaction of these factors over time. Validation of the model was performed based on data from clinical studies of elderly patients' health. The results show that the model has high accuracy in predicting the progression of cardiovascular aging and allows to identify patients with increased risk of cardiovascular diseases. The proposed prediction method may become a valuable tool for physicians, helping to develop personalized prevention and intervention strategies in geriatrics, which, in turn, may improve treatment outcomes and prolong the healthy life of patients. Further refinement of the model parameters and expansion of its application to broader populations are planned for the future.

Key words: cardiovascular aging, prediction, mathematical modeling, elderly patients, physiological factors, differential equations.

Дата поступления статьи в редакцию: 02.08.2024

ӘОЖ 517.98
FTAXP 27.39.19

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-136-145>

¹Бесжанова А.Т.,
магистр, ORCID ID: 0009-0000-6314-1343,
e-mail: beszhanova@mail.ru
¹Байарыстанов А.О.,
ф.м.-ғ.к., ORCID ID: 0000-0002-5840-5401,
e-mail: oskar_62@mail.ru

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

ЖОҒАРҒЫ ШЕГІ АЙНЫМАЛЫ БОЛАТЫН МАТРИЦАЛЫҚ ОПЕРАТОРДЫҢ МОНОТОНДЫ ТІЗБЕКТЕР КОНУСЫНДАҒЫ САЛМАҚТЫ БАҒАЛАУЫ

Аңдатпа

Харди теңсіздігі 1920 ж. тұжырымдалып, 1925 ж. дәлелденді. Сол уақыттан бері бұл теңсіздік айтарлықтай дамыды. Алғашқы жұмыстар жалпы салмақтарды қарастырумен байланыста болды. Кейінгі жұмыстарда Харди операторының орнына басқа ядролары бар жалпы операторлар қарастырылды. Қазіргі уақытта Харди типтес теңсіздіктерге арналған көптеген зерттеулер жүргізілуде. Харди теңсіздігінің жалпылаулары маңызды қолданбаларға негізделіп, тек теріс емес функциялар конусында ғана емес, сонымен қатар монотонды функциялар конусында да қарастырылады. Бұл жұмыста $1 < p \leq q < \infty$ үшін монотонды тізбектер конусында салмақты Харди типтес теңсіздіктің орындалуының қажетті және жеткілікті шартын анықтау қарастырылады. Есепті шешудің негізгі әдісі –редукциялау. Ол Сойер принципін қолдана отырып, монотонды тізбектер конусындағы Харди типті теңсіздікті барлық теріс емес тізбектер үшін белгілі бір теңсіздікке келтіруге мүмкіндік береді.

Тірек сөздер: Харди теңсіздігі, матрицалық оператор, монотонды тізбектер.

Кіріспе

Монотонды сандар тізбегі конусының қасиеттері функциялар теориясында, функционалдық анализде, математикалық экономика есептерінде, ықтималдықтар теориясы мен математикалық статистикада қойылған әртүрлі экстремалды есептер үшін үлкен маңызға ие. Бұл тізбектер операторлардың аппроксимативті сандары, функциялардың ең жақсы жуықтауларының сандық сипаттамалары, функциялардың моменттік тізбектері және басқа да сәйкес объектілер туралы маңызды ақпаратты қамтиды. Ал кейбір объектілердің сапалық қасиеттері монотонды тізбектердің функционалдық қатынастары арқылы өрнектеледі.

Монотонды функциялар конусындағы салмақты Харди теңсіздігі мен оның жалпыламаларының көптеген қолданыстары бар. Олар, мысалы, операторлар теориясында, Лоренц кеңістігіндегі операторлардың шенелімдігін зерттеуде, Лоренц кеңістігінің енгізулері теориясында және басқа да салаларда кеңінен қолданылады.

Материалдар мен әдістер

Монотонды функциялар конусында зерттеулер басталғалы бері негізгі зерттеу әдісі – «редукция әдісі». Бұл әдіс арқылы монотонды функциялар конусындағы берілген теңсіздікті теріс емес функциялар жиынындағы теңсіздікке келтіруге болады. Алғаш рет Е. Сойердің жұмысында [1] өспейтін функциялар жиынындағы сызықты оң операторлар үшін теңсіздікті

қандай да бір теріс емес функциялар жиынындағы теңсіздікке редукциялау әдісі қарастырылды. Бұл әдіс «Сойердің қосалқылық принципі» (Сойер принципі) деп аталады. [2, 3] Жұмыстарда осы принциптің кемімейтін функциялар үшін орындалуы қарастырылған. Сондай-ақ, Сойер принципін қолданып әртүрлі оператор кластары үшін жасалған жұмыстарды [4–7] қарауға болады.

А. Гогатишвили және В.Д. Степанов [8] жұмысында монотонды функциялар конусында сызықты болуы міндетті емес операторлардың салмақты теңсіздіктерін теріс емес функциялар жиынында қандай да бір салмақты теңсіздікке келтіруге болатыны қарастырылған.

[9] Жұмыста $1 < p, q < \infty$ жағдайы үшін келесі түрде Сойер принципінің дискретті аналогы алынды:

Мұндағы $1 < p < \infty$, $r = \{r_i\}$ және $v = \{v_i\}$ теріс емес сандық тізбектер.

Бұл нәтиже бойынша монотонды тізбектер конусында Харди теңсіздігін теріс емес тізбектер үшін қандай да бір теңсіздікке келтіруге болады. [10]–[13] Дискретті Сойер принципін қолданып, Харди операторының монотонды тізбектер конусындағы матрицалық операторлардың салмақты бағалаулары алынған. Осы жұмыста біз осы әдісті қолдана отырып, жоғарғы шегі айнымалы болатын матрицалық операторды теріс емес, өспейтін тізбектер

$$\sup_{0 \leq f \downarrow} \frac{\sum_{i=1}^{\infty} r_i f_i}{\left(\sum_{i=1}^{\infty} v_i f_i^p\right)^{\frac{1}{p}}} \approx \left(\sum_{k=1}^{\infty} \left(\sum_{i=1}^k r_i \right)^{p'} \left(V_k^{-\frac{p'}{p}} - V_{k+1}^{-\frac{p'}{p}} \right) \right)^{\frac{1}{p'}} + \frac{\sum_{i=1}^{\infty} r_i}{\left(\sum_{i=1}^{\infty} v_i\right)^{\frac{1}{p}}},$$

конусындағы салмақты бағалауын қарастырамыз.

Нәтижелер мен талқылау

Айталық $u = \{u_i\}_{i=1}^{\infty}$ – теріс емес, $v = \{v_i\}_{i=1}^{\infty}$ – оң нақты сандар тізбегі болсын. l_{pv} – $f = \{f_i\}_{i=1}^{\infty}$ нақты сандарының тізбектері кеңістігі және олар үшін

$$\|f\|_{p,v} = \left(\sum_{i=1}^{\infty} |v_i f_i|^p \right)^{\frac{1}{p}}, \quad 1 \leq p < \infty$$

нормасы ақырлы болсын.

Келесі түрде анықталған жоғарғы шегі айнымалы болатын матрицалық операторды қарастырайық:

$$(Ag)_n = \sum_{i=1}^{\beta(n)} a_{n,i} g_i, \quad i \in \mathbb{N}, \quad (1)$$

мұндағы, $\mathbb{N}$ – натурал сандар жиыны, $a_{n,i} \geq 0$, $\beta(n)$ – натурал сандар тізбегі келесі қасиеттерге ие:

- 1) қатаң өспелі;
- 2) $\beta(1) = 1$, $n < \beta(n)$, $n \geq 2$.

Жұмыстың негізгі мақсаты $1 < p \leq q < \infty$ болғанда кез келген l_{pv} -дан алынған теріс емес, өспейтін $g = \{g_i\}_{i=1}^{\infty}$ тізбектер үшін

$$\left(\sum_{n=1}^{\infty} u_n^q (Ag)_n^q \right)^{\frac{1}{q}} \leq C \left(\sum_{n=1}^{\infty} g_n^p v_n^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (2)$$

теңсіздігінің орындалуының қажетті және жеткілікті шартын алу.

Егер $\beta(n) = n$, $a_{ni} \equiv 1, n \geq i \geq 1$ болғанда A операторы дискретті Харди операторын береді: $(Ag)_n = \sum_{i=1}^n g_i$. Дискретті Харди операторының теріс емес тізбектер үшін орындалуы p және q параметрлерінің әртүрлі жағдайында толығымен зерттелген. Бұл мәселенің толық талдауы мен шолуын [5] жұмыстан көруге болады.

$a_{n,i} \equiv 1, n \geq i \geq 1$ болғанда (1) операторы жоғарғы шегі айнымалы болатын Харди операторын береді. Бұл оператордың теріс емес тізбектер үшін (2) түрдегі салмақты бағалауы [14]–[16] жұмыстарда зерттелген.

Ал [17] жұмыста жоғарғы және төменгі шектері айнымалы болатын $(Ag)_n = \sum_{i=\alpha(n)}^{\beta(n)} a_{n,i} g_i$ матрицалық оператордың теріс емес тізбектер үшін (2) түрдегі салмақты бағалауы $1 < p \leq q < \infty$ жағдайында қарастырылған.

Алайда жоғарғы не төменгі шегі айнымалы болатын матрицалық оператордың теріс емес, өспейтін тізбектер жиынында салмақты бағалауы осыған дейін қарастырылмаған еді. Бұл мәселені осы жұмыста қарастырмыз.

Ескерту. Бұдан ары $M \ll K$ символы $M \leq cK$ білдіреді, мұндағы константа $c > 0$ маңызды емес параметрлерге ғана тәуелді. Егер $M \ll K \ll M$ болса, онда $M \approx K$.

Айталық,

$$V_k = \sum_{i=1}^k v_i^p, \quad k \geq 1, \quad A_{n,n} = \sum_{j=1}^n a_{n,\beta(j)}, \quad A_{n,k} = \sum_{j=1}^k a_{n,\beta(j)}, \quad W_k = \sum_{j=1}^k \omega_{\beta(j)},$$

$$F_1 = \sup_{s \geq 1} \left(\sum_{n=1}^s u_n^q \left(\sum_{j=1}^n a_{n,\beta(j)} \right) \right)^{\frac{1}{q}} (V_s)^{-\frac{1}{p}}, \quad (3)$$

$$F_2 = \sup_{s \geq 1} \left(\sum_{n=s}^{\infty} b_{n,s}^q u_n^q \right)^{\frac{1}{q}} \left(\sum_{k=1}^s \left(V_k^{-\frac{p'}{p}} - V_{k+1}^{-\frac{p'}{p}} \right) W_k^{p'} \right)^{\frac{1}{p'}}, \quad (4)$$

$$F_3 = \sup_{s \geq 1} \left(\sum_{n=s}^{\infty} u_n^q \right)^{\frac{1}{q}} \left(\sum_{k=1}^s \left(V_k^{-\frac{p'}{p}} - V_{k+1}^{-\frac{p'}{p}} \right) A_{s,k}^{p'} \right)^{\frac{1}{p'}}. \quad (5)$$

Айталық, $m \in \mathbb{N}$ және $\Omega(m) := \{n \in \mathbb{N} : \beta(n) \leq m\}$. $1 \in \Omega(m)$ болғандықтан, $\forall m \in \mathbb{N}, \Omega(m) \neq \emptyset$. Сондай-ақ $\forall m \in \mathbb{N}$ үшін $\beta^{-1}(m) := \max \Omega(m)$ деп белгілейік. Онда $\beta^{-1}(\beta(m)) = m$, $\beta(\beta^{-1}(m)) \leq m$ болады.

Теорема 1. Айталық $1 < p \leq q < \infty$ болсын. (2) теңсіздігі өспейтін теріс емес ($\downarrow g \geq 0$) тізбектері үшін орындалады сонда және тек сонда, егер $F = \max\{F_1, F_2, F_3\} < \infty$. Мұндағы $F \approx C$, ал C – (2)-дегі ең кіші тұрақты.

Дәлелдеу. (2) теңсіздігін ыңғайлы түрде жазып, Гелдер теңсіздігінің кері есебін қолданамыз ($i = \beta(j)$) алмастыруын қолданып және қосындылардың ретін ауыстырамыз)

$$C = \sup_{\downarrow g \geq 0} \frac{\left(\sum_{n=1}^{\infty} u_n^q \left(\sum_{i=1}^{\beta(n)} a_{n,i} g_i \right)^q \right)^{\frac{1}{q}}}{\|g\|_{p,v}} = \sup_{\downarrow g \geq 0} \sup_{f \geq 0} \frac{\sum_{n=1}^{\infty} f_n \sum_{i=1}^{\beta(n)} a_{n,i} g_i}{\|f\|_{q',u^{-1}} \|g\|_{p,v}} =$$

(дискретті Соьер принципін қолданамыз)

$$= \sup_{\downarrow g \geq 0} \sup_{f \geq 0} \frac{\sum_{n=1}^{\infty} f_n \sum_{j=1}^n a_{n,\beta(j)} g_{\beta(j)}}{\|f\|_{q',u^{-1}} \|g\|_{p,v}} = \sup_{f \geq 0} \sup_{\downarrow g \geq 0} \frac{\sum_{j=1}^{\infty} g_{\beta(j)} \sum_{n=j}^{\infty} f_n a_{n,\beta(j)}}{\|f\|_{q',u^{-1}} \|g\|_{p,v}} \approx$$

Осыдан (2) теңсіздігі келесі теңсіздіктерге эквивалентті болатынын аламыз:

$\lim_{k \rightarrow \infty} V_k = \infty$ жағдайында

$$\left(\sum_{k=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^k \sum_{n=j}^{\infty} f_n a_{n,\beta(j)} \right)^{p'} \left(V_k^{\frac{-p'}{p}} - V_{k+1}^{\frac{-p'}{p}} \right) \right)^{\frac{1}{p'}} \leq \tilde{C} \|f\|_{q',u^{-1}}, \quad \forall f_n \geq 0 \quad (6)$$

және $\lim_{k \rightarrow \infty} V_k < \infty$ жағдайында

$$\left(\sum_{k=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^k \sum_{n=j}^{\infty} f_n a_{n,\beta(j)} \right)^{p'} \left(V_k^{\frac{-p'}{p}} - V_{k+1}^{\frac{-p'}{p}} \right) \right)^{\frac{1}{p'}} + \left(\sum_{j=1}^{\infty} \sum_{n=j}^{\infty} f_n a_{n,\beta(j)} \right) \left(\sum_{i=1}^{\infty} v_i^p \right)^{-\frac{1}{p}} \leq \hat{C} \|f\|_{q',u^{-1}}, \quad \forall f_n \geq 0, \quad (7)$$

Мұндағы $C \approx \tilde{C}$ егер $\lim_{k \rightarrow \infty} V_k = \infty$, және $C \approx \hat{C}$ егер $\lim_{k \rightarrow \infty} V_k < \infty$.

Алдымен $\lim_{k \rightarrow \infty} V_k = \infty$ жағдайын қарастырайық.

$a_{n,\beta(j)}, f_i$ теріс емес болғандықтан

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^k \sum_{n=j}^{\infty} f_n a_{n,\beta(j)} &\approx \sum_{j=1}^k \sum_{n=j}^k f_n a_{n,\beta(j)} + \sum_{j=1}^k \sum_{n=k}^{\infty} f_n a_{n,\beta(j)} = \\ &= \sum_{n=1}^k f_n \sum_{j=1}^n a_{n,\beta(j)} + \sum_{n=k}^{\infty} f_n \sum_{j=1}^k a_{n,\beta(j)} = \sum_{n=1}^k f_n A_{n,n} + \sum_{n=k}^{\infty} f_n A_{n,k}. \end{aligned}$$

яғни

$$\left(\sum_{j=1}^k \sum_{n=j}^{\infty} f_n a_{n,\beta(j)} \right)^{p'} \approx \left(\sum_{n=1}^k A_{n,n} f_n \right)^{p'} + \left(\sum_{n=k}^{\infty} A_{n,k} f_n \right)^{p'}. \quad (8)$$

(8) өрнекті (6) қойсақ, онда (6) теңсіздігінің орындалуы келесі теңсіздіктердің бірізгілікте орындалуына эквивалентті болатынын аламыз

$$\left(\sum_{k=1}^{\infty} \left(\sum_{n=1}^k f_n A_{n,n} \right)^{p'} \left(V_k^{\frac{-p'}{p}} - V_{k+1}^{\frac{-p'}{p}} \right) \right)^{\frac{1}{p'}} \leq \tilde{C}_1 \|f\|_{q', u^{-1}}, \quad \forall f_n \geq 0, \quad (9)$$

$$\left(\sum_{k=1}^{\infty} \left(\sum_{n=k}^{\infty} f_n A_{n,k} \right)^{p'} \left(V_k^{\frac{-p'}{p}} - V_{k+1}^{\frac{-p'}{p}} \right) \right)^{\frac{1}{p'}} \leq \tilde{C}_2 \|f\|_{q', u^{-1}}, \quad \forall f_n \geq 0, \quad (10)$$

мұндағы

$$\tilde{C} \approx \max\{\tilde{C}_1, \tilde{C}_2\}. \quad (11)$$

(9) теңсіздігі Харди теңсіздігі болды және орындалады, сонда тек сонда ғана, егер келесі шарт орындалса

$$\begin{aligned} F_1 &= \sup_{s \geq 1} \left(\sum_{n=1}^s A_{n,n}^q u_n^q \right)^{\frac{1}{q}} \left(\sum_{k=s}^{\infty} \left(V_k^{\frac{-p'}{p}} - V_{k+1}^{\frac{-p'}{p}} \right) \right)^{\frac{1}{p'}} \\ &= \sup_{s \geq 1} V_s^{-\frac{1}{p}} \left(\sum_{n=1}^s u_n^q \left(\sum_{j=1}^n a_{n,\beta(j)} \right)^q \right)^{\frac{1}{q}} < \infty. \end{aligned} \quad (12)$$

$$\tilde{C}_1 \approx F_1 \quad (13)$$

$$\left(\sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{k=1}^n \varphi_k A_{n,k} \right)^q u_n^q \right)^{\frac{1}{q}} \leq \tilde{C}_2 \left(\sum_{k=1}^{\infty} \varphi_k^p \left(V_k^{\frac{-p'}{p}} - V_{k+1}^{\frac{-p'}{p}} \right)^{\frac{p}{p'}} \right)^{\frac{1}{p}}, \quad \forall \varphi \geq 0. \quad (14)$$

(10) теңсіздігіне дуалды теңсіздікті қарастырайық

Келесі түрлендірулерді жасайық: $a_{n,\beta(j)} = \tilde{a}_{n,j}$, онда $A_{n,k} = \sum_{j=1}^k a_{n,\beta(j)} = \sum_{i=1}^k \tilde{a}_{n,i}$. Олай болса $(\tilde{a}_{n,j})$ – матрица элементтері [18] жұмыстағы 1.1-шартын қанағаттандыратынын айқын көруге болады, яғни $1 \leq j \leq m \leq n$ үшін $\tilde{a}_{n,j} \approx b_{n,m} \tilde{\omega}_j + \tilde{a}_{m,j}$.

Айталық, $s \in N: n \geq s \geq k \geq j$, онда

$$\begin{aligned} A_{n,k} &= \sum_{j=1}^k a_{n,\beta(j)} = \sum_{j=1}^k \tilde{a}_{n,j} \approx \sum_{j=1}^k (b_{n,s} \tilde{\omega}_j + \tilde{a}_{s,j}) = b_{n,s} \sum_{j=1}^k \tilde{\omega}_j + \sum_{j=1}^k \tilde{a}_{s,j} \\ &= b_{n,s} \sum_{j=1}^k \omega_{\beta(j)} + \sum_{j=1}^k a_{s,\beta(j)} = b_{n,s} W_k + A_{s,k}. \end{aligned}$$

[18] жұмыстағы Теорема 2.1 бойынша (14) теңсіздігі орындалуы үшін келесі шарттардың орындалуы қажет және жеткілікті:

$$F_2 = \sup_{s \geq 1} \left(\sum_{n=s}^{\infty} b_{n,s}^q u_n^q \right)^{\frac{1}{q}} \left(\sum_{k=1}^s W_k^{p'} \left(V_k^{-\frac{p'}{p}} - V_{k+1}^{-\frac{p'}{p}} \right) \right)^{\frac{1}{p'}} < \infty, \quad (15)$$

$$F_3 = \sup_{s \geq 1} \left(\sum_{n=s}^{\infty} u_n^q \right)^{\frac{1}{q}} \left(\sum_{k=1}^s A_{s,k}^{p'} \left(V_k^{-\frac{p'}{p}} - V_{k+1}^{-\frac{p'}{p}} \right) \right)^{\frac{1}{p'}} < \infty, \quad (16)$$

мұндағы

$$\tilde{C}_2 \approx \max\{F_2, F_3\}. \quad (17)$$

(13) пен (17)-ден байқайтынымыз, (9) және (10) теңсіздіктер орындалады, сонда тек сонда ғана, егер $F = \max\{F_1, F_2, F_3\} < \infty$. Онда (11)-ден $\tilde{C} = \max\{F_1, F_2, F_3\} < \infty$ аламыз. $C \approx \tilde{C}$ ескерсек, $F = \max\{F_1, F_2, F_3\} \approx C$ аламыз, яғни $\lim_{k \rightarrow \infty} V_k = \infty$ жағдайда Теорема орындалады, сонда тек сонда ғана, егер $C = \max\{F_1, F_2, F_3\} < \infty$ болса.

Енді $\lim_{k \rightarrow \infty} V_k < \infty$ жағдайын қарастырайық. Бұл жағдайда (2) теңсіздік орындалады, сонда тек сонда ғана, егер (7) теңсіздігі орындалса немесе (6) теңсіздік келесі теңсіздікпен қатар орындалса:

$$\left(\sum_{j=1}^{\infty} \sum_{n=j}^{\infty} f_n a_{n,\beta(j)} \right) \left(\sum_{i=1}^{\infty} v_i^p \right)^{-\frac{1}{p}} \leq \hat{C}' \|f\|_{q', u^{-1}}, \quad \forall f_n \geq 0, \quad (18)$$

мұндағы $\hat{C}'$ – (18) теңсіздігінің ең кіші оң константасы.

Онда $\lim_{k \rightarrow \infty} V_k < \infty$ жағдайында (7) теңсіздік орындалады, сонда тек сонда ғана, егер

$\hat{C} = \max\{F_1', F_2, F_3\} < \infty$ болса.

Мұндағы

$$F_1' = \sup_{s \geq 1} \left(\sum_{n=1}^s A_{n,n}^q u_n^q \right)^{\frac{1}{q}} \left(V_s^{-\frac{p'}{p}} - V_{\infty}^{-\frac{p'}{p}} \right)^{\frac{1}{p'}}.$$

Расында да, егер $\lim_{k \rightarrow \infty} V_k < \infty$ болса, онда (13)-тен (9) теңсіздіктің $F_1' < \infty$ болғанда ғана орындалатыны шығады, және $F_1' \approx \tilde{C}_1$.

(18) теңсіздікте қосындылардың ретін алмастырсақ келесі теңсіздікті аламыз

$$\left(\sum_{n=1}^{\infty} f_n \sum_{j=1}^n a_{n,\beta(j)} \right) \left(\sum_{i=1}^{\infty} v_i^p \right)^{-\frac{1}{p}} \leq \hat{C}' \|f\|_{q', u^{-1}}, \quad \forall f_n \geq 0.$$

Онда

$$\left(\sum_{n=1}^{\infty} f_n A_{n,n} \right) \leq \hat{C}' \left(\sum_{n=1}^{\infty} f_n^{q'} u_n^{-q'} \right)^{\frac{1}{q'}} V_{\infty}^{\frac{1}{p}}, \quad \forall f_n \geq 0.$$

Гелдер теңсіздігінің кері есебін қолдансақ

$$\left(\sum_{n=1}^{\infty} u_n^q A_{n,n}^q \right)^{\frac{1}{q}} = \hat{C}' V_{\infty}^{\frac{1}{p}}.$$

Олай болса (18) теңсіздік орындалады, сонда тек сонда ғана, егер

$$\hat{C}' = \left(\sum_{n=1}^{\infty} u_n^q A_{n,n}^q \right)^{\frac{1}{q}} V_{\infty}^{-\frac{1}{p}} < \infty$$

болса.

$\frac{1}{2}(F'_1 + \hat{C}') < F_1$ болатыны айқын. Ал $\forall s \geq 1$ үшін

$$V_s^{-\frac{1}{p}} = \left(V_s^{-\frac{p'}{p}} \right)^{\frac{1}{p'}} = \left(V_s^{-\frac{p'}{p}} - V_{\infty}^{-\frac{p'}{p}} + V_{\infty}^{-\frac{p'}{p}} \right)^{\frac{1}{p'}} \leq \left(V_s^{-\frac{p'}{p}} - V_{\infty}^{-\frac{p'}{p}} \right)^{\frac{1}{p'}} + V_{\infty}^{-\frac{1}{p}}$$

аламыз, олай болса $F_1 \leq (F'_1 + \hat{C}')$ екендігі шығады, яғни $F_1 \approx F'_1 + \hat{C}'$. Ендеше (9) және (18) теңсіздіктері орындалады, сонда тек сонда ғана, $F_1 < \infty$ болса. Онда (7) теңсіздігі орындалады, сонда тек сонда ғана, егер $\hat{C} \approx \max\{F_1, F_2, F_3\} < \infty$. Бұл жағдайда $C \approx \hat{C}$ ескерсек, онда $C \approx F = \max\{F_1, F_2, F_3\}$.

Олай болса $\lim_{k \rightarrow \infty} V_k = \infty$, $\lim_{k \rightarrow \infty} V_k < \infty$ екі жағдайда да (2) теңсіздігінің орындалуы үшін $C \approx F = \max\{F_1, F_2, F_3\} < \infty$ қажетті және жеткілікті. Теорема дәлелденді.

Қорытынды

Бұл жұмыста Сойер принципінің дискретті аналогын пайдаланып, жоғарғы шегі айнымалы болатын матрицалық оператордың теріс емес, өспейтін тізбектер конусындағы салмақты бағалауының қажетті және жеткілікті шарттары алынды.

ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Sawyer E. Boundedness of classical Lorentz spaces// Studia Math.— 1990. — V. 96. — P. 145–158.
- 2 Stepanov V.D. Integral operators on the cone of monotone functions // J. London Math. Soc. — 1993. — V. 48. — No. 3 — P. 465–487.
- 3 Heinig H.P., Stepanov V.D. Weighted Hardy inequalities for increasing functions // Canad. J. Math. — 1993. — V. 93. — No. 1. — P. 104–116.
- 4 Sinnamon G. Hardy's Inequality and Monotonicity // Function Spaces Differential Operators and Nonlinear Analysis. Prague. — 2005. — P. 292–310.
- 5 Kufner F., Maligranda L., Persson L.E. The Hardy inequality. About its history and some related results. Pilsen: Vydavatelsky servis, 2007.

- 6 Kufner F., Persson L.E. *Weighted Inequalities of Hardy Type*. New Jersey, London, Singapore, Hong Kong: World Scientific, 2003.
- 7 Arendarenko L.S., Oinarov R., Persson L.-E. Some new Hardy – type integral inequalities on cones of monotone functions // *Advances in Harmonic Analysis and Operator Theory*. – 2013. – P. 77–89.
- 8 Гогатишвили А., Степанов В.Д. Редукционные теоремы для весовых интегральных неравенств на конусе монотонных функции // *Успехи мат. наук.* – 2013. – Т. 68. – № 4(412). – С. 3–68.
- 9 Ойнаров Р., Шалгынбаева С.Х. Весовые неравенства Харди на конусе монотонных последовательностей // *Известия НАН РК. Серия физ.-мат.* –1998. – № 1. – С. 33–42.
- 10 Шалгынбаева С.Х. Весовые оценки для класса матриц на конусе монотонных последовательностей // *Известия НАН РК. Серия физ.-мат.* –1998. – №5 – С. 76–80.
- 11 Taspaganbetova Zh. Weighted Hardy type inequalities on the cone of monotone sequences// *Mathematical Journal*. – 2012. –V. 12. – No. 4(46). – P.115–125.
- 12 Taspaganbetova Zh. Weighted estimate for a class of matrices on the cone of monotone sequences// *Eurasian Math. J.* – 2012. – V. 3. – No. 46. – P.137–146.
- 13 Taspaganbetova Zh. Two-sided estimates for matrix operators on the cone of monotone sequences// *J. Math. Anal. Appl.* –2014. – V. 410. – P. 82–93.
- 14 Альхалил А. Дискретные неравенства типа Харди с переменными пределами суммирования I // *Вестник РУДН. Серия. Математика. Информатика. Физика.* – 2010. – № 4. – С. 55–68.
- 15 Альхалил А. Дискретные неравенства типа Харди с переменными пределами суммирования II // *Вестник РУДН. Серия. Математика. Информатика. Физика.* – 2011. – №1. – С. 5–13.
- 16 Альхалил А. Дискретные неравенства типа Харди с переменными пределами суммирования III // *Вестник РУДН. Серия. Математика. Информатика. Физика.* – 2011. – № 2. – С. 44–50.
- 17 Temirkhanova A., Beszhanova A. Boundedness and compactness of a certain class of matrix operators with variable limits of summation // *Eurasian Math. J.* – 2020. – V. 11. – No. 4. – P. 66–75.
- 18 Oinarov R., Persson L-E., Temirkhanova A.M., Weighted inequalities for a class of matrix operators: the case $p \leq q$ // *Math. Inequal. Appl.* – 2009. – V. 12. – P. 891–903.

REFERENCES

- 1 Sawyer E. Boundedness of classical Lorentz spaces. *Studia Math.*, 1990, vol. 96, pp. 145–158.
- 2 Stepanov V.D. Integral operators on the cone of monotone functions. *J. London Math. Soc.*, 1993, vol. 48, no. 3, pp. 465–487.
- 3 Heinig H.P., Stepanov V.D. Weighted Hardy inequalities for increasing functions. *Canad. J. Math.*, 1993, vol. 93, no. 1, pp. 104–116.
- 4 Sinnamon G. *Hardy's Inequality and Monotonicity. Function Spaces Differential Operators and Nonlinear Analysis*. Prague, 2005, pp. 292–310.
- 5 Kufner F., Maligranda L., Persson L.E. *The Hardy inequality. About its history and some related results*. Pilsen: Vydavatelsky servis, 2007.
- 6 Kufner F., Persson L.E. *Weighted Inequalities of Hardy Type*. New Jersey, London, Singapore, Hong Kong: World Scientific, 2003.
- 7 Arendarenko L.S., Oinarov R., Persson L.-E. Some new Hardy – type integral inequalities on cones of monotone functions. *Advances in Harmonic Analysis and Operator Theory*, 2013, pp. 77–89.
- 8 Gogatishvili A., Stepanov V.D. Redukcionnye teoremy dlya vesovykh integralnykh neravenstv na conuse monotonnykh funkci. *Uspexi mat. nauk.*, 2013, vol. 68, no. 4(412), pp. 3–68. [in Russian]
- 9 Oinarov R., Shalgynbaeva S.Kh. Vesovye neravenstva Hardy na conuse monotonnykh posledovatelnoitei. *Izvestiya NAN RK. Serya fis-mat.*, 1998, no.1, pp. 33–42. [in Russian]
- 10 Shalgynbaeva S.Kh. Vesovye ocenki dlya classa matric na conuse monotonnykh posledovatelnoitei. *Izvestiya NAN RK. Seryafis-mat.*, 1998, no.5, pp. 76–80. [in Russian]
- 11 Taspaganbetova Zh. Weighted Hardy type inequalities on the cone of monotone sequences. *Mathematical Journal*, 2012, vol. 12, no. 4(46), pp. 115–125.
- 12 Taspaganbetova Zh. Weighted estimate for a class of matrices on the cone of monotone sequences. *Eurasian Math. J.*, 2012, vol. 3, no. 46, pp. 137–146.
- 13 Taspaganbetova Zh. Two-sided estimates for matrix operators on the cone of monotone sequences. *J. Math. Anal. Appl.*, 2014, vol. 410, pp. 82–93.

- 14 Alhalil A. Diskretnye neravenstva tipa Hardy s peremrnnymi predelami summirovaniya I. Vestnik RUDN. Serya. Matematika. Informatika. Fizika, 2010, vol. 4, pp. 55–68. [in Russian]
- 15 Alhalil A. Diskretnye neravenstva tipa Hardy s peremrnnymi predelami summirovaniya II, Vestnik RUDN. Serya. Matematika. Informatika. Fizika, 2011, no.1, pp. 5–13. [in Russian]
- 16 Alhalil A. Diskretnye neravenstva tipa Hardy s peremrnnymi predelami summirovaniya III // Vestnik RUDN. Serya. Matematika. Informatika. Fizika, 2011, no. 2, pp. 44–50. [in Russian]
- 17 Temirkhanova A., Beszhanova A. Boundedness and compactness of a certain class of matrix operators with variable limits of summation. Eurasian Math. J., 2020, vol. 11, no. 4
- 18 Oinarov R., Persson L-E., Temirkhanova A.M., Weighted inequalities for a class of matrix operators: the case $p \leq q$ // Math. Inequal. Appl., 2009, vol. 12, pp. 891–903.

¹Beszhanova A.T.,

Master, ORCID ID: 0009-0000-6314-1343,

e-mail: beszhanova@mail.ru

¹Bayarystanov A.O.,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, ORCID ID: 0000-0002-5840-5401,

e-mail: oskar_62@mail.ru

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

WEIGHTED ESTIMATE OF A MATRIX OPERATOR WITH VARIABLE UPPER LIMIT ON THE CONE OF MONOTONE SEQUENCES

Abstract

Hardy's inequality was formulated in 1920 and finally proved in 1925. Since then, this inequality has been significantly developed. The first development was related to the consideration of more general weights. The next step was to use more general operators with other kernels instead of the Hardy operator. Currently, there are many works devoted to Hardy-type inequalities with iterated operators. Motivated by important applications, all these generalizations of Hardy's inequality are studied not only on the cone of non-negative functions, but also on the cone of monotone functions. In this paper, we consider the problem of finding necessary and sufficient conditions for the fulfillment of a weighted Hardy-type inequality on the cone of monotone sequences for $1 < p \leq q < \infty$. The main method for solving the problem is the reduction method, which, using the Sawyer principle, allows us to reduce a Hardy-type inequality on the cone of monotone sequences to some inequality for all non-negative sequences.

Key words: Hardy's inequality, matrix operator, monotone sequences.

¹Бесжанова А.Т.,

магистр, ORCID ID: 0009-0000-6314-1343,

e-mail: beszhanova@mail.ru

¹Байарыстанов А.О.,

к.ф.-м.н., ORCID ID: 0000-0002-5840-5401,

e-mail: oskar_62@mail.ru

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

ВЕСОВАЯ ОЦЕНКА МАТРИЧНОГО ОПЕРАТОРА С ПЕРЕМЕННЫМ ВЕРХНИМ ПРЕДЕЛОМ НА КОНУСЕ МОНОТОННЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Аннотация

Неравенство Харди было сформулировано в 1920 г. и окончательно доказано в 1925 г. С тех пор это неравенство получило значительное развитие. Первое развитие было связано с рассмотрением более общих весов. Следующим шагом было использование более общих операторов с другими ядрами вместо операторов

ра Харди. В настоящее время существует много работ, посвященных неравенствам типа Харди с итерированными операторами. Мотивированные важными приложениями, все эти обобщения неравенства Харди изучаются не только на конусе неотрицательных функций, но и на конусе монотонных функций. В этой работе рассматривается задача о нахождении необходимых и достаточных условий выполнения весового неравенства типа Харди на конусе монотонных последовательностей при $1 < p \leq q < \infty$. Основным методом решений задачи является метод редукции, который с помощью принципа Сойера позволяет свести неравенство типа Харди на конусе монотонных последовательностей к некоторому неравенству для всех неотрицательных последовательностей.

Ключевые слова: неравенство Харди, матричный оператор, монотонные последовательности.

Мақаланың редакцияға түскен күні: 30.09.2024

UDC 517.95
IRSTI 27.31.44<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-146-152>¹Dukenbayeva A.,

PhD, ORCID ID: 0000-0003-0437-6091,

e-mail: dukenbayeva@math.kz

¹Sadybekov M.

Dr.Phys.-Math.Sc., Professor, ORCID ID: 0000-0001-8450-8191,

e-mail: sadybekov@math.kz

¹Institute of Mathematics and Mathematical Modeling,
Almaty, Kazakhstan**ON A SPECTRAL PROBLEM FOR THE LAPLACE
OPERATOR WITH MORE GENERAL BOUNDARY CONDITIONS****Abstract**

In this paper, we consider a spectral problem for the Laplace operator with more general boundary conditions in a unit disk B_1 . In the special cases, the boundary conditions include periodic and Samarskii-Ionkin type boundary conditions. The main important property of our problem is its non-self-adjointness, which causes number of difficulties in their analytical and numerical solutions. For example, the Fourier method of separation of variables cannot be applied directly to our problem. Therefore, the possibility of separation of variables is justified in this paper. Namely, we present a method that reduces solution of the problem to a sequential solution of two classical local boundary value problems. By using this method, we construct all eigenfunctions and eigenvalues of the problem in explicit forms. Moreover, completeness of the system of the eigenfunctions is proved in $L^2(B_1)$. Notably, our result generalises the special case of the result on the two-dimensional periodic boundary value problem for the Laplace operator obtained in [1–2].

Key words: Laplace operator, Samarskii-Ionkin type problem, eigenfunctions, eigenvalues.**Introduction**

In [1], as a two-dimensional analogue to the classical periodic boundary value problems the authors considered the Poisson equation

$$-\Delta u = f(z), \quad z \in B_1 \quad (1.1)$$

in a unit disk $B_1 = \{z = (x, y) = x + iy \in \mathbb{C} : |z| < 1\}$ with the periodic boundary conditions

$$u(1, \varphi) - (-1)^k u(1, \varphi + \pi) = \tau(\varphi), \quad 0 \leq \varphi \leq \pi, \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r}(1, \varphi) + (-1)^k \frac{\partial u}{\partial r}(1, \varphi + \pi) = \nu(\varphi), \quad 0 \leq \varphi \leq \pi, \quad (1.3)$$

where $f(z) \in C^\gamma(\overline{B_1})$, $\tau(\varphi) \in C^{1+\gamma}[0, \pi]$, and $\nu(\varphi) \in C[0, \pi]$, $0 < \gamma < 1, k = 1, 2$. In [1], the self-adjointness of these problems was shown, and all corresponding eigenvalues and eigenfunctions were constructed. The problem (1.1)-(1.3) is referred to as antiperiodic when $k = 1$ and periodic when $k = 2$.

In [2] the authors considered the Poisson equation (1.1) with the following boundary conditions

$$u(1, \varphi) + u(1, 2\pi - \varphi) = \tau(\varphi), \quad 0 \leq \varphi \leq \pi \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r}(1, \varphi) - \frac{\partial u}{\partial r}(1, 2\pi - \varphi) = \nu(\varphi), \quad 0 \leq \varphi \leq \pi, \quad (1.5)$$

where $f(z) \in C^\gamma(\overline{B_1})$, $\tau(\varphi) \in C^{1+\gamma}[0, \pi]$, and $v(\varphi) \in C[0, \pi]$, $0 < \gamma < 1$. The eigenvalues of the spectral problem (1.1), (1.4)-(1.5), with $\tau = v = 0$, consist of all the eigenvalues of the Dirichlet and Neumann problems, and each eigenvalue corresponds to one eigenfunction. As for the spectral problem (1.1)-(1.3) with $k = 1$ and $\tau = v = 0$, its eigenvalues consist of only a part ("half") of the eigenvalues $\mu_k^{(n)}$ of the Dirichlet problem for $n = 2j$ and a part ("half") of the eigenvalues $\mu_k^{(n)}$ of the Neumann problem for $n = 2j + 1$. Additionally, it was noted that each eigenvalue has two corresponding eigenfunctions. For the multidimensional extension of these problems, we refer the reader to [2].

Later, in [3] spectral problems for the Laplace operator with the following more general boundary conditions

$$u(1, \varphi) - \alpha u(1, 2\pi - \varphi) = 0, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi, \quad \alpha \neq 1 \quad (1.6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r}(1, \varphi) - \frac{\partial u}{\partial r}(1, 2\pi - \varphi) = 0, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi \quad (1.7)$$

were investigated. One can note that this problem reduces the antiperiodic problem when $\alpha = -1$ from [2] and Samarskii-Ionkin type problem from [4] when $\alpha = 0$. Observe that the latter problem is non-self-adjoint when $\alpha \neq -1$. Nevertheless, the author in [3] managed to prove completeness of its eigenfunctions. For studies on the well-posedness of the Poisson equation with inhomogeneous conditions, we refer to [4] when $\alpha = 0$ as well as to [5] and [6] with general α in two and multidimensional cases, respectively. For other generalisations of (1.1)-(1.3) we can refer to e.g. [7] and [8]. We can also refer to [9] and [10] for the Samarskii-Ionkin type non-local problems concerning other partial differential equations.

Here, in this paper we consider similar problem with a parameter in the second boundary condition (1.7): Let $B_1 = \{z = (x, y) = x + iy \in \mathbb{C} : |z| < 1\}$ be a unit disk, $r = |z|$, $\varphi = \arctan(y/x)$, $B_1^+ = B_1 \cap \{y > 0\}$, and $B_1^- = B_1 \cap \{y < 0\}$. We consider the spectral problem corresponding to the Laplace operator

$$-\Delta u(z) = \lambda u(z), \quad |z| < 1 \quad (1.8)$$

with the boundary conditions

In the special case $\beta = -1$ the problem (1.8)-(1.10) becomes the periodic boundary value problem from [2].

Note that the problem (1.8)-(1.10) is non-self-adjoint in general, so the direct use of the method

$$u(1, \varphi) - u(1, 2\pi - \varphi) = 0, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r}(1, \varphi) - \beta \frac{\partial u}{\partial r}(1, 2\pi - \varphi) = 0, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi, \quad \beta \in \mathbb{R}. \quad (1.10)$$

of separation of variables is impossible. Here, in this paper we propose another method that reduces the solution of the problem to a sequential solution of two classical local boundary value problems. By this method, we calculate eigenfunctions and eigenvalues of the problems (1.8)-(1.10) in an explicit form. Furthermore, we prove completeness of the eigenfunctions.

Material and methods

As mentioned in Introduction, as analogues of the classical periodic and anti-periodic problems the authors in [1, 2] considered two and multidimensional versions for the Laplace operator. Then, in [3–6] these problems but with more generalised Samarskii-Ionkin type boundary conditions that include periodic, antiperiodic and Samarskii-Ionkin type boundary conditions were investigated. We also refer to [7–10] for other generalisations. Here, we are interested in a non-self-adjoint spectral problem, for which it is impossible to directly apply traditional method of separation of variables. In this paper, we will demonstrate a method that reduces the solution of the problem to a sequential solution of two classical local boundary value problems.

Results and Discussion

In this section, we present our main result. Before doing so, we will introduce the necessary notations.

We will use L_β to denote the closure in $L^2(B_1)$ of the operator defined by the differential expression $\ell_1 u = -\Delta u(z)$ on the linear manifold of functions $u(z) \in C^{2+\gamma}(B_1)$, $0 < \gamma < 1$, satisfying the following two boundary conditions

$$u(1, \varphi) - u(1, 2\pi - \varphi) = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial r}(1, \varphi) - \beta \frac{\partial u}{\partial r}(1, 2\pi - \varphi) = 0, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi, \beta \in \mathbb{R}.$$

Now we are ready to state our result on the spectral problem L_β :

Theorem 1. Let $\beta \neq 1$. Then the system of the eigenfunctions of the operator L_β takes the form

$$u_k^1(z) = J_k(r\sqrt{\lambda_N}) \cos k\varphi, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (2.1)$$

$$u_m^2(z) = J_m(r\sqrt{\lambda_D}) \sin m\varphi + \frac{a_0}{2} J_0(r\sqrt{\lambda_D}) + \sum_{n=1, n \neq m}^{\infty} a_n J_n(r\sqrt{\lambda_D}) \cos n\varphi \quad (2.2)$$

for all $0 \leq \varphi \leq 2\pi, m = 1, 2, \dots$, where

$$a_n = -\frac{2\sqrt{\lambda_D} J'_m(\sqrt{\lambda_D})(1+\beta)}{\pi J_n(\sqrt{\lambda_D})(1-\beta)} \int_0^\pi \sin m\psi \cos n\psi d\psi, \quad n \neq m, n = 0, 1, \dots$$

Here, $J_i(x), i = 0, 1, \dots$ are Bessel functions, λ_D and λ_N are eigenvalues of the Dirichlet and Neumann problems for the Laplace equation in B_1 , respectively. Moreover, the system of the eigenfunctions of the operator L_β is complete in $L^2(B_1)$.

Proof of Theorem 1. Let us begin by introducing the auxiliary functions

$$c(r, \varphi) = \frac{1}{2}(u(r, \varphi) + u(r, 2\pi - \varphi)), \quad s(r, \varphi) = \frac{1}{2}(u(r, \varphi) - u(r, 2\pi - \varphi)) \quad (2.3)$$

A direct calculation shows that the functions $c(z)$ and $s(z)$ satisfies the following spectral problems: for the function $s(z)$, we have the Dirichlet problem

$$-\Delta s(z) = \lambda s(z), \quad z \in B_1; \quad s(1, \varphi) = 0, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi \quad (2.4)$$

and for the function $c(z)$, we obtain the Neumann problem

$$-\Delta c(z) = \lambda c(z), \quad z \in B_1; \quad \frac{\partial c}{\partial r}(1, \varphi) = \begin{cases} -\frac{1+\beta}{1-\beta} \frac{\partial s}{\partial r}(1, \varphi), & 0 \leq \varphi \leq \pi \\ \frac{1+\beta}{1-\beta} \frac{\partial s}{\partial r}(1, \varphi), & \pi \leq \varphi \leq 2\pi \end{cases} \quad (2.5)$$

Further, we split the rest of the proof into two cases:

In the case of $\lambda \neq \lambda_D$, it can be observed that $s(r, \varphi) = 0$, and the Neumann problem (2.5) becomes

$$-\Delta c(z) = \lambda c(z), \quad z \in B_1; \quad \frac{\partial c}{\partial r}(1, \varphi) = 0, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi. \quad (2.6)$$

Due to the property $c(r, \varphi) = c(r, 2\pi - \varphi)$ from (2.3), one of the series of the eigenfunctions of the spectral problem L_β has the form

$$u_k(z) = J_k(r\sqrt{\lambda_N}) \cos k\varphi, \quad k = 0, 1, \dots \quad (2.7)$$

It remains to consider the case $\lambda = \lambda_D$. In this scenario, by using the property $s(r, \varphi) = -s(r, 2\pi - \varphi)$ from the representation (2.3), we get

$$s_m(z) = J_m(r\sqrt{\lambda_D}) \sin m\varphi, \quad m = 1, 2, \dots \quad (2.8)$$

Substituting this representation into the Neumann problem (2.5) implies

Recalling $c(r, \varphi) = c(r, 2\pi - \varphi)$, we seek the function $c(r, \varphi)$ in the form

$$c(r, \varphi) = \frac{a_0}{2} J_0(r\sqrt{\lambda_D}) + \sum_{n=1}^{\infty} a_n J_n(r\sqrt{\lambda_D}) \cos n\varphi \quad (2.11)$$

Plugging this into the boundary condition (2.10), we calculate

$$\begin{aligned} a_n J_n(\sqrt{\lambda_D}) &= - \int_0^\pi \frac{\sqrt{\lambda_D}(1+\beta)}{\pi(1-\beta)} J'_m(\sqrt{\lambda_D}) \sin m\psi \cos n\psi d\psi \\ &\quad + \int_\pi^{2\pi} \frac{\sqrt{\lambda_D}(1+\beta)}{\pi(1-\beta)} J'_m(\sqrt{\lambda_D}) \sin m\psi \cos n\psi d\psi \\ &= - \int_0^\pi \frac{2\sqrt{\lambda_D}(1+\beta)}{\pi(1-\beta)} J'_m(\sqrt{\lambda_D}) \sin m\psi \cos n\psi d\psi, \quad n = 0, 1, \dots \end{aligned}$$

that is,

$$-\Delta c(z) = \lambda_D c(z), \quad z \in B_1, \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial c}{\partial r}(1, \varphi) = \begin{cases} -\frac{1+\beta}{1-\beta} \sqrt{\lambda_D} J'_m(\sqrt{\lambda_D}) \sin m\varphi, & 0 \leq \varphi \leq \pi; \\ \frac{1+\beta}{1-\beta} \sqrt{\lambda_D} J'_m(\sqrt{\lambda_D}) \sin m\varphi, & \pi \leq \varphi \leq 2\pi. \end{cases} \quad (2.10)$$

$$a_n = - \frac{2\sqrt{\lambda_D} J'_m(\sqrt{\lambda_D})}{\pi J_n(\sqrt{\lambda_D})} \int_0^\pi \frac{1+\beta}{1-\beta} \sin m\psi \cos n\psi d\psi, \quad n = 0, 1, \dots$$

for $n \neq m$ and $a_n = 0$ for $n = m$.

Thus, we have completed the construction of the eigenvalues of the L_β problem:

$$u_k^1(z) = J_k(r\sqrt{\lambda_N}) \cos k\varphi, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi, k = 0, 1, 2, \dots \quad (2.12)$$

$$u_m^2(z) = J_m(r\sqrt{\lambda_D}) \sin m\varphi + \frac{a_0}{2} J_0(r\sqrt{\lambda_D}) + \sum_{n=1, n \neq m}^{\infty} a_n J_n(r\sqrt{\lambda_D}) \cos n\varphi \quad (2.13)$$

for all $0 \leq r \leq 1$, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, $m = 1, 2, \dots$.

Here, the convergence of the obtained series in (2.13) can be verified by using asymptotic forms of the Bessel function and Leibniz criterion.

Now, we need to show the second part of our result, namely that the obtained eigenfunctions (2.12) and (2.13) are complete in $L^2(B_1)$. For this, we note that

$$\int_{B_1} u_k^1(z) f(z) dz = \int_0^1 \int_0^\pi r J_k(r\sqrt{\lambda_N}) (f(r, \varphi) + f(r, 2\pi - \varphi)) \cos k\varphi dr d\varphi = 0$$

Using the fact that the system $\{rJ_k(r\sqrt{\lambda_N})\cos k\varphi\}_{k=0}^{k=\infty}$ is complete in $L^2(B_1^+)$, we derive from above that

$$f(r, \varphi) + f(r, 2\pi - \varphi) = 0, 0 \leq \varphi \leq \pi. \quad (2.14)$$

Taking into account this, we obtain

$$\begin{aligned} \int_{B_1} u_m^2(z) f(z) dz &= \int_{B_1} (J_m(r\sqrt{\lambda_D}) \sin m\varphi) f(z) dz \\ &+ \int_{B_1} \left(\frac{a_0}{2} J_0(r\sqrt{\lambda_D}) + \sum_{n=1, n \neq m}^{\infty} a_n J_n(r\sqrt{\lambda_D}) \cos n\varphi \right) f(z) dz \\ &= \int_0^1 \int_0^\pi r J_m(r\sqrt{\lambda_D}) \sin m\varphi (f(r, \varphi) - f(r, 2\pi - \varphi)) dr d\varphi = 0. \end{aligned}$$

Here, using the completeness of $\{rJ_m(r\sqrt{\lambda_D}) \sin m\varphi\}_{m=1}^{m=\infty}$ in $L^2(B_1^+)$, we conclude that

$$f(r, \varphi) - f(r, 2\pi - \varphi) = 0, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi. \quad (2.15)$$

Thus, a combination of (2.14) and (2.15) implies $f(r, \varphi) = 0$ for $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, which yields the completeness of the eigenfunctions (2.12) and (2.13) in $L^2(B_1)$, as desired.

Conclusion

Thus, we showed a method for the non-self-adjoint spectral problem that reduces the solution of the problem to a sequential solution of two classical local boundary value problems. Namely, this method allowed us to construct eigenfunctions and eigenvalues in explicit form. Moreover, we proved completeness of the eigenfunctions in $L^2(B_1)$. It should be noted that the question of whether the system of eigenfunctions we have constructed forms an unconditional basis in $L^2(B_1)$ remains open.

Acknowledgement

This research is funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP23490970).

REFERENCES

- 1 Sadybekov M.A., Turmetov B.Kh. On an analog of periodic boundary value problems for the Poisson equation in the disk. *Differential Equations*, 2014, vol.50, no. 2, pp. 268–273.
- 2 Sadybekov M.A., Turmetov B.Kh. On analogues of periodic boundary value problems for the Laplace operator in a ball. *Eurasian Mathematical Journal*, 2012, vol. 3, no. 1, pp. 143–146.
- 3 Yessirkegenov N. Spectral properties of the generalised Samarskii–Ionkin type problems. *Filomat*, 2018, vol. 32, no. 3, pp. 1019–1024.
- 4 Sadybekov M.A., Torebek B.T., Yessirkegenov N.A. On an analog of Samarskii–Ionkin type boundary value problem for the Poisson equation in the disk. *AIP Conference Proceedings*, 2015, 1676, Article ID 020035.
- 5 Dukenbayeva A., Sadybekov M., Yessirkegenov N. On a generalised Samarskii–Ionkin type problem for the Poisson equation. *Springer Proceedings in Mathematics and Statistics*, 2018, vol.264, Springer, Cham., pp. 207–216.
- 6 Dukenbayeva A., Sadybekov M. On boundary value problems of the Samarskii–Ionkin type for the Laplace operator in a ball. *Complex Var. Elliptic Equ.*, 2022, no. 67, pp. 369–383.

7 Sadybekov M.A., Turmetov B.Kh., Torebek B.T. Solvability of nonlocal boundary-value problems for the Laplace equation in the ball. EJDE, 2014, pp. 1–14.

8 Sadybekov M.A., Turmetov B.Kh., Torebek, B.T. On an explicit form of the Green function of the third boundary value problem for the Poisson equation in a circle. AIP Conference Proceedings, 1611, 2014. [http://doi: 10.1063/1.4893843](http://doi:10.1063/1.4893843).

9 Ionkin N.I. The solution of a certain boundary value problem of the theory of heat conduction with a nonclassical boundary condition. Differ. Uravn., 1977, vol. 13, no. 2, pp. 294–304.

¹Дукенбаева А.,

PhD, ORCID ID: 0000-0003-0437-6091,

e-mail: dukenbayeva@math.kz

¹Садыбеков М.

ф.-м. ф. д., профессор, ORCID ID: 0000-0001-8450-8191,

e-mail: sadybekov@math.kz

¹Математика және математикалық модельдеу институты,
Алматы қ., Қазақстан

ЖАЛПЫЛАНҒАН ШЕКТІК ШАРТТАРЫ БАР ЛАПЛАС ОПЕРАТОРЫ ҮШІН ҚОЙЫЛҒАН СПЕКТРАЛДЫҚ ЕСЕП ТУРАЛЫ

Аңдатпа

Бұл мақалада B_1 бірлік шеңберінде Лаплас операторы үшін жалпы шекаралық шарттары бар спектрлік есеп қарастырылады. Дербес жағдайларда шекаралық шарттар периодтық және Самарский-Ионкин типіндегі шекаралық шарттарды қамтиды. Есептің маңызды ерекшелігі – оның өзіне-өзі түйіндес еместігі, бұл аналитикалық және сандық шешуде бірқатар қиындықтар туғызады. Мысалы, Фурье айнымалыларды бөлу әдісі тікелей қолданылмайды. Осыған байланысты жұмыста айнымалыларды бөлу әдісінің қолдану мүмкіндігі негізделеді. Атап айтқанда, есепті екі локальды классикалық шекаралық есептерді тізбектей шешуге келтіретін әдіс ұсынылады. Бұл әдісті пайдалана отырып, есептің барлық меншікті функциялары мен меншікті мәндері анық түрде анықталды. Сонымен қатар, меншікті функциялар жүйесінің кеңістігінде толықтығы дәлелденді. Айта кету керек, бұл нәтиже Лаплас операторы үшін екі өлшемді периодтық шекаралық есептің [1, 2] еңбектерінде алынған нәтижелерінің арнайы жағдайын жалпылайды.

Тірек сөздер: Пуассон теңдеуі, Самарск-Ионкин типті есеп, меншікті функциялар, меншікті мәндер.

¹Дукенбаева А.,

PhD, ORCID ID: 0000-0003-0437-6091,

e-mail: dukenbayeva@math.kz

¹Садыбеков М.

д.ф.-м.н., профессор, ORCID ID: 0000-0001-8450-8191,

e-mail: sadybekov@math.kz

¹Институт математики и математического моделирования,
г. Алматы, Казахстан

ОБ ОДНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЗАДАЧЕ ДЛЯ ОПЕРАТОРА ЛАПЛАСА С БОЛЕЕ ОБЩИМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ

Аннотация

В данной работе мы рассматриваем спектральную задачу для оператора Лапласа с более общими краевыми условиями в единичном круге B_1 . В частных случаях краевые условия включают периодические и краевые условия типа Самарского-Ионкина. Основное важное свойство нашей задачи – это ее несамосопря-

женность, что вызывает ряд трудностей при аналитических и численных решениях. Например, метод Фурье для разделения переменных не может быть применен напрямую к нашей задаче. Поэтому в данной работе обосновывается возможность применения метода разделения переменных. А именно мы представляем метод, который сводит решение задачи к последовательному решению двух классических локальных краевых задач. С использованием этого метода мы строим все собственные функции и собственные значения задачи в явном виде. Более того, доказывается полнота системы собственных функций в $L^2(B_1)$. Примечательно, что наш результат обобщает частный случай решения двумерной задачи с периодическими краевыми условиями для оператора Лапласа, полученного в [1, 2].

Ключевые слова: уравнение Пуассона, задача типа Самарского–Ионкина, собственные функции, собственные значения.

Article submission date: 15.10.2024

UDC 517.5
IRSTI 27.39.27

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-153-167>

^{1,2}**Zhangirbayev A.**,
BSc, ORCID ID: 0009-0000-4062-6102,
e-mail: amir.zhangirbayev@gmail.com

¹Institute of Mathematics and Mathematical Modeling, Almaty, Kazakhstan

²SDU University, 040900, Kaskelen, Kazakhstan

HARDY INEQUALITIES AND IDENTITIES RELATED TO THE BAOUENDI-GRUSHIN VECTOR FIELDS AND LANDAU-HAMILTONIAN

Abstract

In this paper, we present a weighted Hardy identity related to the Baouendi-Grushin vector fields and its applications in the context of differential inequalities. By selecting appropriate parameters, the Hardy identity related to the Baouendi-Grushin operator implies numerous sharp remainder formulae for Hardy type inequalities. In the commutative case, we obtain improved weighted Hardy inequalities in the setting of the Euclidean space. For example, in a special case, by dropping non-negative remainder terms, related to the Baouendi-Grushin operator, and choosing suitable parameters our identity allows us to derive an improved critical Hardy inequality for the radial derivative operator with a sharp constant that does not depend on the topological dimension. We employ the method of factorizing differential expressions, as used by Gesztesy and Littlejohn in [1]. In this paper, we demonstrate the application of the factorization method in the noncommutative Baouendi-Grushin setting. As an application of the Hardy identity related to the Baouendi-Grushin vector fields, we establish a Hardy inequality for the generalized Landau Hamiltonian (or the twisted Laplacian) with remainder terms.

Key words: factorization method, Hardy inequality, Baouendi-Grushin operator, Landau-Hamiltonian.

Introduction

The classical Hardy inequality for functions $f \in C_0^\infty(\mathbb{R}^n \setminus \{0\})$ is

$$\int_{\mathbb{R}^n} |\nabla f(z)|^2 dz \geq \left(\frac{n-2}{2}\right)^2 \int_{\mathbb{R}^n} \frac{|f(z)|^2}{|z|^2} dz, \quad n \geq 3, \quad (1)$$

where the constant $\left(\frac{n-2}{2}\right)^2$ is sharp but not attained. Originating from Hardy's work [2] in 1920, initially focusing on the one-dimensional case, this inequality has since garnered significant attention from mathematicians and undergone extensive analysis in various directions. The enormous amount of research that has been done through the years make it unachievable to list all the relevant references on this subject. Therefore, we only refer to the standard monographs such as [3–8].

Baouendi-Grushin operator

The sharp Hardy inequality (1) arises very naturally in the study of degenerate elliptic differential operators and it was first extended in [9] by Garofalo to the Baouendi-Grushin vector fields

$$X_i = \frac{\partial}{\partial x_i}, \quad i = 1, \dots, m, \quad Y_j = |x|^\gamma \frac{\partial}{\partial y_j}, \quad j = 1, \dots, k,$$

where $x \in \mathbb{R}^m, y \in \mathbb{R}^k$ with $m, k \geq 1, \gamma \geq 0$. To be explicit, Garofalo in [9] proved the following Hardy inequality

$$\int_{\mathbb{R}^n} (|\nabla_x f(z)|^2 + |x|^{2\gamma} |\nabla_y f(z)|^2) dz$$

$$\geq \left(\frac{Q-2}{2}\right)^2 \int_{\mathbb{R}^n} \frac{|x|^{2\gamma}}{|x|^{2+2\gamma} + (1+\gamma)^2 |y|^2} |f(z)|^2 dz, \quad (2)$$

for every $f \in C_0^\infty(\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^k \setminus \{(0,0)\})$ with $n = m + k$, $Q = m + (1 + \gamma)k$. Here, $(\nabla_x f)(z)$ and $(\nabla_y f)(z)$ are the gradients of f in the variables x and y respectively. Moreover, the inequality (2) recovers (1) if $\gamma = 0$.

The corresponding sub-elliptic gradient to the Baouendi-Grushin vector fields is defined as

$$\nabla_\gamma := (X_1, \dots, X_m, Y_1, \dots, Y_k) = (\nabla_x, |x|^\gamma \nabla_y).$$

The Baouendi-Grushin operator on $\mathbb{R}^n$ is

$$\Delta_\gamma = \sum_{i=1}^m X_i^2 + \sum_{j=1}^k Y_j^2 = \Delta_x + |x|^{2\gamma} \Delta_y = \nabla_\gamma \cdot \nabla_\gamma,$$

where Δ_x and Δ_y are the Laplacians on $\mathbb{R}^m$ and $\mathbb{R}^k$, respectively. The Baouendi-Grushin operator is a sum of squares of C^∞ vector fields satisfying the Hörmander condition for even positive integers γ

$$\text{rank Lie}[X_1, \dots, X_m, Y_1, \dots, Y_k] = n.$$

We can define on $\mathbb{R}^{m+k}$ the anisotropic dilation attached to Δ_γ as

$$\delta_\lambda(x, y) = (\lambda x, \lambda^{1+\gamma} y),$$

for $\lambda > 0$, and the homogeneous dimension with respect to this dilation is

$$Q = m + (1 + \gamma)k.$$

A change of variables formula for the Lebesgue measure implies that

$$d \circ \delta_\lambda(x, y) = \lambda^Q dx dy.$$

It is easy to check that

$$X_i(\delta_\lambda) = \lambda \delta_\lambda(X_i), \quad Y_i(\delta_\lambda) = \lambda \delta_\lambda(Y_i),$$

and hence

$$\nabla_\gamma \circ \delta_\lambda = \lambda \delta_\lambda \nabla_\gamma.$$

Let $\rho(z)$ be the corresponding distance function from the origin for $z = (x, y) \in \mathbb{R}^n$:

$$\rho = \rho(z) := (|x|^{2(1+\gamma)} + (1+\gamma)^2 |y|^2)^{\frac{1}{2(1+\gamma)}}.$$

Material and methods

The main purpose of this paper is to derive a weighted Hardy identity for Baouendi-Grushin vector fields via the method of factorization. Initially, Gesztesy used the method with regards to the classical Hardy inequality [10] and its logarithmic refinements [11]. In short, let us demonstrate this method: for any given $n \in \mathbb{N}$, $n \geq 3$, let us consider the following vector-valued differential expression

$$T := \nabla + \frac{n-2}{2} |x|^{-2} x, \quad x \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\},$$

with the formal adjoint

$$T^+ = -\text{div}(\cdot) + \frac{n-2}{2} |x|^{-2} x, \quad x \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\},$$

such that,

$$T^+ T = -\Delta + \frac{n-2}{2} \left(\frac{n-2}{2} + 2 - n \right) |x|^{-2}.$$

Then, using the non-negativity of T^+T , for $f \in C_0^\infty(\mathbb{R}^n \setminus \{0\})$, one gets

$$\begin{aligned} 0 &\leq \int_{\mathbb{R}^n} |(Tf)(x)|^2 dx = \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(x)} (T^+Tf)(x) dx \\ &= \int_{\mathbb{R}^n} |(\nabla f)(x)|^2 dx + \frac{n-2}{2} \left(\frac{n-2}{2} + 2 - n \right) \int_{\mathbb{R}^n} |x|^{-2} |f(x)|^2 dx. \end{aligned}$$

As a result, one obtains the following inequality with the sharp constant:

$$\int_{\mathbb{R}^n} |(\nabla f)(x)|^2 dx \geq \left(\frac{n-2}{2} \right)^2 \int_{\mathbb{R}^n} \frac{|f(x)|^2}{|x|^2} dx, \quad f \in C_0^\infty(\mathbb{R}^n \setminus \{0\}), \quad n \geq 3.$$

The method was then employed in [1] to demonstrate how factorization of singular, even-order partial differential operators give elementary approach to classical inequalities of Hardy–Rellich-type. Lam, Lu and Zhang [12] applied factorizations to obtain Hardy’s type identities and inequalities on upper half spaces. Furthermore, Ruzhansky and Yessirkegenov [13], using the same technique, were able to derive Hardy, weighted Hardy, improved Hardy and Hardy-Rellich inequalities on stratified, on Heisenberg and on homogeneous groups.

Results and Discussion

Theorem 1. Let $\alpha, a, b, c, d \in \mathbb{R}$. Then the identity

$$\begin{aligned} &\left\| (\log \rho)^c \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{a+\gamma+1}} + \alpha \frac{(\log \rho)^d}{\rho^b} f(z) \right\|_{L^2(\mathbb{R}^n)}^2 \\ &= \int_{\mathbb{R}^n} (\rho^{-a} (\log \rho)^c)^2 \left| \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \right|^2 dz \\ &+ \alpha \int_{\mathbb{R}^n} \left[\frac{(\log \rho)^{c+d} (|x|^{2\gamma+2} + |x|^{\gamma(1+\gamma)} |y|^2)}{\rho^{a+b+3\gamma+3}} \left(a + b + 1 + \gamma - \frac{c+d}{\log \rho} \right) \right] |f(z)|^2 dz \\ &+ \alpha \int_{\mathbb{R}^n} \left[-\frac{m+k|x|^\gamma}{\rho^{a+b+1+\gamma}} (\log \rho)^{c+d} + \alpha \frac{(\log \rho)^{2d}}{\rho^{2b}} \right] |f(z)|^2 dz, \end{aligned} \quad (3)$$

holds for every $f \in C_0^\infty(\mathbb{R}^n \setminus \{0\})$.

$$\begin{aligned} &\left\| (\log |z|)^c \frac{\partial_{|z|} f(z)}{|z|^a} + \alpha \frac{(\log |z|)^d}{|z|^b} f(z) \right\|_{L^2(\mathbb{R}^n)}^2 = \int_{\mathbb{R}^n} \frac{(\log |z|)^{2c}}{|z|^{2a}} |\partial_{|z|} f(z)|^2 dz \\ &- \alpha \int_{\mathbb{R}^n} \left[\frac{(\log |z|)^{c+d}}{|z|^{a+b+1}} \left(\frac{c+d}{\log |z|} + n - (a+b+1) \right) \right] |f(z)|^2 dz \\ &+ \alpha^2 \int_{\mathbb{R}^n} \frac{(\log |z|)^{2d}}{|z|^{2b}} |f(z)|^2 dz, \end{aligned} \quad (4)$$

Remark 1. If $\gamma = 0$ in (3), then the following identity is obtained:
where, $\partial_{|z|}f = \frac{\partial f(z)}{\partial |z|} = \frac{z \cdot (\nabla f)(z)}{|z|}$ is the radial derivative of f with respect to $z = (x, y)$. Now after dropping the left-hand side of (4), specifying the parameters ($a = \frac{n-2}{2}$, $b = \frac{n}{2}$, $c = 1$ and $d = 0$), and maximising the constant with respect to α , we derive the following critical Hardy inequality in $\mathbb{R}^n$ from [Formula 3.6, 13]:

$$\int_{\mathbb{R}^n} \frac{(\log|z|)^2}{|z|^{n-2}} |\partial_{|z|}f(z)|^2 dz \geq \frac{1}{4} \int_{\mathbb{R}^n} \frac{|f(z)|^2}{|z|^n} dz. \quad (5)$$

For the sharpness of the constant in (5) we refer to [14]. We also refer to [15, 16, 17, 18, 19] for such inequalities on homogeneous Lie groups.

Let us now demonstrate an application of the obtained result in the magnetic inequality related to the Landau-Hamiltonian type magnetic field. First, let us recall from [20] the generalized twisted Laplacian with Landau-Hamiltonian type magnetic field defined by

$$\mathcal{L} = \sum_{j=1}^n \left[\left(i \partial_{x_j} + \psi(|z|) y_j \right)^2 + \left(i \partial_{y_j} - \psi(|z|) x_j \right)^2 \right],$$

where $\psi(|z|)$ is a radial real-valued differentiable function. Denoting

$$\check{X}_j = \partial_{x_j} - i\psi(|z|)y_j, \text{ and } \check{Y}_j = \partial_{y_j} + i\psi(|z|)x_j,$$

we write

$$\widetilde{\nabla}_{\mathcal{L}} f = (\check{X}_1 f, \dots, \check{X}_n f, \check{Y}_1 f, \dots, \check{Y}_n f).$$

Corollary 1. Let $\alpha, a, b, c, d \in \mathbb{R}$. Let $\psi = \psi(|z|)$ be a radial real-valued function such that $\psi \in L^2_{loc}(\mathbb{C} \setminus \{0\})$ with $|\psi(r)|r^2 \leq 1/2$, $\forall r \in (0, \infty)$. Then for every $f \in C_0^\infty(\mathbb{C} \setminus \{0\})$ we have where $\mathbb{C}$ is the set of complex numbers.

Proof of Corollary 1. We will use the following inequality from [Formula 44, 20]:

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{C}} (|z|^{-a} (\log|z|)^c)^2 |\widetilde{\nabla}_{\mathcal{L}} f|^2 dz &\geq \int_{\mathbb{C}} (|z|^{-a+1} (\log|z|)^c)^2 \psi(|z|)^2 |f(z)|^2 dz \\ &+ \left\| \frac{(\log|z|)^c}{|z|^a} \frac{df}{d|z|} + \alpha \frac{(\log|z|)^d}{|z|^b} f(z) \right\|_{L^2(\mathbb{C})}^2 - \alpha \int_{\mathbb{C}} \left[\frac{(\log|z|)^{c+d}}{|z|^{a+b+1}} \left(a + b + 1 - \frac{c+d}{\log|z|} \right) - \frac{m+k}{|z|^{a+b+1}} (\log|z|)^{c+d} + \right. \\ &\quad \left. \alpha \frac{(\log|z|)^{2d}}{|z|^{2b}} \right] |f(z)|^2 dz, \end{aligned}$$

$$\int_{\mathbb{C}} \frac{|\widetilde{\nabla}_{\mathcal{L}} f|^2}{\kappa(|z|)} dz \geq \int_{\mathbb{C}} \frac{1}{\kappa(|z|)} \left| \frac{d}{d|z|} f \right|^2 dz + \int_{\mathbb{C}} \frac{|z|^2 \psi(|z|)^2}{\kappa(|z|)} |f|^2 dz$$

for all $f \in C_0^\infty(\mathbb{C} \setminus \{0\})$ and for every radial function $\kappa(|z|) \neq 0$ with $\kappa(|z|)^{-1} \in L^2_{loc}(\mathbb{C} \setminus \{0\})$. Taking $\kappa(|z|) = (|z|^{-a} (\log|z|)^c)^{-2}$ and substituting (3) when $\gamma = 0$ into the above inequality concludes the proof.

Proof of Theorem 1. Let us first introduce the six-parameter differential expression

$$T_{\alpha, \gamma, a, b, c, d} := \rho^{-a} (\log \rho)^c \frac{z \cdot \nabla_{\gamma}}{\rho^{\gamma+1}} + \alpha \rho^{-b} (\log \rho)^d. \quad (6)$$

Calculating the formal adjoint:

$$\begin{aligned}
 \langle (T_{\alpha,\gamma,a,b,c,d}f)(z), \overline{g(z)} \rangle &= \int_{\mathbb{R}^n} \left(\rho^{-a} (\log \rho)^c \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} + \alpha \rho^{-b} (\log \rho)^d f(z) \right) \overline{g(z)} dz \\
 &= \int_{\mathbb{R}^n} \frac{\overline{g(z)} \rho^{-a} (\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} \left(\sum_{i=1}^m x_i \partial_{x_i} (f(z)) + |x|^\gamma \sum_{j=1}^k y_j \partial_{y_j} (f(z)) \right) dz + \alpha \int_{\mathbb{R}^n} \rho^{-b} (\log \rho)^d f(z) \overline{g(z)} dz \\
 &= \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^n} \frac{\overline{g(z)} \rho^{-a} (\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} x_i \partial_{x_i} (f(z)) dz + \sum_{j=1}^k \int_{\mathbb{R}^n} \frac{\overline{g(z)} \rho^{-a} (\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} |x|^\gamma y_j \partial_{y_j} (f(z)) dz \\
 &\quad + \alpha \int_{\mathbb{R}^n} \rho^{-b} (\log \rho)^d f(z) \overline{g(z)} dz \\
 &= - \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^n} \partial_{x_i} \left(\frac{\overline{g(z)} \rho^{-a} (\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} \right) x_i f(z) dz - m \int_{\mathbb{R}^n} \frac{\overline{g(z)} \rho^{-a} (\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} f(z) dz \\
 &\quad - \sum_{j=1}^k \int_{\mathbb{R}^n} \partial_{y_j} \left(\frac{\overline{g(z)} \rho^{-a} (\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} \right) |x|^\gamma y_j f(z) dz - k \int_{\mathbb{R}^n} \frac{\overline{g(z)} \rho^{-a} (\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} |x|^\gamma f(z) dz \\
 &\quad + \alpha \int_{\mathbb{R}^n} \rho^{-b} (\log \rho)^d f(z) \overline{g(z)} dz.
 \end{aligned}$$

Since $\partial_{x_i} (\rho^{\gamma+1}) = (\gamma+1) \rho^{-\gamma-1} |x|^{2\gamma} x_i$ and $\partial_{y_j} (\rho^{\gamma+1}) = (\gamma+1) \rho^{-\gamma-1} y_j$, we obtain

$$\begin{aligned}
 \langle (T_{\alpha,\gamma,a,b,c,d}f)(z), \overline{g(z)} \rangle &= \\
 &- \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^n} \left(\frac{-\overline{g(z)} \rho^{-a} (\log \rho)^c \frac{(1+\gamma)x_i |x|^{2\gamma}}{\rho^{\gamma+1}}}{\rho^{2\gamma+2}} \right) x_i f(z) dz \\
 &- \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^n} \left(\frac{\overline{g(z)} \partial_{x_i} (\rho^{-a} (\log \rho)^c)}{\rho^{\gamma+1}} \right) x_i f(z) dz \\
 &- \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^n} \left(\frac{\rho^{-a} (\log \rho)^c \partial_{x_i} (\overline{g(z)})}{\rho^{\gamma+1}} \right) x_i f(z) dz \\
 &- \int_{\mathbb{R}^n} \frac{\overline{g(z)} \rho^{-a} (\log \rho)^c f(z)}{\rho^{\gamma+1}} (m+k|x|^\gamma) dz
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \sum_{j=1}^k \int_{\mathbb{R}^n} \left(\frac{-\overline{g(z)} \rho^{-a} (\log \rho)^c \frac{y_j (1 + \gamma)^2}{\rho^{\gamma+1}}}{\rho^{2\gamma+2}} \right) |x|^\gamma y_j f(z) dz \\
& - \sum_{j=1}^k \int_{\mathbb{R}^n} \left(\frac{\overline{g(z)} \partial_{y_j} (\rho^{-a} (\log \rho)^c)}{\rho^{\gamma+1}} \right) |x|^\gamma y_j f(z) dz \\
& - \sum_{j=1}^k \int_{\mathbb{R}^n} \left(\frac{\rho^{-a} (\log \rho)^c \partial_{y_j} (\overline{g(z)})}{\rho^{\gamma+1}} \right) |x|^\gamma y_j f(z) dz + \alpha \int_{\mathbb{R}^n} \rho^{-b} (\log \rho)^d f(z) \overline{g(z)} dz.
\end{aligned}$$

Now we open the brackets:

$$\begin{aligned}
\langle (T_{\alpha, \gamma, a, b, c, d} f)(z), \overline{g(z)} \rangle &= \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^n} \frac{f(z) \overline{g(z)} \rho^{-a} (\log \rho)^c \frac{(1 + \gamma) x_i^2 |x|^{2\gamma}}{\rho^{\gamma+1}}}{\rho^{2\gamma+2}} dz \\
& - \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^n} \frac{x_i f(z) \overline{g(z)} \partial_{x_i} (\rho^{-a} (\log \rho)^c)}{\rho^{\gamma+1}} dz \\
& - \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^n} \frac{x_i f(z) \rho^{-a} (\log \rho)^c \partial_{x_i} \overline{g(z)}}{\rho^{\gamma+1}} dz - \int_{\mathbb{R}^n} \frac{\overline{g(z)} \rho^{-a} (\log \rho)^c f(z)}{\rho^{\gamma+1}} (m + k |x|^\gamma) dz \\
& + \sum_{j=1}^k \int_{\mathbb{R}^n} |x|^\gamma \frac{f(z) \overline{g(z)} \rho^{-a} (\log \rho)^c \frac{y_j^2 (1 + \gamma)^2}{\rho^{\gamma+1}}}{\rho^{2\gamma+2}} dz - \sum_{j=1}^k \int_{\mathbb{R}^n} |x|^\gamma \frac{y_j f(z) \overline{g(z)} \partial_{y_j} (\rho^{-a} (\log \rho)^c)}{\rho^{\gamma+1}} dz \\
& - \sum_{j=1}^k \int_{\mathbb{R}^n} |x|^\gamma \frac{y_j f(z) \rho^{-a} (\log \rho)^c \partial_{y_j} \overline{g(z)}}{\rho^{\gamma+1}} dz + \alpha \int_{\mathbb{R}^n} \rho^{-b} (\log \rho)^d f(z) \overline{g(z)} dz.
\end{aligned}$$

Simplifying, we get the following:

$$\begin{aligned}
& \langle (T_{\alpha, \gamma, a, b, c, d} f)(z), \overline{g(z)} \rangle \\
&= \int_{\mathbb{R}^n} \frac{f(z) \overline{g(z)} \rho^{-a} (\log \rho)^c ((1 + \gamma) |x|^{2\gamma+2} + |x|^\gamma (1 + \gamma)^2 |y|^2)}{\rho^{3\gamma+3}} dz \\
& - \int_{\mathbb{R}^n} f(z) \overline{g(z)} \frac{z \cdot \nabla_\gamma \rho^{-a} (\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} dz \\
& - \int_{\mathbb{R}^n} f(z) \rho^{-a} (\log \rho)^c \frac{z \cdot (\nabla_\gamma \overline{g})(z)}{\rho^{\gamma+1}} dz - \int_{\mathbb{R}^n} \frac{\overline{g(z)} \rho^{-a} (\log \rho)^c f(z)}{\rho^{\gamma+1}} (m + k |x|^\gamma) dz \\
& + \alpha \int_{\mathbb{R}^n} \rho^{-b} (\log \rho)^d f(z) \overline{g(z)} dz
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \int_{\mathbb{R}^n} f(z) \left(\frac{\overline{g(z)} \rho^{-a} (\log \rho)^c ((1+\gamma)|x|^{2\gamma+2} + |x|^\gamma (1+\gamma)^2 |y|^2)}{\rho^{3\gamma+3}} - \overline{g(z)} \frac{z \cdot \nabla_\gamma \rho^{-a} (\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} \right) dz \\
 &+ \int_{\mathbb{R}^n} f(z) \left(-\rho^{-a} (\log \rho)^c \frac{z \cdot (\nabla_\gamma \overline{g})(z)}{\rho^{\gamma+1}} - \frac{\overline{g(z)} \rho^{-a} (\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} (m + k|x|^\gamma) + \alpha \rho^{-b} (\log \rho)^d \overline{g(z)} \right) dz \\
 &= \int_{\mathbb{R}^n} f(z) \left(-\rho^{-a} (\log \rho)^c \frac{z \cdot (\nabla_\gamma \overline{g})(z)}{\rho^{\gamma+1}} \right) dz \\
 &+ \int_{\mathbb{R}^n} f(z) \left(-\left(\frac{m + k|x|^\gamma}{\rho^{\gamma+1}} - \frac{(1+\gamma)|x|^{2\gamma+2} + |x|^\gamma (1+\gamma)^2 |y|^2}{\rho^{3\gamma+3}} \right) \rho^{-a} (\log \rho)^c \overline{g(z)} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{z \cdot \nabla_\gamma \rho^{-a} (\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} \overline{g(z)} \right) dz \\
 &\quad + \alpha \int_{\mathbb{R}^n} f(z) \rho^{-b} (\log \rho)^d \overline{g(z)} dz.
 \end{aligned}$$

Thus, the formal adjoint operator of $T_{\alpha,\gamma,a,b,c,d}$ is the following:

$$\begin{aligned}
 T_{\alpha,\gamma,a,b,c,d}^+ &= -\rho^{-a} (\log \rho)^c \frac{z \cdot \nabla_\gamma}{\rho^{\gamma+1}} - \left(\frac{m + k|x|^\gamma}{\rho^{\gamma+1}} - \frac{(1+\gamma)|x|^{2\gamma+2} + |x|^\gamma (1+\gamma)^2 |y|^2}{\rho^{3\gamma+3}} \right) \rho^{-a} (\log \rho)^c \\
 &\quad - \frac{z \cdot \nabla_\gamma \rho^{-a} (\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} + \alpha \rho^{-b} (\log \rho)^d.
 \end{aligned}$$

Then, we calculate $(T_{\alpha,\gamma,a,b,c,d}^+ T_{\alpha,\gamma,a,b,c,d} f)(z)$:

$$\begin{aligned}
 (T_{\alpha,\gamma,a,b,c,d}^+ T_{\alpha,\gamma,a,b,c,d} f)(z) &= T_{\alpha,\gamma,a,b,c,d}^+ \left(\rho^{-a} (\log \rho)^c \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} + \alpha \rho^{-b} (\log \rho)^d f(z) \right) \\
 &= I_1 + I_2 + I_3 + I_4,
 \end{aligned} \tag{7}$$

where

$$\begin{aligned}
 I_1 &= -\frac{\rho^{-a} (\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} \left(z \cdot \nabla_\gamma \left(\rho^{-a} (\log \rho)^c \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} + \alpha \rho^{-b} (\log \rho)^d f(z) \right) \right), \\
 I_2 &= -\left(\frac{m + k|x|^\gamma}{\rho^{\gamma+1}} - \frac{(1+\gamma)|x|^{2\gamma+2} + |x|^\gamma (1+\gamma)^2 |y|^2}{\rho^{3\gamma+3}} \right) \left((\rho^{-a} (\log \rho)^c)^2 \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \right) \\
 &\quad - \alpha \left(\frac{m + k|x|^\gamma}{\rho^{\gamma+1}} - \frac{(1+\gamma)|x|^{2\gamma+2} + |x|^\gamma (1+\gamma)^2 |y|^2}{\rho^{3\gamma+3}} \right) \rho^{-a} (\log \rho)^c \rho^{-b} (\log \rho)^d f(z), \\
 I_3 &= -\frac{z \cdot \nabla_\gamma \rho^{-a} (\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} \left(\rho^{-a} (\log \rho)^c \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} + \alpha \rho^{-b} (\log \rho)^d f(z) \right),
 \end{aligned}$$

$$-\int_{\mathbb{R}^n} \frac{\rho^{-a}(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} \left[|x|^\gamma \sum_{j=1}^k y_j \partial_{y_j} \left(\rho^{-a}(\log \rho)^c \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \right) \right] \overline{f(z)} dz, \quad (13)$$

$$U_2 = -\alpha \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \rho^{-a}(\log \rho)^c \frac{z \cdot (\nabla_\gamma \rho^{-b}(\log \rho)^d f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} dz, \quad (14)$$

$$U_3 = -\int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \left(\frac{m+k|x|^\gamma}{\rho^{\gamma+1}} - \frac{(1+\gamma)|x|^{2\gamma+2} + |x|^\gamma(1+\gamma)^2|y|^2}{\rho^{3\gamma+3}} \right) \times \left((\rho^{-a}(\log \rho)^c)^2 \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \right) dz, \quad (15)$$

$$U_4 = -\alpha \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \left(\frac{m+k|x|^\gamma}{\rho^{\gamma+1}} - \frac{(1+\gamma)|x|^{2\gamma+2} + |x|^\gamma(1+\gamma)^2|y|^2}{\rho^{3\gamma+3}} \right) \times \rho^{-a}(\log \rho)^c \rho^{-b}(\log \rho)^d f(z) dz, \quad (16)$$

$$U_5 = -\int_{\mathbb{R}^n} \rho^{-a}(\log \rho)^c \overline{f(z)} \frac{z \cdot \nabla_\gamma \rho^{-a}(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} dz, \quad (17)$$

$$U_6 = -\alpha \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \rho^{-b}(\log \rho)^d f(z) \frac{z \cdot \nabla_\gamma \rho^{-a}(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} dz, \quad (18)$$

$$U_7 = \alpha \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \rho^{-b}(\log \rho)^d \rho^{-a}(\log \rho)^c \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} dz, \quad (19)$$

$$U_8 = \alpha^2 \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} (\rho^{-b}(\log \rho)^d)^2 f(z) dz. \quad (20)$$

First, we calculate (13):

$$U_1 = -\int_{\mathbb{R}^n} \frac{\rho^{-a}(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} \left[\sum_{i=1}^m x_i \partial_{x_i} \left(\rho^{-a}(\log \rho)^c \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \right) + |x|^\gamma \sum_{j=1}^k y_j \partial_{y_j} \left(\rho^{-a}(\log \rho)^c \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \right) \right] \overline{f(z)} dz \\ = A_1 + \widetilde{A}_1. \quad (21)$$

For A_1 , we have

$$A_1 = -\int_{\mathbb{R}^n} \frac{\rho^{-a}(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} \left(\sum_{i=1}^m x_i \partial_{x_i} \left(\rho^{-a}(\log \rho)^c \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \right) \right) \overline{f(z)} dz \\ = -\int_{\mathbb{R}^n} \frac{\rho^{-a}(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} \left[\sum_{i=1}^m x_i \left[\rho^{-a}(\log \rho)^c \partial_{x_i} \left(\frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \right) + \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \partial_{x_i} (\rho^{-a}(\log \rho)^c) \right] \right] \overline{f(z)} dz$$

$$\begin{aligned}
 &= - \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \frac{\rho^{-a}(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} \sum_{i=1}^m x_i \rho^{-a}(\log \rho)^c \partial_{x_i} \left(\frac{z \cdot (\nabla_{\gamma} f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \right) dz \\
 &\quad - \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \frac{\rho^{-a}(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} \sum_{i=1}^m x_i \frac{z \cdot (\nabla_{\gamma} f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \partial_{x_i} (\rho^{-a}(\log \rho)^c) dz \\
 &= - \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \frac{\rho^{-a}(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} x_i \rho^{-a}(\log \rho)^c \partial_{x_i} \left(\frac{z \cdot (\nabla_{\gamma} f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \right) dz \\
 &\quad - \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \frac{\rho^{-a}(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} x_i \frac{z \cdot (\nabla_{\gamma} f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \partial_{x_i} (\rho^{-a}(\log \rho)^c) dz \\
 &= - \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \frac{(\rho^{-a}(\log \rho)^c)^2}{\rho^{\gamma+1}} x_i \partial_{x_i} \left(\frac{z \cdot (\nabla_{\gamma} f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \right) dz \\
 &\quad - \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \frac{\rho^{-a}(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} x_i \frac{z \cdot (\nabla_{\gamma} f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \partial_{x_i} (\rho^{-a}(\log \rho)^c) dz \\
 &= B_1 + B_2.
 \end{aligned} \tag{22}$$

We will consider B_2 first. It will become clear why we did so later.

$$\begin{aligned}
 B_2 &= - \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \frac{\rho^{-a}(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} x_i \frac{z \cdot (\nabla_{\gamma} f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \partial_{x_i} (\rho^{-a}(\log \rho)^c) dz \\
 &= \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^n} \partial_{x_i} (\overline{f(z)}) \frac{(\rho^{-a}(\log \rho)^c)^2}{\rho^{\gamma+1}} x_i \frac{z \cdot (\nabla_{\gamma} f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} dz \\
 &\quad + \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \partial_{x_i} \left(\frac{\rho^{-a}(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} \right) x_i \frac{z \cdot (\nabla_{\gamma} f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \rho^{-a}(\log \rho)^c dz \\
 &\quad + m \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \frac{(\rho^{-a}(\log \rho)^c)^2}{\rho^{\gamma+1}} \frac{z \cdot (\nabla_{\gamma} f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} dz \\
 &\quad + \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \frac{(\rho^{-a}(\log \rho)^c)^2}{\rho^{\gamma+1}} x_i \partial_{x_i} \left(\frac{z \cdot (\nabla_{\gamma} f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \right) dz \\
 &= C_1 + C_2 + C_3 + C_4.
 \end{aligned} \tag{23}$$

For C_1 :

$$C_1 = \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^n} \partial_{x_i} (\overline{f(z)}) \frac{(\rho^{-a}(\log \rho)^c)^2}{\rho^{\gamma+1}} x_i \frac{z \cdot (\nabla_{\gamma} f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} dz. \tag{24}$$

For C_2 :

$$\begin{aligned}
C_2 &= \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \partial_{x_i} \left(\frac{\rho^{-a}(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} \right) x_i \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \rho^{-a}(\log \rho)^c dz \\
&= \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \frac{-\rho^{-a}(\log \rho)^c (1+\gamma) \rho^{-\gamma-1} |x|^{2\gamma} x_i + \rho^{1+\gamma} \partial_{x_i} (\rho^{-a}(\log \rho)^c)}{\rho^{2\gamma+2}} \\
&\quad \times x_i \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \rho^{-a}(\log \rho)^c dz \\
&= - \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \frac{(\rho^{-a}(\log \rho)^c)^2 (1+\gamma) |x|^{2\gamma+2}}{\rho^{3\gamma+3}} \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} dz \\
&\quad + \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^n} \rho^{-a}(\log \rho)^c \overline{f(z)} \frac{\partial_{x_i} (\rho^{-a}(\log \rho)^c)}{\rho^{\gamma+1}} x_i \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} dz. \tag{25}
\end{aligned}$$

For C_3 :

$$C_3 = m \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \frac{(\rho^{-a}(\log \rho)^c)^2}{\rho^{\gamma+1}} \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} dz. \tag{26}$$

For C_4 :

$$C_4 = \sum_{i=1}^m \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \frac{(\rho^{-a}(\log \rho)^c)^2}{\rho^{\gamma+1}} x_i \partial_{x_i} \left(\frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \right) dz. \tag{27}$$

Putting (24)-(27) to (23), and then (23) to (22) we get

$$\begin{aligned}
A_1 &= B_1 + B_2 \\
&= B_1 + C_1 + C_2 + C_3 + C_4. \tag{28}
\end{aligned}$$

Since $C_4 = -B_1$, (28) implies that

$$A_1 = C_1 + C_2 + C_3. \tag{29}$$

The calculations for $\widetilde{A}_1$ are analogous:

$$\widetilde{A}_1 = \widetilde{C}_1 + \widetilde{C}_2 + \widetilde{C}_3, \tag{30}$$

where

$$\begin{aligned}
\widetilde{C}_1 &= \sum_{j=1}^k \int_{\mathbb{R}^n} |x|^\gamma \partial_{y_j} \left(\overline{f(z)} \right) \frac{(\rho^{-a}(\log \rho)^c)^2}{\rho^{\gamma+1}} y_j \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} dz, \\
\widetilde{C}_2 &= - \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \frac{(\rho^{-a}(\log \rho)^c)^2 |x|^\gamma |y|^2 (1+\gamma)^2}{\rho^{3\gamma+3}} \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} dz \\
&\quad + \sum_{j=1}^k \int_{\mathbb{R}^n} |x|^\gamma \rho^{-a}(\log \rho)^c \overline{f(z)} \frac{\partial_{y_j} (\rho^{-a}(\log \rho)^c)}{\rho^{\gamma+1}} y_j \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} dz,
\end{aligned}$$

$$\widetilde{C}_3 = k \int_{\mathbb{R}^n} |x|^\gamma \overline{f(z)} \frac{(\rho^{-a}(\log \rho)^c)^2}{\rho^{\gamma+1}} \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} dz.$$

Therefore, substituting (29) and (30) to (21), we obtain

$$\begin{aligned} U_1 &= A_1 + \widetilde{A}_1 \\ &= \int_{\mathbb{R}^n} (\rho^{-a}(\log \rho)^c)^2 \left| \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \right|^2 dz \\ &+ \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \left(\frac{m+k|x|^\gamma}{\rho^{\gamma+1}} - \frac{(1+\gamma)|x|^{2\gamma+2} + |x|^\gamma(1+\gamma)^2|y|^2}{\rho^{3\gamma+3}} \right) \times \left((\rho^{-a}(\log \rho)^c)^2 \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \right) dz \\ &+ \int_{\mathbb{R}^n} \rho^{-a}(\log \rho)^c \overline{f(z)} \frac{z \cdot \nabla_\gamma \rho^{-a}(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} dz. \end{aligned} \quad (31)$$

Summing (31), (15), and (17), we get

$$U_1 + U_3 + U_5 = \int_{\mathbb{R}^n} (\rho^{-a}(\log \rho)^c)^2 \left| \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \right|^2 dz. \quad (32)$$

Now we consider the sum of (14) and (19):

$$\begin{aligned} U_2 + U_7 &= -\alpha \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \rho^{-a}(\log \rho)^c \frac{z \cdot (\nabla_\gamma \rho^{-b}(\log \rho)^d f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} dz \\ &+ \alpha \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \rho^{-b}(\log \rho)^d \rho^{-a}(\log \rho)^c \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} dz \\ &= -\alpha \left(\int_{\mathbb{R}^n} \frac{\overline{f(z)} \rho^{-a}(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} \left(\sum_{i=1}^m x_i \partial_{x_i} (\rho^{-b}(\log \rho)^d f(z)) + |x|^\gamma \sum_{j=1}^k y_j \partial_{y_j} (\rho^{-b}(\log \rho)^d f(z)) \right) dz \right) \\ &+ \alpha \int_{\mathbb{R}^n} \overline{f(z)} \rho^{-b}(\log \rho)^d \rho^{-a}(\log \rho)^c \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} dz \\ &= -\alpha \int_{\mathbb{R}^n} |f(z)|^2 \rho^{-a}(\log \rho)^c \frac{z \cdot \nabla_\gamma \rho^{-b}(\log \rho)^d}{\rho^{\gamma+1}} dz. \end{aligned} \quad (33)$$

Thus, putting (32), (33), (16), (18), (20) to (12), we obtain the following:

$$\begin{aligned} 0 &\leq \int_{\mathbb{R}^n} |(T_{\alpha,\gamma,a,b,c,d} f)(z)|^2 dz \\ &= \int_{\mathbb{R}^n} (\rho^{-a}(\log \rho)^c)^2 \left| \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \right|^2 dz \\ &- \alpha \int_{\mathbb{R}^n} \left(\rho^{-a}(\log \rho)^c \frac{z \cdot \nabla_\gamma \rho^{-b}(\log \rho)^d}{\rho^{\gamma+1}} + \rho^{-b}(\log \rho)^d \frac{z \cdot \nabla_\gamma \rho^{-a}(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1}} \right) |f(z)|^2 dz \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\alpha \int_{\mathbb{R}^n} \left(\frac{m+k|x|^\gamma}{\rho^{\gamma+1}} - \frac{(1+\gamma)|x|^{2\gamma+2} + |x|^\gamma(1+\gamma)^2|y|^2}{\rho^{3\gamma+3}} \right) \\
& \quad \times \rho^{-a}(\log \rho)^c \rho^{-b}(\log \rho)^d |f(z)|^2 dz \\
& \quad + \alpha^2 \int_{\mathbb{R}^n} (\rho^{-b}(\log \rho)^d)^2 |f(z)|^2 dz \\
& = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5,
\end{aligned} \tag{34}$$

where

$$\begin{aligned}
L_1 &= \int_{\mathbb{R}^n} \frac{(\log \rho)^{2c}}{\rho^{2a}} \left| \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \right|^2 dz, \\
L_2 &= -\alpha \int_{\mathbb{R}^n} \left(\rho^{-a}(\log \rho)^c \frac{z \cdot \nabla_\gamma (\rho^{-b}(\log \rho)^d)}{\rho^{\gamma+1}} \right) |f(z)|^2 dz, \\
L_3 &= -\alpha \int_{\mathbb{R}^n} \left(\rho^{-b}(\log \rho)^d \frac{z \cdot \nabla_\gamma (\rho^{-a}(\log \rho)^c)}{\rho^{\gamma+1}} \right) |f(z)|^2 dz, \\
L_4 &= -\alpha \int_{\mathbb{R}^n} \left(\frac{m+k|x|^\gamma}{\rho^{\gamma+1}} - \frac{(1+\gamma)|x|^{2\gamma+2} + |x|^\gamma(1+\gamma)^2|y|^2}{\rho^{3\gamma+3}} \right) \times \frac{(\log \rho)^{c+d}}{\rho^{a+b}} |f(z)|^2 dz, \\
L_5 &= \alpha^2 \int_{\mathbb{R}^n} \frac{(\log \rho)^{2d}}{\rho^{2b}} |f(z)|^2 dz.
\end{aligned}$$

For L_1 , we have

$$L_1 = \int_{\mathbb{R}^n} \frac{(\log \rho)^{2c}}{\rho^{2a}} \left| \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \right|^2 dz. \tag{35}$$

For L_2 :

$$\begin{aligned}
L_2 &= -\alpha \int_{\mathbb{R}^n} \left(\rho^{-a}(\log \rho)^c \frac{z \cdot \nabla_\gamma (\rho^{-b}(\log \rho)^d)}{\rho^{\gamma+1}} \right) |f(z)|^2 dz \\
&= -\alpha \int_{\mathbb{R}^n} \left[\frac{(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1+a}} \left[\sum_{i=1}^m x_i \partial_{x_i} \left(\frac{(\log \rho)^d}{\rho^b} \right) + |x|^\gamma \sum_{j=1}^k y_j \partial_{y_j} \left(\frac{(\log \rho)^d}{\rho^b} \right) \right] \right] |f(z)|^2 dz \\
&= -\alpha \int_{\mathbb{R}^n} \frac{(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1+a}} \left(\sum_{i=1}^m x_i \partial_{x_i} \left(\frac{(\log \rho)^d}{\rho^b} \right) \right) |f(z)|^2 dz \\
&\quad - \alpha \int_{\mathbb{R}^n} \frac{(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1+a}} \left(|x|^\gamma \sum_{j=1}^k y_j \partial_{y_j} \left(\frac{(\log \rho)^d}{\rho^b} \right) \right) |f(z)|^2 dz \\
&= -\alpha \int_{\mathbb{R}^n} \frac{(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1+a}} \left(\frac{(\log \rho)^d |x|^{2\gamma+2}}{\rho^{b+2\gamma+2}} \left(\frac{d}{\log \rho} - b \right) \right) |f(z)|^2 dz
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\alpha \int_{\mathbb{R}^n} \frac{(\log \rho)^c}{\rho^{\gamma+1+a}} \left(\frac{(\log \rho)^d (1+\gamma) |x|^\gamma |y|^2}{\rho^{b+2\gamma+2}} \left(\frac{d}{\log \rho} - b \right) \right) |f(z)|^2 dz \\
 & = -\alpha \int_{\mathbb{R}^n} \frac{(\log \rho)^{c+d} (|x|^{2\gamma+2} + |x|^\gamma (1+\gamma) |y|^2)}{\rho^{a+b+3\gamma+3}} \left(\frac{d}{\log \rho} - b \right) |f(z)|^2 dz.
 \end{aligned} \tag{36}$$

By interchanging a and b as well as d and c in (35), we can immediately get L_3 :

$$\begin{aligned}
 L_3 & = -\alpha \int_{\mathbb{R}^n} \left(\rho^{-b} (\log \rho)^d \frac{z \cdot \nabla_\gamma (\rho^{-a} (\log \rho)^c)}{\rho^{\gamma+1}} \right) |f(z)|^2 dz \\
 & = -\alpha \int_{\mathbb{R}^n} \frac{(\log \rho)^{c+d} (|x|^{2\gamma+2} + |x|^\gamma (1+\gamma) |y|^2)}{\rho^{a+b+3\gamma+3}} \left(\frac{c}{\log \rho} - a \right) |f(z)|^2 dz.
 \end{aligned} \tag{37}$$

Now for L_4 , we get

$$\begin{aligned}
 L_4 & = -\alpha \int_{\mathbb{R}^n} \left(\frac{m+k|x|^\gamma}{\rho^{\gamma+1}} \right) \frac{(\log \rho)^{c+d}}{\rho^{a+b}} |f(z)|^2 dz \\
 & + \alpha \int_{\mathbb{R}^n} \left(\frac{(1+\gamma) |x|^{2\gamma+2} + |x|^\gamma (1+\gamma)^2 |y|^2}{\rho^{3\gamma+3}} \right) \frac{(\log \rho)^{c+d}}{\rho^{a+b}} |f(z)|^2 dz.
 \end{aligned} \tag{38}$$

Finally, for L_5 we have

$$L_5 = \alpha^2 \int_{\mathbb{R}^n} \frac{(\log \rho)^{2d}}{\rho^{2b}} |f(z)|^2 dz. \tag{39}$$

Putting (35)-(39) to (34), we get

$$\begin{aligned}
 0 & \leq \int_{\mathbb{R}^n} |(T_{\alpha,\gamma,a,b,c,d} f)(z)|^2 dz = \int_{\mathbb{R}^n} (\rho^{-a} (\log \rho)^c)^2 \left| \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{\gamma+1}} \right|^2 dz \\
 & + \alpha \int_{\mathbb{R}^n} \left[\frac{(\log \rho)^{c+d} (|x|^{2\gamma+2} + |x|^\gamma (1+\gamma) |y|^2)}{\rho^{a+b+3\gamma+3}} \left(a+b+1+\gamma - \frac{c+d}{\log \rho} \right) \right] |f(z)|^2 dz \\
 & + \alpha \int_{\mathbb{R}^n} \left[-\frac{m+k|x|^\gamma}{\rho^{a+b+1+\gamma}} (\log \rho)^{c+d} + \alpha \frac{(\log \rho)^{2d}}{\rho^{2b}} \right] |f(z)|^2 dz.
 \end{aligned} \tag{40}$$

Meanwhile, using (6), we have

$$\| (T_{\alpha,\gamma,a,b,c,d} f)(z) \|_{L^2(\mathbb{R}^n)}^2 = \left\| (\log \rho)^c \frac{z \cdot (\nabla_\gamma f)(z)}{\rho^{a+\gamma+1}} + \alpha \frac{(\log \rho)^d}{\rho^b} f(z) \right\|_{L^2(\mathbb{R}^n)}^2. \tag{41}$$

Putting (40) and (41) together, we obtain (3).

Conclusion

In conclusion, we have successfully derived a weighted Hardy identity associated with the Baouendi-Grushin operator using the method of factorization. In addition, we were able to apply our result in the magnetic inequality related to the Landau-Hamiltonian type magnetic field. This

approach allowed us to extend classical Hardy inequalities to more complex settings involving degenerate elliptic operators.

Acknowledgement

This research is funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP23490970). The author would like to thank Professor N. Yessirkegenov for the valuable discussions.

REFERENCES

- 1 Gesztesy F., Littlejohn L.L. Factorizations and Hardy-Rellich-type inequalities. Non-linear partial differential equations, mathematical physics, and stochastic analysis, 2018, pp. 207–226, EMS Ser. Congr. Rep., Eur. Math. Soc., Zürich.
- 2 Hardy G.H. Note on a theorem of Hilbert. *Mathematische Zeitschrift*, 1920, vol. 6, pp. 314–317.
- 3 Kufner A., Maligranda L., Persson L.E. The Hardy inequality: About its history and some related results. *Vydavatelský servis*, 2007.
- 4 Amrein W., Boutet de Monvel-Berthier A., Georgescu V. Hardy type inequalities for abstract differential operators. *Memoirs of the American Mathematical Society*, 1987, vol. 70, no. 375, pp. 1–119.
- 5 Balinsky A.A., Evans W.D., Lewis R.T. The analysis and geometry of Hardy's inequality, 2015, Universitext, Springer.
- 6 Edmunds D.E., Evans W.D. Spectral theory and differential operators (2nd ed.). Oxford Mathematical Monographs, 2018, Clarendon Press, Oxford.
- 7 Ghoussoub N., Moradifard A. Functional inequalities: New perspectives and new applications. *Mathematical Surveys and Monographs*, 2013, vol. 187, American Mathematical Society, Providence, RI.
- 8 Kinnunen J., Lehtinen J., Vähäkangas A. Maximal function methods for Sobolev spaces. *Mathematical Surveys and Monographs*, 2021, vol. 257, American Mathematical Society, Providence, RI.
- 9 Garofalo N. Unique continuation for a class of elliptic operators which degenerate on a manifold of arbitrary codimension. *Journal of Differential Equations*, 1993, vol. 104, no. 1, pp. 117–146.
- 10 Gesztesy F., Pittner L. A generalization of the virial theorem for strongly singular potentials. *Reports on Mathematical Physics*, 1980, vol. 18, no. 2, pp. 149–162.
- 11 Gesztesy F. On non-degenerate ground states for Schrödinger operators. *Reports on Mathematical Physics*, 1984, vol. 20, no. 1, pp. 93–109.
- 12 Lam N., Lu G., Zhang L. Factorizations and Hardy's type identities and inequalities on upper half spaces. *Calculus of Variations and Partial Differential Equations*, 2019, vol. 58, p. 183.
- 13 Ruzhansky M., Yessirkegenov N. Factorizations and Hardy-Rellich inequalities on stratified groups. *Journal of Spectral Theory*, 2020, vol. 10, no. 4, pp. 1361–1411.
- 14 Ruzhansky M., Suragan D., Yessirkegenov N. Sobolev type inequalities, Euler-Hilbert-Sobolev and Sobolev-Lorentz-Zygmund spaces on homogeneous groups. *Integral Equations and Operator Theory*, 2018, vol. 90, p. 10.
- 15 Ruzhansky M., Suragan D., Yessirkegenov N. Extended Caffarelli-Kohn-Nirenberg inequalities and superweights for L^p -weighted Hardy inequalities. *Comptes Rendus Mathématique. Académie des Sciences*, 2017, vol. 355, no. 6, pp. 694–698.
- 16 Ruzhansky M., Suragan D., Yessirkegenov N. Extended Caffarelli-Kohn-Nirenberg inequalities, and remainders, stability, and superweights for L^p -weighted Hardy inequalities. *Transactions of the American Mathematical Society, Series B*, 2018, vol. 5, no. 2, pp. 32–62.
- 17 Shaimerdenov Y., Yessirkegenov N. Cylindrical and horizontal extensions of critical Sobolev type inequalities and identities. *Trends in Mathematics*, 2024, vol. 4, pp. 167–174.
- 18 Shaimerdenov Y., Yessirkegenov N. Critical Sobolev-type identities and inequalities on stratified Lie groups. *Trends in Mathematics*, 2024, vol. 2, pp. 123–129.
- 19 Ruzhansky M., Shaimerdenov Y., Yessirkegenov N. Cylindrical extensions of critical Sobolev type inequalities and identities. *arXiv preprint arXiv:2408.10697*, 2024.
- 20 Laptev A., Ruzhansky M., Yessirkegenov N. Hardy inequalities for Landau Hamiltonian and for Baouendi-Grushin operator with Aharonov-Bohm type magnetic field. Part I. *Mathematica Scandinavica*, 2019, vol. 125, no. 2, pp. 239–269.

^{1,2}Жангирбаев А.,
бакалавр, ORCID ID: 0009-0000-4062-6102,
e-mail: amir.zhangirbayev@gmail.com

¹Математика және математикалық модельдеу институты, Алматы қ., Қазақстан

²СДУ университеті, Қаскелен қ., Қазақстан

БАОУЭНДИ-ГРУШИН ВЕКТОРЛЫҚ ӨРІСТЕРІНЕ ЖӘНЕ ЛАНДАУ-ГАМИЛЬТОНИАҢҒ БАЙЛАНЫСТЫ ХАРДИ ТЕҢСІЗДІКТЕРІ МЕН ТЕҢДІКТЕРІ

Аңдатпа

Бұл мақалада біз Баоуэнди-Грушин векторлық өрістерімен байланысты салмақты Харди теңдігін талқылай отырып және оның дифференциалдық теңсіздіктер контекстінде әртүрлі қолданыстарын зерттейміз. Бұл Харди теңдігінен, сәйкес параметрлерді таңдау арқылы Баоуэнди-Грушин операторына қатысты Харди типті теңсіздіктер үшін нақты қалдық формулаларын да алуға болады. Коммутативті жағдайды қарастырғанда, бізге евклидтік кеңістік үшін де, Баоуэнди-Грушин операторына қатысты жақсартылған салмақты Харди теңсіздіктерін де анықтау мүмкіндігі туады. Мысалы, нақты жағдайда, Баоуэнди-Грушин операторына қатысты теріс емес қалдық мүшелерді алып тастап және тиісті параметрлерді дәл таңдау арқылы, біздің теңдіктен топологиялық өлшемге тәуелді емес тұрақтысы дәл анықталған радиалды туынды операторына арналған жақсартылған критикалық Харди теңсіздігін алуға да мүмкіндік береді. Сонымен қатар, осы мақалада Гештези мен Литтлджон [1] жұмысында ұсынылған дифференциалды өрнектерді факторизациялау әдісін де қолданамыз. Бұл мақалада біз коммутативті емес Баоуэнди-Грушин векторлық өрісінде факторизация әдісін қолдануды көрсетеміз. Сонымен бірге, Баоуэнди-Грушин векторлық өрістерімен байланысты Харди теңдігінің қолданысы ретінде, жалпыланған Ландау-Гамильтон (немесе бұралған лапласиан) операторы үшін қалдық мүшелері бар Харди типті теңсіздікті аламыз.

Тірек сөздер: факторизация әдісі, Харди теңсіздігі, Баоуэнди-Грушин операторы, Ландау-Гамильтониан.

^{1,2}Жангирбаев А.,
бакалавр, ORCID ID: 0009-0000-4062-6102,
e-mail: amir.zhangirbayev@gmail.com

¹Институт математики и математического моделирования, г. Алматы, Казахстан

²Университет СДУ, г. Каскелен, Казахстан

НЕРАВЕНСТВА И ТОЖДЕСТВА ХАРДИ, СВЯЗАННЫЕ С ВЕКТОРНЫМИ ПОЛЯМИ БАОУЭНДИ-ГРУШИНА И ЛАНДАУ-ГАМИЛЬТОНИАНОМ

Аннотация

В этой статье мы представляем взвешенное тождество Харди, связанное с векторными полями Баоуэнди-Грушина, и его приложения с применениями в контексте дифференциальных неравенств. С помощью выбора соответствующих параметров наше полученное тождество Харди, связанное с оператором Баоуэнди-Грушина, влечет за собой многочисленные формулы точного остатка для неравенств типа Харди. В коммутативном случае мы получаем улучшенные взвешенные неравенства Харди в постановке евклидова пространства. Например, в частном случае, отбрасывая неотрицательные остаточные члены, связанные с оператором Баоуэнди-Грушина, и выбирая подходящие параметры, наше тождество позволяет нам вывести улучшенное критическое неравенство Харди для радиального производного оператора с точной константой, которая, в свою очередь, не зависит от топологической размерности. Мы используем метод факторизации дифференциальных выражений, использованный Гештези и Литтлджоном в [1]. В данной статье мы демонстрируем применение метода факторизации в некоммутативной постановке Баоуэнди-Грушина. В качестве применения полученного тождества Харди, связанного с векторными полями Баоуэнди-Грушина, мы устанавливаем неравенство Харди для обобщенного гамильтониана Ландау (или искривленного лапласиана) с определенными остаточными членами.

Ключевые слова: метод факторизации, неравенство Харди, оператор Баоуэнди-Грушина, Ландау-Гамильтониан.

Article submission date: 17.10.2024

УДК 517.54
МРНТИ 27.27.17

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-168-185>

^{1*}Майер 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

¹Байманкулов А.Т.,

докт. физ.-мат. наук, доцент, ORCID ID: 0000-0002-6435-9560,

e-mail: g_talgat_a@mail.ru

¹Костанайский региональный университет имени Ахмета Байтурсынулы,
г. Костанай, Казахстан

КЛАССЫ ПОЧТИ ЗВЕЗДООБРАЗНЫХ ФУНКЦИЙ, ПОСТРОЕННЫЕ НА ОСНОВЕ ОПОРНОЙ ФУНКЦИИ ОБЩЕГО ВИДА

Аннотация

Цель статьи – представить и исследовать широкий класс дважды почти звездообразных функций, продемонстрировав при этом единый подход к решению определенного круга экстремальных задач. В статье определена опорная функция общего вида – звездообразная функция, на базе которой можно строить классы почти звездообразных и дважды почти звездообразных функций. На базе опорной функции общего вида, содержащей три параметра, и новых оценок аналитических функций вводится обобщение различных подклассов классов почти звездообразных и дважды почти звездообразных функций, рассмотренных в ряде статей, вышедших в последние годы, в том числе введенный класс содержит обобщенный класс типично вещественных функций. Изучены свойства введенного класса функций, например, получены теорема роста, оценки модуля логарифмической производной функции и радиус звездообразности, в частных случаях приводящие как к ранее известным результатам, так и представляющие собой новые результаты. Все результаты статьи являются точными.

Ключевые слова: однолистные функции, звездообразные функции, почти звездообразные функции, типично вещественные функции, радиус звездообразности.

Введение

Изучение геометрических свойств различных классов аналитических функций является одной из важнейших задач геометрической теории функций. Особый интерес представляет класс S однолистных функций [1]. Вспомним, что аналитическая в круге $E = \{z: |z| < 1\}$ функция $w = f(z)$ называется однолистной, если она осуществляет взаимно однозначное отображение круга E на некоторую область $f(E)$ расширенной комплексной плоскости.

В статье [2] введены почти звездообразные функции, что послужило основой для исследования их различных подклассов (напр., [2–12]).

В настоящей статье на основе построения трехпараметрической опорной функции общего вида и использования новых оценок аналитических функций вводится достаточно широкий класс дважды почти звездообразных функций, который, как частные случаи, включает прак-

тически все классы функций, исследуемые в статьях [3–12]. На примере построения данного класса функций и определения точных оценок $|f(z)|$, $|zf'(z)/f(z)|$ и радиусов звездообразности продемонстрирован единый подход к решению определенного круга экстремальных задач. В частных случаях получаются как новые оригинальные результаты, так и ряд результатов процитированных выше статей.

Пусть $\mathcal{N}$ – класс аналитических в круге E функций $f(z)$, нормированных условием $f(0) = f'(0) - 1 = 0$. В частности, класс однолистных функций $S \subset \mathcal{N}$. Ряд подклассов класса S имеет хорошо изученные наглядные описания (см., напр., [1], §2–5). Среди них отметим класс S^* звездообразных функций $f(z)$, обладающих наглядными геометрическими свойствами, который задается с помощью условия $\operatorname{Re} \left(z \frac{f'(z)}{f(z)} \right) \geq 0$, $z \in E$.

Определение 1. Функция $w = f(z)$ называется звездообразной в круге E , если область $f(E)$ является звездообразной относительно точки $w = 0$, то есть наряду с любой точкой $w \in f(E)$ области $f(E)$ принадлежит и отрезок $[0, w]$.

Определение 2. Будем говорить, что функция $f(z)$ из $\mathcal{N}$ принадлежит классу CS^* почти звездообразных функций («close-to-starlike functions»), если она удовлетворяет некоторому неравенству, содержащему отношение $f(z)/g(z)$, причем функция $g(z) \in S^*$. Если же функция $g(z)$ сама является почти звездообразной, то функцию $f(z)$ будем называть дважды почти звездообразной функцией («doubly close-to-starlike functions») и писать $f(z) \in CCS^*$.

Заметим, что классы CS^* и CCS^* в столь общей формулировке, которая дана в определении 2, ранее в научной литературе не вводились.

Впервые почти звездообразные функции были введены М.О. Ридом в [2] как функции $f(z)$ из $\mathcal{N}$, удовлетворяющие условию

$$\operatorname{Re} \frac{f(z)}{g(z)} \geq 0, \quad g(z) \in S^*, \quad z \in E, \quad (1)$$

Здесь же было отмечено без обоснования, что почти звездообразные функции могут быть и не однолиственными.

В силу общности класса CS^* , введенного определением 2, почти звездообразные функции М.О. Рида включаются в класс CS^* . Кроме того, класс CS^* включает и почти звездообразные функции, не удовлетворяющие условию (1), например, если использовать неравенства

$$\operatorname{Re} \frac{f(z)}{g(z)} \geq \alpha, \quad \alpha < 0,$$

или

$$m \leq \left| \frac{f(z)}{g(z)} \right| \leq M, \quad 0 \leq m < 1, \quad M > 1,$$

где $g(z) \in S^*$, $z \in E$.

Пусть $f(z) \in CS^*$, $g(z) \in S^*$. Тогда в соответствии с определением 2 функция $f(z)$ для всех $z \in E$ удовлетворяет некоторому неравенству, содержащему отношение $f(z)/g(z)$. Поэтому, если $f(z) \equiv g(z)$, то $f(z)/g(z) \equiv f(0)/g(0) = 1$ также удовлетворяет данному неравенству. В силу этого любая звездообразная функция $f(z)$ принадлежит классу CS^* . То есть $S^* \subset CS^*$. Аналогично устанавливается, что $CS^* \subset CCS^*$. Таким образом,

$$S^* \subset CS^* \subset CCS^*.$$

Пример функции $f_0(z) = z \left(\frac{1+z}{1-z} \right)$ показывает, что $f_0(z) \in CS^*$ с $g(z) = z$, поскольку $\operatorname{Re} \frac{f_0(z)}{z} \geq 0$ для всех $z \in E$. Но $f_0'(z) = \frac{1+2z-z^2}{(1-z)^2} = 0$ в точке $z = 1 - \sqrt{2} \in E$. Поэтому функ-

ция $f_0(z)$ не является однолистной в круге E и, значит, $f_0(z)$ не является звездообразной в E . Таким образом, класс CS^* кроме звездообразных функций содержит и функции, которые не являются ни звездообразными, ни однолиственными.

Аналогично функция

$$f_1(z) = f_0(z) \left(\frac{1+z}{1-z} \right) = z \left(\frac{1+z}{1-z} \right)^2 \in CCS^*$$

с $g(z) = z$, поскольку $f_0(z) \in CS^*$ и $\operatorname{Re} \frac{f_1(z)}{f_0(z)} = \operatorname{Re} \frac{1+z}{1-z} \geq 0, z \in E$. При этом функция $f_1(z) \notin CS^*$, поскольку $\frac{f_1(z)}{z} = \left(\frac{1+z}{1-z} \right)^2$ и условие $\operatorname{Re} \frac{f_1(z)}{z} \geq 0$ в круге E не выполняется. Таким образом, класс дважды почти звездообразных функций содержит и функции, которые не являются почти звездообразными.

В настоящей статье на основе класса $\mathcal{P}(a, \gamma)$ и построения звездообразной опорной функции общего вида вводится некоторый класс дважды почти звездообразных функций и исследуются его свойства.

Обзор литературы

К первым исследованиям в этом направлении кроме статьи [2] М.О. Рида также относятся исследования Т.Х. МакГрегора [3–4] классов почти звездообразных функций $f(z)$, удовлетворяющих одному из условий

$$\operatorname{Re} \frac{f(z)}{g(z)} \geq 0 \text{ или } \left| \frac{f(z)}{g(z)} - 1 \right| \leq 1, g(z) \in S^*. \quad (2)$$

Данные статьи дали толчок исследованию других подклассов класса почти звездообразных функций за счет введения вместо (2) новых условий, применения вместо класса S^* некоторых его подклассов или использования конкретных звездообразных функций $g(z)$, которые будем называть опорными функциями для классов почти звездообразных функций.

Примерами опорных звездообразных функций являются функции вида

$$h_1(z) = \frac{z}{1-z^2}, h_2(z) = \frac{z}{(1-z)^2}, h_3(z) = \frac{z}{1-z}, h_4(z) = z - \frac{z^2}{2}, h_5(z) = z.$$

Заметим, что с помощью замен $\hat{h}_1(z) = (1/i)h_1(iz)$, $\hat{h}_k(z) = -h_k(-z)$, $k = 2, 3, 4, 5$, от функций $h_k(z)$, $k = 1, 2, 3, 4$, можно перейти к функциям

$$\hat{h}_1(z) = \frac{z}{1+z^2}, \hat{h}_2(z) = \frac{z}{(1+z)^2}, \hat{h}_3(z) = \frac{z}{1+z}, \hat{h}_4(z) = z + z^2/2,$$

обладающим аналогичными свойствами, определяющими, по сути, тот же самый класс почти звездообразных или дважды почти звездообразных функций $f(z)$, а $\hat{h}_5(z) = h_5(z) = z$.

Отметим также статью [5], в которой найдены радиусы звездообразности классов почти звездообразных функций, определяемых с помощью одного из условий

$$\left| \frac{f(z)}{z} - a \right| \leq a, a > \frac{1}{2} \text{ или } \left| \frac{f(z)}{z + kz^2} - a \right| \leq a, |k| \leq 1, a > \frac{1}{2}.$$

Заметим, что все исследования, проводимые в процитированных выше статьях [3–5], не выходят за пределы класса почти звездообразных функций, введенного М.О. Ридом [2] с помощью условия (1).

В работах [6–11] для некоторых подклассов классов почти звездообразных и дважды почти звездообразных функций решалась задача определения их радиусов звездообразности отно-

сительно некоторых подклассов класса S^* , таких как классы функций $f(z) \in \mathcal{N}$, для которых множество значений $z f'(z)/f(z)$ содержится в полуплоскости $\operatorname{Re} w > \alpha$, $0 \leq \alpha < 1$ (класс звездообразных функций порядка α), в области, ограниченной правой половиной лемнискаты Бернулли (класс лемнискатных функций), в области, ограниченной кардиоидой (класс функций, связанных с кардиоидой) и другие классы.

При этом рассматривались классы почти звездообразных и дважды почти звездообразных функций, построенные с помощью конструкций вида

$$\mathcal{M}_1 = \left\{ f(z) : \operatorname{Re} \frac{f(z)}{g(z)} \geq 0, \operatorname{Re} \frac{g(z)}{h(z)} \geq 0 \right\}, \quad \mathcal{M}_2 = \left\{ f(z) : \left| \frac{f(z)}{g(z)} - 1 \right| \leq 1, \operatorname{Re} \frac{g(z)}{h(z)} \geq 0 \right\},$$

$$\mathcal{M}_3 = \left\{ f(z) : \operatorname{Re} \frac{f(z)}{h(z)} \geq 0 \right\},$$

в которых $h(z) = h_k(z)$, $k = \overline{1, 5}$. Стоит отметить, что в статьях [6–11] исследование проводилось отдельно для каждого из классов $\mathcal{M}_1$, $\mathcal{M}_2$, $\mathcal{M}_3$ и в каждой статье использовалась своя опорная функция $h(z) = h_k(z)$, $k = \overline{1, 5}$.

Наша гипотеза состоит в том, что можно построить класс $\mathcal{M}$, который включает классы $\mathcal{M}_1$, $\mathcal{M}_2$, $\mathcal{M}_3$, и построить опорную функцию $h(z) \in S^*$ общего вида с несколькими параметрами, которая при определенных значениях параметров дает функции $h_k(z)$, $k = \overline{1, 5}$, и, кроме того, содержит целый ряд других конкретных случаев.

Целью работы является определение многопараметрической опорной функции $h(z) \in S^*$ общего вида и класса $\mathcal{M}$, для которого можно найти радиусные константы относительно различных подклассов класса S^* , позволяющие получить результаты статей [6–11] как следствия одного результата, а также ряд новых результатов.

К классу почти звездообразных функций относится и введенный В. Рогозински в [12] класс T типично вещественных функций. При этом $f(z) \in T$ тогда и только тогда, когда при любом вещественном $z \in E$ она принимает вещественные значения и $\operatorname{Im} f(z) \operatorname{Im} z > 0$ в остальных точках круга E . В [12] также установлено, что

$$f(z) \in T \Leftrightarrow \operatorname{Re} \left(\frac{1-z^2}{z} f(z) \right) \geq 0, z \in E, \quad (3)$$

то есть для функций $f(z)$ из T выполняется условие (1) с $g(z) = z/(1-z^2)$.

Материалы и методы

Обозначим через $\mathcal{P}$ класс аналитических в круге E функций $\varphi(z) = 1 + c_1 z + c_2 z^2 + \dots$ с положительной вещественной частью, через $\mathcal{P}(a, \gamma)$ – класс функций $\varphi(z) \in \mathcal{P}$, удовлетворяющих условию $|(\varphi(z))^{1/\gamma} - a| \leq a$, где $a > 1/2$, $0 < \gamma \leq 1$. Обозначим также через $\mathcal{P}(\gamma) := \mathcal{P}(\infty, \gamma)$ подкласс класса $\mathcal{P}(a, \gamma)$ функций $\varphi(z) \in \mathcal{P}$, удовлетворяющих условию $|\arg \varphi(z)| \leq \frac{\gamma\pi}{2}$, $z \in E$.

Доказательства основных результатов настоящей статьи опираются на следующее утверждение, полученное на основе метода подчиненности.

Лемма 1 [13]. Пусть аналитическая в круге E функция $\varphi(z)$ разлагается в ряд вида $\varphi(z) = 1 + c_n z^n + c_{n+1} z^{n+1} + \dots$, $n \geq 1$, $z \in E$, и выполняется условие $\varphi(z) \in \mathcal{P}(a, \gamma)$, $a > 1/2$, $0 < \gamma \leq 1$, и пусть $c = 1 - 1/a$, $-1 < c \leq 1$. Тогда при $|z| = r$, $0 \leq r < 1$, имеют место точные оценки

$$\left(\frac{1-r^n}{1+cr^n}\right)^{\gamma} \leq |\varphi(z)| \leq \left(\frac{1+r^n}{1-cr^n}\right)^{\gamma}, \quad (4)$$

$$\left|z \frac{\varphi'(z)}{\varphi(z)}\right| \leq \frac{\gamma(1+c)nr^n}{(1-r^n)(1+cr^n)}, \quad (5)$$

которые достигаются для функции $\varphi(z) = \varphi_0(z^n)$, где

$$\varphi_0(z) = \left(\frac{1+z}{1-cz}\right)^{\gamma}. \quad (6)$$

Определение 3. Аналитическая в круге E функция $\varphi(z)$ называется подчиненной однолистной функции $\varphi_0(z)$, если $\varphi(E) \subset \varphi_0(E)$ и $\varphi(0) = \varphi_0(0)$, что обозначается в виде $\varphi(z) \prec \varphi_0(z)$.

Суть метода подчиненности заключается в том, что если $\varphi(z) \prec \varphi_0(z)$ в круге E , то подчиненность распространяется и на внутренние круги, то есть $\varphi(|z| \leq r) \subset \varphi_0(|z| \leq r)$ при любом r , $0 \leq r < 1$.

Результаты и обсуждение

1. Опорная функция общего вида для классов почти звездообразных и дважды почти звездообразных функций

Определим опорную функцию $h_m(z)$, $m = 1, 2, 3, \dots$, $h_m(0) = 0$, $h'_m(0) = 1$, для классов почти звездообразных и дважды почти звездообразных функций как решение дифференциального уравнения

$$z \frac{h'(z)}{h(z)} = \frac{1 + Az^m}{1 + Bz^m}, \quad (7)$$

где $\psi_0(z) = \frac{1+Az}{1+Bz}$, $-1 \leq B < A \leq 1$, – функция Яновского [14]. Поскольку

$$\operatorname{Re} z \frac{h'(z)}{h(z)} = \operatorname{Re} \frac{1 + Az^m}{1 + Bz^m} \geq \frac{1-A}{1-B} \geq 0,$$

в круге E , то все решения $h_m(z)$ уравнения (7) являются функциями, звездообразными в круге E . Кроме того, нетрудно установить, что функции $h_m(z)$ при $m \geq 2$ обладают m -кратной симметрией вращения вокруг точки $h_m(0) = 0$ и определяются [15] по формуле

$$h_m(z) = \begin{cases} z \cdot (1 + Bz^m)^{\frac{A-B}{mB}}, & B \neq 0, \\ z \cdot \exp\left\{\frac{A}{m}z^m\right\}, & B = 0 \ (0 < A \leq 1), \end{cases} \quad (8)$$

причем $h_m(z) = z + b_{m+1}z^{m+1} + b_{2m+1}z^{2m+1} + \dots$, $m \geq 1$, $z \in E$.

Если $B = -1$, то

$$h_m(z) = \frac{z}{(1-z^m)^{\frac{A+1}{m}}}, \quad -1 < A \leq 1,$$

и, в частности,

$$h_m(z) = \frac{z}{(1-z^m)^{1/m}} \text{ при } A = 0, m = 1, 2, 3, \dots,$$

$$h_m(z) = \frac{z}{(1 - z^m)^{2/m}} \text{ при } A = 1, m = 1, 2, 3, \dots,$$

$$h_m(z) = \frac{z}{(1 - z^{2m})^{1/m}} \text{ при } A = 1, m = 1, 2, 3, \dots$$

Отсюда получаем наиболее распространенные случаи использования опорной функции (например, [7–9, 11])

$$h_m(z) = \frac{z}{1 - z} \text{ при } m = 1, A = 0,$$

$$h_m(z) = \frac{z}{(1 - z)^2} \text{ при } m = 1, A = 1,$$

$$h_m(z) = \frac{z}{1 - z^2} \text{ при } m = 2, A = 1.$$

Если положить $A = 2B$, то из условия $-1 \leq B < A \leq 1$ получаем, что $0 < B \leq 1/2$ и $h_m(z) = z(1 + Bz^m)^{1/m}$, причем функция $h_m(z)$ является звездообразной и при $B = 0$. В частности, при $m = 1$ имеем опорную функцию из [5, 10] и при $B \rightarrow 0$ – из [3–4, 16–18]:

$$h_m(z) = z + Bz^2, 0 < B \leq 1/2, \text{ и при } B = 0 \text{ имеем } h_m(z) = z.$$

Кроме того, из второго выражения (8) получаем следующий пример опорной функции

$$h_m(z) = z \cdot \exp \left\{ \frac{A}{m} z^m \right\}, 0 < A \leq 1.$$

2. Описание классов почти звездообразных и дважды почти звездообразных функций

Определение 4. Будем говорить, что функция $g(z)$ из $\mathcal{N}$ принадлежит классу $CS_m^*(b, \delta, A, B)$ почти звездообразных функций тогда и только тогда, когда для некоторой функции $h_m(z)$ вида (8) $\frac{g(z)}{h_m(z)} \in \mathcal{P}(b, \delta)$, то есть

$$\left| \left(\frac{g(z)}{h_m(z)} \right)^{1/\delta} - b \right| \leq b, \quad b > 1/2, \quad 0 < \delta \leq 1, \quad z \in E. \quad (9)$$

Заметим, что класс $CS_m^*(b, \delta, A, B)$ является подклассом класса почти звездообразных функций, введенного М.О. Ридом с помощью условия (1), поскольку из (9) вытекает условие $\operatorname{Re} \frac{g(z)}{h_m(z)} \geq 0$, причем $h_m(z) \in S^*$.

Определение 5. Будем говорить, что функция $f(z)$ из $\mathcal{N}$ принадлежит классу $CCS_m^*(a, \gamma, b, \delta, A, B)$ дважды почти звездообразных функций тогда и только тогда, когда для некоторой функции $g(z) \in CS_m^*(b, \delta, A, B)$ выполняется условие

$$\frac{f(z)}{g(z)} \in \mathcal{P}(a, \gamma).$$

Таким образом,

$$f(z) \in CCS_m^*(a, \gamma, b, \delta, A, B) \Leftrightarrow \left| \left(\frac{f(z)}{g(z)} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - a \right| \leq a \text{ и } \left| \left(\frac{g(z)}{h_m(z)} \right)^{\frac{1}{\delta}} - b \right| \leq b, \quad (10)$$

в круге E , где $a, b > 1/2, 0 < \gamma, \delta \leq 1$, и функция $h_m(z)$ задается формулой (8).

Заметим, что поскольку $h_m(z) \in S^*$, то $g(z)$ является почти звездообразной функцией. Поэтому функции класса $CCS_m^*(a, \gamma, b, \delta, A, B)$ дважды почти звездообразными. Также $CCS_m^*(a, \gamma, \infty, 0, A, B) \equiv CS_m^*(a, \gamma, A, B)$.

Пусть $m = 2, B = -1, A = 1$, тогда $h_m(z) = \frac{z}{1 - z^2}$. Предположим также, что $g(z)$ в точках $z \in (-1; 1)$ принимает вещественные значения. Тогда в силу (3) условие

$$\operatorname{Re} \frac{g(z)}{h_m(z)} = \operatorname{Re} \left((1-z^2) \frac{g(z)}{z} \right) \geq 0$$

задает класс T типично вещественных функций $g(z)$. С учетом этого введем класс $CCT^*(a, \gamma, b, \delta)$ функций $f(z) \in \mathcal{N}$, удовлетворяющих условию

$$\left| \left(\frac{f(z)}{g(z)} \right)^{1/\gamma} - a \right| \leq a \text{ и } \left| \left((1-z^2) \frac{g(z)}{z} \right)^{1/\delta} - b \right| \leq b. \quad (11)$$

Пусть $b \rightarrow \infty$, $\delta \rightarrow 0$. Тогда $g(z) = \frac{z}{1-z^2}$, второе условие в (11) становится тривиальным и получается класс $CT^*(a, \gamma) \equiv CCT^*(a, \gamma, \infty, 0)$ функций $f(z)$, удовлетворяющих условию

$$\left| \left((1-z^2) \frac{f(z)}{z} \right)^{1/\gamma} - a \right| \leq a, \quad a > 1/2, 0 < \gamma \leq 1,$$

обобщающий класс типично вещественных функций $T \equiv CT^*(\infty, 1)$.

3. Оценки в классе $CCS_m^*(a, \gamma, b, \delta, A, B)$

Теорема 1. Пусть $f(z) \in CCS_m^*(a, \gamma, b, \delta, A, B)$ и пусть $c = 1 - 1/a$, $k = 1 - 1/b$, $-1 < c, k \leq 1$. Тогда при $|z| = r$, $0 \leq r < 1$, имеют место точные оценки:

1) при $-1 \leq B < A \leq 1$, $B \neq 0$

$$\begin{aligned} \left(\frac{1-r}{1+cr} \right)^\gamma \left(\frac{1-r}{1+kr} \right)^\delta r (1 - Br^m)^{\frac{A-B}{mB}} &\leq |f(z)| \leq \\ &\leq \left(\frac{1+r}{1-cr} \right)^\gamma \left(\frac{1+r}{1-kr} \right)^\delta r (1 + Br^m)^{\frac{A-B}{mB}}, \end{aligned} \quad (12)$$

2) при $0 < A \leq 1$, $B = 0$

$$\begin{aligned} \left(\frac{1-r}{1+cr} \right)^\gamma \left(\frac{1-r}{1+kr} \right)^\delta r \exp \left(-\frac{A}{m} r^m \right) &\leq |f(z)| \leq \\ &\leq \left(\frac{1+r}{1-cr} \right)^\gamma \left(\frac{1+r}{1-kr} \right)^\delta r \exp \left(\frac{A}{m} r^m \right), \end{aligned} \quad (13)$$

3) при $-1 \leq B < A \leq 1$

$$\left| z \frac{f'(z)}{f(z)} - \frac{1 + Az^m}{1 + Bz^m} \right| \leq \frac{r}{1-r} \left(\frac{\gamma(1+c)}{1+cr} + \frac{\delta(1+k)}{1+kr} \right). \quad (14)$$

Доказательство. Обозначим $\varphi(z) = \frac{f(z)}{g(z)}$, $\psi(z) = \frac{g(z)}{h_m(z)}$. Тогда $f(z) = \varphi(z)g(z)$, $g(z) = \psi(z)h_m(z)$ и

$$f(z) = \varphi(z)\psi(z)h_m(z). \quad (15)$$

Поскольку $\varphi(z) \in \mathcal{P}(a, \gamma)$, $\psi(z) \in \mathcal{P}(b, \delta)$, то в силу леммы 1 при $n = 1$

$$\left(\frac{1-r}{1+cr} \right)^\gamma \leq |\varphi(z)| \leq \left(\frac{1+r}{1-cr} \right)^\gamma, \quad \left(\frac{1-r}{1+kr} \right)^\delta \leq |\psi(z)| \leq \left(\frac{1+r}{1-kr} \right)^\delta \quad (16)$$

С другой стороны, так как функция $h_m(z) \in S^*(A, B)$ и разлагается в ряд вида $h_m(z) = z + b_{m+1}z^{m+1} + b_{2m+1}z^{2m+1} + \dots$, $m \geq 1$, то (напр., [15])

$$r(1 - Br^m)^{\frac{A-B}{mB}} \leq |h_m(z)| \leq r(1 + Br^m)^{\frac{A-B}{mB}}, B \neq 0, \quad (17)$$

$$\operatorname{rexp}\left(-\frac{A}{m}r^m\right) \leq |h_m(z)| \leq \operatorname{rexp}\left(\frac{A}{m}r^m\right) \quad B = 0 \quad (0 < A \leq 1). \quad (18)$$

Применяя, соответственно, левые или правые оценки для $|\varphi(z)|$ и $|\psi(z)|$ в (16), левые или правые оценки в (17)–(18), на основе равенства (15) получим оценки (12) и (13).

Докажем теперь оценку (14). В силу (15) и (4)–(5) имеем

$$z \frac{f'(z)}{f(z)} = z \frac{\varphi'(z)}{\varphi(z)} + z \frac{\psi'(z)}{\psi(z)} + \frac{1 + Az^m}{1 + Bz^m}.$$

Отсюда в силу оценки (5), примененной к функциям $\varphi(z)$ и $\psi(z)$ при $n = 1$, получаем оценку

$$\left| z \frac{f'(z)}{f(z)} - \frac{1 + Az^m}{1 + Bz^m} \right| \leq \frac{\gamma(1+c)r}{(1-r)(1+cr)} + \frac{\delta(1+k)r}{(1-r)(1+kr)},$$

которая равносильна оценке (14).

Докажем точность оценок (12)–(14).

Рассмотрим функцию

$$f_0(z) = z(1 + Bz^m)^{\frac{A-B}{mB}} \left(\frac{1+z}{1-cz} \right)^\gamma \left(\frac{1+z}{1-kz} \right)^\delta = \left(\frac{1+z}{1-cz} \right)^\gamma g_0(z), \quad (19)$$

где

$$g_0(z) = z(1 + Bz^m)^{\frac{A-B}{mB}} \left(\frac{1+z}{1-kz} \right)^\delta,$$

и покажем, что $f_0(z) \in CCS_m^*(a, \gamma, b, \delta, A, B)$. Учитывая, что $z(1 + Bz^m)^{\frac{A-B}{mB}} = h_m(z)$ для случая $B \neq 0$ и $w(z) = \frac{1+z}{1-kz}$ есть отображение круга E на круг $|w - b| < b$, получаем

$$\left| \left(\frac{g_0(z)}{h_m(z)} \right)^{1/\delta} - b \right| = |w(z) - b| < b.$$

Следовательно, по определению $1 \ g_0(z) \in CS_m^*(b, \delta, A, B)$ и, так как

$$\frac{f_0(z)}{g_0(z)} = \left(\frac{1+z}{1 - (1 - 1/a)z} \right)^\gamma = \left(\frac{1+z}{1 - cz} \right)^\gamma \in \mathcal{P}(a, \gamma),$$

то $f_0(z) \in CCS_m^*(a, \gamma, b, \delta, A, B)$ и для функции $f_0(z)$ в точке $z = r$ в правой оценке (12) достигается знак равенства.

Если m – нечетное, то для функции $f_0(z)$ в точке $z = -r$ получаем

$$f_0(-r) = -r(1 - Br^m)^{\frac{A-B}{mB}} \left(\frac{1-r}{1+cr} \right)^\gamma \left(\frac{1-r}{1+kr} \right)^\delta.$$

Поэтому в левой оценке (12) также достигается знак равенства.

Пусть теперь m является четным. Рассмотрим два случая.

а) $m = 2, 6, 10, \dots, 2(2j-1), \dots, j \in \mathbb{N}$. Тогда $i^m = -1$ и для $z = ir$ имеем $z^m = i^m r^m = -r^m$, $iz = -r$. Поэтому для функции

$$f_1(z) = z(1 + Bz^m)^{\frac{A-B}{mB}} \left(\frac{1+iz}{1-ciz} \right)^\gamma \left(\frac{1+iz}{1-kiz} \right)^\delta \in CCS_m^*(a, \gamma, b, \delta, A, B) \quad (20)$$

в точке $z = ir$ получаем

$$f_1(ir) = ir(1 - Br^m)^{\frac{A-B}{mB}} \left(\frac{1-r}{1+cr} \right)^{\gamma} \left(\frac{1-r}{1+kr} \right)^{\delta},$$

то есть в этом случае левую оценку (12) улучшить нельзя.

б) $m = 4, 8, 12, \dots, 4j, \dots, j \in \mathbb{N}$. Обозначим $\varepsilon = i^{\frac{m+2}{m}}$, Тогда для $z = -\varepsilon r$ имеем $z^m = (-1)^m i^{m+2} r^m = -r^m$, $\varepsilon^{-1}z = -\varepsilon^{-1}\varepsilon r = -r$. Поэтому для функции

$$f_2(z) = z(1 + Bz^m)^{\frac{A-B}{mB}} \left(\frac{1 + \varepsilon^{-1}z}{1 - c\varepsilon^{-1}z} \right)^{\gamma} \left(\frac{1 + \varepsilon^{-1}z}{1 - k\varepsilon^{-1}z} \right)^{\delta} \in CCS_m^*(a, \gamma, b, \delta, A, B) \quad (21)$$

в точке $z = -\varepsilon r$ имеем

$$f_2(-\varepsilon r) = -\varepsilon r (1 - Br^m)^{\frac{A-B}{mB}} \left(\frac{1-r}{1+cr} \right)^{\gamma} \left(\frac{1-r}{1+kr} \right)^{\delta}.$$

Следовательно, в левой оценке (12) достигается равенство, что доказывает неулучшаемость левой оценки (12) и в этом случае.

Доказательство точности оценки (13) проводится точно так же, только в качестве $h_m(z)$ используется вторая формула в (8).

Докажем точность оценки (14). Для функции $f_0(z)$ имеем

$$z \frac{f'_0(z)}{f_0(z)} - \frac{1 + Az^m}{1 + Bz^m} = \frac{\gamma(1+c)z}{(1+z)(1-cz)} + \frac{\delta(1+k)z}{(1+z)(1-kz)}.$$

Поскольку в точке $z = -r$

$$\left(z \frac{f'_0(z)}{f_0(z)} - \frac{1 + Az^m}{1 + Bz^m} \right) \Big|_{z=-r} = -\frac{\gamma(1+c)r}{(1-r)(1+cr)} - \frac{\delta(1+k)r}{(1-r)(1+kr)},$$

то оценку (14) улучшить нельзя.

Теорема 1 доказана.

4. Радиус звездообразности класса $CCS_m^*(a, \gamma, b, \delta, A, B)$

В качестве примера применения оценки (14) как дополнение к теореме 1 найдем радиус звездообразности порядка α класса $CCS_m^*(a, \gamma, b, \delta, A, B)$, обобщающий аналогичные результаты из [3–4, 6–10] и ряда других статей. При этом через $S^*(\alpha)$ будем обозначать введенный в [19] класс функций $f(z)$, звездообразных порядка α , то есть удовлетворяющих условию $\operatorname{Re} \frac{zf'(z)}{f(z)} \geq \alpha$, $0 \leq \alpha < 1$, $z \in E$.

Отметим, что, следуя методике статей [6–10], также можно найти радиусы звездообразности класса $CCS_m^*(a, \gamma, b, \delta, A, B)$ относительно других подклассов класса S^* , связанных с лемнискатой Бернулли, кардиоидой, луной, синусоидальной или экспоненциальной функцией и рассмотренных в [6–10].

Теорема 2. Точный радиус звездообразности порядка α класса $CCS_m^*(a, \gamma, b, \delta, A, B)$ определяется как единственный на $(0; 1)$ корень уравнения

$$\frac{1 - Ar^m}{1 - Br^m} - \alpha - \frac{r}{1-r} \left(\frac{\gamma(1+c)}{1+cr} + \frac{\delta(1+k)}{1+kr} \right) = 0, \quad (22)$$

где $c = 1 - 1/a$, $k = 1 - 1/b$, $-1 < c, k \leq 1$.

Доказательство. В силу теоремы 1 для любой функции $f(z) \in CCS_m^*(a, \gamma, b, \delta, A, B)$ в круге $|z| \leq r$, $0 \leq r < 1$, имеет место оценки (14), откуда

$$\operatorname{Re} z \frac{f'(z)}{f(z)} \geq \min_{|z| \leq r} \operatorname{Re} \frac{1 + Az^m}{1 + Bz^m} - \frac{r}{1-r} \left(\frac{\gamma(1+c)}{1+cr} + \frac{\delta(1+k)}{1+kr} \right).$$

В [15] (формула (2.5) установлено, что

$$\operatorname{Re} \frac{1 + Az^m}{1 + Bz^m} \geq \frac{1 - Ar^m}{1 - Br^m}.$$

Поэтому в круге $|z| \leq r$ выполняется неравенство

$$\operatorname{Re} z \frac{f'(z)}{f(z)} \geq \frac{1 - Ar^m}{1 - Br^m} - \frac{r}{1-r} \left(\frac{\gamma(1+c)}{1+cr} + \frac{\delta(1+k)}{1+kr} \right).$$

Следовательно, если $|z| \leq r$, где $r = r^*$ – корень уравнения (22), то $\operatorname{Re} z \frac{f'(z)}{f(z)} \geq \alpha$ и $f(z)$ в круге $|z| \leq r^*$ является звездообразной порядка α .

Покажем, что уравнение (22) на $(0; 1)$ имеет единственный корень. Действительно, не трудно установить, что функция

$$m_1(r) = \frac{1 - Ar^m}{1 - Br^m} - \alpha$$

монотонно убывает на $[0; 1)$ от $1 - \alpha$ до $(1 - A)/(1 - B) - \alpha$, а функции

$$m_2(r) = \frac{r}{1-r} \left(\frac{\gamma(1+c)}{1+cr} + \frac{\delta(1+k)}{1+kr} \right)$$

монотонно возрастают на $[0; 1)$ от 0 до $+\infty$. Поэтому уравнение $m_1(r) - m_2(r) = 0$ на $[0; 1)$ имеет единственный корень r^* .

По аналогии с доказательством теоремы 1 покажем, что радиус звездообразности увеличить нельзя.

Пусть m – нечетное. Для функции $f_0(z)$ из (19) в точке $z = -r$ получаем

$$\begin{aligned} z \frac{f'_0(z)}{f_0(z)} \Big|_{z=-r} &= \frac{1 + Az^m}{1 + Bz^m} + \frac{z}{1+z} \left(\frac{\gamma(1+c)}{1-cz} + \frac{\delta(1+k)}{1-kz} \right) \Big|_{z=-r} = \\ &= \frac{1 - Ar^m}{1 - Br^m} - \frac{r}{1-r} \left(\frac{\gamma(1+c)}{1+cr} + \frac{\delta(1+k)}{1+kr} \right) = \alpha. \end{aligned}$$

Если m – четное, то рассмотрим два случая.

а) Пусть $m = 2(2j - 1)$, $j \in \mathbb{N}$. Тогда для $z = ir$ имеем $z^m = -r^m$, $iz = -r$. Поэтому для функции $f_1(z)$ из (20) в точке $z = ir$ получаем

$$\begin{aligned} z \frac{f'_1(z)}{f_1(z)} \Big|_{z=ir} &= \left(\frac{1 + Az^m}{1 + Bz^m} + \frac{\gamma(1+c)iz}{(1+iz)(1-ciz)} + \frac{\delta(1+k)iz}{(1+iz)(1-kiz)} \right) \Big|_{z=ir} = \\ &= \frac{1 - Ar^m}{1 - Br^m} - \frac{r}{1-r} \left(\frac{\gamma(1+c)}{1+cr} + \frac{\delta(1+k)}{1+kr} \right) = \alpha. \end{aligned}$$

б) Пусть $m = 4j$, $j \in \mathbb{N}$. Тогда если обозначить $\varepsilon = i^{\frac{m+2}{m}}$, то для $z = -\varepsilon r$ имеем $z^m = -r^m$, $\varepsilon^{-1}z = -r$. Поэтому для функции $f_2(z)$ из (21) получаем

$$\begin{aligned}
\left| z \frac{f'_2(z)}{f_2(z)} \right|_{z=-\varepsilon r} &= \left(\frac{1 + Az^m}{1 + Bz^m} + \frac{\gamma(1+c)\varepsilon^{-1}z}{(1+\varepsilon^{-1}z)(1-c\varepsilon^{-1}z)} + \frac{\delta(1+k)\varepsilon^{-1}z}{(1+\varepsilon^{-1}z)(1-k\varepsilon^{-1}z)} \right) \\
&= \left(\frac{1 + Az^m}{1 + Bz^m} + \frac{\gamma(1+c)\varepsilon^{-1}z}{(1+\varepsilon^{-1}z)(1-c\varepsilon^{-1}z)} + \frac{\delta(1+k)\varepsilon^{-1}z}{(1+\varepsilon^{-1}z)(1-k\varepsilon^{-1}z)} \right) \Big|_{z=-\varepsilon r} = \\
&= \frac{1 - Ar^m}{1 - Br^m} - \frac{r}{1-r} \left(\frac{\gamma(1+c)}{1+cr} + \frac{\delta(1+k)}{1+kr} \right) = \alpha.
\end{aligned}$$

Следовательно, во всех случаях в условии звездообразности порядка α достигается знак равенства. Поэтому радиус звездообразности увеличить нельзя. Теорема 2 доказана.

5. Частные случаи

Следствие 1 ($a \rightarrow \infty$, $\gamma = 1$, $b \rightarrow \infty$, $\delta = 1$). Пусть $f(z)$ удовлетворяет условию

$$\operatorname{Re} \frac{f(z)}{g(z)} \geq 0, \operatorname{Re} \frac{g(z)}{h_m(z)} \geq 0, z \in E,$$

где функция $h_m(z)$ задается формулой (8). Тогда при $|z| = r$, $0 \leq r < 1$, имеют место точные оценки:

1) при $-1 \leq B < A \leq 1$, $B \neq 0$

$$\begin{aligned}
\left(\frac{1-r}{1+r} \right)^2 r(1 - Br^m)^{\frac{A-B}{mB}} &\leq |f(z)| \leq \left(\frac{1+r}{1-r} \right)^2 r(1 + Br^m)^{\frac{A-B}{mB}}, \\
\left| z \frac{f'(z)}{f(z)} - \frac{1 + Az^m}{1 + Bz^m} \right| &\leq \frac{4r}{1-r^2};
\end{aligned}$$

2) при $0 < A \leq 1$, $B = 0$

$$\begin{aligned}
\left(\frac{1-r}{1+r} \right)^2 r \exp\left(-\frac{A}{m} r^m\right) &\leq |f(z)| \leq \left(\frac{1+r}{1-r} \right)^2 r \exp\left(\frac{A}{m} r^m\right), \\
\left| z \frac{f'(z)}{f(z)} - 1 - Az^m \right| &\leq \frac{4r}{1-r^2}
\end{aligned}$$

и функция $f(z)$ является звездообразной порядка α в круге $|z| \leq r^*$, где r^* – единственный на $(0; 1)$ корень уравнения

$$\frac{1 - Ar^m}{1 - Br^m} - \alpha - \frac{4r}{1-r^2} = 0. \quad (23)$$

Следствие 2 ($a = 1$, $\gamma = 1$, $b \rightarrow \infty$, $\delta = 1$). Пусть $f(z)$ удовлетворяет условию

$$\left| \frac{f(z)}{g(z)} - 1 \right| \leq 1, \operatorname{Re} \frac{g(z)}{h_m(z)} \geq 0, z \in E,$$

где функция $h_m(z)$ задается формулой (8), и пусть $c = 0$, $k = 1$. Тогда при $|z| = r$, $0 \leq r < 1$, имеют место точные оценки:

1) при $-1 \leq B < A \leq 1$, $B \neq 0$

$$\frac{r(1-r)^2}{1+r} (1 - Br^m)^{\frac{A-B}{mB}} \leq |f(z)| \leq \frac{r(1+r)^2}{1-r} (1 + Br^m)^{\frac{A-B}{mB}},$$

$$\left| z \frac{f'(z)}{f(z)} - \frac{1 + Az^m}{1 + Bz^m} \right| \leq \frac{r(3+r)}{1-r^2};$$

2) при $0 < A \leq 1, B = 0$

$$\frac{r(1-r)^2}{1+r} \exp\left(-\frac{A}{m} r^m\right) \leq |f(z)| \leq \frac{r(1+r)^2}{1-r} \exp\left(\frac{A}{m} r^m\right),$$

$$\left| z \frac{f'(z)}{f(z)} - 1 - Az^m \right| \leq \frac{r(3+r)}{1-r^2}$$

и функция $f(z)$ является звездообразной порядка α в круге $|z| \leq r^*$, где r^* – единственный на $(0; 1)$ корень уравнения

$$\frac{1 - Ar^m}{1 - Br^m} - \alpha - \frac{r(3+r)}{1-r^2} = 0, \quad (24)$$

Следствие 3 ($a \rightarrow \infty, \gamma = 1, b \rightarrow \infty, \delta = 0$). Пусть $f(z)$ удовлетворяет условию

$$\operatorname{Re} \frac{f(z)}{h_m(z)} \geq 0, z \in E,$$

где функция $h_m(z)$ задается формулой (8). Тогда при $|z| = r, 0 \leq r < 1$, имеют место точные оценки:

1) при $-1 \leq B < A \leq 1, B \neq 0$

$$\frac{1-r}{1+r} r(1 - Br^m)^{\frac{A-B}{mB}} \leq |f(z)| \leq \frac{1+r}{1-r} r(1 + Br^m)^{\frac{A-B}{mB}},$$

$$\left| z \frac{f'(z)}{f(z)} - \frac{1 + Az^m}{1 + Bz^m} \right| \leq \frac{2r}{1-r^2};$$

2) при $0 < A \leq 1, B = 0$

$$\frac{1-r}{1+r} r \exp\left(-\frac{A}{m} r^m\right) \leq |f(z)| \leq \frac{1+r}{1-r} r \exp\left(\frac{A}{m} r^m\right),$$

$$\left| z \frac{f'(z)}{f(z)} - 1 - Az^m \right| \leq \frac{2r}{1-r^2}$$

и функция $f(z)$ является звездообразной порядка α в круге $|z| \leq r^*$, где r^* – единственный на $(0; 1)$ корень уравнения

$$\frac{1 - Ar^m}{1 - Br^m} - \alpha - \frac{2r}{1-r^2} = 0. \quad (25)$$

Следствие 4 ($a = 1, \gamma = 1, b \rightarrow \infty, \delta = 0$). Пусть $f(z)$ удовлетворяет условию

$$\left| \frac{f(z)}{h_m(z)} - 1 \right| \leq 1, z \in E,$$

где функция $h_m(z)$ задается формулой (8). Тогда при $|z| = r, 0 \leq r < 1$, имеют место точные оценки:

1) при $-1 \leq B < A \leq 1, B \neq 0$

$$(1-r)r(1 - Br^m)^{\frac{A-B}{mB}} \leq |f(z)| \leq (1+r)r(1 + Br^m)^{\frac{A-B}{mB}},$$

$$\left| z \frac{f'(z)}{f(z)} - \frac{1 + Az^m}{1 + Bz^m} \right| \leq \frac{r}{1-r};$$

2) при $0 < A \leq 1, B = 0$

$$(1-r)r \exp\left(-\frac{A}{m}r^m\right) \leq |f(z)| \leq (1+r)r \exp\left(\frac{A}{m}r^m\right),$$

$$\left| z \frac{f'(z)}{f(z)} - 1 - Az^m \right| \leq \frac{r}{1-r}$$

и функция $f(z)$ является звездообразной порядка α в круге $|z| \leq r^*$, где r^* – единственный на $(0; 1)$ корень уравнения

$$\frac{1 - Ar^m}{1 - Br^m} - \alpha - \frac{r}{1-r} = 0. \quad (26)$$

Примечание 1. При определенных значениях m, A, B из следствий 1–3 вытекают радиусы звездообразности порядка α для классов функций, найденные в статьях:

1) при $m = 2, A = 1, B = -1$, то есть, при $h_m(z) = \frac{z}{1-z^2}$, для классов

$$\begin{aligned} \mathcal{K}_1 &= \left\{ f(z): \operatorname{Re} \frac{f(z)}{g(z)} \geq 0, \operatorname{Re} (1-z^2) \frac{f(z)}{z} \geq 0 \right\}, \\ \mathcal{K}_2 &= \left\{ f(z): \left| \frac{f(z)}{g(z)} - 1 \right| \leq 1, \operatorname{Re} (1-z^2) \frac{f(z)}{z} \geq 0 \right\}, \\ \mathcal{K}_3 &= \{ f(z): \operatorname{Re} (1-z^2) f(z)/z \geq 0 \} \text{ из [7];} \end{aligned}$$

2) при $m = 1, A = 1, B = -1$, то есть при $h_m(z) = \frac{z}{(1-z)^2}$ для классов

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \left\{ f(z): \operatorname{Re} \frac{f(z)}{g(z)} \geq 0, \operatorname{Re} \frac{(1-z)^2}{z} g(z) \geq 0, z \in E \right\}, \\ \Pi_2 &= \left\{ f(z): \left| \frac{f(z)}{g(z)} - 1 \right| \leq 1, \operatorname{Re} \frac{(1-z)^2}{z} g(z) \geq 0, z \in E \right\} \text{ из [8];} \end{aligned}$$

3) при $m = 1, A = 0, B = -1$, или при $m = 1, A = 1, B = -1$, то есть при $h_m(z) = \frac{z}{1-z}$, или при $h_m(z) = \frac{z}{(1-z)^2}$ для классов

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_1 &= \left\{ f(z): \operatorname{Re} \frac{f(z)}{g(z)} \geq 0, \operatorname{Re} \frac{1-z}{z} g(z) \geq 0 \right\}, \\ \mathcal{F}_2 &= \left\{ f(z): \left| \frac{f(z)}{g(z)} - 1 \right| \leq 1, \operatorname{Re} \frac{1-z}{z} g(z) \geq 0 \right\}, \\ \mathcal{F}_3 &= \left\{ f(z): \operatorname{Re} \frac{1-z}{z} f(z) \geq 0 \right\}, \\ \mathcal{F}_4 &= \left\{ f(z): \operatorname{Re} \frac{(1-z)^2}{z} f(z) \geq 0, z \in E \right\} \text{ из [9];} \end{aligned}$$

4) при $m = 1, A = 1, B = 1/2$, то есть при $h_m(z) = z + \frac{z^2}{2}$ для классов

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_1 &= \left\{ f(z): \operatorname{Re} \frac{f(z)}{g(z)} \geq 0, \operatorname{Re} (g(z)/(z + z^2/2)) \geq 0 \right\}, \\ \mathcal{F}_2 &= \left\{ f(z): \left| \frac{f(z)}{g(z)} - 1 \right| \leq 1, \operatorname{Re} (g(z)/(z + z^2/2)) \geq 0 \right\}, \\ \mathcal{F}_3 &= \{ f(z): \operatorname{Re} (f(z)/(z + z^2/2)) \geq 0 \} \text{ из [10];} \end{aligned}$$

5) при $m = 1, A \rightarrow 0, B \rightarrow 0$, то есть при $h_m(z) = z$ для классов

$$\begin{aligned}\mathcal{F}_1 &= \left\{ f(z): \operatorname{Re} \frac{f(z)}{g(z)} \geq 0, \operatorname{Re} \left(\frac{g(z)}{z} \right) \geq 0 \right\}, \\ \mathcal{F}_3 &= \left\{ f(z): \left| \frac{f(z)}{g(z)} - 1 \right| \leq 1, \operatorname{Re} \left(\frac{g(z)}{z} \right) \geq 0 \right\}, \\ \mathcal{F}_5 &= \left\{ f(z): \left| \frac{f(z)}{g(z)} - 1 \right| \leq 1, g(z) \in S^o \right\} \text{ из [6].}\end{aligned}$$

Примечание 2. В силу общности класса $CCS_m^*(a, \gamma, b, \delta, A, B)$ и точности результатов теорем 1 и 2 данные теоремы в частных случаях приводят ко многим ранее опубликованным результатам, в том числе и отличным от приведенных в примечании 1. Например, при $m = 1, A = 1, B = 1/2, b \rightarrow \infty, \delta = 1$ из теоремы 2 вытекает

Следствие 5. Пусть $f(z), g(z) \in \mathcal{N}$, $\left| \left(\frac{f(z)}{g(z)} \right)^{1/\gamma} - a \right| \leq a$ и $\operatorname{Re} \frac{g(z)}{z} \geq 0$. Тогда точный радиус звездообразности r^* функции $f(z)$ определяется как единственный на $(0; 1)$ корень уравнения

$$cr^3 + [1 + \gamma + (2 + \gamma)c]r^2 - [(1 - \gamma)c - 2 - \gamma]r - 1 = 0,$$

где $c = 1 - 1/a$.

При $\gamma = 1$ следствие 5 дает радиусы звездообразности $r^* = \sqrt{5} - 2$ и $r^* = (\sqrt{17} - 3)/4$, соответствующие случаям $a \rightarrow \infty$ и $a = 1$, впервые полученные в [17].

При $m = 1, A = 1, B = 1/2, b \rightarrow \infty, \delta = 0$ из теоремы 2 вытекает

Следствие 6. Пусть $f(z) \in \mathcal{N}$, $\left| \left(\frac{f(z)}{z} \right)^{1/\gamma} - a \right| \leq a, a > \frac{1}{2}, 0 < \gamma \leq 1, z \in E$. Тогда точный радиус звездообразности r^* функции $f(z)$ определяется по формуле

$$r_0 = \begin{cases} \frac{1 + \gamma(2a - 1) - \sqrt{(1 + \gamma(2a - 1))^2 + 4a(a - 1)}}{2(1 - a)}, & a \neq 1; \\ (1 + \gamma)^{-1}, & a = 1. \end{cases}$$

Для случая $\gamma = 1$ следствие 6 получено в [5, теорема 2]. При $\gamma = 1, a \rightarrow \infty$ или при $\gamma = 1, a = 1$ из следствия 6 вытекают два ранних результата Т.Х. МакГрегора [3] $\operatorname{Re} \frac{f(z)}{z} \geq 0 \Rightarrow r^* = \sqrt{2} - 1$ и [4] $\left| \frac{f(z)}{z} - 1 \right| \leq 1 \Rightarrow r^* = 1/2$.

При $m = 2, A = 1, B = -1, b \rightarrow \infty, \delta \rightarrow 0$ из теоремы 2 вытекает

Следствие 7. Пусть функция $f(z)$ из $\mathcal{N}$ удовлетворяет условию

$$\left| \left(\frac{1 - z^2}{z} f(z) \right)^{1/\gamma} - a \right| \leq a, \quad a > \frac{1}{2}, 0 < \gamma \leq 1.$$

Тогда $f(z)$ является звездообразной в круге $|z| \leq r^*$, где r^* определяется как единственный на $(0; 1)$ корень уравнения

$$(1 - r^2)(1 - r)(1 + cr) - \gamma(1 + c)r(1 + r^2) = 0.$$

Из следствия 7 вытекает целый ряд результатов, в том числе и ранее известных.

1) $\gamma = 1$, то есть $\left| \frac{1 - z^2}{z} f(z) - a \right| \leq a, a > \frac{1}{2} \Rightarrow r^*$ – единственный на $(0; 1)$ корень уравнения $(1 - r^2)(1 - r)(1 + (1 - 1/a)r) - (1 + r^2)(2 - 1/a)r = 0$;

2) $a \rightarrow \infty$, то есть $\left| \arg \left[\frac{1-z^2}{z} f(z) \right] \right| \leq \gamma \frac{\pi}{2}$, $0 < \gamma \leq 1 \Rightarrow r^*$ – единственный на $(0;1)$ корень уравнения $r^4 - 2\gamma r^3 - 2r^2 - 2\gamma r + 1 = 0$;

3) $\gamma = 1$, $a \rightarrow \infty$, то есть $\operatorname{Re} \frac{1-z^2}{z} f(z) \geq 0$ ($f(z)$ является типично-вещественной) $\Rightarrow$

$$r^* = \frac{1}{2} \left(\sqrt{5} + 1 - \sqrt{2(\sqrt{5} + 1)} \right).$$

Заметим, что следствие 7 вытекает из теоремы 4 в [20], случай 3) рассмотрен в [21, 22].

Заключение

В статье получили дальнейшее развитие идеи, связанные с исследованием различных подклассов класса почти звездообразных функций, введенного М.О. Ридом в [2]. На основе нового подхода, связанного с применением опорной функции общего вида, введен новый подкласс класса почти звездообразных функций из [2] и на его базе определен новый подкласс класса дважды почти звездообразных функций, обобщающий различные классы почти звездообразных и дважды почти звездообразных функций из статей [2–11].

Все это позволило систематизировать ряд сходных разрозненных результатов данного направления и получить обобщенные результаты, включающие как частные случаи многие результаты отмеченных выше статей.

Доказанные в статье теоремы и следствия являются новыми результатами в теории экстремальных задач для подклассов аналитических в единичном круге функций.

Примененные в статье подходы и оценки могут быть также использованы для нахождения радиусов звездообразности введенного в статье класса дважды почти звездообразных функций относительно других подклассов класса S^* , связанных с лемниской Бернулли, кардиоидой, луной, синусоидальной или экспоненциальной функцией.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Авхадиев Ф.Г., Аксентьев Л.А. Основные результаты в достаточных условиях однолиственности аналитических функций // УМН. – 1975. – Т. 30. – Вып. 4(184). – С. 3–60. <https://www.mathnet.ru/links/e7c4d119db41755ee64c4677f4c40f9b/rm4232.pdf>.
- 2 Reade M.O. On close-to-close univalent functions // Michigan Math. J. –1955. – No. 3. – P. 59–62.
- 3 MacGregor T.H. The radius of univalence of certain analytic functions / Proc. Amer. Math. Soc. – 1963. – Vol. 14. – 514–520.
- 4 MacGregor T.H. The radius of univalence of certain analytic functions / II. Proc. Am. Math. Soc. – 1963. – Vol. 14. – P. 521–524. <http://dx.doi.org/10.1090/s0002-9939-1963-0148892-5>.
- 5 Chichra P. On the radii of starlikeness and convexity of certain classes of regular functions // J. of the Australian Math. Soc. – 1972. – Vol. 13. – No. 2. – P. 208–218. <https://doi.org/10.1017/S1446788700011290>.
- 6 Ali R.M., Jain N.K., Ravichandran V. On the radius constants for classes of analytic functions // arXiv:1207.4529v1 [math.CV]. – 2012. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1207.4529>.
- 7 Khatter K., Lee S. K., Ravichandran V. Radius of starlikeness for classes of analytic functions // arXiv preprint arXiv:2006.11744. – 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.11744>.
- 8 El-Faqeer A.S.A., Mohd M.H., Ravichandran V., Supramaniam S. Starlikeness of certain analytic functions // arXiv preprint arXiv:2006.11734. – 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.11734>.
- 9 Sebastianc A., Ravichandran V. Radius of starlikeness of certain analytic functions // Math. Slovaca. – 2021. – Vol. 71. – No. 1. – P. 83–104. <https://doi.org/10.1515/ms-2017-0454>.
- 10 Kanaga R., Ravichandran V. Starlikeness for Certain Close-to-Star Functions // Hacet. J. Math. Stat. – Vol. 50. – No. 2. – P. 414–432. <https://doi.org/10.15672/hujms.702703>.
- 11 Sharma M., Jain N.K., Kumar S. Constrained radius estimates of certain analytic functions // arXiv:2305.16210v1 [math.CV] – 2023.
- 12 Rogosinski W. Über Positive Harmonische Entwicklungen und typisch-reelle Potenzreihen // Math. Zeitschr. – 1932. – Vol. 35. – No.1. – P. 93–121. <https://doi.org/10.1007/BF01186552>.

- 13 Майер Ф.Ф., Тастанов М.Г., Утемисова А.А., Ысмағұл Р.С. Точные оценки регулярных функций и радиусы выпуклости и звездообразности некоторых классов звездообразных и почти звездообразных функций. // Вестник Казахстанско-Британского технического университета. – 2024. – Т. 21. – №2. – С.127–138. <https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-127-138>.
- 14 Janowski J. Some extreme problems for certain families of analytic functions // *Ann. Polon. Math.* – 1973. – Vol. 28. – P. 297–326. <https://doi.org/10.4064/ap-28-3-297-326>
- 15 Anh V.V., Tuan P.D. Extremal problems for a class of functions of positive real part and applications // *Austral. Math. Soc. (Series A)*. 1986. – Vol. 41. – P. 152–164. <https://doi.org/10.1017/S1446788700033577>.
- 16 Shah G.M. On the univalence of some analytic functions // *Pacific J. Math.* – 1972. – Vol. 43. – No. 1. – P. 239–250. <https://doi.org/10.2140/pjm.1972.43.239>.
- 17 Ratti J.S. The radius of univalence of certain analytic functions // *Math. Z.* – 1968. – Vol. 107. – P. 241–248.
- 18 Anh V.V., Tuan P.D. On starlikeness and convexity of certain pacific // *Journal of Mathematics.* – 1977. – Vol. 69. – No. 1. – P. 1–9. <https://doi.org/10.2140/PJM.1977.69.1>
- 19 Robertson M.S. Certain classes of starlike functions // *Michigan Math. J.* – 1985. – Vol.32. – No. 2. – P. 135–140.
- 20 Maiyer F.F., Tastanov M.G., Utemissova A.A., Kenzhebekova D.S., Temirbekov N.M. Estimates and radii of convexity in some classes of regular functions / *WSEAS Transactions on Mathematics.* – 2024. – Vol. 23. – Art. #18. – P. 446–457. E-ISSN: 2224-2880. <https://doi.org/10.37394/23206.2024.23.47>.
- 21 Гельфер С.А. Типично вещественные функции // *Матем. сб.* – 1964. – Т. 64 (106). – № 2. – С. 171–184. https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=sm&paperid=4441&option_lang=rus
- 22 Libera R.J. Some radius of convexity problems // *Duke Math. J.* – 1964. – Vol. 31. – №1. – P. 143–158. <https://doi.org/10.1215/S0012-7094-64-03114-X>

REFERENCES

- 1 Avkhadiyev F.G., Aksent'ev L.A. The main results on sufficient conditions for an analytic function to be schlicht. *Russian Mathematical Surveys*, 1975, vol. 30, no. 4, pp. 1–63. https://www.mathnet.ru/links/f5a3866220d851a8713bf8b1673e35c7/rm4232_eng.pdf
- 2 Reade M.O. (1955) On close-to-close univalent functions. *Michigan Math. J.*, vol. 3, pp. 59–62.
- 3 MacGregor T.H. (1963) The radius of univalence of certain analytic functions. *Proc. Amer. Math. Soc.*, vol. 14, pp. 514–520.
- 4 MacGregor T.H. (1963) The radius of univalence of certain analytic functions, II. *Proc. Am. Math. Soc.*, vol. 14, pp. 521–524. <http://dx.doi.org/10.1090/s0002-9939-1963-0148892-5>.
- 5 Chichra P. (1972) On the radii of starlikeness and convexity of certain classes of regular functions. *J. of the Australian Math. Soc.*, vol. 13, no. 2, pp. 208–218 <https://doi.org/10.1017/S1446788700011290>.
- 6 Ali R.M., Jain N.K. and Ravichandran V. (2012) On the radius constants for classes of analytic functions. *arXiv:1207.4529v1*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1207.4529>.
- 7 Khatter K., Lee S.K. and Ravichandran V. (2020) Radius of starlikeness for classes of analytic functions. *arXiv preprint arXiv:2006.11744*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.11744>.
- 8 El-Faqeer A.S.A., Mohd M.H., Ravichandran V. and Supramaniam S. (2020) Starlikeness of certain analytic functions. *arXiv preprint arXiv:2006.11734*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.11734>.
- 9 Sebastianc A. and Ravichandran V. (2021) Radius of starlikeness of certain analytic functions. *Math. Slovaca*, vol. 71, no. 1, pp. 83–104. <https://doi.org/10.1515/ms-2017-0454>.
- 10 Kanaga R. and Ravichandran V. (2021). Starlikeness for certain close-to-star functions. *Hacet. J. Math. Stat.*, vol. 50, no. 2, pp. 414–432. <https://doi.org/10.15672/hujms.702703>.
- 11 Sharma M., Jain N.K. and Kumar S. (2023) Constrained radius estimates of certain analytic functions. *arXiv:2305.16210v1*.
- 12 Rogosinski W. (1932) Über positive harmonische entwicklungen und typisch-reelle potenzreihen. *Math. Zeitschr.*, vol. 35, no. 1, pp. 93–121. <https://doi.org/10.1007/BF01186552>.
- 13 Maiyer F.F., Tastanov M.G., Utemissova A.A. and Ysmagul R.S. (2024) Exact estimates of regular functions and radii of convexity and starlikeness of some classes of starlike and close-to-starlike functions. *Herald of the Kazakh-British technical university*, vol. 21, no. 2, pp. 127–138 [In Russian]. <https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-127-138>.

- 14 Janowski J. (1973) Some extreme problems for certain families of analytic functions. *Ann. Polon. Math.*, vol. 28, pp. 297–326. <https://doi.org/10.4064/ap-28-3-297-326>.
- 15 Anh V.V. and Tuan P.D. (1986) Extremal problems for a class of functions of positive real part and applications. *Austral. Math. Soc. (Series A)*, vol. 41, pp. 152–164. <https://doi.org/10.1017/S1446788700033577>.
- 16 Shah G.M. (1972) On the univalence of some analytic functions. *Pacific J. Math.*, vol. 43, no. 1, pp. 239–250. <https://doi.org/10.2140/pjm.1972.43.239>.
- 17 Ratti J.S. (1968) The radius of univalence of certain analytic functions. *Math. Z.*, vol. 107, pp. 241–248.
- 18 Anh V.V. and Tuan P.D. (1977) On starlikeness and convexity of certain pacific. *J. of Math.*, vol. 69, no. 1, pp. 1–9. <https://doi.org/10.2140/PJM.1977.69.1>.
- 19 Robertson M.S. (1985) Certain classes of starlike functions. *Michigan Math. J.*, vol. 32, no. 2, pp. 135–140.
- 20 Maiyer F.F., Tastanov M.G., Utemissova A.A., Kenzhebekova D.S. and Temirbekov N.M. (2024) Estimates and radii of convexity in some classes of regular functions. *WSEAS Transactions on Mathematics*, E-ISSN: 2224-2880, vol. 23, Art. #18, pp. 446–457. <https://doi.org/10.37394/23206.2024.23.47>.
- 21 Gelfer S.A. (1964) Tipichno veshhestvennyye funktsii [Typically real functions]. *Matem. sb.*, vol. 64(106), no. 2, pp. 171–184 [In Russian]. <https://www.mathnet.ru/rus/sm4441>.
- 22 Libera R.J. (1964) Some radius of convexity problems. *Duke Math. J.*, vol. 31, no. 1, pp. 143–158. <https://doi.org/10.1215/S0012-7094-64-03114-X>.

^{1*}Майер Ф.Ф.,

физ.-мат.ф.к., профессор, ORCID ID: 0000-0002-2278-2723,

*e-mail: maiyer@mail.ru

¹Тастанов М.Г.,

физ.-мат.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

¹Байманкулов А.Т.,

физ.-мат.ф.д., доцент, ORCID ID: 0000-0002-6435-9560,

e-mail: g_talgat_a@mail.ru

¹Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, Қостанай қ., Қазақстан

ТІРЕК ФУНКЦИЯСЫНЫҢ ЖАЛПЫ КӨРІНІСІ НЕГІЗІНДЕ ҚҰРЫЛҒАН ЖҰЛДЫЗ ТӘРІЗДІ ФУНКЦИЯЛАРДЫҢ КЛАСТАРЫ

Аңдатпа

Мақаланың мақсаты – белгілі бір экстремалды есептер шеңберіне біртұтас көзқарасты көрсете отырып, екі рет жұлдыз тәрізді функциялардың үлкен класын ұсыну және зерттеу. Мақалада тірек функциясының жалпы көрінісі ретінде жұлдыз тәрізді функция анықталып, оның негізінде жұлдыз тәрізді және екі есе жұлдыз тәрізді функциялар кластарын құру мүмкіндігі талқыланады. Үш параметрден тұратын жалпы типтегі тірек функциясына және аналитикалық функциялардың жаңа бағалауларына сүйене отырып, соңғы жылдары жарық көрген бірқатар мақалаларда қарастырылған жұлдыз тәрізді және екі есе жұлдыз тәрізді функциялар кластарын жалпылау ұсынылады. Бұл класс типтік нақты функциялардың жалпыланған кластарын да қамтиды. Мақалада енгізілген функциялар класының қасиеттері жан-жақты зерттеліп, өсу теоремасы, функцияның логарифмдік туынды модулін бағалау қолданылып, жұлдыздық радиус есептелді. Арнайы жағдайларда бұл зерттеу бұрын белгілі нәтижелерге және жаңа нәтижелерге әкеледі. Мақалада ұсынылған барлық нәтижелер дәлелденген.

Тірек сөздер: бір жапырақты функциялар, жұлдыз тәрізді функциялар, әдепкі нақты функциялар, жұлдыз тәрізді радиустар.

^{1*}**Maiyer F.F.,**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, 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**Baimankulov A.T.,**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,

ORCID ID: 0000-0002-6435-9560,

e-mail: g_talgat_a@mail.ru

¹Baitursynuly Kostanay Regional University, Kostanay, Kazakhstan

CLASSES OF CLOSE-TO-STARLIKE FUNCTIONS BASED ON THE REFERENCE FUNCTION OF A GENERAL FORM

Abstract

The purpose of the article is to introduce and explore a wide class of doubly close-to-starlike functions, while demonstrating a unified approach to solving a certain range of extreme problems. The article defines a reference function of a general form – a starlike function, on the basis of which classes of close-to-starlike and doubly close-to-starlike functions can be constructed. On the basis of a general support function containing three parameters and new estimates of analytical functions, a generalization of various classes of close-to-starlike and doubly close-to-starlike functions is introduced, considered in a number of articles published in recent years, including the introduced class contains a generalized class of typically real functions. The properties of the introduced class of functions are studied, for example, the growth theorem, estimates of the modulus of the logarithmic derivative of the function and the radius of starlikeness are obtained, in particular cases leading to previously known results and representing new results. All the results of the article are accurate.

Key words: univalent functions, starlike functions, close-to-starlike functions, typically real functions, radii of starlikeness.

Дата поступления статьи в редакцию: 14.10.2024

**ФИЗИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР
PHYSICAL SCIENCES
ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ**

УДК 621.319.4, 661.666.2
МРНТИ 45.35.39

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-186-195>

^{1,2*}**Дүйсенбек Ә.Н.,**

PhD докторант, ORCID ID: 0009-0007-5211-6098,
e-mail: aselka_star@mail.ru

^{1,2}**Бейсенова Е.Е.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0392-6015,
e-mail: mamyrbayeva.e@gmail.com

^{2,3}**Бейсенов Р.Е.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-6880-7693,
e-mail: renat7787@mail.ru

^{1,3,4}**Асқарұлы Қ.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-8998-0409,
e-mail: k.askaruly@gmail.com

^{2,4}**Приходько Н.Г.,**

PhD, д.х.н., профессор, ORCID ID: 0000-0001-7733-0903,
e-mail: nik99951@mail.ru

⁵**Туганбаев А.Б.,**

главный инженер,
e-mail: tatek.oid@mail.ru

¹КазННТУ им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

²Институт проблем горения, г. Алматы, Казахстан

³Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Казахстан

⁴Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, г. Алматы, Казахстан

⁵Талдыкорганская акционерная транспортно-электросетевая компания,
г. Талдыкорган, Казахстан

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ
С ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ
ГРАФЕНОПОДОБНОГО УГЛЕРОДА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ОТХОДОВ ЧАЯ**

Аннотация

В данной статье представлены результаты исследования по изготовлению активного материала для электродов суперконденсатора из графеноподобного углерода, полученного из чайных отходов карбони-

заций при температуре 550 °С с последующей термохимической активацией с гидроксидом калия в соотношении 1:4 при температуре 850 °С в кварцевой трубчатой печи. Структура и морфология полученного пористого графеноподобного углерода на основе чайных отходов исследована на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ), метода Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ), рентгеновской дифракции и рамановской спектроскопии. Площадь поверхности активированного пористого графеноподобного углерода из чайных отходов составила 2407 м²/г. Электрохимические и вольтамперные характеристики собранного двухслойного суперконденсатора с электродом из ГПУ-ЧО были определены с использованием потенциостат-гальваностата и исследованы на электрохимической рабочей станции Elins P-40X. Полученные результаты показали высокую удельную емкость в 182 Ф/г и кулоновскую эффективность в 96% при плотности тока 2 А/г, также материал продемонстрировал низкое сопротивление переносу заряда, составляющее около 1,5 Ом, что подчеркивает эффективность использования графеноподобного углерода, полученного из отходов чая, демонстрируя его потенциал в качестве многообещающего материала для суперконденсаторов.

Ключевые слова: суперконденсатор, электрод, графеноподобный углерод, активированный уголь, карбонизация, термохимическая активация.

Введение

В современном мире, где технологии стремительно развиваются и возрастает потребность в эффективном хранении энергии, суперконденсаторы становятся перспективным решением для энергетических систем [1–5]. Одним из ключевых компонентов суперконденсаторов являются электроды, исследование и усовершенствование которых направлены на повышение производительности и эффективности устройств. Наиболее широко исследуемыми электродными материалами для суперконденсаторов являются графен и активированный уголь (АУ) [6–10]. Однако несмотря на высокие характеристики графена, его промышленное применение ограничено из-за высокой стоимости и сложности повторного использования тонких графитовых слоев. Использование пористого графеноподобного углерода (ГПУ), полученного из чайных отходов, в качестве базового компонента для электродов суперконденсаторов предоставляет двойные преимущества [11]. ГПУ из чайных отходов обладает значительной удельной поверхностью, что обеспечивает большее количество мест для хранения заряда и способствует высокой удельной емкости. Материал также демонстрирует низкое сопротивление переносу заряда R_{CT} , что улучшает общую электрохимическую производительность суперконденсаторов. Дополнительно использование чайных отходов для производства ГПУ не только снижает стоимость производства, но и способствует устойчивому развитию, сокращая количество бытовых отходов. Таким образом, ГПУ из чайных отходов сочетает в себе высокую эффективность с доступностью сырья, что делает его привлекательным для широкого применения в промышленности. В данной работе представлен синтез графеноподобного углерода из чайных отходов методом активации с использованием КОН, а также проанализированы электрохимические характеристики полученного материала в качестве активного компонента для высокоэффективных суперконденсаторов.

Материалы и методы

Чайные отходы были получены от компании ТОО «RG Brands Казахстан», которая производит чай под торговой маркой «Пиала». Это казахстанский производитель, и город производства – Алматы. Перед синтезом чайные отходы (ЧО) тщательно промывали горячей деионизированной водой, затем сушили в сушильном шкафу при температуре 120 °С в течение 8 часов. При карбонизации готовую массу нагревали в кварцевой трубчатой печи при 550 °С в течение 100 минут, прокаливали при 550 °С еще 100 минут, а затем масса остывала до комнатной температуры. При термохимической активации карбонизированную массу смешивают с КОН, который выступает в качестве активирующего агента, в соотношении 1:4. Это соотношение обеспечивает оптимальное развитие пористой структуры, напрямую влияющей на

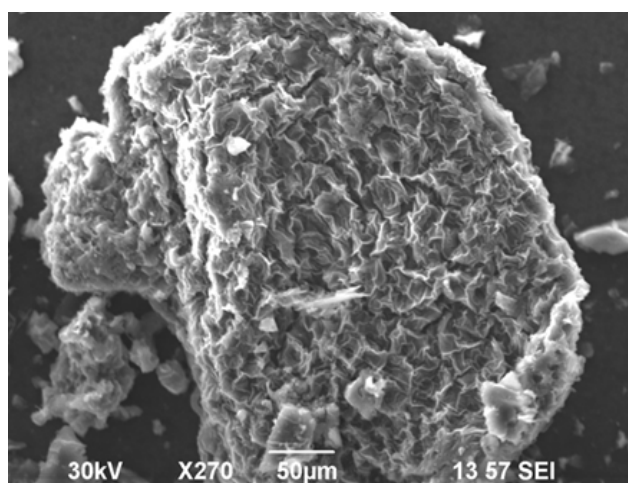
удельную поверхность и электрохимические свойства материала [8]. Готовую перемешанную массу нагревали при 850 °С в течение 120 минут, прокаливали при 850 °С в течение 90 минут и остывала до комнатной температуры. Активированный уголь кипятили в деионизированной воде и промывали 5 раз от соединений калия, значение pH составляло 6. Образовавшийся графеноподобный углерод на основе чайных отходов назвали ГПУ-ЧО. Пористый графеноподобный углерод, полученный из биомассы чая, был подвергнут характеристике при помощи различных методов анализа, включая сканирующую электронную микроскопию (SEM, JEOL JSM-6490 LA), рамановскую спектроскопию (NTEGRA, 473 нм) и рентгеновский дифрактометр X'Pert MPD PRO с использованием источника излучения Cu K α . Эти методы использовались для изучения кристаллической структуры образца ГПУ-ЧО. Удельную поверхность (SSA) измеряли с использованием анализатора СОРБОМЕТР-М по методу БЭТ (Брунауэра – Эммета – Теллера). Перед измерением образцы были дегазированы при температуре 150–300 °С в течение нескольких часов под вакуумом, чтобы удалить адсорбированные вещества. Затем проводилась адсорбция азота при температуре 77 К. Удельная площадь поверхности была рассчитана по уравнению БЭТ на основе изотермы адсорбции в диапазоне давлений от 0,05 до 0,3 P/P₀.

В электрохимических измерениях использовалась двухэлектродная схема, в которой был собран симметричный прототип суперконденсатора. Измерения электрохимических характеристик проводились для электродов, созданных на основе активного материала, испытания выполнялись на электрохимической рабочей станции Elins P-40X. ГПУ-ЧО перемешивали с суспензией, используя N-метил-2-пирролидинон (NMP, Sigma-Aldrich, 99.5%) в качестве растворителя, содержащей 70% ГПУ-ЧО, 10% поливинилфторида (Arkema HSV900, Sigma-Aldrich, 99%) и 20% токопроводящей сажи (TIMICAL SUPER C45, Sigma-Aldrich, 99%). В качестве токоуловителя в 6 М электролите КОН (диапазон напряжений 0–1 В) использовалась титановая фольга (1 см²), а в качестве сепаратора использовалась фильтровальная бумага. Перед нанесением электродного материала титановая фольга обрабатывалась механически с обеих сторон для создания шероховатой поверхности и увеличения адгезии к формирующемуся слою. Нанесенный слой суспензии сушился в вакууме при температуре 120 °С в течение 10 часов. Массовая нагрузка активного материала на электроды составила 0,00395 г. Этот параметр указывает на количество активного вещества, нанесенного на электрод.

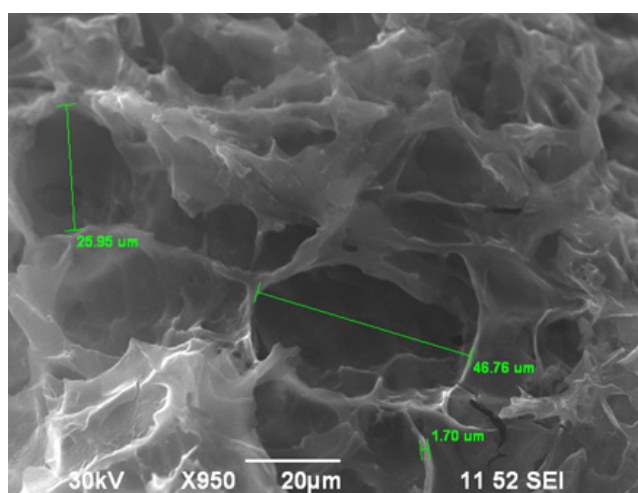
Результаты и обсуждение

На рисунке 1 показаны СЭМ-изображения карбонизированного ЧО (а) при 550 °С и активированного ЧО (б) при 850 °С с помощью КОН в качестве активатора [12]. В микроструктуре карбонизированных отходов чая наблюдается образование трехмерного пористого углерода с хорошо развитой поверхностью, характеризующегося каркасом из двумерных углеродных стенок высокой плотности. Пористость карбонизированного образца в расчете на объем материала количество частиц ограничено. Активированные отходы чая, в свою очередь, образуют отчетливую взаимосвязанную структуру и представляют собой хорошо развитый каркас из многослойного графеноподобного углерода.

Рентгеноструктурный анализ для ГПУ-ЧО показывает широкие пики с максимальной интенсивностью 2 тета при 24,26° (002) и 43,81° (101), характерные для графита (рисунок 2). Пиковая интенсивность широкой линии на плоскости (002) для ГПУ-ЧО предполагает наличие аморфного или наноструктурированного углерода [13, 14].



а



б

Рисунок 1 – СЭМ снимки ЧО: а) карбонизованный, б) ГПУ-ЧО

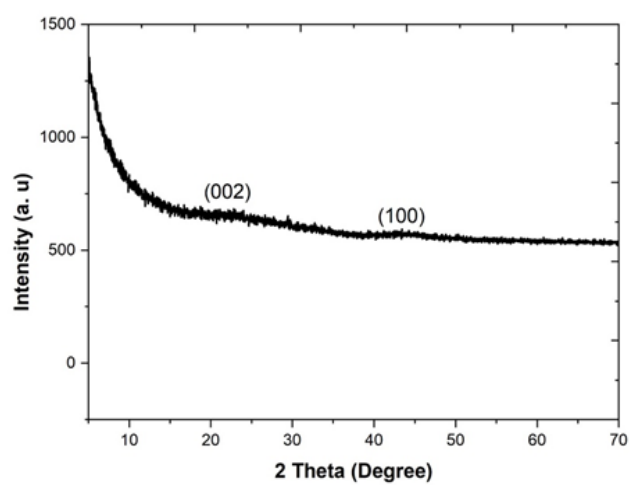


Рисунок 2 – Рентгеноструктурный анализ для ГПУ-ЧО

Результат рамановской спектроскопии для ГПУ-ЧО показан на рисунке 3. Спектр комбинационного рассеяния ГПУ-ЧО показывает стабильное присутствие пика D, расположенного в диапазоне $1355\text{--}1360\text{ см}^{-1}$, и пика G в диапазоне $1580\text{--}1590\text{ см}^{-1}$. Колебательные моды спектра включают полосу G, указывающую на присутствие sp^2 -гибридизированных атомов углерода, с полосой D, отражающей sp^3 или дефекты структуры, обычно нормальные для трехмерного активированного угля, полученного из биомассы [15, 16].

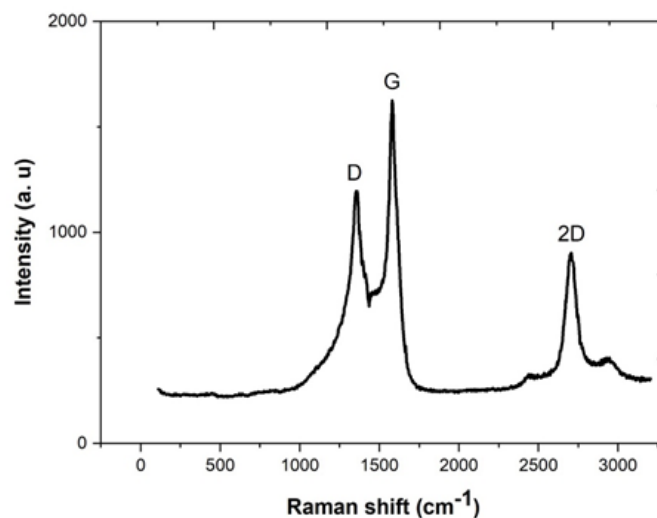


Рисунок 3 – Спектр Рамана для ГПУ-ЧО

Характерной особенностью образца ГПУ-ЧО, прошедшего термическую обработку с КОН, является наличие 2D-пики высокой интенсивности. При карбонизации ЧО при 550 °C биомасса в основном состоит из аморфного углерода sp^3/sp^2 , который после химической активации при 850 °C образует качественные многослой графеноподобного углерода $I_{2D}/I_G=0,55$.

Площадь поверхности активированного ГПУ-ЧО составила $2407\text{ м}^2/\text{г}$, при этом для карбонизованного ЧО составляет $10,41\text{ м}^2/\text{г}$. Эти параметры были определены через адсорбцию газа и анализ методом БЭТ (Брунауэра – Эммета – Теллера). Активация биомассы чайных отходов приводит к улучшению развития поверхности и пористости материала, которые также видны на СЭМ снимках по сравнению с карбонизованными ЧО.

Симметричные суперконденсаторы изготавливаются с использованием 6 М водного раствора КОН в качестве электролита для оценки емкостных свойств материалов. Кривые циклической вольтамперометрии (ЦВА) ГПУ-ЧО имеют более нормативную форму с увеличением скорости сканирования (диапазон потенциалов 0 и 1 В) от 20 мВ/с до 160 мВ/с (рисунок 4), демонстрируя довольно хорошее поведение при хранении суперконденсатора с двойным электрическим слоем [17].

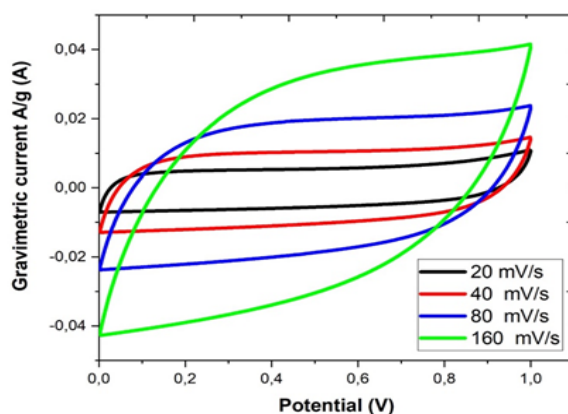


Рисунок 4 – Кривые циклической вольтамперометрии для ГПУ-ЧО

Профили гальваностатического заряда-разряда (ГЗР) ГПУ-ЧО сохраняют типичную симметричную треугольную форму с плотностью тока, варьирующейся от 100 мА/г до 2000 мА/г (рисунок 5), что указывает на хорошую электрохимическую обратимость.

Удельная емкость двухэлектродной системы рассчитывалась из профилей ГЗР с использованием следующего уравнения:

$$C_s = \frac{2 \times I \times t}{m \times \Delta V}$$

где C_s – удельная емкость (Ф/г), I – ток в амперах (А), m – масса активного материала, ΔV – приложенное напряжение и t – время разряда в секундах.

Удельные емкости ГПУ-ЧО составили при плотности тока 0,1; 0,5; 1 и 2 А/г, показали значения 214, 194, 182 и 168 Ф/г соответственно. Полученные ГЗР характеристики демонстрируют высокую кулоновскую эффективность суперконденсатора, что отражается в удельной емкости, достигающей $(t_d/t_c)=96\%$ (t_d – время разряда, t_c – время заряда) при плотности тока 2 А/г. Емкостные характеристики ГПУ-ЧО весьма примечательны по сравнению с различными типами симметричных суперконденсаторов на основе углерода, такими как пористый углерод, легированные азотом (PNHCS) [18], иерархический пористый углерод, полученный из арахисовых отрубей (PB-НТС) [19], полученные из бактериальной целлюлозы взаимосвязанные сети мезо-микропористых углеродных нановолокон (CN-BC) [20], пористый углерод, полученный из биомассы, легированный азотом (NHPC) [21].

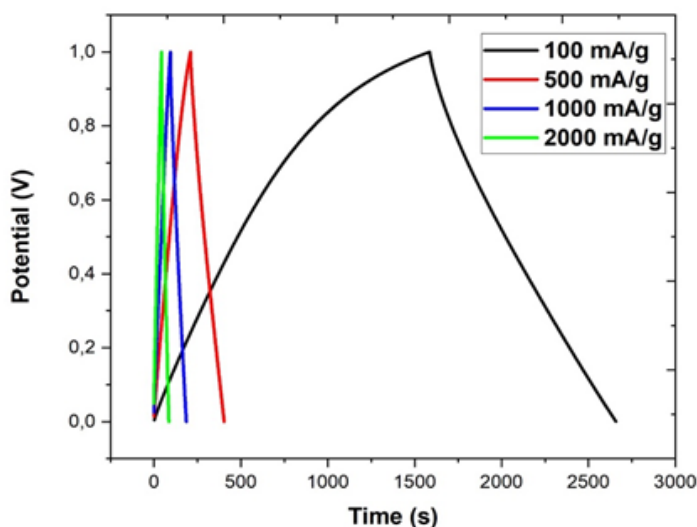


Рисунок 5 – Кривые гальваностатического заряда-разряда для ГПУ-ЧО

Профиль электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС) ГПУ-ЧО представлен на рисунке 6. Падение внутреннего сопротивления во время кривой разряда связано с сопротивлением и электропроводностью материала. Сопротивление переноса заряда ($R_{ct} \sim 1,5$ Ом) ГПУ-ЧО меньше, что указывает на повышенную электропроводность и свойства обратимого суперконденсатора [22, 23].

Стабильные характеристики ГПУ-ЧО объясняются не только обильной пористой структурой, но и улучшенной проводимостью, что подтверждается спектрами электрохимического импеданса.

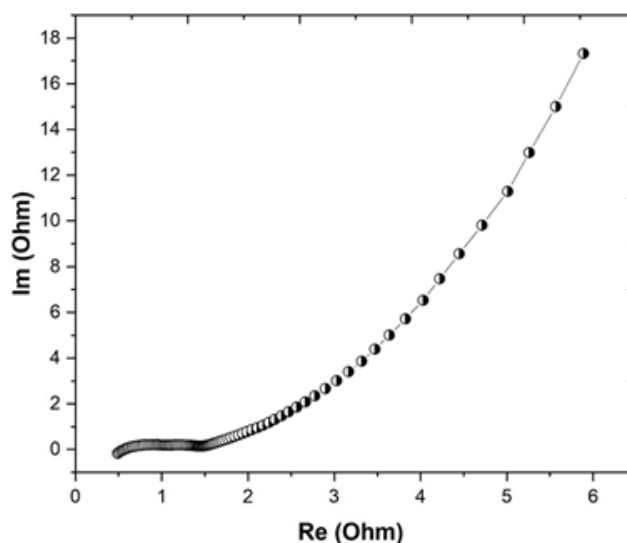


Рисунок 6 – Спектр электрохимического импеданса для ГПУ-ЧО

Заключение

Графеноподобный углерод, полученный из чайных отходов, продемонстрировал выдающиеся характеристики, подтверждающие его потенциал в технологиях хранения энергии. ГПУ-ЧО подвергли физической и химической активации, в результате чего удельная поверхность карбонизированного чайного отхода составила $10 \text{ м}^2/\text{г}$, а для химически активированного угля этот показатель достиг $2407 \text{ м}^2/\text{г}$. Материал также показал низкое сопротивление переносу заряда (R_{CT}) около $1,5 \text{ Ом}$. Суперконденсатор на основе графеноподобного углерода из чайных отходов продемонстрировал емкость 182 Ф/г при плотности тока 1 А/г . Эти улучшенные характеристики связаны с высокотемпературной обработкой КОН, которая способствует развитию микропористой структуры. Результаты подчеркивают важность термохимического синтеза для адаптации углеродных материалов к электрохимическим применениям, открывая новые перспективы для дальнейших исследований.

Благодарность

Работа выполнена в рамках программы «Грантовое финансирование научных исследований» AP15473245 Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

REFERENCES

- 1 Frackowiak E., Abbas Q., Béguin F. Carbon/carbon supercapacitors, *Journal of Energy Chemistry*, 2013, vol. 22, pp. 226–240. [https://doi.org/10.1016/S2095-4956\(13\)60028-5](https://doi.org/10.1016/S2095-4956(13)60028-5).
- 2 Gao Y., Zhou Y.S., Qian M., He X.N., Redepenning J., Goodman P., Li H.M., Jiang L., Lu Y.F. Chemical activation of carbon nano-onions for high-rate supercapacitor electrodes, *Carbon*, 2013, vol. 51, pp. 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.08.009>.
- 3 Fu M., Huang J., Feng S., Zhang T., Qian P.-C., Wong W.-Y. One-step solid-state pyrolysis of bio-wastes to synthesize multi-hierarchical porous carbon for ultra-long life supercapacitors, *Mater. Chem. Front.*, 2021, vol. 5, pp. 2320–2327. <https://doi.org/10.1039/D0QM00960A>.
- 4 Tian Q., Wang X., Xu X., Zhang M., Wang L., Zhao X., An Z., Yao H., Gao J. A novel porous carbon material made from wild rice stem and its application in supercapacitors, *Materials Chemistry and Physics*, 2018, vol. 213, pp. 267–276. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.04.026>.

- 5 Laheäär A., Przygocki P., Abbas Q., Béguin F. Appropriate methods for evaluating the efficiency and capacitive behavior of different types of supercapacitors, *Electrochemistry Communications*, 2015, vol. 60, pp. 21–25. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2015.07.022>.
- 6 Abbas A., Tabish T.A., Bull S.J., Lim T.M., Phan A.N. High yield synthesis of graphene quantum dots from biomass waste as a highly selective probe for Fe³⁺ sensing, *Sci Rep.*, 2020, vol. 10, 21262. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78070-2>.
- 7 Wang Y., Shi Z., Huang Y., Ma Y., Wang C., Chen M., Chen Y. Supercapacitor Devices Based on Graphene Materials, *J. Phys. Chem.*, 2009, vol. 113, pp. 13103–13107. <https://doi.org/10.1021/jp902214f>.
- 8 Yeleuov M., Daulbayev C., Taurbekov A., Abdisattar A., Ebrahim R., Kumekov S., Prikhodko N., Lesbayev B., Batyrzhan K. Synthesis of graphene-like porous carbon from biomass for electrochemical energy storage applications, *Diamond and Related Materials*, 2021, vol. 119, 108560. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108560>.
- 9 Roy A., Kar S., Ghosal R., Naskar K., Bhowmick A.K. Facile Synthesis and Characterization of Few-Layer Multifunctional Graphene from Sustainable Precursors by Controlled Pyrolysis, Understanding of the Graphitization Pathway, and Its Potential Application in Polymer Nanocomposites, *ACS Omega*, 2021, vol. 6, pp. 1809–1822. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03550>.
- 10 Prikhod'ko N.G., Mansurov Z.A., Auelkhankyzy M., Lesbaev B.T., Nazhipkyzy M., Smagulova G.T. Flame synthesis of graphene layers at low pressure, *Russ. J. Phys. Chem.*, 2015, vol. 9, pp. 743–747. <https://doi.org/10.1134/S1990793115050115>.
- 11 Song X., Ma X., Li Y., Ding L., Jiang R. Tea waste derived microporous active carbon with enhanced double-layer supercapacitor behaviors, *Applied Surface Science*, 2019, vol. 487, pp. 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.04.277>.
- 12 Bhoyate S., Ranaweera C.K., Zhang C., Morey T., Hyatt M., Kahol P.K., Ghimire M., Mishra S.R., Gupta R.K. Eco-Friendly and High Performance Supercapacitors for Elevated Temperature Applications Using Recycled Tea Leaves, *Global Challenges*, 2017, vol. 1, 1700063. <https://doi.org/10.1002/gch2.201700063>.
- 13 Adan-Mas A., Alcaraz L., Arévalo-Cid P., López-Gómez Félix. A., Montemor F. Coffee-derived activated carbon from second biowaste for supercapacitor applications, *Waste Management*, 2021, vol. 120, pp. 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.043>.
- 14 Li Y., Li Z., Xing B., Li H., Ma Z., Zhang W., Reubroycharoen P., Wang S. Green conversion of bamboo chips into high-performance phenol adsorbent and supercapacitor electrodes by simultaneous activation and nitrogen doping, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2021, vol. 155, 105072. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105072>.
- 15 Ferrari A.C. Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron–phonon coupling, doping and nonadiabatic effects, *Solid State Communications*, 2007, vol. 143, pp. 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2007.03.052>.
- 16 Bleu Y., Bourquard F., Loir A., Barnier V., Garrelie F., Donnet C. Raman study of the substrate influence on graphene synthesis using a solid carbon source via rapid thermal annealing, *J Raman Spectrosc*, 2019, vol. 50, pp. 1630–1641. <https://doi.org/10.1002/jrs.5683>.
- 17 He X., Ling P., Yu M., Wang X., Zhang X., Zheng M. Rice husk-derived porous carbons with high capacitance by ZnCl₂ activation for supercapacitors, *Electrochimica Acta*, 2013, vol. 105, pp. 635–641. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.05.050>.
- 18 Han J., Xu G., Ding B., Pan J., Dou H., MacFarlane D.R. Porous nitrogen-doped hollow carbon spheres derived from polyaniline for high performance supercapacitors, *J. Mater. Chem. A*, 2014, vol. 2, pp. 5352–5357. <https://doi.org/10.1039/C3TA15271E>.
- 19 Kang W., Lin B., Huang G., Zhang C., Yao Y., Hou W., Xu B., Xing B. Peanut bran derived hierarchical porous carbon for supercapacitor, *J Mater Sci: Mater Electron*, 2018, vol. 29, pp. 6361–6368. <https://doi.org/10.1007/s10854-018-8615-1>.
- 20 Hao X., Wang J., Ding B., Wang Y., Chang Z., Dou H., Zhang X. Bacterial-cellulose-derived interconnected meso-microporous carbon nanofiber networks as binder-free electrodes for high-performance supercapacitors, *Journal of Power Sources*, 2017, vol. 352, pp. 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.088>.
- 21 Sun J., Niu J., Liu M., Ji J., Dou M., Wang F. Biomass-derived nitrogen-doped porous carbons with tailored hierarchical porosity and high specific surface area for high energy and power density supercapacitors, *Applied Surface Science*, 2018, vol. 427, pp. 807–813. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.07.220>.

22 Peng C., Yan X., Wang R., Lang J., Ou Y., Xue Q. Promising activated carbons derived from waste tea-leaves and their application in high performance supercapacitors electrodes, *Electrochimica Acta*, 2013, vol. 87, pp. 401–408. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.09.082>.

23 Ratnaji T., L. John Kennedy. Hierarchical porous carbon derived from tea waste for energy storage applications: Waste to worth, *Diamond & Related Materials*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108100>.

^{1,2*} **Дүйсенбек Ә.Н.,**

PhD докторант, ORCID ID: 0009-0007-5211-6098,

e-mail: aselka_star@mail.ru

^{1,2} **Бейсенова Е.Е.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0392-6015,

e-mail: mamyrbayeva.e@gmail.com

^{2,3} **Бейсенов Р.Е.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-6880-7693,

e-mail: renat7787@mail.ru

^{1,3,4} **Асқарұлы Қ.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-8998-0409,

e-mail: k.askaruly@gmail.com

^{2,4} **Приходько Н.Г.,**

PhD, х.ғ.д., профессор, ORCID ID: 0000-0001-7733-0903,

e-mail: nik99951@mail.ru

⁵ **Туганбаев А.Б.,**

бас инженер,

e-mail: tatek.oid@mail.ru

¹Қ.И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ, Алматы қ., Қазақстан

²Жану мәселелері институты, Алматы қ., Қазақстан

³Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

⁴Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан

⁵Талдықорған акционерлік көлік-электр желілері компаниясы, Талдықорған қ., Қазақстан

ШАЙ ҚАЛДЫҚТАРЫНАН АЛЫНҒАН ГРАФЕН ТӘРІЗДІ КӨМІРТЕК НЕГІЗІНДЕ ЖОҒАРЫ ӨНІМДІ СУПЕРКОНДЕНСАТОР ЭЛЕКТРОДТАРЫН ДАЙЫНДАУ

Аңдатпа

Бұл мақалада шай қалдықтарынан алынған графен тәрізді көміртегінің (ГТК) негізінде суперконденсатор электродтары үшін белсенді материалды алу әдістері мен зерттеу нәтижелері ұсынылған. Белсенді материал 550 °C температурада карбонизацияланып, кейін 850 °C температурада кварц құбырлы пеште калий гидроксиді (КОН) арқылы 1:4 қатынасында термохимиялық белсендіру жүргізілді. Шай қалдықтарына негізделген кеуекті графен тәрізді көміртектің құрылымы мен морфологиясы сканерлеуші электрондық микроскопия (SEM), Брунауэр-Эммет-Теллер (BET) әдісі, рентгендік дифракция және Раман спектроскопиясы арқылы зерттелді. Белсендірілген кеуекті графен тәрізді көміртектің беттік ауданы 2407 м²/г құрады. Суперконденсатордың электрохимиялық сипаттамалары Elins P-40X электрохимиялық жұмыс станциясында зерттелді. Сынақ нәтижелері материалдың 1 А/г тоқ тығыздығында 182 Ф/г жоғары меншікті сыйымдылыққа және 96% кулондық тиімділікке қол жеткізгенін көрсетті. Сондай-ақ, шамамен 1,5 Ом заряд тасымалдау кедергісі тіркелді, бұл материалдың электрод ретіндегі әлеуетін айқындай түседі. Бұл зерттеудің нәтижелері шай қалдықтарынан алынған графен тәрізді көміртекті суперконденсаторлар үшін перспективалық материал ретінде пайдаланудың жоғары тиімділігін дәлелдейді және қалдықтарды пайдалы бағытта өңдеу мүмкіндіктерін көрсетеді.

Тірек сөздер: суперконденсатор, электрод, графен тәрізді көміртек, белсендірілген көмір, карбонизация, термохимиялық активация.

^{1,2*}**Duisenbek A.N.,**

PhD student, ORCID ID: 0009-0007-5211-6098,
e-mail: aselka_star@mail.ru

^{1,2}**Beissenova E.E.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0392-6015,
e-mail: mamyrbayeva.e@gmail.com

^{2,3}**Beissenov R.E.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-6880-7693,
e-mail: renat7787@mail.ru

^{1,2,4}**Askaruly K.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-8998-0409,
e-mail: k.askaruly@gmail.com

^{2,4}**Prikhodko N.G.,**

PhD, Doctor of Chemical Sciences, Professor, ORCID ID: 0000-0001-7733-0903,
e-mail: nik99951@mail.ru

⁵**Tuganbaev A.B.,**

main engineer,
e-mail: tatek.oid@mail.ru

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Institute of Combustion Problems, Almaty, Kazakhstan

³Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

⁴G. Daukeev Almaty University of Energy and Communications, Almaty, Kazakhstan

⁵«Taldykorgan Joint-Stock Transport Electric Network Company», Taldykorgan, Kazakhstan

PRODUCTION OF HIGH-PERFORMANCE SUPERCAPACITOR ELECTRODES BASED ON GRAPHENE-LIKE CARBON OBTAINED FROM TEA WASTE

Abstract

This article presents the results of a study on the production of active material for supercapacitor electrodes from graphene-like carbon obtained from tea waste, carbonization at a temperature of 550°C, followed by thermochemical activation using potassium hydroxide in a ratio of 1:4 at a temperature of 850°C in a quartz tube furnace. The structure and morphology of the resulting porous graphene-like carbon based on tea waste were investigated using scanning electron microscopy (SEM), Brunauer-Emmett-Teller (BET), X-ray diffraction, and Raman spectroscopy. The surface area of activated porous graphene-like carbon from tea waste was 2407 m²/g. Electrochemical characterization of the assembled supercapacitor using GLC-TW was performed on an Elins P-40X electrochemical workstation and showed high specific capacitance values of 182 F/g, as well as a Coulombic efficiency of 96% at a current density of 1 A/g and the material also demonstrated a low charge transfer resistance of about 1.5 Ohms. These results highlight the effectiveness of using graphene-like carbon derived from tea waste, demonstrating its potential as a promising material for supercapacitors.

Key words: supercapacitor, electrode, graphene-like carbon, activated carbon, carbonization, thermochemical activation.

Дата поступления: 31.08.2024

УДК 551.51
МРНТИ 37.23.15

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-196-209>

¹**Жаңабай Н.Ж.,**

канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-8153-1449,
e-mail: nurlan.zhanabay777@mail.ru

¹**Утелбаева А.Б.,**

докт. хим. наук, ORCID ID: 0000-0002-4771-9835,
e-mail: mako_01-777@mail.ru

¹**Түрсүнкүлүлы Т.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-6215-7677,
e-mail: timurtursunkululy@gmail.com

²**Жаңабай А.Ж.,**

докторант, ORCID ID: 0009-0003-3569-0531,
e-mail: 4izhan.ss@gmail.com

¹**Бахбергген С.**

магистрант, ORCID ID: 0009-0002-1248-0884,
e-mail: sultan4ik.pro02@gmail.com

¹Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, г. Шымкент, Казахстан

²Казахский Национальный исследовательский технический университет им. К. Сатпаева,
г. Алматы, Казахстан

ФИЗИКА СРЕДЫ – ПРЕДПОСЫЛКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА НАРУЖНЫЕ СТЕНОВЫЕ ОГРАЖДЕНИЯ ЗДАНИЙ

Аннотация

В исследовании, согласно данным национальной гидрометеорологической службы «Казгидромет» за последние 30 лет, проведены инженерно-климатические расчеты по г. Шымкенту в разрезе годовых, месячных и суточных значений, где основной целью, согласно полученным данным, было определение благоприятной, неблагоприятной, допустимой и недопустимой ориентаций, которые были рассчитаны по значениям солнечной радиации и ветровому режиму указанной территории. В результате инженерно-климатического расчета составлена итоговая комплексная оценка анализа климата, где сектором благоприятной ориентации для г. Шымкента установлено юго-восточное направление между 140–200°, сектором недопустимой ориентации установлено северное направление между 320–40°, сектором допустимой ориентации установлено северо-западное направление между 270–320°, сектором неблагоприятной ориентации установлено юго-западное направление между 200–270°, а в качестве оптимальной ориентации установлено восточное направление между 40–140°. Отмечено, что полученные результаты являются актуальными и могут быть использованы в дальнейшем при исследовании процесса теплообмена в наружных стеновых ограждающих конструкциях с учетом влияния солнечной радиации в условиях жаркого климата Республики Казахстан.

Ключевые слова: физика среды, строительно-климатический паспорт, ориентация, параметры климата, климатический расчет, анализ.

Введение

Влияние окружающей среды на проектирование и строительство зданий является основополагающим фактором при принятии тех или иных строительных материалов и конструкций [1]. Так как принятые конструктивные решения зданий напрямую влияют на обеспечение

комфортной среды обитания человека, что также зависит от физики среды, которая в том числе изучает вопросы влияния наружных климатических параметров и микроклимата помещений, что относится к направлению архитектурно-строительной климатологии.

В разрезе национального масштаба исследование такого направления, как физика, является вопросом актуальным, так как в силу своей расположенности территорию республики можно поделить на несколько климатических районов – от суровой и холодной зимы до жаркого лета с относительно коротким зимним периодом, что поднимает вопрос активной защиты от перегрева зданий в летний период. При этом действующими нормами рассматривается вопрос только теплозащиты в холодный период, а вопрос теплоустойчивости в жаркий период не нормируется, и здания подвергаются перегреву [2].

Обзор литературы

Влияние качественных и количественных параметров окружающей среды на объемно-планировочные [3, 4] и конструктивные [5, 6] решения ограждений в силу своей актуальности в вопросе энергоэффективности исследуется весьма активно большим количеством ученых. Так, авторы работы [7] провели обзор работ о преимущественно жарком климате, где в качестве предложения рассмотрели самозатеняющие фасады зданий, которые используют форму ограждающей конструкции здания или ее компонентов для обеспечения частичной защиты от солнечного излучения. Результаты обзора литературы показали, что самозатеняющиеся фасады снижают теплоотдачу за счет различных аспектов самозатенения, включая морфологию, площадь затеняемой поверхности и строительные материалы. В работе [8] из-за особенности климата представлено сравнение возможностей утепления кокосовой койрой и зеленого фасада для уменьшения перегрева помещений в условиях теплого и влажного климата, распространенного в прибрежных районах Южной Индии. В исследовании [9] авторы, учитывая особенности жаркого климата, провели полевые измерения 20 распространенных и современных фасадных материалов зданий и их влияния на температуру наружного воздуха. В результате исследования были определены наиболее эффективные конструкции наружного ограждения в исследуемых климатических условиях. В работе [10] авторы провели экспериментальные исследования наружного ограждения с учетом особенностей климатических параметров в Китае. В результате исследованы значения теплопроводности внутренней стены и конструктивных особенностей фасада, включая коэффициент раскрытия стыков, цвет внешней облицовки, открытость вентиляционных отверстий и ширину полости, что показало существенное влияние на тепловые характеристики вентилируемых фасадов. Было подчеркнуто, что функции контроля солнечной радиации на поверхности в наибольшей степени влияют на производительность летом, в то время как функции, ограничивающие вентиляцию полости, преобладают зимой [11]. В работе [12] рассматривался такой климатический параметр, как влияние ветра на давление воздуха в воздушной прослойке вентилируемого фасада, где были проведены полевые эксперименты в сравнении с теоретическими. Результаты которых показали, что ветер оказывает значительное влияние на воздушный поток в полости прослойки. В работе [13] были экспериментально исследованы тепловые характеристики вентилируемых фасадов в типичных средиземноморских летних погодных условиях с использованием крупномасштабного испытательного здания. Результаты экспериментов показали, что окружающие климатические условия имеют значительное влияние на исходные данные конструирования наружных ограждений. В работе [14] авторы также подчеркнули особенность влияния такого климатического параметра, как солнечное излучение, на территории Республики Казахстан, где провели исследование потенциала использования солнечного извлечения для выработки электроэнергии.

Проведенный выше литературный обзор исследований показывает, что актуальные и правильные инженерно-климатические расчеты способствуют дальнейшему корректному исследованию. В связи с чем полученные результаты данного исследования имеют цель также правильной оценки климатических параметров на основе последних актуальных данных для дальнейшей оценки влияния солнечной радиации на теплофизические процессы, происходящие в наружных стеновых ограждениях, что является актуальным для регионов Республики Казахстан с жарким климатом, тем более что климат Казахстана по сравнению с периодом 1961–1990 гг. в 1991–2020 гг. становится жарче [15].

Материалы и методы

Для составления инженерно-климатических расчетов для территории с наиболее жарким климатом Республики Казахстан был выбран г. Шымкент (таблица 1), где на основе методики, описанной в работах [16, 17] и полученных данных за последние 30 лет национальной гидрометеорологической службой «Казгидромет», а также из анализа существующих норм по климатологии [18] были составлены для дальнейшего анализа актуальные сведения по климатической ситуации г. Шымкента.

Таблица 1 – Климатические значения г. Шымкента согласно [18]

Климатические подрайоны	Климатические подрайоны	Наименование крупных городов	Среднемесячная температура воздуха в январе, °C		Средняя скорость ветра за три зимних месяца, м/с	Среднемесячная температура воздуха в июле, °C		Климатические факторы, определяющие общие типологические требования к зданиям
IV	IVГ	Шымкент	-15	0	-	25	28	Жаркое лето и относительно короткий зимний период, обуславливающие активную защиту зданий от перегрева летом при соответствующей теплозащите в зимний период

Методика составления инженерно-климатических расчетов для климатической паспортизации в основном состоит из четырех разделов [16, 17], где глубоко анализируются данные по режиму солнечной радиации, температурному режим, ветровому режиму и влажностному режиму в разрезе годовых, месячных, суточных и часовых данных, которые представлены на рисунках 1–10.

На рисунках 1, 2 представлены расчеты годового хода среднемесячной суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность при ясном небе и годового хода среднемесячной суммарной солнечной радиации на вертикальную поверхность при ясном небе с учетом ориентаций г. Шымкента.

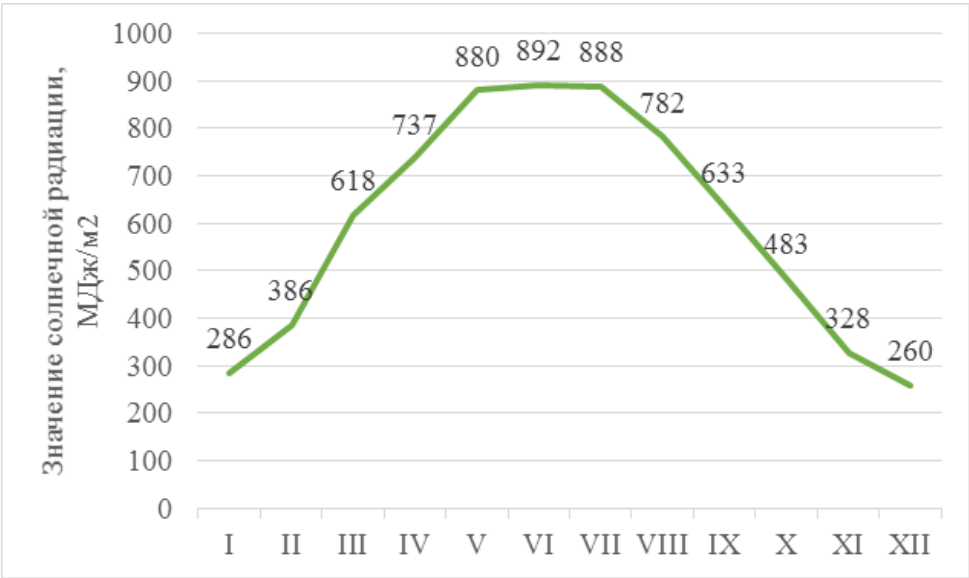


Рисунок 1 – Годовой ход среднемесячной суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность при ясном небе, г. Шымкент

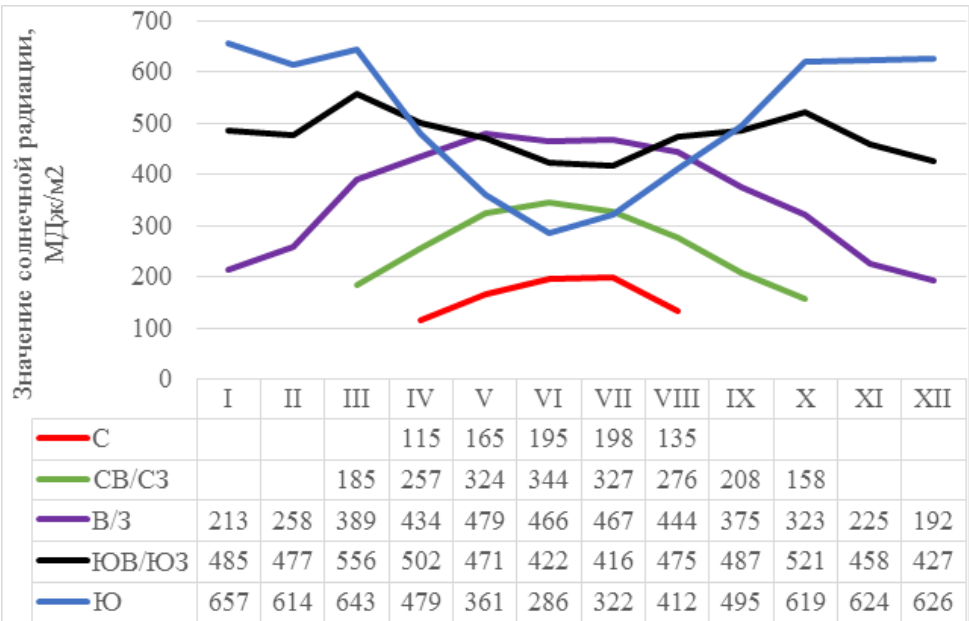


Рисунок 2 – Годовой ход среднемесячной суммарной солнечной радиации на вертикальную поверхность при ясном небе с учетом ориентаций, г. Шымкент

На рисунках 3–5 представлены расчеты годового хода среднемесячной температуры воздуха, месячного хода среднесуточной температуры, суточного хода температуры г. Шымкента.

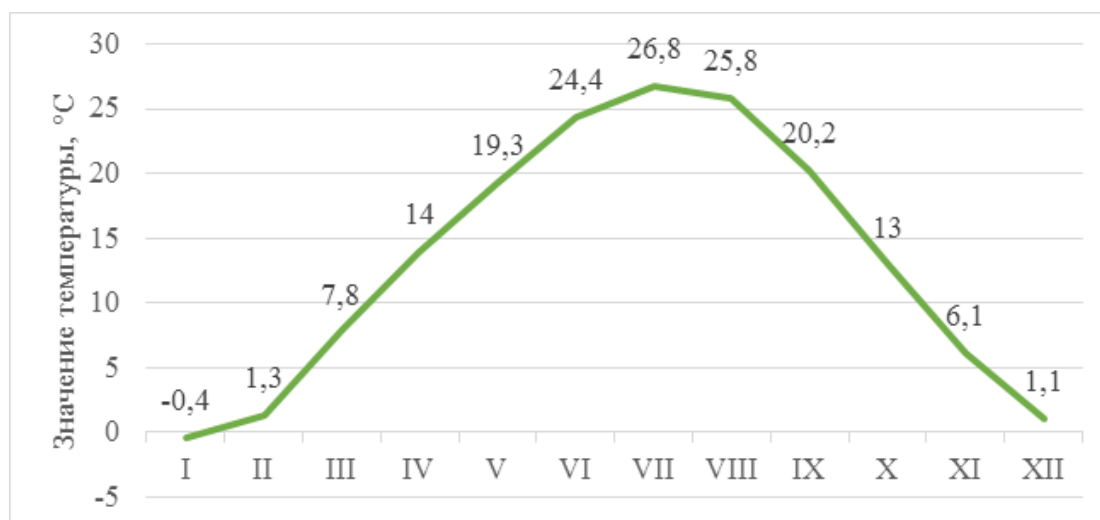
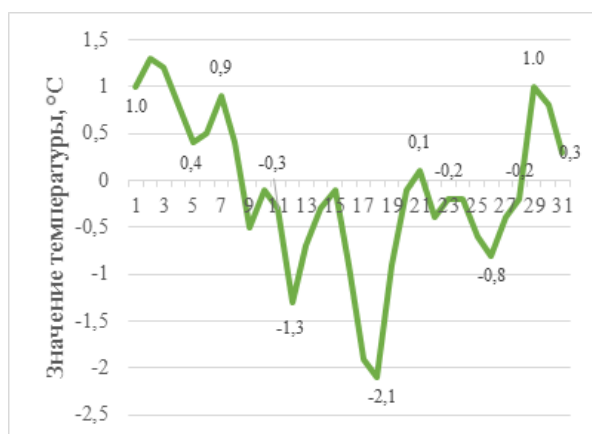
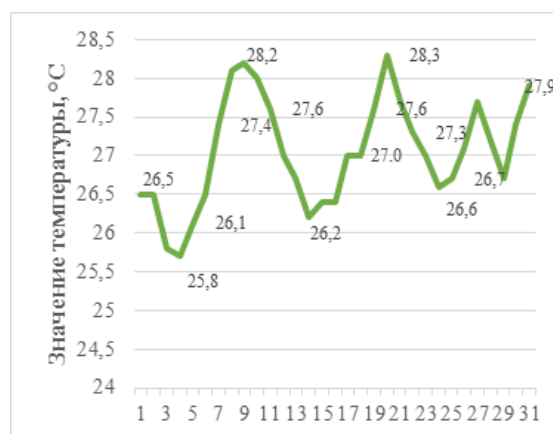


Рисунок 3 – Годовой ход среднемесячной температуры воздуха, г. Шымкент

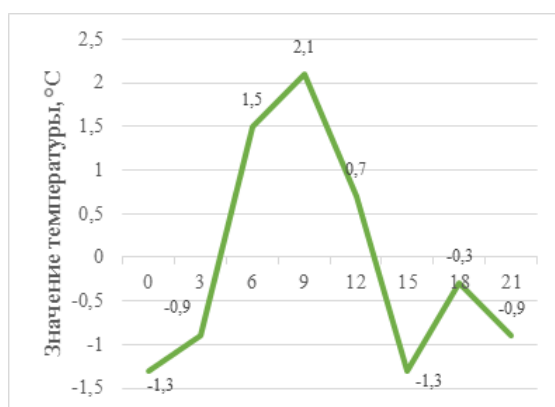


а

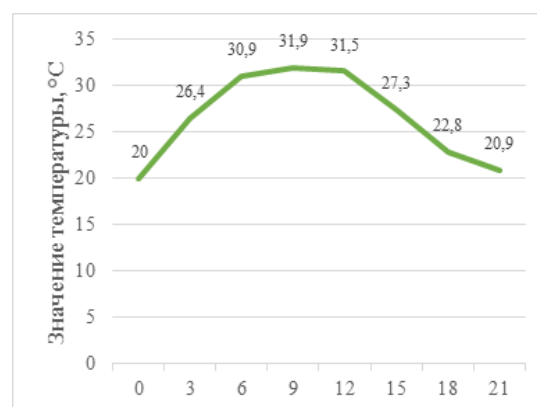


б

Рисунок 4 – Месячный ход среднесуточной температуры, г. Шымкент: а – в январе, б – в июле



а



б

Рисунок 5 – Суточный ход температуры, г. Шымкент: а – 15 января, б – 15 июля

На рисунках 6–8 представлены расчеты годового хода относительной влажности воздуха, месячного хода относительной влажности, суточного хода относительной влажности, а также представлено среднеемесячное количество осадков в г. Шымкенте (рисунок 9).

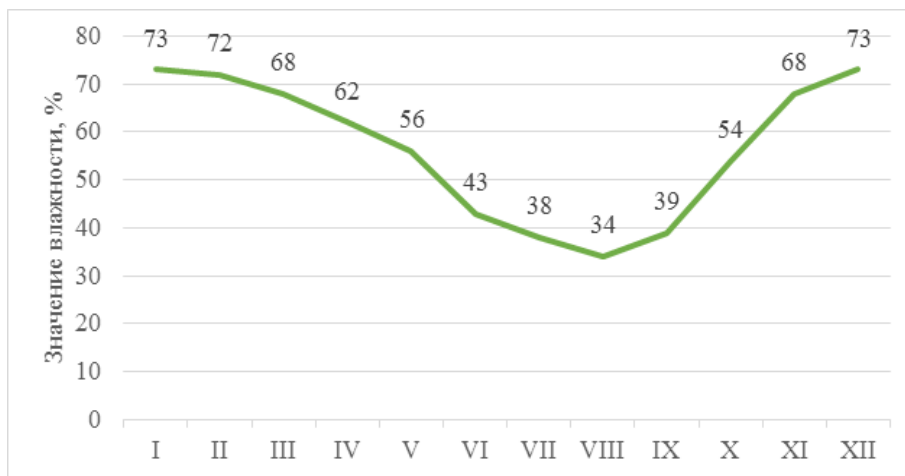
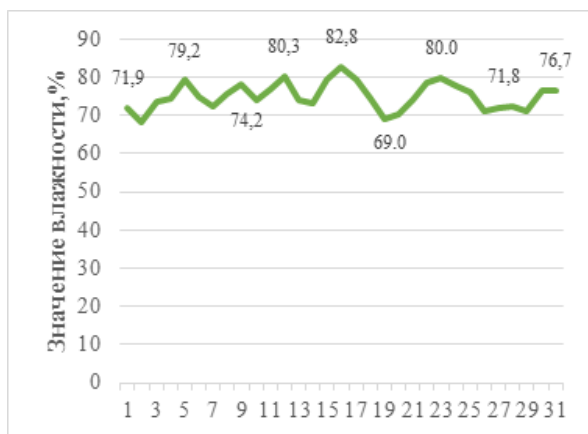
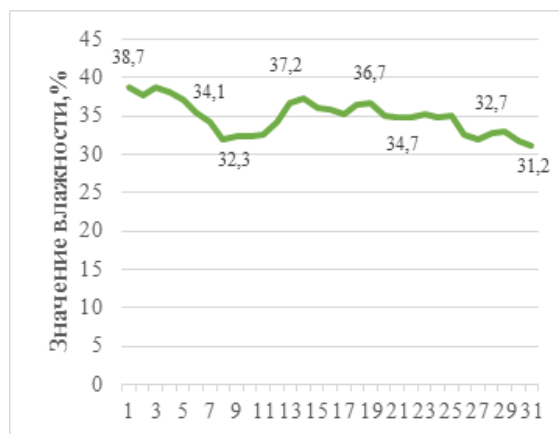


Рисунок 6 – Годовой ход средней относительной влажности по месяцам, г. Шымкент

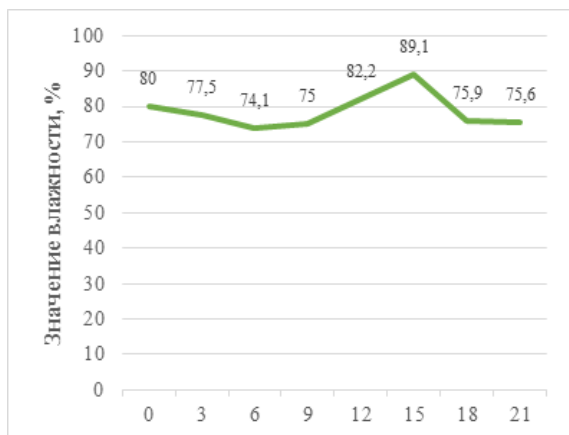


а

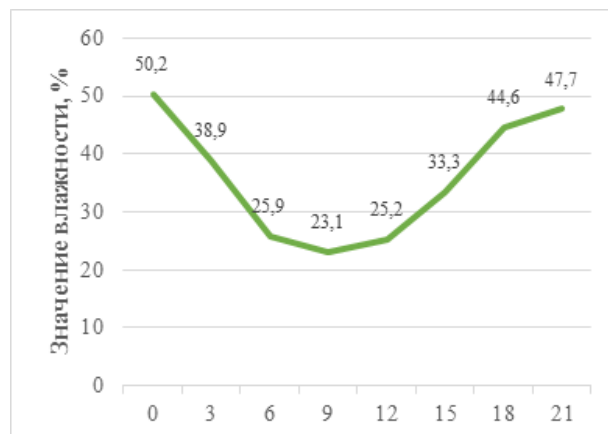


б

Рисунок 7 – Месячный ход средневенной относительной влажности, г. Шымкент:
а – в январе, б – в июле



а



б

Рисунок 8 – Суточный ход влажности, г. Шымкент: а – 15 января, б – 15 июля

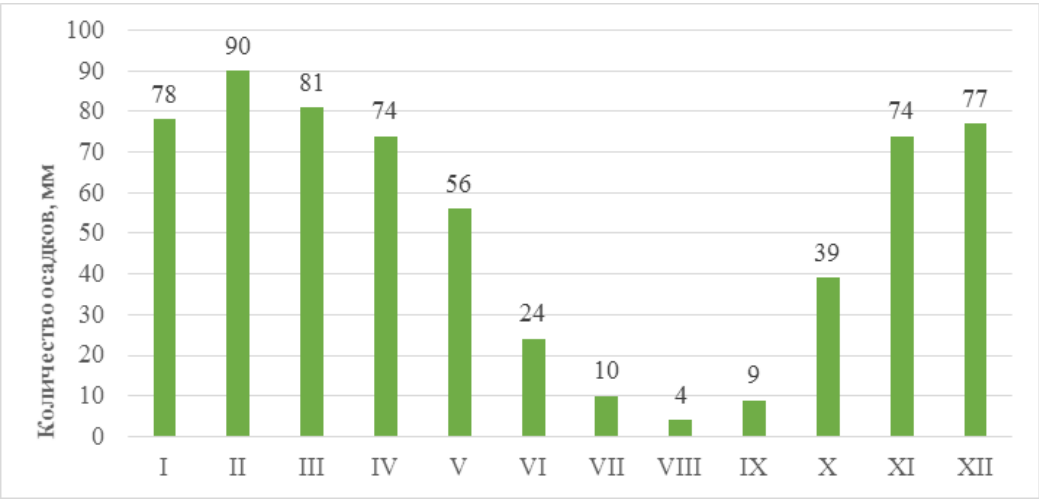


Рисунок 9 – Анализ средимесячных осадков, г. Шымкент

На рисунке 10 представлен анализ ветрового режима холодного (январь) и теплого (июль) периодов с указанием повторяемости и средней скорости ветра в г. Шымкенте. В таблице 2 представлены значения повторяемости и скорости ветра.

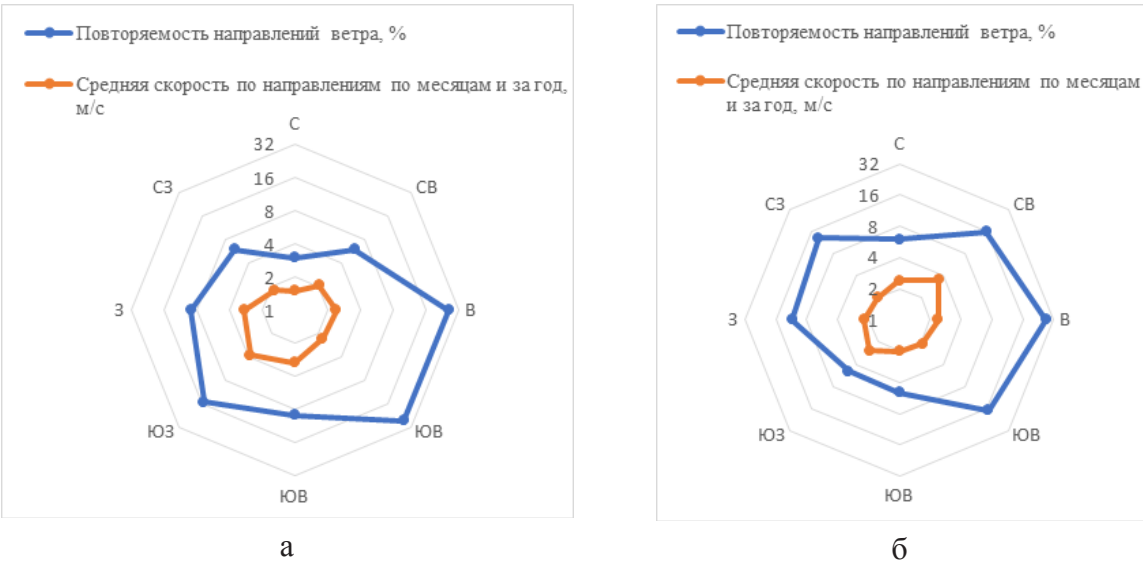


Рисунок 10 – Анализ ветрового режима, г. Шымкент: а – январь, б – июль

Таблица 2 – Значения повторяемости и скорости ветра на январь и июль, г. Шымкент

Город	Месяц	Повторяемость/скорость ветра, м/с								Штиль/ сред
		С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	
Шымкент	январь	3/1.5	6/2.1	26/2.4	26/2.3	9/3.0	15/3.8	9/2.9	6/1.8	18/2.5
	июль	6/2.4	16/3.5	27/2.4	17/2.1	5/2.0	5/2.6	11/2.2	13/2.0	9/2.4

Результаты и обсуждения

На основе проведенного анализа результатов инженерно-климатических расчетов, данных последних актуальных архивных источников, указанных в разделе 2, был сделан архитектурный анализ характеристики важного климатообразующего фактора – солнечной радиации наряду с ветровым режимом, позволяющий произвести оценку сторон горизонта по условиям теплового ограничения ориентации жилых помещений и их ограждающих конструкций (рисунки 11 и 12). В результате анализа прихода солнечной радиации на поверхность фасада зданий разной ориентации и повторяемости направления ветра выявлены степени благоприятности и неблагоприятности ориентации зданий и наружных конструктивных стен по сторонам света в зависимости от режима инсоляции г. Шымкента (рисунок 11). Также произведен архитектурный анализ ветрового режима с учетом соответствующих критериев повторяемости ветра по сторонам света и представлен в виде круга горизонта выявлением сектора благоприятной, допустимой, неблагоприятной и недопустимой ориентации г. Шымкента (см. рисунок 12). В итоге комплексная оценка по инженерно-климатическим расчетам данного исследования представлена в виде заключительного архитектурного анализа климата, учитывающего одновременно режим солнечной радиации и ветровой режим, являющиеся важными факторами в ориентации зданий и конструировании наружных теплозащитных ограждающих стеновых конструкций. Результаты исследования вносятся в виде круга с разбивкой на сектора благоприятной, допустимой, неблагоприятной, недопустимой ориентации выявлением оптимального сектора ориентации зданий и фасадов г. Шымкента (рисунок 13), что позволяет решать круг задач по архитектурно-конструктивному решению теплозащитной вертикальной оболочки зданий, фасадных систем, энергоэффективных стен, инновационных конструкций фасадов и т.д.

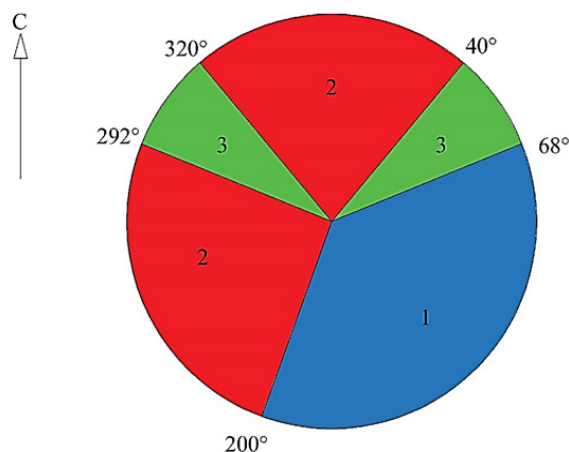


Рисунок 11 – Показатель благоприятности и неблагоприятности ориентации по сторонам света для г. Шымкента: 1 – сектор благоприятной ориентации; 2 – сектор недопустимой ориентации; 3 – сектор допустимой ориентации

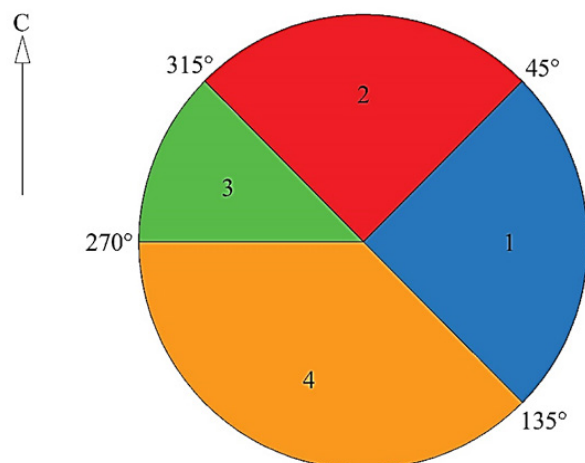


Рисунок 12 – Показатель архитектурного анализа ветрового режима для г. Шымкента:
1 – сектор благоприятной ориентации; 2 – сектор недопустимой ориентации;
3 – сектор допустимой ориентации; 4 – сектор неблагоприятной ориентации

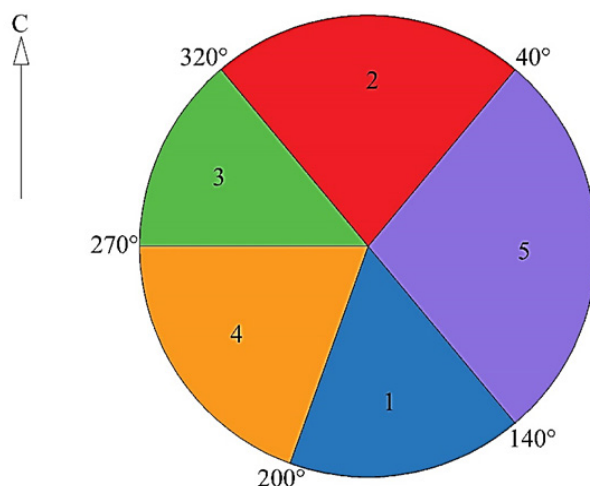


Рисунок 13 – Показатель благоприятной, допустимой, неблагоприятной, недопустимой ориентации для г. Шымкента: 1 – сектор благоприятной ориентации;
2 – сектор недопустимой ориентации; 3 – сектор допустимой ориентации;
4 – сектор неблагоприятной ориентации; 5 – сектор оптимальной ориентации

Выводы

В результате проведенных инженерно-климатических расчетов по годовому ходу средне-месячной суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность и годовому ходу среднемесячной суммарной солнечной радиации на вертикальную поверхность при ясном небе с учетом ориентаций, расчетов годового, месячного и суточного хода среднемесячной температуры воздуха, расчетов годового, месячного и суточного хода относительной влажности, а также количества осадков, расчетов ветрового режима холодного (январь) и тепло-

го (июль) периода с указанием повторяемости и средней скорости ветра были установлены: показатель благоприятности и неблагоприятности ориентации по сторонам света, показатель архитектурного анализа ветрового режима, показатель благоприятной, допустимой, неблагоприятной и недопустимой ориентации зданий.

Согласно расчетам по показателю благоприятности и неблагоприятности ориентации по сторонам света (солнечной радиации) было установлено, что сектором благоприятной ориентации является юго-восточная ориентация между 68° – 200° . Сектором недопустимой ориентации является юго-западная ориентация и северная ориентация между 200° – 292° и 320° – 40° соответственно. В качестве допустимой ориентации можно отметить направления северо-запад и северо-восток между 292° – 320° и 40° – 68° соответственно. Расчеты по показателю архитектурного анализа ветрового режима показали, что сектором благоприятной ориентации является восточное направление между 45° – 135° , неблагоприятной ориентацией является северное направление между 315° – 45° , сектором допустимой ориентации является северо-западное направление между 270° – 315° , а сектором неблагоприятной ориентацией является юго-западное направление между 135° – 270° .

Итоговая комплексная оценка на основе анализа климата, учитывающего одновременно режим солнечной радиации и ветровой режим, показала, что сектором благоприятной ориентации установлено юго-восточное направление между 140° – 200° , недопустимой ориентацией установлено северное направление между 320° – 40° , сектором допустимой ориентации установлено северо-западное направление между 270° – 320° , сектором неблагоприятной ориентации установлено юго-западное направление между 200° – 270° , а оптимальной ориентацией установлено восточное направление между 40° – 140° .

Таким образом, полученные результаты данного исследования в дальнейшем авторами будут использоваться при анализе влияния солнечной радиации на наружные стеновые ограждения в условиях жаркого климата Республики Казахстан при исследовании процесса теплообмена через конструкции ограждения.

Благодарность/источник финансирования

Исследование проводилось в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (AP23486892).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Samoilova T., Rakhimov M., Rakhimova G., & Zhangabay N. Effect of heat treatment of expanded polystyrene concrete on its compressive strength // *Technobius*. – Vol. 4(2). – P. 0059. <https://doi.org/10.54355/tbus/4.2.2024.0059>.
- 2 СП РК 2.04-107-2022. Тепловая защита зданий. Свод правил Республики Казахстан. Комитет по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства. – Астана, 2022. – 135 с. https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=39838250.
- 3 Tu D., Tang J., Zhang Z., Sun H. Thermal environment optimization in a large space building for energy-saving // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2023. – Vol. 51. – P. 103649. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103649/>
- 4 Zhen Yang Zh., Zhang W., Qin M., Liu H. Comparative study of indoor thermal environment and human thermal comfort in residential buildings among cities, towns, and rural areas in arid regions of China // *Energy and Buildings*. – 2022. – Vol. 273. – P.112373. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112373>.

5 Vakilinezhad R., Khabir S. Energy optimization for Façade retrofit design of residential buildings in hot climates using advanced materials // *Energy and Buildings*. – 2024. – Vol. 317. – P. 114417. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114417>.

6 Жанабай Н., Буганова С., Байділла И., Тағыбаев А. Моделирование теплового сопротивления разработанных наружных ограждающих конструкций с воздушной прослойкой // *Вестник QazBSQA*. – 2023. – № 2(88). – С. 178–191. <https://doi.org/10.51488/1680-080X/2023.2-19>.

7 Lionar R., Kroll D., Soebarto V., Sharifi E., Aburas M. A review of research on self-shading façades in warm climates // *Energy and Buildings*. – 2024. – Vol. 314. – P. 114203. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114203>.

8 Sigi Kumar T.S., Shafi K.A., Thomas J., Mohammed J. Experimental evaluation of the thermal performance of coir mat and green facade as wall insulation in a tropical climate // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2023. – vol. 40. – P. 101757. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101757>.

9 Tabatabaei S., Fayaz R. The effect of facade materials and coatings on urban heat island mitigation and outdoor thermal comfort in hot semi-arid climate // *Building and Environment*. – 2023. – vol. 243. – P. 110701. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110701>.

10 Lin Z., Song Y., Chu Y. An experimental study of the summer and winter thermal performance of an opaque ventilated facade in cold zone of China // *Building and Environment*. – 2022. – Vol. 218. – P. 109108. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109108>.

11 Kvande T., Bakken N., Bergheim E., Thue J.V. Durability of ETICS with Rendering in Norway – Experimental and Field Investigations // *Buildings*. – 2018. – Vol. 8. – P. 93. <https://doi.org/10.3390/buildings8070093>.

12 Uvsløkk S. The Importance of Wind Barriers for Insulated Timber Frame Constructions // *J. Therm. Insul. Build. Envel.* – 1996. – vol. 20, pp. 40–62. <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/109719639602000105>.

13 Marinosci C., Semprini G., Morinia G.L. Experimental analysis of the summer thermal performances of a naturally ventilated rainscreen façade building // *Energy and Buildings*. – 2014. – Vol. 72. – P. 280–287. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.044>.

14 Чередов В.О., Каримов А.М., Акылбекова А.Ж. Оценка потенциала солнечного излучения в пределах территории Республики Казахстан для выработки электроэнергии // *Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан*. – 2016. – № 1. – С. 55–64. <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-gelioenergeticheskogo-potentsiala-dlya-territorii-respubliki-kazahstan>

15 Снижая градус: как Казахстан борется с изменением климата. URL: <https://www.undp.org/ru/kazakhstan/news/snizhaya-gradus-kak-kazakhstan-boretsya-s-izmeneniem-klimata>

16 Гиясов А.И., Гиясова И.В. Физика среды / Учебное пособие. – М. : Издательство МИСИ – МГСУ, 2022. – С. 47. <https://kaska.mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/uchebnye-posobiya/49058/> (accessed on 25 June 2024).

17 Куприянов В.Н., Петров А.С., Иванцов А.И. Архитектурная физика. – Казань: Издательство Казанск, 2022. – С. 132. <https://search.rsl.ru/ru/record/07000512816>.

18 СП РК 2.04-01-2017 Строительная климатология: Государственные нормативы в области архитектуры, градостроительства и строительства. Свод правил Республики Казахстан. АО «КазНИИСА», ТОО «Астана Строй-Консалтинг», 2017. Утвержден и введен в действие 20.12.2017. – 43 с. https://online.zakon.kz/m/document/?doc_id=37599018

REFERENCES

1 Samoilova T., Rakhimov M., Rakhimova G., & Zhangabay N. (2024) Effect of heat treatment of expanded polystyrene concrete on its compressive strength. *Technobius*. vol. 4(2), p.0059. <https://doi.org/10.54355/tbus/4.2.2024.0059>.

2 SP RK 2.04-107-2022. Thermal protection of buildings. The Code of Rules of the Republic of Kazakhstan. Committee for Construction and Housing and Communal Services. Astana 2022, p. 135. https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=39838250.

- 3 Tu D., Tang J., Zhang Z., Sun H. (2023) Thermal environment optimization in a large space building for energy-saving. *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 51, pp. 103649. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103649>
- 4 Zhen Yang Zh., Zhang W., Qin M., Liu H. (2022) Comparative study of indoor thermal environment and human thermal comfort in residential buildings among cities, towns, and rural areas in arid regions of China. *Energy and Buildings*, vol. 273, p. 112373. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112373>.
- 5 Vakilinezhad R., Khabir S. (2024) Energy optimization for Façade retrofit design of residential buildings in hot climates using advanced materials. *Energy and Buildings*, vol. 317, p. 114417. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114417>.
- 6 Zhanabai N., Bugarova S., Baidilla I., Tagybaev A. (2023) Modeling of thermal resistance of developed external enclosing structures with an air layer. *Bulletin of QazBSQA*, no. 2 (88), pp.178–191. <https://doi.org/10.51488/1680-080X/2023.2-19>.
- 7 Lionar R., Kroll D., Soebarto V., Sharifi E., Aburas M. (2024) A review of research on self-shading façades in warm climates. *Energy and Buildings*, vol. 314, p. 114203. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114203>.
- 8 Sigi Kumar T.S., Shafi K.A., Thomas J., Mohammed J. (2023) Experimental evaluation of the thermal performance of coir mat and green facade as wall insulation in a tropical climate. *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 40, p. 101757. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101757>.
- 9 Tabatabaei S., Fayaz R. (2023) The effect of facade materials and coatings on urban heat island mitigation and outdoor thermal comfort in hot semi-arid climate. *Building and Environment*, vol. 243, p. 110701. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110701>.
- 10 Lin Z., Song Y., Chu Y. (2022) An experimental study of the summer and winter thermal performance of an opaque ventilated facade in cold zone of China. *Building and Environment*, vol. 218, p. 109108. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109108>.
- 11 Kvande T., Bakken N., Bergheim E., Thue J.V. (2018) Durability of ETICS with Rendering in Norway – Experimental and Field Investigations. *Buildings*, vol. 8, p. 93. <https://doi.org/10.3390/buildings8070093>.
- 12 Uvsløkk S. (1996) The Importance of Wind Barriers for Insulated Timber Frame Constructions. *J. Therm. Insul. Build. Envel.*, vol. 20, pp. 40–62. <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/109719639602000105>.
- 13 Marinosci C., Semprini G., Morinia G.L. (2014) Experimental analysis of the summer thermal performances of a naturally ventilated rainscreen façade building. *Energy and Buildings*, vol. 72, pp. 280–287. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.044>.
- 14 Cheredov V.O., Karimov A.M., Akylbekova A.J. (2016) Assessment of the potential of solar radiation within the territory of the Republic of Kazakhstan for electricity generation. *Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, no. 1, pp. 55–64. <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-gelioenergeticheskogo-potentsiala-dlya-territorii-respubliki-kazahstan>.
- 15 Snizhaja gradus: kak Kazahstan boretsja s izmeneniem klimata. URL: <https://www.undp.org/ru/kazahstan/news/snizhaya-gradus-kak-kazahstan-boretsya-s-izmeneniem-klimata>
- 16 Giasov A.I., Giasova I.V. (2022) Textbook Physics of the environment. Moscow, Publishing house MISI – MGSU, p. 47. <https://kaska.mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/uchebnye-posobiya/49058/> (accessed on 25 June 2024).
- 17 Kupriyanov V.N., Petrov A.S., Ivantsov A.I. (2022) Architectural physics, Kazan, Publishing House Kazansk, p. 132. <https://search.rsl.ru/ru/record/07000512816>.
- 18 Joint Venture of the Republic of Kazakhstan 2.04-01-2017 Building climatology: State standards in the field of architecture, urban planning and construction. The Code of Rules of the Republic of Kazakhstan, KazNIISA JSC, Astana Sroy-Consulting LLP, 2017. Approved and put into effect on 12/20/2017. – 43 p. https://online.zakon.kz/m/document/?doc_id=37599018.

¹Жаңабай Н.Ж.,

Т.Ф.К, ORCID ID: 0000-0002-8153-1449,

e-mail: nurlan.zhanabay777@mail.ru

¹Утелбаева А.Б.,

Х.Ф.Д., ORCID ID: 0000-0002-4771-9835,

e-mail: mako_01-777@mail.ru

¹Тұрсұнкулы Т.,

PhD, ORCID ID: 0000-0001-6215-7677,

e-mail: timurtursunkululy@gmail.com

²Жаңабай А.Ж.,

докторант, ORCID ID: 0009-0003-3569-0531,

e-mail: 4izhan.ss@gmail.com

¹Бахберген С.

магистрант, ORCID ID: 0009-0002-1248-0884,

e-mail: sultan4ik.pro02@gmail.com

¹М. Әуезова атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қ., Қазақстан
²Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан

ҚОРШАҒАН ОРТА ФИЗИКАСЫ – КҮН РАДИАЦИЯСЫНЫҢ ҒИМАРАТТАРДЫҢ СЫРТҚЫ ҚАБЫРҒА ҚОРШАУЛАРЫНА ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУДІҢ АЛҒЫШАРТЫ

Аңдатпа

Зерттеуде Қазгидромет ұлттық гидрометеорологиялық қызметінің деректеріне сәйкес, соңғы 30 жыл ішінде Шымкент қаласының жылдық, айлық және тәуліктік көрсеткіштері негізінде инженерлік-климаттық есептеулер жүргізілді. Алынған деректер негізінде зерттеудің негізгі мақсаты – күн радиациясының мәндері мен көрсетілген аумақтың жел режиміне сүйене отырып, қолайлы, қолайсыз, жол берілетін және жол берілмейтін бағдарларды анықтау болды. Инженерлік-климаттық есептеу нәтижесінде климатты талдаудың қорытынды кешенді бағасы жасалды, онда Шымкент қаласы үшін қолайлы бағдарлау секторы ретінде 140–200° арасында оңтүстік-шығыс бағыты белгіленді, жол берілмейтін бағдарлау секторы 320–40° арасында солтүстік бағыт белгіленді, жол берілетін бағдарлау секторы 270–320° арасында солтүстік-батыс бағыт белгіленді, қолайсыз бағдарлау секторы ретінде оңтүстік-батыс бағыт белгіленді бағыт 200–270° аралығында, ал оңтайлы бағыт ретінде шығыс бағыты 40–140° аралығында орнатылған. Аталған нәтижелер Қазақстан Республикасының ыстық климат жағдайында маңызды және күн радиациясының әсерін ескере отырып, сыртқы қабырға қоршау конструкцияларындағы жылу алмасу процесін зерттеу кезінде қолданыла алатыны атап өтілді.

Тірек сөздер: қоршаған орта физикасы, құрылыс және климаттық төлқұжат, бағдар, климат параметрлері, климаттық есептеу, талдау.

¹Zhangabay N.,

Candidate of Technical Sciences, ORCID ID: 0000-0002-8153-1449,
e-mail: nurlan.zhanabay777@mail.ru

¹Utelbayeva A.,

Doctor of Chemical Sciences, ORCID ID: 0000-0002-4771-9835,
e-mail: mako_01-777@mail.ru

¹Tursunkululy T.,

PhD, ORCID ID: 0000-0001-6215-7677,
e-mail: timurtursunkululy@gmail.com

²Zhangabay A.,

doctoral student, ORCID ID: 0009-0003-3569-0531,
e-mail: 4izhan.ss@gmail.com

¹Bakhbergen S.

undergraduate student, ORCID ID: 0009-0002-1248-0884,
e-mail: sultan4ik.pro02@gmail.com

¹Auezov University, Shymkent, Kazakhstan

²Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

ENVIRONMENTAL PHYSICS IS A PREREQUISITE FOR STUDYING THE EFFECT OF SOLAR RADIATION ON THE EXTERNAL WALL FENCES OF BUILDINGS

Abstract

In the study, according to the data of the national hydrometeorological service Kazhydromet, over the past 30 years, engineering and climatic calculations of Shymkent have been carried out in the context of annual, monthly and daily values, where the main purpose according to the data obtained was to determine favorable, unfavorable, permissible and unacceptable orientations, which were calculated based on the values of solar radiation and wind regime of the specified territory. As a result of the engineering and climatic calculation, a final comprehensive assessment of the climate analysis was compiled, where the south-eastern direction was set as the sector of favorable orientation for Shymkent between 140–200°, the sector of unacceptable orientation was set to the northern direction between 320–40°, the sector of permissible orientation was set to the north-western direction between 270–320°, the sector of unfavorable orientation was set to the south-western The direction is between 200–270°, and the optimal orientation is set to the east direction between 40–140°. It is noted that the obtained results of this study are relevant and can be used further in the study of the heat transfer process in external wall enclosing structures, taking into account the influence of solar radiation in the hot climate of the Republic of Kazakhstan.

Key words: environmental physics, construction and climate passport, orientation, climate parameters, climate calculation, analysis.

Дата поступления в редакцию 24.08.2024

УДК 620.3
МРНТИ 29.19.22

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-210-218>

^{1*}**Кошанова А.Б.,**

докторант, ORCID ID: 0009-0003-6842-2955,

e-mail: aizhankoshanova.kz@gmail.com

¹**Немкаева Р.Р.,**

магистр физ.-техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-8782-703X,

e-mail: quasisensus@mail.ru

¹**Гусейнов Н.Г.,**

магистр физ.-техн. наук, ORCID ID: 0000-0003-4804-5323,

e-mail: solar_neo@mail.ru

¹**Мархабаева А.А.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0657-422X,

e-mail: aiko_marx@mail.ru

¹**Мухаметкаримов Е.С.,**

PhD, ассоц. профессор, доцент, ORCID ID: 0000-0003-1381-4532,

e-mail: m.c.erzhan@mail.ru

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

ПЛАЗМОННЫЙ РЕЗОНАНС В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ZnO С НАНОЧАСТИЦАМИ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Аннотация

Главным недостатком традиционных оксидов металлов, в том числе оксида цинка (ZnO), является слабое поглощение света в видимом диапазоне. Из множества путей решения данной проблемы создание их композиции с наночастицами (NPs) благородных металлов является наиболее интересным как с практической, так и с теоретической точки зрения. Благодаря эффекту локализованного поверхностного плазмонного резонанса (ЛППР), характеризующегося полосой поглощения света в видимом диапазоне, функциональность оксидных полупроводников может быть существенно улучшена. В этой работе представлены результаты получения композитных пленок на основе ZnO с наночастицами благородных металлов (серебра Ag, золота Au и их сплава AgAu) методом магнетронного распыления, а также анализ эффекта ЛППР в данных композитах. В пленках ZnO:AgNPs ЛППР поглощение наблюдалось на 475 нм, а для ZnO:AuNPs – на 535 нм. Сплавленные наночастицы AuAg демонстрируют максимум с пиком в промежуточном интервале двух этих значений, т.е. в области 508 нм. Полученные данные свидетельствуют о том, что, контролируя состав наночастиц благородных металлов, можно эффективно управлять полосой поглощения света в видимом диапазоне излучения.

Ключевые слова: оксид цинка, наночастицы, серебро, золото, локализованный поверхностный плазмонный резонанс, магнетронное распыление.

Введение

Несмотря на высокую стоимость, наночастицы благородных металлов до сих пор привлекают огромное внимание ученых благодаря своим уникальным плазмонным характеристикам. В частности, в системах с наночастицами серебра (Ag) или золота (Au) наблюдается эффект локализованного поверхностного плазмонного резонанса (ЛППР) [1, 2]. Последнее имеет место, когда падающий свет вызывает резонансное колебание электронов в наночастице. Важно, что резонансная частота зависит от размеров, формы и состава наночастиц, а также их окружения. В частности, известно, что увеличение размеров частиц приводит к смещению резонанса в

сторону длинных волн [3, 4]. Форма наночастиц также играет важную роль: анизотропные структуры, такие как наностержни и нанозвезды, позволяют значительно расширить диапазон плазмонного резонанса [5]. Для наночастиц Ag и Au сферической формы резонансная частота приходится на видимый диапазон излучения. При резонансном освещении происходит локализация энергии падающего излучения на поверхности наночастицы [6, 7], что приводит к возникновению сильного радиального поля вблизи ее поверхности, способного поляризовать органические макромолекулы. Этот эффект является основой техники гигантского (поверхностно-усиленного) комбинационного рассеяния света, которое позволяет детектировать одиночные молекулы [8]. Кроме того, сильная зависимость положения пика плазмонного резонансного поглощения от показателя преломления окружающей среды позволяет создавать датчики показателя преломления [9, 10]. Обзор публикаций последних лет свидетельствует о возрастающем интересе к термооптическим свойствам Au NPs, особенно для медицинских целей и фотокатализа [11–13].

Другой немаловажной областью применения металлических наночастиц является сенсбилизация широкозонных оксидных полупроводников путем создания их композиции. Такое сочетание увеличивает фотокаталитические свойства полупроводников. Наночастицы благородных металлов за счет процессов обмена зарядов на границе металл – полупроводник могут привести к снижению скорости рекомбинации (увеличению времени жизни) неравновесных носителей заряда полупроводника. Во многих работах доказано, что при освещении такой системы УФ-излучением увеличение фотокаталитической активности происходит за счет захвата электронов из зоны проводимости полупроводника металлом и обратный процесс наблюдается при освещении видимым светом.

Ярким представителем широкозонных полупроводников является оксид цинка (ZnO), который широко применяется в различных областях. В частности, ZnO обладает замечательной физической и химической стабильностью [14], большой зоной пропускания и энергией связи экситонов [15], что делает его незаменимым в оптоэлектронике и солнечных батареях [16].

В этой работе основное внимание уделено возможности контролируемого изменения положения полосы поглощения света в композитных тонких пленках ZnO:MeNPs (Ag/Au NPs). Пленки были получены методом магнетронного распыления комбинированной мишени с последующей термической обработкой.

Материалы и методы

Тонкие пленки ZnO:Ag/Au были получены методом ВЧ магнетронного распыления комбинированной мишени, состоящей из круглой заводской мишени оксида цинка (4N, 3”), в зоне эрозии которой были симметрично расположены стержни серебра (Ag) и золота (Au) размером 0,5 мм × 10 мм. Аналогичная схема используемой установки представлена в [17] работе. Осаждение пленок осуществлялось в течение 30 минут при постоянной мощности ВЧ разряда (70 Вт) и давлении (0,7 Па), обеспечивающемся постоянным потоком ОСЧ аргона в 60 стандартных кубических сантиметрах в минуту. Расстояние между мишенью и подложкой было зафиксировано на 8 см, что обеспечивало однородность пленок по толщине.

В качестве подложек были использованы кварцевые стекла (КУ-1) для изучения оптических спектров поглощения, кремниевые подложки (n типа, ориентация (100), сопротивление 5 Ом) для элементного анализа и определения толщины. Для получения изолированных наночастиц полученные свежесоздаанные пленки подвергались отжигу в муфельной печи. Отжиг проводился в течение 20 минут при температуре 500 °С в условиях атмосферы воздуха. При этом скорость нагрева печи составляла ~12 °С, а охлаждение было естественным. Параметры отжига подбирались таким образом, чтобы при кристаллизации оксидной матрицы не происходило формирование трещин и размер металлических наночастиц сохранялся минимальным.

Состав свежееосажденных тонких пленок контролировался методом энергодисперсионного анализа на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Quanta 3D 200i с приставкой EDAX. Структура композитов ZnO:MeNPs была охарактеризована методом рамановской спектроскопии на приборе Solver Spectrum (NT-MDT) с лазерными источниками возбуждения 473 нм и 633 нм в диапазоне от 50 до 1500 см⁻¹ и временем экспозиции 100 с. Наличие наночастиц благородных металлов было подтверждено результатами исследования поверхности методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) (Solver Spectrum, NT-MDT) и СЭМ. Оптические спектральные характеристики тонких пленок были исследованы в диапазоне видимого излучения на спектрофотометре Shimadzu UV-3600.

Основные положения

Традиционные оксиды металлов, такие как ZnO, имеют слабое поглощение света в видимом диапазоне. Одним из решений этой проблемы является создание композитов с наночастицами благородных металлов (Ag, Au, и их сплава AgAu), которые обладают эффектом локализованного поверхностного плазмонного резонанса (ЛППР).

В пленках ZnO ЛППР поглощение наблюдалось на 475 нм, в ZnO – на 535 нм, а сплавленные наночастицы AuAg показывали максимум в области 508 нм. Это свидетельствует о возможности контролировать полосу поглощения света путем изменения состава наночастиц.

Результаты и обсуждение

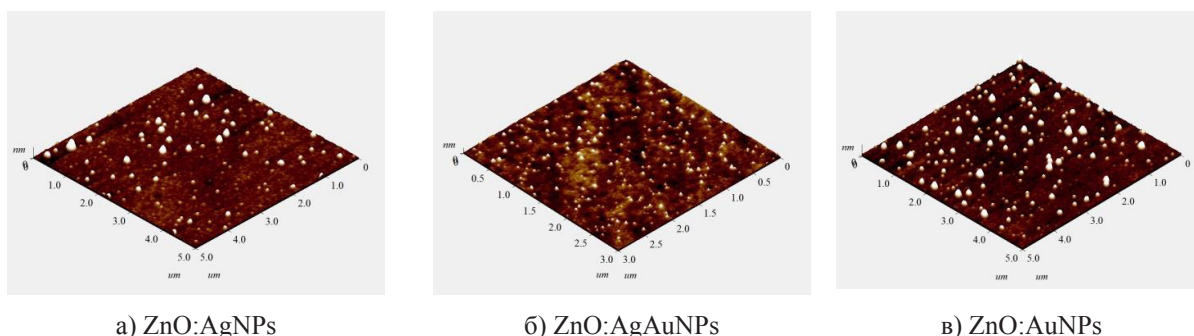
1. Структура и морфология тонких пленок ZnO:MeNPs

В таблице 1 представлены результаты элементного анализа состава свежееосажденных пленок, толщины и количество использованных стержней благородных металлов на поверхности распыляемой мишени. При указанных количествах стержней композитные пленки содержали около 1–2 ат. % благородных металлов, а их толщины, выявленные сканированием скоса структуры ZnO:Me/Si, составляли 105–109 нм.

Таблица 1 – Толщины и элементный состав тонких композиционных пленок ZnO:Me

#	Обозначение образца	Метал. стержни, шт.	Толщина, Нм	Zn, ат. %	O, ат. %	Ag, ат. %	Au, ат. %
1	ZnO:AgNPs	4 Ag	105	49.49	49.38	1.13	-
2	ZnO:AgAuNPs	2-Ag, 2-Au	106	49.39	49.27	0.79	0.55
3	ZnO:AuNPs	4 Au	109	49.48	49.14	-	1.38

Свежееосажденные композиционные пленки ZnO:MeNPs обладали высокой прозрачностью, что, в свою очередь, означает, что примеси металла не образовали изолированные наночастицы в матрице ZnO. Последующий отжиг в воздушной атмосфере привел к частичной кристаллизации матрицы и образованию наночастиц на поверхности пленок ZnO. Это утверждение подтверждается результатами исследования поверхностей отоженных пленок методами АСМ и СЭМ. На рисунке 1 представлены АСМ изображения морфологии поверхностей отоженных тонких пленок ZnO:Ag/Au. Видно, что на поверхности пленок ZnO появились наночастицы со средним диаметром ~20–30 нм. На рисунке 2 также представлены СЭМ изображения поверхности указанных пленок, на которых также можно заметить белые пятна, соответствующие наночастицам благородных металлов.

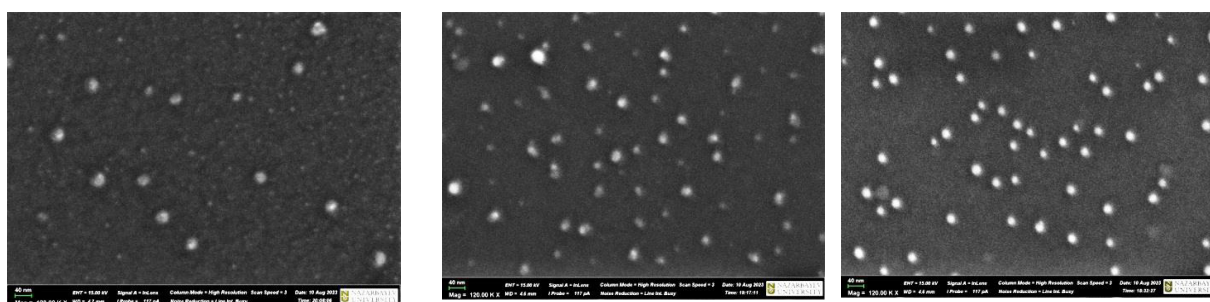


а) ZnO:AgNPs

б) ZnO:AgAuNPs

в) ZnO:AuNPs

Рисунок 1 – АСМ изображения поверхности пленок ZnO:MeNPs после отжига



а) ZnO:AgNPs

б) ZnO:AgAuNPs

в) ZnO:AuNPs

Рисунок 2 – СЭМ изображения поверхности тонких пленок ZnO:MeNPs после отжига

В кристаллическом ZnO ширина запрещенной зоны составляет около 3.3 эВ, но при добавлении наночастиц серебра и золота возникают ЛППР, которые могут изменять ширину зоны. В аморфном ZnO с наночастицами металлов ширина запрещенной зоны также изменяется, причем дефекты и неоднородности структуры усиливают этот эффект [18].

Кроме того, важно помнить, что кристаллическая фаза ZnO за счет своей упорядоченной структуры обеспечивает более высокие оптические свойства, включая показатель преломления (2,0–2,1), по сравнению с аморфной формой (1,6–1,9), что оказывает существенное влияние и на положение пика плазмонного резонанса в композитных материалах с соответствующей матрицей [19].

Структурные характеристики чистого ZnO и композитных пленок ZnO:MeNPs после отжига были изучены методом рамановской спектроскопии. Из рисунка 3 следует, что рамановский спектр чистого ZnO содержит два наиболее ярко выраженных пика в области 437 и 575 см^{-1} , соответствующих $E_2(\text{high})$ и $A_1(\text{LO})/E_1(\text{LO})$ фоновым модам. Широкий пик в области $\sim 1100 \text{ см}^{-1}$ соответствует двум фоновым модам оксида цинка 2LO при 1104 см^{-1} и $2A_1(\text{LO})$ при 1155 см^{-1} . При этом пик в области 575 см^{-1} соответствует дефектной структуре оксида цинка. Уширение в диапазоне частот от 300 до 500 см^{-1} объясняется влиянием сигнала подложки аморфного оксида кремния на рамановский спектр ZnO [20–21].

Исследование композитных тонких пленок ZnO:MeNPs осуществлялось с использованием двух длин волн возбуждающего лазера: 473 нм и 633 нм. Это связано с влиянием прямых электронных переходов в наночастицах благородных металлов на рамановский спектр пленки ZnO, так как возникает излучательная рекомбинация электронов в металле. Известно, что энергия прямых межзонных переходов для серебра приходится на $\sim 4 \text{ эВ}$, а для золота эта энергия равна $\sim 2,4 \text{ эВ}$ [22]. Действительно, рамановские спектры ZnO:AgAuNPs и ZnO:AuNPs, полученные с использованием 473 нм лазера (рисунок 3 а)), неинформативны из-за растущей

го тренда флуоресценции наночастиц. Аналогичные спектры, полученные с использованием 633 нм лазера (рисунок 3 б)), содержат пики в области 575 см^{-1} , соответствующие дефектной структуре оксида цинка, и широкие пики в области 437 см^{-1} основного пика ZnO. Обратная картина наблюдалась для композитной пленки ZnO:AgNPs. Рамановский спектр ZnO:AgNPs, полученный с использованием 473 нм и 633 нм лазеров, содержит интенсивный дефектный пик в области 575 см^{-1} и широкий пик в области $\sim 355\text{ см}^{-1}$, вероятно, соответствующий двум фоновым модам оксида цинка $E_2(\text{high})$ - $E_2(\text{low})$ и $A_1(\text{TO})$ [23].

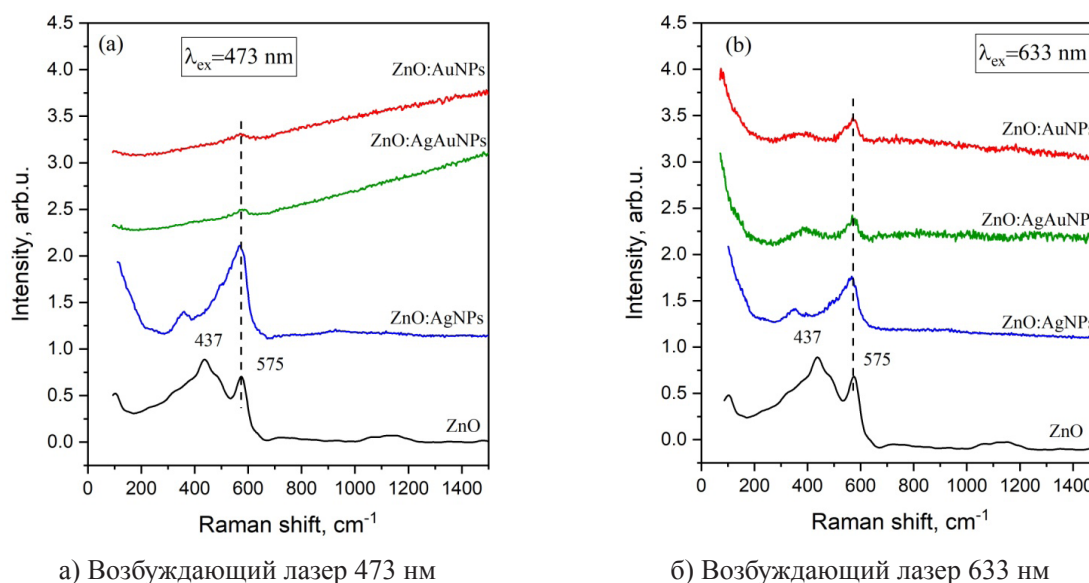


Рисунок 3 – Раман спектры пленки ZnO и композитных тонких пленок ZnO:MeNPs

2. Локализованный поверхностный плазмонный резонанс в ZnO:MeNPs

Наличие эффекта локализованного поверхностного плазмонного резонанса в отожженных пленках в ZnO:MeNPs было подтверждено результатами исследования спектральной зависимости оптической плотности композитных пленок. На рисунке 4 представлены спектры оптической плотности рассматриваемых композиционных пленок ZnO:AgAu, нормированные на максимум пика плазмонного поглощения. При этом для композитной пленки ZnO:AgNPs пик резонансного поглощения приходится на 475 нм, а для ZnO:AgAuNPs – на 535 нм. Сплавленные наночастицы AuAg демонстрируют максимум с пиком в промежуточном интервале двух этих значений, т.е. в области 508 нм. Следует отметить, что чистая пленка ZnO имеет низкое поглощение света в видимом диапазоне.

На основе представленной на рисунке 4 спектральной зависимости оптической плотности можно заключить, что изменение состава наночастиц сплава AuAg, приводит к сдвигу положения пика поглощения света. В качестве доказательства на рисунке 5 представлены нормированные спектры оптической плотности, полученные с применением разных количеств золотых и серебряных стержней в процессе распыления. Нижние индексы в описании обозначают количество использованных стержней в процессе распыления. Из представленных на рисунке 5 графиков видно, что путем изменения состава металлических наночастиц можно эффективно управлять полосой поглощения света, связанной с эффектом локализованного поверхностного плазмонного резонанса.

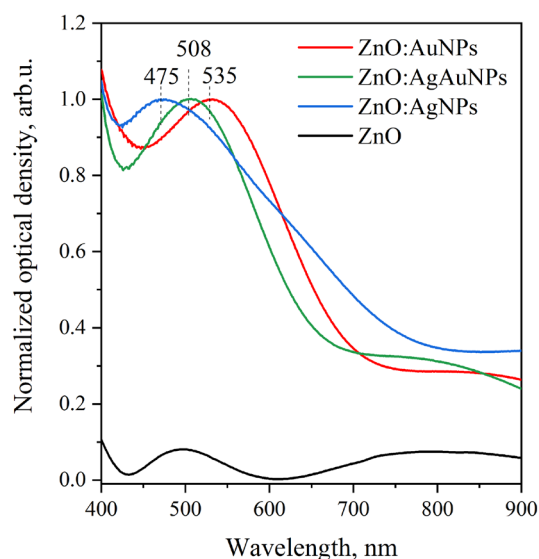


Рисунок 4 – Нормализованные спектры оптической плотности для пленки ZnO и композитных тонких пленок ZnO:MeNPs

Следует отметить, что увеличение времени отжига также может влиять на положение максимума поглощения, так как при высокой температуре происходит сильная диффузия ионов металлов. Длительный отжиг приводит к увеличению размеров наночастиц на поверхности пленок ZnO, что, как широко известно, приводит к красноволновому смещению пика поглощения [24]. Кроме того, на положение пика поглощения влияет и расстояние между наночастицами. Это, в свою очередь, означает, что концентрация металла также приведет к существенному изменению пика. Тем не менее продемонстрированный в работе механизм настройки оптического поглощения имеет ряд преимуществ по сравнению с вышеуказанными процессами. Так, например, известно, что ионы серебра имеют высокую диффузионную способность [25] и композиты на их основе могут со временем изменять оптические свойства [26] в отличие от более стабильных композитов с наночастицами Au. Однако плазмонные эффекты наиболее ярко проявляются именно в наночастицах Ag. Поэтому создание композитных пленок на основе наночастиц сплава AgAu и оксидной матрицы позволит стабилизировать свойства композита без существенных потерь в эффективности.

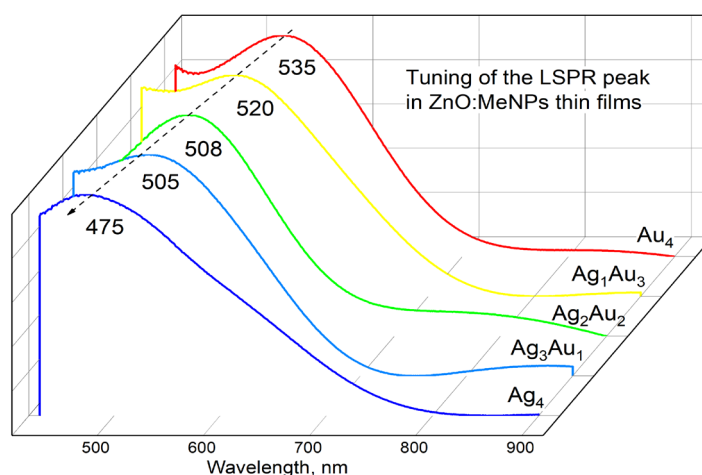


Рисунок 5 – Нормализованные спектры оптической плотности в композиционных тонких пленках ZnO:MeNPs

Заклучение

В данной работе продемонстрирована возможность создания композитных тонких пленок оксида цинка ZnO с наночастицами благородных металлов Ag, Au и AgAu. Композиты были получены путем термической обработки пленок ZnO:Me, полученных методом магнетронного ВЧ распыления комбинированной мишени. В работе показано, что путем создания наночастиц сплава AgAu можно эффективно управлять полосой резонансного поглощения света в видимом диапазоне. Анализ структуры методом рамановской спектроскопии указывает на необходимость исследования таких систем с применением различных длин волн возбуждающего лазера из-за проявления флуоресцентного тренда, связанного с прямыми межзонными электронными переходами в благородных металлах. Полученные в рамках работы композитные пленки могут представлять интерес при создании оптических фильтров, сенсоров окружающей среды, электродов фотоэлектрохимических ячеек, предназначенных для очистки сточных вод и преобразования солнечной энергии.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Khurana K., Jaggi N. Localized Surface Plasmonic Properties of Au and Ag Nanoparticles for Sensors: A Review. *Plasmonics*, 2021, no.16, pp. 981–999.
- 2 Guglielmelli A., Pierini F., Tabiryan N., Umeton C., Bunning T.J., De Sio L. Thermoplasmonics with Gold Nanoparticles: A New Weapon in Modern Optics and Biomedicine. *Adv. Photonics Res.* 2021, no. 2, p. 2000198.
- 3 F.Y. Alzoubi, Ahmad A. Ahmad, Ihsan A. Aljarrah, A.B. Migdadi, and Qais M. Al-Bataineh. Localize surface plasmon resonance of silver nanoparticles using Mie theory. *J. Mater Sci: Mater Electron*, 2023, no. 34, p. 2128.
- 4 Koichi Okamoto, Daisuke Tanaka, Tetsuya Matsuyama, Kenji Wada, Yusuke Arima and Kaoru Tamada. Design and Optimization of Silver Nanostructured Arrays in Plasmonic Metamaterials for Sensitive Imaging Applications. *J. Photonics*, 2024, vol. 11, no. 4, p. 292.
- 5 Novikov S.M., Popok V.N., Fiutowski J., Arsenin A.V. and Volkov V.S. Plasmonic properties of nanostructured graphene with silver nanoparticles. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, no. 1461, p. 012119.
- 6 Baffou G., Cichos F., Quidant R. Applications and Challenges of Thermoplasmonics. *Nat. Mater.*, 2020, no. 19, pp. 946–958.
- 7 Chehadi Z., Girardon J.S., Capron M., Dumeignil F., Jradi S. Thermoplasmonic-Induced Energy-Efficient Catalytic Oxidation of Glycerol over Gold Supported Catalysts Using Visible Light at Ambient Temperature. *Appl. Catal. A Gen.*, 2019, no. 572, pp. 9–14.
- 8 Brognara A., Bricchi B.R., William L., Brinza O., Konstantakopoulou M., Bassi A.L., Ghidelli M., Lidgi-Guigui N. New Mechanism for Long Photo-Induced Enhanced Raman Spectroscopy in Au Nanoparticles Embedded in TiO₂. *Small*, 2022, no. 18, p. 2201088.
- 9 Ye J., Arul R., Nieuwoudt M.K., Dong J., Zhang T., Dai L., Greenham N.C., Rao A., Hoye R.L.Z., Gao W. et al. Under-standing the Chemical Mechanism behind Photoinduced Enhanced Raman Spectroscopy. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2023, no. 14, pp. 4607–4616.
- 10 Lyu P., Espinoza R., Nguyen S.C. Photocatalysis of Metallic Nanoparticles: Interband vs Intraband Induced Mechanisms. *J. Phys. Chem. C*, 2023, vol. 127, no. 32, pp. 15685–15698
- 11 Rituraj Borah, Rajeshreddy Ninakanti, Sara Bals & Sammy W. Verbruggen. Plasmon resonance of gold and silver nanoparticle arrays in the Kretschmann (attenuated total reflectance) vs. direct incidence configuration. *J. Scientific Reports*, 2022, vol. 12, Article number: 15738.
- 12 Alexis Loiseau, Victoire Asila, Gabriel Boitel-Aullen, Mylan Lam, Michèle Salmain and Souhir Boujday. Silver-Based Plasmonic Nanoparticles for and Their Use in Biosensing. *J. Biosensors (Basel)*, 2019 Jun., vol. 9, no. 2, p. 78.
- 13 Karunakaran C., Rajeswari V., Gomathisankar P. Combustion synthesis of ZnO and Ag-doped ZnO and their bactericidal and photocatalytic activities. *J. Superlattices and Microstructures*, 2011, vol. 50, Issue 3, pp. 234–241.
- 14 Linhua Xu, Gaige Zheng, Lilong Zhao, Shixin Pei. Two different mechanisms on UV emission enhancement in Ag-doped ZnO thin films. *J. Journal of Luminescence*, 2015, vol. 158, pp. 396–400.
- 15 Zhuang T.-T., Liu Y., Li Y., Sun M., Sun Z.-J., Du P.-W., Jiang J., Yu S.-H. 1D Colloidal Hetero-Nanomaterials with Programmed Semiconductor Morphology and Metal Location for Enhancing Solar Energy Conversion. *J. Small.*, 2017, no. 13, p. 1602629.

- 16 Mwankemwa B.S., Nambala F.J., Kyeyune F., Hlatshwayo T.T., Nel J.M., Diale M. Materials Science in Semiconductor Processing, 2017, no. 71, pp. 209–216.
- 17 Prikhodko O., Dosseke U., Nemkayeva R., Rofman O., Guseinov N., Mukhametkarimov Ye. Localized surface plasmon resonance phenomenon in Ag/Au-WO₃-x nanocomposite thin films. J. Thin Solid Films, 2022, no. 757, p. 139387.
- 18 Asaad A. Kamil, Nabeel A. Bakr, Mubarak T.H., Al-Zanganawee J. Effect of Au and Ag nanoparticles addition on the morphological, structural and optical properties of ZnO thin films deposited by sol-gel method. J. Journal of Ovonic Research, 2022, vol. 18, no. 3, pp. 431–442.
- 19 Ziaul Raza Khan, Mohd Shueb Khan, Mohammad Zulfequar, Mohd Shahid Khan. Optical and Structural Properties of ZnO Thin Films Fabricated by Sol-Gel Method. J. Materials Sciences and Applications, 2011, no. 2, pp. 340–345.
- 20 Kumar P., Som S., Pandey M. K., Das S, Chanda A, Singh J. Journal of Alloys and Compounds 744, 2018, pp. 64–74.
- 21 Prabhu S., Pudukudy M., Sohila S., Harish S., Navaneethan M., Navaneethan D., Ramesh R., Hayakawa Y., Optical Materials, 2018, no. 79, pp. 186–195.
- 22 Changhwan Lee, Yujin Park and Jeong Young Park. Hot electrons generated by intraband and interband transition detected using a plasmonic Cu/TiO₂ nanodiode. RSC Adv., 2019, no. 9, pp. 18371–18376.
- 23 Siti Huzaimah Ributa, Che Azuranim Che Abdullaha, Mohd Zaki Mohammad Yusof. Investigations of structural and optical properties of zinc oxide thin films growth on various substrates. J. Results in Physics, 2019, vol. 13, p.102146.
- 24 Quinten M. Optical Properties of Nanoparticle Systems: Mie and Beyond, November 2010, p. 502. ISBN: 978-3-527-63315-9.
- 25 Shaheen Husain, Aditya Nandi, Faizan Zarreen Simnani, Utsa Saha, Aishee Ghosh, Adrija Sinha, Aarya Sahay, Shailesh Kumar Samal, Pritam Kumar Panda and Suresh K. Verma. Emerging Trends in Advanced Translational Applications of Silver Nanoparticles: A Progressing Dawn of Nanotechnology. J. Funct. Biomater., 2023, 14, 47.
- 26 Takeo Tomiyama, Ikuo Mukai, Hiroshi Yamazaki and Yoshihiko Takeda. Optical properties of silver nanowire/polymer composite films: absorption, scattering and color difference. J. Optical Materials Express, 2020, vol. 10, Issue 12, pp. 3202–3214.

^{1*}Кошанова А.Б.,

докторант, ORCID ID: 0009-0003-6842-2955

e-mail: aizhankoshanova.kz@gmail.com

¹Немкаева Р.Р.,

физ.-тех.ғылымдарының магистрі, ORCID ID: 0000-0002-8782-703X

e-mail: quasisensus@mail.ru

¹Гусейнов Н.Г.,

физ.-тех.ғылымдарының магистрі, ORCID ID: 0000-0003-4804-5323

e-mail: solar_neo@mail.ru

¹Мархабаева А.А.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0657-422X

e-mail: aiko_marx@mail.ru

¹Мухаметкаримов Е.С.,

PhD, қауымдастырылған профессор, доцент, ORCID ID: 0000-0003-1381-4532

e-mail: m.c.erzhan@mail.ru

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

АСЫЛ МЕТАЛДАР НАНОБӨЛШЕКТЕРІ ҚОСЫЛҒАН ZnO ЖҰҚА ҚАБЫРШАҚТАРЫНДАҒЫ ПЛАЗМОНДЫҚ РЕЗОНАНС

Аңдатпа

Дәстүрлі металл оксидтерінің, соның ішінде мырыш оксидінің (ZnO) негізгі кемшілігі – көрінетін аумақта жарықты әлсіз жұтуы. Бұл мәселені шешуде практикалық және теориялық көзқарас тұрғысынан көп

қызығушылық тудыратын жолдарының бірі – олардың құрамына асыл металдардың нанобөлшектерін (NPs) қосу арқылы композиттер алу. Мұндай композиттер жарықтың көрінетін аумағындағы жұтылу жолағын локальды беттік плазмондық резонанс (ЛБПР) эффектісі арқылы кеңейтіп, оксидті жартылайөткізгіштердің функционалдық қасиеттерін едәуір арттыра алады. Бұл жұмыста магнетрондық тозаңдандыру әдісі арқылы асыл металдардың (күміс – Ag, алтын – Au және олардың қоспасы – AgAu) нанобөлшектері қосылған ZnO негізіндегі композициялық қабыршақтарды алу нәтижелері ұсынылған. Сондай-ақ, осы композиттердегі ЛБПР әсерінің талдауы жасалды. Аталған ZnO қабыршақтарында ЛБПР әсері 475 нм, ал ZnO үшін 535 нм толқын ұзындығында байқалды. AuAg біріктірілген нанобөлшектері осы екі толқын ұзындықтарының аралығындағы диапазонда, нақтырақ айтқанда, 508 нм-де ЛБПР-дің максималды пикін көрсетті. Алынған нәтижелер асыл металл нанобөлшектерінің құрамын өзгерту арқылы көрінетін спектр аймағындағы жарықты жұту жолағын тиімді басқаруға болатынын көрсетті.

Тірек сөздер: цинк оксиді, нанобөлшектер, күміс, алтын, локальды беттік плазмондық резонанс, магнетрондық тозаңдандыру.

¹**Koshanova A.B.,**

doctoral student, ORCID ID: 0009-0003-6842-2955,
e-mail: aizhankoshanova.kz@gmail.com

¹**Nemkayeva R.R.,**

Master of Phys.-Tech Sciences, ORCID ID: 0000-0002-8782-703X,
e-mail: quasisensus@mail.ru

¹**Guseinov N.G.,**

Master of Phys.-Tech Sciences, ORCID ID: 0000-0003-4804-5323,
e-mail: solar_neo@mail.ru

¹**Markhabayeva A.A.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0657-422X,
e-mail: aiko_marx@mail.ru

¹**Mukhametkarimov Ye.S.,**

PhD, Associate Professor, ORCID ID: 0000-0003-1381-4532,
e-mail: m.c.erzhan@mail.ru

¹Al-Farabi Kazakh National University, Department of Physics and Technology,
Almaty, Kazakhstan

PLASMON RESONANCE IN THIN ZnO FILMS WITH NANOPARTICLES OF NOBLE METALS

Abstract

The main disadvantage of traditional metal oxides, including zinc oxide (ZnO), is poor absorption of light in the visible range. Among the many ways to solve this problem, the creation of their composition with noble metal nanoparticles (NPs) is the most interesting from both practical and theoretical points of view. Due to the effect of localized surface plasmon resonance (LSPR), characterized by a light absorption band in the visible range, the functionality of oxide semiconductors can be significantly improved. This work presents the results of preparation of composite films based on ZnO with nanoparticles of noble metals (silver Ag, gold Au and their alloy AgAu) by magnetron sputtering, as well as the analysis of the LSPR effect in these composites. In ZnO:AgNPs films, the LSPR absorption was observed at 475 nm, while for ZnO:AuNPs at 535 nm. The AuAg alloy nanoparticles exhibit a maximum in the intermediate interval of these two values, i.e., in the region of 508 nm. The obtained data indicate that by controlling the composition of noble metal nanoparticles it is possible to effectively control the light absorption band in the visible range.

Key words: zinc oxide, nanoparticles, silver, gold, localized surface plasmon resonance, magnetron sputtering.

Дата поступления статьи в редакцию: 18.06.2024

УДК 538.9

МРНТИ 29.19.16; 29.19.22

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-219-233>

¹Шонғалова А.Қ.,

PhD, с.н.с., ORCID ID: 0000-0002-7352-9007,
e-mail: shongalova.aigul@gmail.com

¹Лебедев И.А.,

докт. физ.-матем. наук, ORCID ID: 0000-0002-7562-9925,
e-mail: lebedev692007@yandex.ru

^{1*}Бондарь Е.А.,

PhD, с.н.с., ORCID ID: 0000-0001-6745-5462,
*e-mail: bondar@sci.kz

¹Дмитриева Е.А.,

канд. физ.-матем. наук, в.н.с., ORCID ID: 0000-0002-1280-2559,
e-mail: dmitriyeva2017@mail.ru

¹Федосимова А.И.,

PhD, ассоц. профессор, ORCID ID: 0000-0001-9607-6074,
e-mail: ananastasia@list.ru

¹Ибраимова С.А.,

инженер ФТИ, ORCID ID: 0000-0002-6652-9252,
e-mail: sayara_ibraimova@mail.ru

¹Кемелбекова А.Е.,

PhD, с.н.с., ORCID ID: 0000-0003-4813-8490,
e-mail: a.kemelbekova@sci.kz

¹Жұмабай Б.,

м.н.с., ORCID ID: 0000-0001-8603-633,
e-mail: b.Zhymabay@sci.ox

¹Нұрбаев Б.М.,

инженер ФТИ, ORCID ID: 0000-0002-3059-6349,
e-mail: bedel.armia.99@gmail.com

¹Исаева Ұ.Б.,

PhD, м.н.с., ORCID ID: 0000-0001-6976-6096,
e-mail: ulyajan_1603@mail.ru

²Кучкаров К.М.,

докт. физ.-матем. наук, ORCID ID: 0000-0002-2238-7205,
e-mail: k.kuchkarov@mail.ru

¹Физико-технический институт, Satbayev University, г. Алматы, Казахстан

²Физико-технический институт Академии наук Республики Узбекистан,
г. Ташкент, Узбекистан

ИЗУЧЕНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СТРУКТУР В НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНКАХ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ОЛОВА

Аннотация

Среди большого числа физических и химических методов получения материалов с разнообразными функциональными характеристиками одним из весьма интересных и простых методов является золь-гель технология. Материалы, синтезированные при помощи золь-гель технологии, имеют высокую химическую однородность, что определенно является большим плюсом. А благодаря изменению исходных условий среды и параметров растворов имеется возможность контроля размера и формы получаемых частиц, а также структуры пор синтезируемых продуктов. В настоящее время большое внимание уделяется изучению иерархических структур на основе диоксида олова. Поскольку их отличают большая площадь поверхности, стабильные физико-химические свойства, низкая стоимость получения, экологичность метода, а также высокая поверхностная проницаемость и низкая плотность. Настоящая статья описывает результаты синтеза иерархических структур в тонких пленках на основе диоксида олова. Исходным раствором является лиофильная

пленкообразующая система $\text{SnCl}_4/\text{EtOH}/\text{NH}_4\text{OH}$. Обнаружена прямая зависимость формирования иерархических структур от объема добавки гидроксида аммония. Что способствует контролю формы и размера синтезируемых структур при изменении соотношения исходных прекурсоров. И, как следствие, позволяет влиять на конечные физико-химические характеристики получаемых образцов для дальнейшего их применения в качестве прозрачных проводящих покрытий, сенсоров различных газов (в том числе токсичных), в солнечных панелях и т.д.

Ключевые слова: диоксид олова, золь-гель метод, иерархические структуры, наноразмерные пленки, оптические свойства, сенсоры газов.

Введение

Среди большого числа физических и химических методов получения материалов с разнообразными функциональными характеристиками одним из весьма интересных и простых методов является золь-гель технология [1–5]. Золь-гель технология включает в себя синтез материалов из исходных растворов (к примеру, пленкообразующих), причем на первой стадии раствор модифицируется при «созревании» в золь, а на второй стадии золь переходит уже в гель. Спектр применения золь-гель технологии очень обширен. К примеру, золь-гель технология используется для получения опто-химических датчиков [6], композитных фотокатализаторов [7], для получения материалов, применяемых для каталитической очистки частиц сажи из дизельных двигателей [8], для синтеза флуоресцентных наноперовскитов, которые применяются в дактилоскопии [9]. Следует отметить, что золь-гель метод зарекомендовал себя как основа новейших нанотехнологий синтеза наночастиц для потенциального применения в дозиметрии [10]. С помощью золь-гель метода получают тонкие пленки для перовскитных солнечных элементов [11]. Более того, золь-гель методом получают наноструктуры, применяемые для удаления кристаллического фиолетового красителя из водных сред. Данный краситель представляет значительную опасность для здоровья человека, включая канцерогенные и мутагенные эффекты, а также опасность для окружающей среды из-за его стойкости и токсичности в водных экосистемах [12]. Ну и, наконец, с помощью золь-гель технологии получают тонкие наноструктурные пленки на основе диоксида олова [13]. Тонкие наноструктурированные пленки, нанодисперсные порошки, а также композитные системы из SnO_2 представляют собой функциональные материалы со множеством применений. Покрытия на основе диоксида олова применяют как трехмерный макропористый анод в литий-ионных батареях, как активные слои или же основу в газовых сенсорах, а также как защитный слой от коррозии и т.д. [14, 15]. Следует отметить, что одно из основных свойств наноструктурированных тонких пленок SnO_2 заключается в изменении электропроводности при адсорбции газа. В связи с чем они находят применение в сенсорах газов различного рода, в том числе имеющих токсичное и взрывоопасное действие [16–19].

Одной из важных характеристик формирования синтезируемых тонких пленок диоксида олова является pH-уровень исходных пленкообразующих растворов. Зачастую в экспериментах работают с pH растворов в диапазоне от 7 до 11 [20]. Настоящая работа направлена на диапазон в интервале от 1,4–1,53 для pH. Что не случайно, поскольку в данном диапазоне меняются характеристики поглощения света, а также поверхностного сопротивления. И поверхностный диоксид олова переходит в объемный.

Формирование структур различного рода влияет на уникальность свойств наноматериалов. Отмечается, что у иерархических структур формирование полезных функций происходит как в нанометровой, так и в других структурных областях [21]. Иерархические структуры, сформированные в тонких пленках диоксида олова, отличаются большой площадью поверхности, стабильные физико-химические свойства, низкая стоимость получения, экологичность метода, а также высокая поверхностная проницаемость и низкая плотность.

Материалы и методы

Для проведения эксперимента по синтезу пленкообразующих систем применены следующие реагенты:

- 1) порошок пятиводного хлорида олова $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$;

- 2) этиловый спирт C_2H_5OH (ГОСТ 5962-13);
- 3) концентрированный водный раствор аммиака NH_4OH .

Всего было приготовлено 6 пленкообразующих растворов с помощью золь-гель метода.

Для приготовления которых использовали:

- 1) $m(SnCl_4 \cdot 5H_2O) = 3,9072$ г
- 2) $V(C_2H_5OH) = 100$ мл
- 3) $V(NH_4OH) = 0$ мл; 0,1 мл; 0,2 мл; 0,4 мл; 0,8 мл; 1,6 мл.

Порошок $SnCl_4 \cdot 5H_2O$ засыпали в колбу $V=100$ мл и растворяли в этиловом спирте $V=50$ мл. Далее в отдельную колбу заливали этиловый спирт $V=25$ мл и добавляли необходимое количество концентрированного водного раствора аммиака. Полученный раствор вводили в исходную колбу по каплям. Далее заливали оставшимся объемом этилового спирта. Тщательно перемешивали и отправляли в темное место на сутки для «созревания» раствора.

Таблица 1 демонстрирует объем добавки гидроксида аммония, pH пленкообразующих систем, содержание ионов олова и аммония в 100 мл раствора, а также их соотношение.

Таблица 1 – Уровень pH пленкообразующих растворов в зависимости от объема добавляемого гидроксида аммония, содержание ионов олова и аммония в 100 мл раствора

$V(NH_4OH)$ в мл	pH пленкообразующих систем	Содержание ионов олова в 100мл (в молях)	Содержание ионов аммония в 100мл (в молях)	Соотношение ионов аммония к олову
0	1,40	0,011	0	0
0,2	1,42	0,011	0,0025	0,227
0,4	1,44	0,011	0,005	0,455
0,8	1,46	0,011	0,01	0,909
1,6	1,49	0,011	0,02	1,818

В системах происходят следующие химические реакции:



При взаимодействии с концентрированным водным раствором аммиака протекают следующие реакции:



Синтезируемые образцы наносили на разогретую до $100^\circ C$ стеклянную подложку методом спрей-пиролиза и отжигали в течение 15 минут.

pH среды синтезируемых пленкообразующих растворов измеряли при помощи pH метра «pH – 150M». Морфология поверхности синтезируемых наноразмерных пленок изучалась на оптическом микроскопе МПЭ-11. Для лучшего понимания структуры пленок и распределения в них химических элементов (Sn, N, Cl) сделаны СЭМ-изображения поверхности полученных образцов, проведены картирование и элементный анализ. Эти результаты были получены на сканирующем электронном микроскопе СС-66 (Китай). Прозрачность образцов измеряли на спектрофотометре UNICO Spectro Quest 2800.

Результаты и обсуждение

Для того чтобы оценить функциональные характеристики синтезируемых образцов была изучена их структура. Полученные данные образцов, отожженных на плитке при 100 °С, представлены на рисунке 1.

Рисунок 1 (а) демонстрирует слабую адгезию пленки к поверхности, а также неоднородность поверхности. Наблюдаются структуры круглой формы порядка 3 мкм. Разброс структур по поверхности пленки неравномерен, что может быть связано со скоростью оседания капель раствора на подложку при спрей-пиролизе. При добавлении 0,2 мл гидроксида аммония (рисунок 1(б)) в раствор в пленке образуются структуры крестообразной и цветочкоподобной формы разных размеров от нескольких мкм до десятка мкм. Разнообразие формы структур может быть связано с превалированием содержания ионов Sn над ионами NH_4 , а также с процессом оседания капель раствора на подложку и временем их фиксации. Следует отметить, что распределение структур по поверхности пленки равномерное. На рисунке 1 (в) наблюдаются структуры треугольной и шестиугольной формы, размеры которых порядка нескольких десятков микрометров. Образование подобных структур может указывать на формирование промежуточного соединения, которое образовалось в результате недостаточной температуры отжига. Отмечается стремление структур к образованию конгломератов. Рисунок 1(г) демонстрирует наличие в структуре поверхности как объектов шестигранной и крестообразной формы, так и цветочкоподобной. А это означает, что в составе присутствуют как непосредственно структуры SnO_2 (цветок) и NH_4Cl (крест), но и промежуточное образование. Кроме того, размер структур значительно больше, чем в предыдущих образцах. Размеры структур достигают нескольких сотен микрометров. Но также присутствуют и структуры порядка нескольких микрон. Что тоже может быть связано со скоростью оседания капель и временем их фиксации. Рисунок 1(д) показывает наличие шестигранных и крестообразных структур, тогда как цветочкоподобные структуры не наблюдаются. Что дает повод предположить отсутствие в составе пленок соединения SnO_2 . Следует отметить, что данное предположение исходит из того, что элементарная ячейка диоксида олова имеет форму шестилепесткового цветка, а у соединения NH_4Cl она напоминает крест.

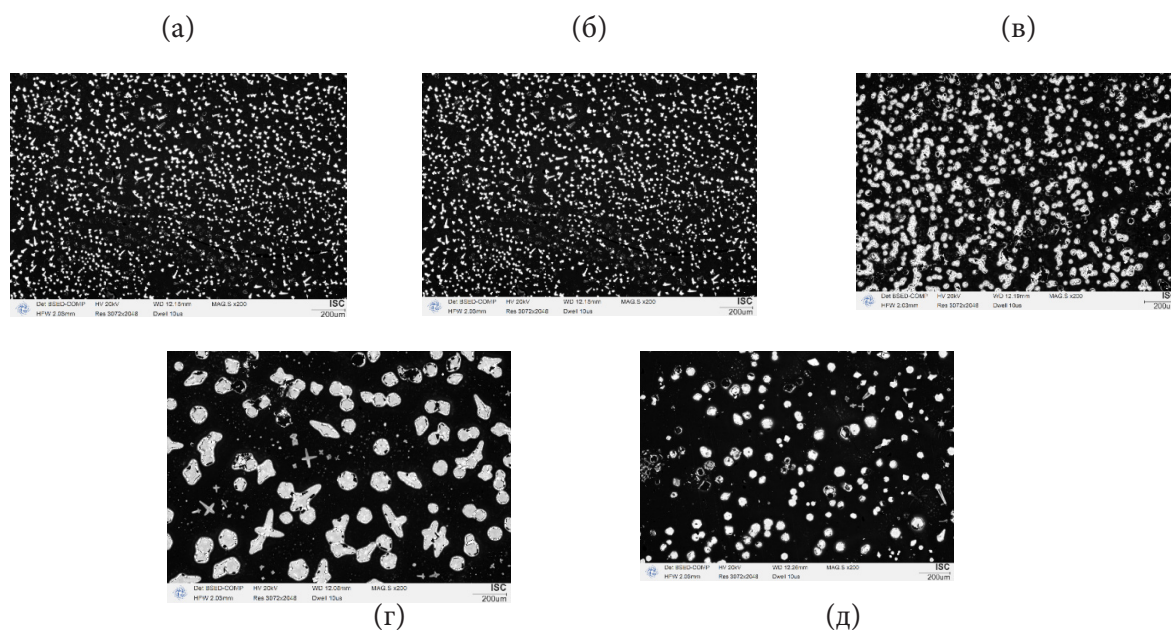


Рисунок 1 – Структура синтезируемых образцов со следующим содержанием гидроксида аммония в 100 мл раствора: а) 0 мл; б) 0,2 мл; в) 0,4 мл; г) 0,8 мл; д) 1,6 мл

Схематично данное описание можно представить следующим образом (рисунок 2):

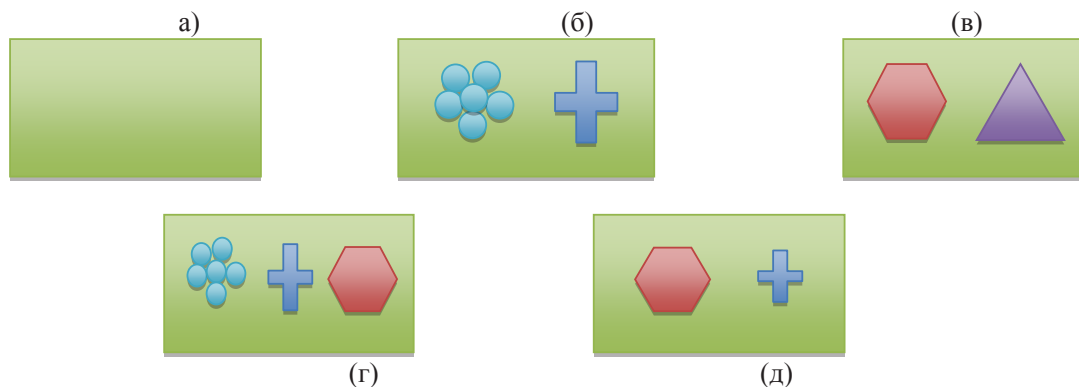
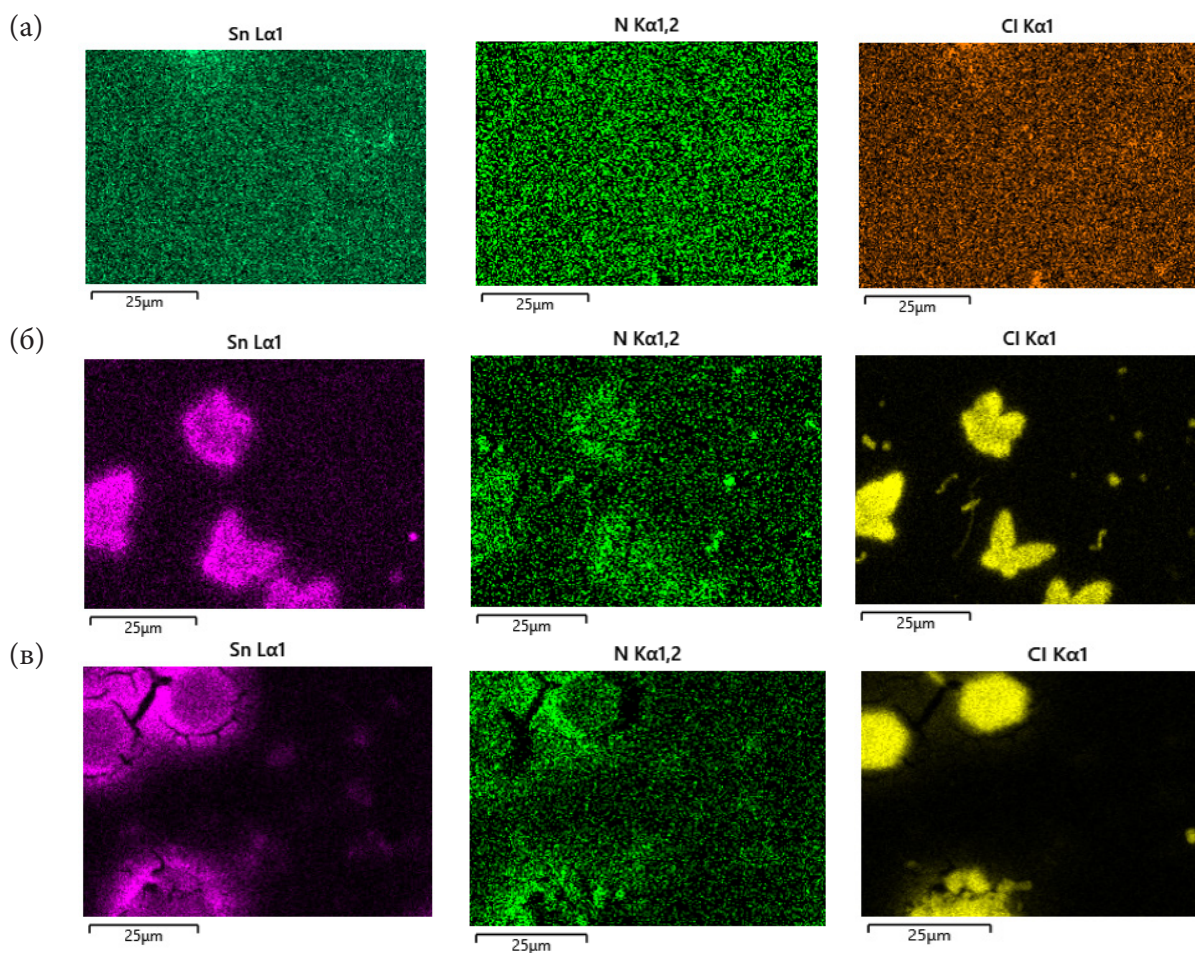


Рисунок 2 – Схема формирования структур в полученных образцах

Для лучшего понимания распределения олова, азота и хлора в полученных образцах было проведено их картирование. Результаты представлены на рисунке 3.



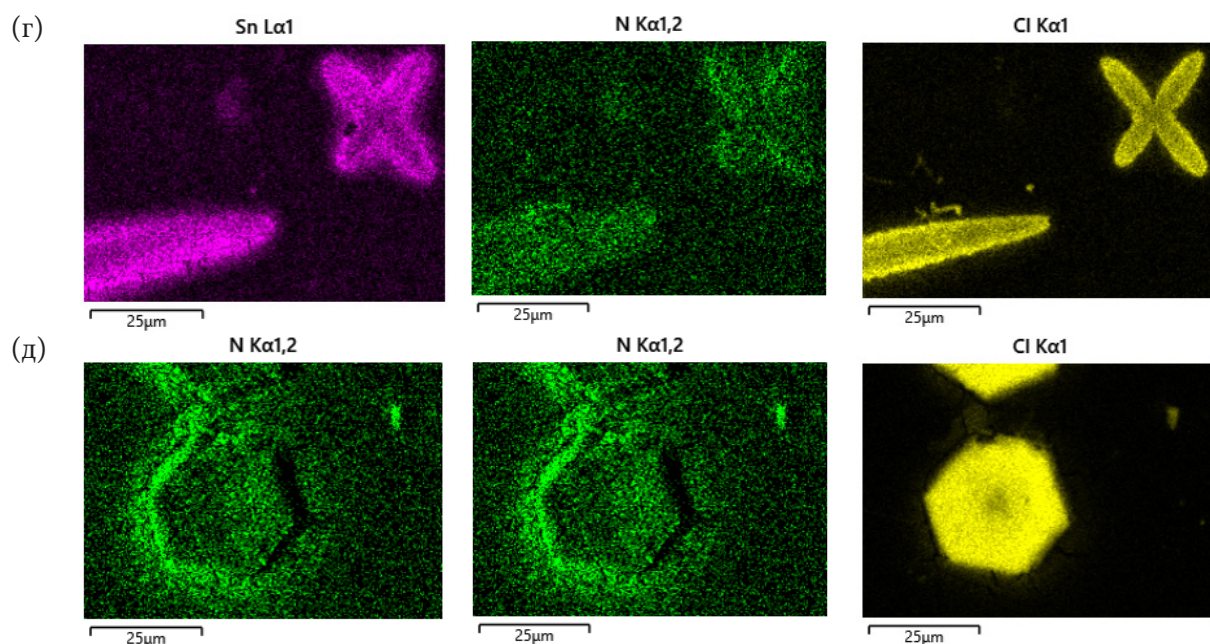


Рисунок 3 – Распределение олова, азота и хлора по поверхности синтезируемых образцов, со следующим содержанием гидроксида аммония в 100 мл раствора:
а) 0 мл; б) 0,2 мл; в) 0,4 мл; г) 0,8 мл; д) 1,6 мл

Рисунок 3(а) демонстрирует равномерное распределение элементов Sn, N и Cl по всей поверхности пленки, не содержащей добавки гидроксида аммония. При добавлении в раствор 0,2 мл гидроксида аммония (рисунок 3(б)) начинают формироваться крестообразные и цветочкоподобные структуры. Однако распределение элементов Sn, N и Cl по всей поверхности пленки неравномерное. Азот присутствует во всей пленке, тогда как Sn и Cl только в самих структурах. Аналогичная ситуация наблюдается и при добавлении 0,4 мл гидроксида аммония в раствор (рисунок 3(в)). Однако структуры имеют форму шестигранника. Что наводит на мысль о том, что структуры также имеют в составе Sn и Cl, но, вероятно, в другом соотношении, нежели в образце, представленном на рисунке 3(б). Рисунок 3(г) показывает примерно ту же картину, что и предыдущие образцы (рисунок 3(б) и (в)). Однако структуры в данном случае гораздо крупнее. И как показал СЭМ, при данном количестве гидроксида аммония в составе раствора здесь наблюдаются структуры трех форм: шестигранной, цветочкоподобной и крестообразной. Следовательно, формирование структур связано как с соотношением в их составе Sn, N и Cl, так и со скоростью нанесения и временем фиксации пленки к поверхности. Рисунок 3(д) показывает аналогичную рисунку 3(в) ситуацию. Однако шестиугольные структуры гораздо больше. Содержание Cl, однако, больше, нежели Sn.

Для дальнейшего изучения состава полученных структур был проведен элементный анализ. Ниже приведен элементный анализ образцов, отожженных при 100 °С.

Согласно таблице 1 пленка без добавки гидроксида аммония (а) содержит олово в своем составе порядка 69%, кислорода порядка 18% и хлора порядка 12%, тогда как содержание азота элементный анализ не показал вовсе. Что противоречит картированию образцов. Пленка, содержащая 0,2 мл гидроксида аммония (таблица 1(б)), также не содержит в своем составе азота, что также противоречит результатам картирования. Содержание Sn в ней порядка 55%, хлора ~30%, кислорода ~14%. В пленке с добавкой 0,4 мл гидроксида аммония (таблица 1(в)) содержание Sn~39%, что гораздо меньше, чем в образцах (а) и (б). Следует отметить, что и

структуры здесь иной формы, нежели в образце (б). Однако содержание хлора ~48%, что является большим, чем в образце (а) и (б). Содержание кислорода здесь ~12%. Кроме того, показано и содержание азота ~0,5%. Тогда как в предыдущих образцах анализ не показывал его вовсе. По образцу (таблица 1 (г)) элементный анализ показал следующий результат: Sn~63%, Cl~20%, O~17%. Содержание азота не обнаружено. С таким соотношением элементов в пленке формируется 3 типа структур, описанных ранее. Кроме того, структуры гораздо большего размера. И, наконец, при изучении последнего образца (таблица 1 (д)) содержание элементов представлено в следующем процентом соотношении: Sn~42%, Cl~40%, O~16%, N~1,8%. Как и в образце (в), здесь отмечается наличие в составе пленки азота. И структуры также представлены шестигранной формы. Следовательно, можно сделать вывод, что на формирование структур шестигранной формы оказывает влияние наличие азота в составе пленки. Более того, соотношение Sn и Cl составляет примерно одинаковые показатели. То есть можно сказать, что они находятся практически в равных долях. Схематично это можно представить следующим образом (рисунок 4):

Таблица 1 – Элементный анализ полученных образцов

(а)	Элемент	Масс. %	Сигма (масс. %)	Атомный %
	Sn	69.29	0.28	27.92
	N	0.00	7.40	0.00
	Cl	12.03	0.20	16.23
	O	18.68	0.20	55.84
	Всего	100		100
(б)	Элемент	Масса %	Сигма (масс.%)	Атомный %
	Sn	55.08	0.13	20.71
	N	0.00	2.17	0.00
	Cl	30.07	0.10	37.86
	O	14.85	0.07	41.43
	Всего	100		100
(в)	Элемент	Масса %	Сигма (вес%)	Атомный %
	Sn	39.12	1.44	13.30
	N	0.49	1.21	1.42
	Cl	48.43	1.78	55.13
	O	11.95	3.05	30.15
	Всего	100		100
(г)	Элемент	Масса %	Сигма (масс. %)	Атомный %
	Sn	63.03	0.12	24.62
	N	0.00	2.14	0.00
	Cl	19.98	0.09	26.13
	O	16.99	0.07	49.25
	Всего	100		100
(д)	Элемент	Масса %	Сигма (масс. %)	Атомный %
	Sn	41.91	1.77	13.43
	N	1.77	1.37	4.80
	Cl	39.98	1.69	42.91
	O	16.34	3.33	38.86
	Всего	100		100

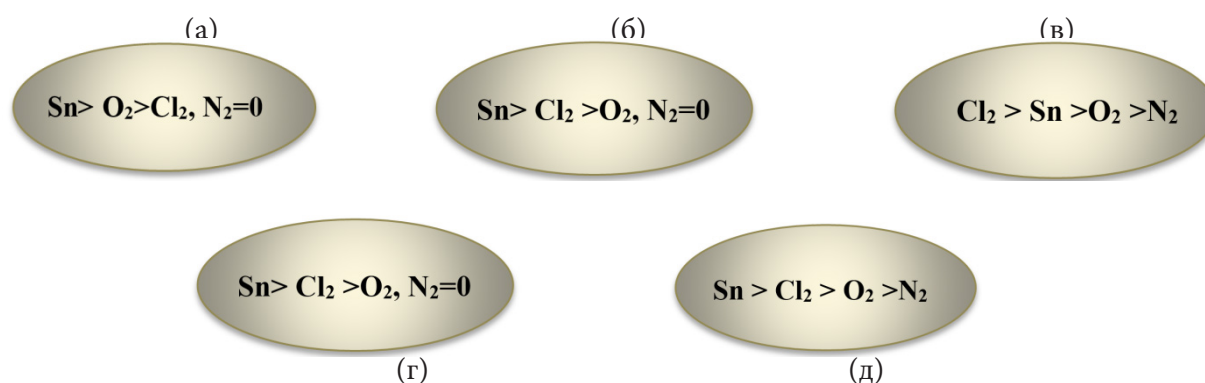


Рисунок 4 – Схема содержания основных элементов в составе полученных образцов

Для более детального анализа структуры получаемых образцов были сняты Раман спектры. Однако анализу подлежали только пленки, имеющие шестигранные структуры (рисунок 5).

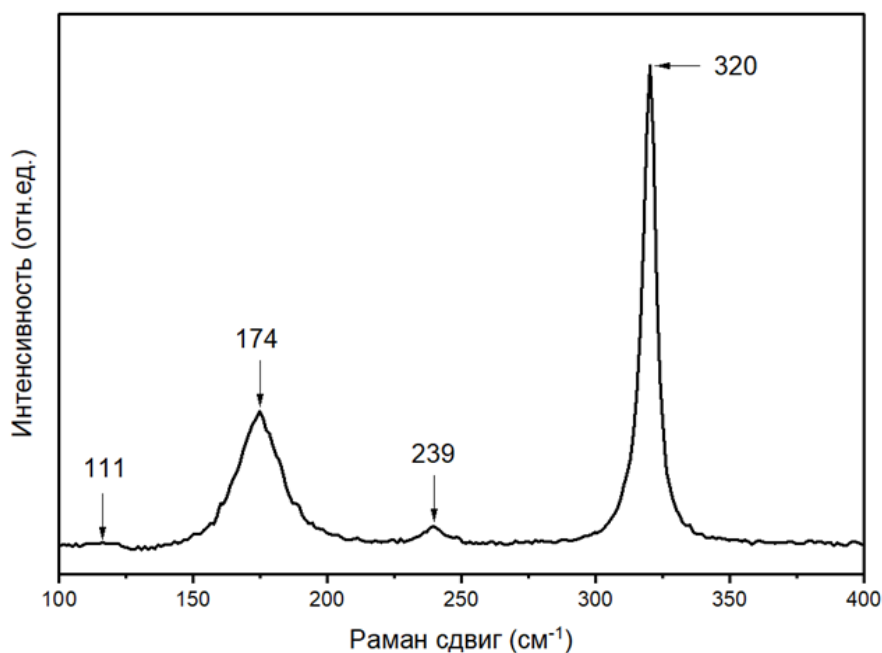


Рисунок 5 – Раман спектр, полученный на структурах шестигранной формы

Раман спектр образца был снят при комнатной температуре с использованием возбуждающей длины волны равной 632,8 нм на установке Jobin-Yvon LabRaman HR800, Horiba. Спектры были сняты в диапазоне от 100 cm^{-1} до 900 cm^{-1} . На рисунке 5 представлен Раман спектр, полученный на структурах шестигранной формы. Наблюдаемые пики расположены при $\sim 111 \text{ cm}^{-1}$, 174 cm^{-1} , 239 cm^{-1} , 320 cm^{-1} . При идентификации полученных колебательных мод был проведен литературный анализ возможных соединений, образующихся при химическом взаимодействии исходных реагентов. У соединения NH_4Cl Раман моды располагается в более высокочастотной стороне спектра от 3000 cm^{-1} и более [22], что не совпадает с областью спектра образца. Теоретически и на практике подтверждено, что у всех оксидных фаз олова и комплексов смешанных гидроксохлоридов олова Раман активные моды располагаются в области от 50 cm^{-1} до более высоких значений волнового числа [23, 24]. Однако для вышеперечислен-

ных фаз множество колебательных мод находится в соответствующей области для нашего образца. В спектре образца наблюдаются четыре пика от 100 см^{-1} до 350 см^{-1} . В области более высоких частот пиков не наблюдается. Наиболее совпадающим по интенсивности пиков и по расположению со спектром нашего образца является соединение $\text{NH}_3(\text{CH}_2)_5\text{NH}_3\text{SnCl}_6$ [25]. Таким образом, на шестигранниках, возможно, образуется промежуточная фаза. Полученные данные совпадают с результатами СЭМ, где на шестигранниках наблюдаются Sn, N₂, Cl.

Для дальнейшего изучения влияния образованных в пленках структур на функциональные свойства синтезированных пленок был проведен спектральный анализ полученных образцов. Полученные результаты представлены на рисунке 6. Для сравнения был также снят спектр стеклянной подложки, отожженной при 100 °C , так как она обладает хорошей прозрачностью (рисунок 6, кривая 1).

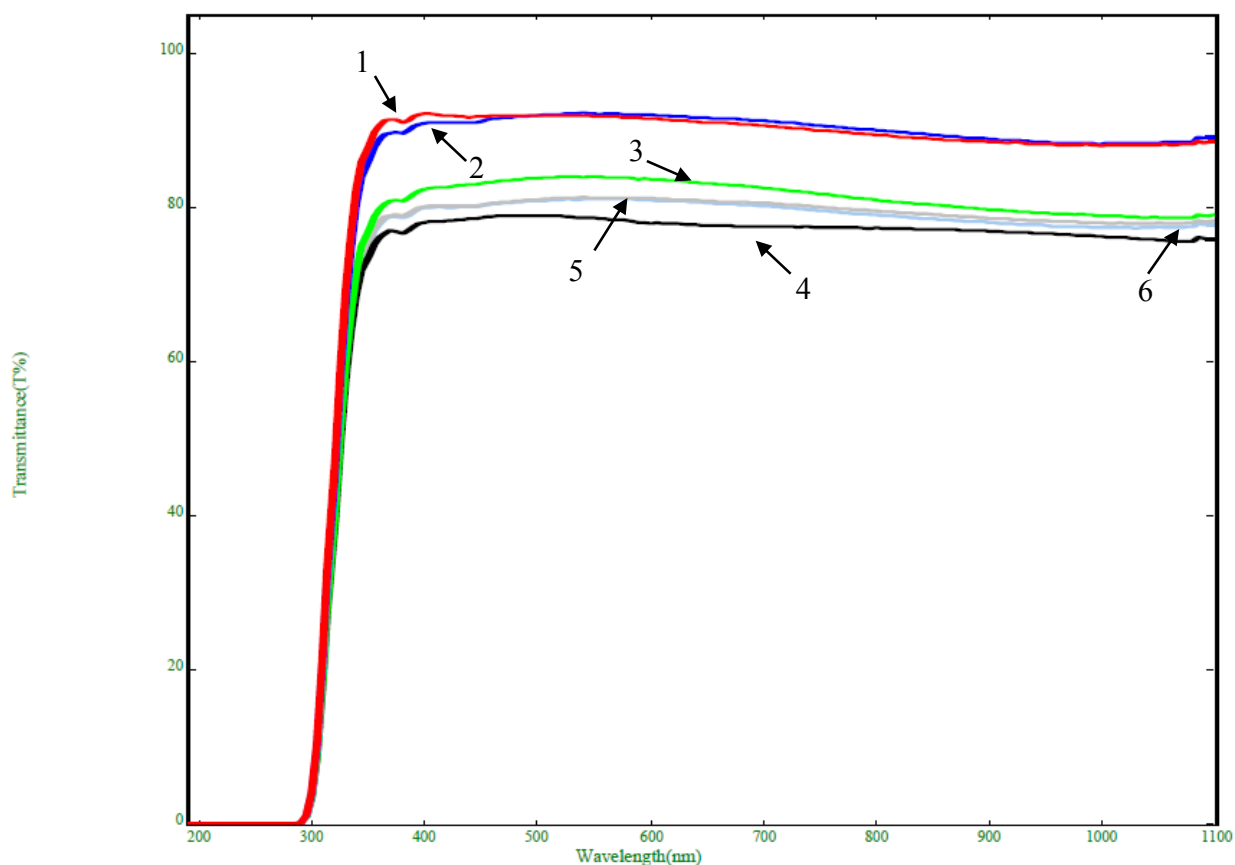


Рисунок 6 – Спектры пропускания образцов (отжиг при 100 °C):

- 1) чистое стекло, отожженное при 100 °C (красная кривая);
- 2) без добавления NH_4OH (синяя кривая); 3) $+0,2\text{ мл NH}_4\text{OH}$ (зеленая кривая);
- 4) $+0,4\text{ мл NH}_4\text{OH}$ (черная кривая); 5) $+0,8\text{ мл NH}_4\text{OH}$ (серая кривая);
- 6) $+1,6\text{ мл NH}_4\text{OH}$ (голубая кривая)

Как видно из рисунка 6, наибольшей прозрачностью $T\sim 90\%$ обладает пленка без добавления гидроксида аммония (синяя кривая 2). Она практически так же прозрачна, как стеклянная подложка (красная кривая 1). При добавлении $0,2\text{ мл}$ гидроксида аммония (рисунок 6, зеленая кривая 3) прозрачность образца понижается до $T\sim 84\%$. При добавлении $0,4\text{ мл}$ гидроксида аммония в состав исходного пленкообразующего раствора (рисунок 6, черная кривая 4) прозрачность уменьшается до $T\sim 78\%$. Следует отметить, что это наименьшая прозрачность из всех проанализированных образцов. Далее при увеличении добавки гидроксида аммония в исход-

ном растворе до 0,8 мл (рисунок 6, серая кривая 5) прозрачность улучшается в сравнении с предыдущим образцом до $T \sim 81\%$. Данный результат также наблюдается и при добавлении 1,6 мл гидроксида аммония в исходный раствор (рисунок 6, голубая кривая 6). Таким образом, можно сделать вывод, что добавление гидроксида аммония, который является основой роста иерархических структур в синтезируемых пленках, снижает прозрачность образцов, но незначительно.

Заключение

Были синтезированы пленки на основе диоксида олова с иерархическими структурами из лиофильной пленкообразующей системы $\text{SnCl}_4/\text{EtOH}/\text{NH}_4\text{OH}$. Наблюдается значительный рост структур при добавлении гидроксида аммония в состав исходного раствора. Было отмечено, что при соотношении $\text{Sn} > \text{Cl}_2 > \text{O}_2$, $\text{N}_2 = 0$ и $\text{pH} = 1,42$ наблюдается рост структур крестообразной и цветочкоподобной формы разных размеров от нескольких μm до десятка μm . При соотношении $\text{Cl}_2 > \text{Sn} > \text{O}_2 > \text{N}_2$ и $\text{pH} = 1,44$ наблюдаются структуры треугольной и шестиугольной формы, размеры которых порядка нескольких десятков микрометров. На рост структур шестиугольной формы, вероятно, влияет наличие азота в составе пленки, согласно элементному анализу. При соотношении $\text{Sn} > \text{Cl}_2 > \text{O}_2 > \text{N}_2$ и pH раствора 1,49 наблюдается рост шестигранных и крестообразных структур, тогда как цветочкоподобные структуры не наблюдаются. При проведении Рамановской спектроскопии полученных образцов анализируемыми оказались только образцы, содержащие шестигранные структуры. Было обнаружено, что этим шестигранным структурам по интенсивности пиков и по расположению со спектром нашего образца соответствует соединение $\text{NH}_3(\text{CH}_2)_5\text{NH}_3\text{SnCl}_6$. Остальные соединения интерпретации не подлежат, поскольку дают сильный шум. Для дальнейшего изучения влияния образованных в пленках структур на функциональные свойства синтезированных пленок был проведен спектральный анализ полученных образцов. Согласно которому можно сделать вывод, что добавление гидроксида аммония, который является основой роста иерархических структур в синтезируемых пленках, снижает прозрачность образцов, но незначительно. Иерархические структуры являются важной составляющей данного эксперимента, поскольку они обладают большой площадью поверхности, а также высокой поверхностной проницаемостью, что положительно влияет на чувствительность к газам различного рода. Данные образцы могут быть использованы в газовых анализаторах, что поможет предотвратить утечку газа на ранних стадиях на различных производствах, в шахтах, лабораториях и прочих организациях, где газ является сопутствующим элементом производства.

Информация о финансировании

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан, грант № AP19178659.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Jin Zhihao et.al. Construction of $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2$ composite nanofiltration membranes for efficient selective separation of dyes and salts // Separation and Purification Technology. – 2024. – Vol. 351. – ID.128127. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128127>.
- 2 Kim Tae-Nam et.al. Swelling-resistant graphene oxide membranes reinforced by heteroatomic inorganic dots for electrochemical lithium recovery from aqueous solution // Desalination. – 2024. – Vol. 592. – ID.118089. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118089>.
- 3 Rohan Khizer Muhammad et.al. Polymer and graphitic carbon nitride based nanohybrids for the photocatalytic degradation of pharmaceuticals in wastewater treatment – A review // Separation and Purification Technology. – 2024. – Vol. 350. – ID.127768. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127768>.

4 Shahbaz Muhammad et.al. Sol-gel derived ternary CrxCuCx-I compounds: Characterization, structural insights and biological properties // *Journal of Molecular Structure*. – 2024. – Vol. 1318. – ID.139216. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.139216>.

5 Sharma Arpana Pal et.al. Synergistic interaction of Neodymium Manganite (NdMnO₃) nanoparticles and Reduced Graphene Oxide (rGO) to enhance the polar β phase crystallization in P(VDF-TrFE) for piezoelectric applications // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2024. – Vol. 1007. – ID.176349. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.176349>.

6 Alshoaibi Adil et.al. Mesoporous and thermally stable phenol red encapsulated Ag-SiO₂ and zincite decorated Ag-SiO₂ opto-chemical Sensor // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2024. – Vol. 702. – ID.135075. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135075>.

7 Zhou Ruifeng et.al. Carbonaceous structures as electronic bridges to enhance charge migration and radical reactions in composite photocatalysts: An effective way to achieve efficient mineralization of pollutants // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2024. – Vol. 702. – ID.135015. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135015>.

8 Yu Di et.al. Investigation of sodium–manganese oxides with various crystal phases for the efficient catalytic removal of diesel soot particles // *Applied Catalysis B: Environmental*. – 2024. – Vol. 358. – ID.124407. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2024.124407>.

9 Upendranath K. et.al. Sol-gel synthesis of LaFeO₃ perovskite oxide for distinct ridges detection of level II and III latent fingerprints // *Inorganic Chemistry Communications*. – 2024. – Vol. 170. – ID.113210. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113210>.

10 Alshahrani B. Synthesis and characterization of HfO₂ nanoparticles for dosimetry applications // *Materials Science and Engineering: B*. – 2024. – Vol. 310. – ID.117711. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117711>.

11 Sweta et.al. Influence of Fluorine doping on electron transport characteristics of TiO₂ for Perovskite solar cells: A combined Experimental and DFT analysis // *Hybrid Advances*. – 2024. – Vol. 7. – ID.100284. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100284>.

12 Al-Wasidi Asma S. et.al. Simplified synthesis and identification of novel nanostructures consisting of cobalt borate and cobalt oxide for crystal violet dye removal from aquatic environments // *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14. – No. 1. – ID.21631. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71981-4>.

13 Acharya Vishwas et.al. Solution processed low operating voltage SnO₂ thin film transistor by using Li₂SnO₃/TiO₂ stacked gate dielectric // *Materials Science and Engineering: B*. – 2023. – Vol. 289. – ID.116270. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116270>.

14 Sehrish Gul et.al. Tin oxide thin films prepared by sol-gel for PV applications // *Materials Today: Proceedings*. – 2015. – Vol. 2. – P. 5793–5798.

15 Linghui Yang et.al. Corrosion protection of 304 stainless steel bipolar plates of PEMFC by coating SnO₂ film // *Int. J. Electrochem. Sci*. – 2017. – Vol.12. – P. 10946–10957.

16 Зайцев С.В., Ващилин В.С., Прохоренков Д.С., Нарцев В.М, Евтушенко Е.И. Структура тонких пленок диоксида олова, формируемых методом дуального магнетронного распыления // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. – 2015. – №5. – С. 228–231.

17 Filippatos Petros-Panagis et.al. Temperature and Ambient Band Structure Changes in SnO₂ for the Optimization of Hydrogen Response // *Inorganics*. – 2023. – Vol. 11. – No. 3. – ID.96. <https://doi.org/10.3390/inorganics11030096>.

18 Basyooni Mohamed A. et.al. Structural, optical, electrical and room temperature gas sensing characterizations of spin coated multilayer cobalt-doped tin oxide thin films // *Superlattices and Microstructures*. – 2020. – Vol. 140. – ID.106465. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2020.106465>.

19 Yadav B.C. et.al. Fabrication and characterization of nanostructured indium tin oxide film and its application as humidity and gas sensors // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2016. – Vol. 27. – No. 5. – P. 4172–4179. <https://doi.org/10.1007/s10854-016-4279-x>.

20 Abebe G. Habte et.al. Effect of solution pH on structural, optical and morphological properties of SnO₂ nanoparticles // *Physica B: Condensed Matter*. – 2020. – Vol. 580. – ID.411832. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2019.411832>.

21 Грачева И.Е., Мошников В.А. Наноматериалы с иерархической структурой пор // Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2011. – 107 с.

22 Heyns A.M. The effect of pressure on the Raman spectrum of NH₄Cl // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 1980. – Vol. 41. – No. 7. – P.769–776.

23 Eifert B. et.al. Raman studies of the intermediate tin-oxide phase //Physical Review Materials. – 2017. – Vol. 1. – No. 1. – ID.014602.

24 Shihada A.F. et.al. Crystal Structures and Raman Spectra of cis- $[\text{SnCl}_4(\text{H}_2\text{O})_2] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, cis- $[\text{SnCl}_4(\text{H}_2\text{O})_2] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $[\text{Sn}_2\text{Cl}_6(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_2] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, and $[\text{HL}][\text{SnCl}_5(\text{H}_2\text{O})] \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$ (L= 3- acetyl 5- benzyl- 1- phenyl- 4, 5- dihydro- 1, 2, 4- triazine- 6- one oxime, $\text{C}_{18}\text{H}_{18}\text{N}_4\text{O}_2$) //Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie. – 2004. – Vol. 630. – No. 6. – P. 841–847.

25 Ouasri A. et.al. Synthesis, DTA, IR and raman spectra of penthylenediammonium hexachlorostannate $\text{NH}_3(\text{CH}_2)_5\text{NH}_3\text{SnCl}_6$ //Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2001. – Vol. 57. – No.13. – P. 2593–2598.

REFERENCES

1 Jin Zhihao et.al. (2024) Separation and Purification Technology, vol. 351, 128127. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128127>.

2 Kim Tae-Nam et.al. (2024) Desalination, vol. 592, 118089. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118089>.

3 Rohan Khizer Muhammad et.al. (2024) Separation and Purification Technology, vol. 350, p. 127768. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127768>.

4 Shahbaz Muhammad et.al. (2024) Journal of Molecular Structure, vol. 1318, 139216. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.139216>.

5 Sharma Arpana Pal et.al. (2024) Journal of Alloys and Compounds, vol. 1007, 176349. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.176349>.

6 Alshoaibi Adil et.al. (2024) Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 702, 135075. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135075>.

7 Zhou Ruifeng et.al. (2024) Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 702, 135015. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135015>.

8 Yu Di et.al. (2024) Applied Catalysis B: Environmental, vol. 358, 124407. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2024.124407>.

9 Upendranath K. et.al. (2024) Inorganic Chemistry Communications, vol. 170, 113210. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113210>.

10 Alshahrani B. (2024) Materials Science and Engineering: B, vol. 310, 117711. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117711>.

11 Sweta et.al. (2024) Hybrid Advances, vol. 7, 100284. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100284>.

12 Al-Wasidi Asma S. et.al. (2024) Scientific Reports, vol. 14, no. 1, 21631. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71981-4>

13 Acharya Vishwas et.al. (2023) Materials Science and Engineering: B, vol. 289, 116270. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116270>.

14 Sehrish Gul et.al. (2015) Materials Today: Proceedings, vol. 2, pp. 5793–5798.

15 Linghui Yang et.al. (2017) Int. J. Electrochem. Sci., vol. 12, pp. 10946–10957.

16 Zajcev S.V., Vashhilin V.S., Prohorenkov D.S., Narcev V.M. and Evtushenko E.I. (2015) Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhova, vol. 5, pp. 228–231 [in Russian].

17 Filippatos Petros-Panagis et.al. (2023) Inorganics, vol. 11, no. 3, 96. <https://doi.org/10.3390/inorganics11030096>.

18 Basyooni Mohamed A. et.al. (2020) Superlattices and Microstructures, vol. 140, 106465. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2020.106465>.

19 Yadav B.C. et.al. (2016) Journal of Materials Science: Materials in Electronics, vol. 27, no. 5, pp. 4172–4179. <https://doi.org/10.1007/s10854-016-4279-x>.

20 Abebe G. Habte et.al. (2020) Physica B: Condensed Matter, vol. 580, 411832. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2019.411832>.

21 Gracheva I.E., Moshnikov V.A. Nanomaterialy s ierarhicheskoy strukturoj por (SPb.: Publishing house of SPbGETU LETI, 2011), p.107. [in Russian].

22 Heyns A.M. (1980) Journal of Physics and Chemistry of Solids, vol. 41, no. 7, pp. 769–776.

23 Eifert B. et.al. (2017) Physical Review Materials, vol. 1, no.1, 014602.

24 Shihada A.F. et.al. (2024) Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie, vol. 630, no. 6, pp. 841–847.

25 Ouasri A. et.al. (2001) Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, vol. 57, no. 13, pp. 2593–2598.

¹Шонғалова А.Қ.,

PhD, аға ғылыми қызметкер, ORCID ID: 0000-0002-7352-9007,

e-mail: shongalova.aigul@gmail.com

¹Лебедев И.А.,

физика-математика ғылымдарының докторы, ORCID ID: 0000-0002-7562-9925,

e-mail: lebedev692007@yandex.ru

^{1*}Бондарь Е.А.,

PhD, аға ғылыми қызметкер, ORCID ID: 0000-0001-6745-5462,

e-mail: bondar@sci.kz

¹Дмитриева Е.А.,

физика-математика ғылымдарының кандидаты, жетекші ғылыми қызметкер,

ORCID ID: 0000-0002-1280-2559,

e-mail: dmitriyeva2017@mail.ru

¹Федосимова А.И.,

PhD, қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0001-9607-6074,

e-mail: anastasia@list.ru

¹Ибраимова С.А.,

ФТИ инженері, ORCID ID: 0000-0002-6652-9252,

e-mail: sayara_ibraimova@mail.ru

¹Кемелбекова А.Е.,

PhD, аға ғылыми қызметкер, ORCID ID: 0000-0003-4813-8490,

e-mail: a.kemelbekova@sci.kz

¹Жұмабай Б.,

кіші ғылыми қызметкер, ORCID ID: 0000-0001-8603-633,

e-mail: b.Zhymabay@sci.ox

¹Нұрбаев Б.М.,

ФТИ инженері, ORCID ID: 0000-0002-3059-6349,

e-mail: bedel.armia.99@gmail.com

¹Исаева Ұ.Б.,

PhD, кіші ғылыми қызметкер, ORCID ID: 0000-0001-6976-6096,

e-mail: ulyajan_1603@mail.ru

²Кучкаров К.М.,

физ.-мат.ғ.д., ORCID ID: 0000-0002-2238-7205,

e-mail: k.kuchkarov@mail.ru

¹Физика-техникалық институты, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан

²Өзбекстан Республикасы Ғылым академиясының Физика-техника институты,
Ташкент қ., Өзбекстан

ҚАЛАЙЫ ДИОКСИДІ НЕГІЗІНДЕГІ НАНОӨЛШЕМДІ ҚАБЫҚШАЛАРДАҒЫ ИЕРАРХИЯЛЫҚ ҚҰРЫЛЫМДАРДЫ ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа

Өртүрлі функционалдық сипаттамалары бар материалдарды алудың көптеген физикалық және химиялық әдістерінің ішінде өте қызықты және қарапайым әдістердің бірі – золь-гель технологиясы. Золь-гель технологиясымен синтезделген материалдар жоғары химиялық біртектілікке ие, бұл сөзсіз үлкен плюс. Ал бастапқы қоршаған орта жағдайлары мен ерітінді параметрлерін өзгертудің арқасында алынған бөлшектердің өлшемі мен пішінін, сондай-ақ синтезделген өнімдердің кеуекті құрылымын бақылауға болады. Қазіргі уақытта қалайы диоксиді негізіндегі иерархиялық құрылымдарды зерттеуге көп көңіл бөлінеді. Олар үлкен бетінің ауданымен, тұрақты физикалық және химиялық қасиеттерімен, өндірістің төмен құнымен, әдістің экологиялық тазалығымен, сонымен қатар жоғары беттік өткізгіштігімен және төмен тығыздығымен ерекшеленеді. Бұл мақалада қалайы диоксиді негізіндегі жұқа қабықшалардағы иерархиялық құрылымдардың синтезінің нәтижелері сипатталған. Бастапқы ерітінді $\text{SnCl}_4/\text{EtOH}/\text{NH}_4\text{OH}$ лиофильді қабық түзетін жүйе. Иерархиялық құрылымдардың түзілуінің аммоний гидроксиді қоспасының

көлеміне тікелей тәуелділігі анықталды. Бұл бастапқы прекурсорлардың қатынасын өзгерту кезінде синтезделген құрылымдардың пішіні мен өлшемін басқаруға көмектеседі. Нәтижесінде алынған үлгілердің соңғы физика-химиялық сипаттамаларына оларды мөлдір өткізгіш жабындар, әртүрлі газдарға арналған сенсорлар (соның ішінде улы), күн батареяларында және т.б. ретінде пайдалану үшін әсер етуге мүмкіндік береді.

Тірек сөздер: қалайы диоксиді, золь-гель әдісі, иерархиялық құрылымдар, наноөлшемді қабықшалар, оптикалық қасиеттер, газ датчиктері.

¹Shongalova A.K.,

PhD, senior researcher, ORCID ID: 0000-0002-7352-9007,
e-mail: shongalova.aigul@gmail.com

¹Lebedev I.A.,

Dr. Phys.-Math.Sc., ORCID ID: 0000-0002-7562-9925,
e-mail: lebedev692007@yandex.ru

^{1*}Bondar E.A.,

senior researcher, ORCID ID: 0000-0001-6745-5462,
*e-mail: bondar@sci.kz

¹Dmitriyeva E.A.,

Candidate of Phys.-Math. Sc., leading researcher, ORCID ID: 0000-0002-1280-2559,
e-mail: dmitriyeva2017@mail.ru

¹Fedosimova A.I.,

PhD, Associate Professor, ORCID ID: 0000-0001-9607-6074,
e-mail: ananastasia@list.ru

¹Ibraimova S.A.,

IPT engineer, ORCID ID: 0000-0002-6652-9252,
e-mail: sayara_ibraimova@mail.ru

¹Kemelbekova A.E.,

PhD, senior researcher, ORCID ID: 0000-0003-4813-8490,
e-mail: a.kemelbekova@sci.kz

¹Zhumabay B.,

junior research assistant, ORCID ID: 0000-0001-8603-633,
e-mail: b.Zhymabay@sci.ox

¹Nurbayev B.M.,

IPT engineer, ORCID ID: 0000-0002-3059-6349,
e-mail: bedel.armia.99@gmail.com

¹Issayeva U.B.,

junior research assistant, ORCID ID: 0000-0001-6976-6096,
e-mail: ulyajan_1603@mail.ru

²Kuchkarov K.M.,

Dr.Phys.-Math.Sc., ORCID ID: 0000-0002-2238-7205,
e-mail: k.kuchkarov@mail.ru

¹Institute of Physics and Technology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Physicotechnical Institute of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
Tashkent, Uzbekistan

STUDY OF HIERARCHICAL STRUCTURES IN TIN DIOXIDE BASED NANOSIZED FILMS

Abstract

Among a large number of physical and chemical methods for obtaining materials with various functional characteristics, one of the very interesting and simple methods is sol-gel technology. Materials synthesized using

sol-gel technology have high chemical homogeneity, which is definitely a big plus. And by changing the initial environmental conditions and solution parameters, it is possible to control the size and shape of the particles obtained, as well as the pore structure of the synthesized products. At present, much attention is paid to the study of hierarchical structures based on tin dioxide. Since they are distinguished by a large surface area, stable physicochemical properties, low cost of production, environmental friendliness of the method, as well as high surface permeability and low density. This article describes the results of the synthesis of hierarchical structures in thin films based on tin dioxide. The initial solution is a lyophilic film-forming system $\text{SnCl}_4/\text{EtOH}/\text{NH}_4\text{OH}$. A direct dependence of the formation of hierarchical structures on the volume of ammonium hydroxide additive was found. This helps to control the shape and size of the synthesized structures when changing the ratio of the initial precursors. And as a consequence, it allows influencing the final physical and chemical characteristics of the obtained samples for their further use as transparent conductive coatings, sensors for various gases (including toxic ones), in solar panels, etc.

Key words: tin dioxide, sol-gel method, hierarchical structures, nanoscale films, optical properties, gas sensors.

Дата поступления статьи в редакцию: 04.10.2024

УДК 666.97
МРНТИ 55.41.13

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-234-244>

^{1*}**Сариев Б.,**

PhD, ассистент-профессор, ORCID ID: 0000-0002-2637-9704,

*e-mail: b.sariyev@astanait.edu.kz

²**Амрин А.,**

PhD, постдокторант, ORCID ID: 0000-0001-7567-6695,

e-mail: andas.amrin@nu.edu.kz

^{3*}**Джексембаева А.,**

PhD, ORCID ID: 0009-0009-6153-9580,

*e-mail: dzheksembayeva_ae@mail.ru

³**Конканов М.,**

PhD, ORCID ID: 0009-0006-9365-4127,

e-mail: marcon@metrology.kz

¹Astana IT University, г. Астана, Казахстан

²Назарбаев Университет, г. Астана, Казахстан,

³Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

АНАЛИЗ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГЕОПОЛИМЕРА ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ АРМИРОВАННОГО ПОЛИЭТИЛЕНОВЫМ ВОЛОКНОМ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация

Лидирующее место в достижениях в области строительства занимает 3D-печать, которая позволяет создавать прочные и сложные конструкции, минимизируя потери ресурсов. В качестве жизнеспособной замены обычным цементным материалам выделяют экологические преимущества и высокие механические характеристики геополимеров на основе летучей золы. Это исследование изучает, как добавление полиэтиленовых (РЕ) волокон изменяет эти свойства и как различные концентрации влияют на поведение текучести и способность производства композитного материала. Анализ неньютоновского поведения в этих материалах проводится с использованием модели Гершеля-Балкли. Точно измеряя критические реологические факторы, такие как вязкость и поведение потока, это исследование оценивает, как эти факторы влияют на процессы 3D-печати. Оптимальное сочетание содержания волокон выявляется в контролируемых испытаниях, которые сочетают в себе управляемый поток экструзии и надежностью конструкции. Результаты предлагают практические применения, раскрывают методы производства геополимеров, способных поддерживать прочность, соответствуя строгим требованиям методов 3D-печати.

Ключевые слова: геополимеры, полиэтиленовые волокна, 3D-печать, реологические свойства, экструзируемость, летучая зола, устойчивые строительные материалы.

Введение

За последние несколько лет 3D-печать, известная также как аддитивное производство, произвела революцию в методах проектирования и строительства [1]. Эта технология позволяет создавать сложные структуры с высокой точностью, сокращая при этом материальные отходы. Она также предоставляет гибкость в формировании дизайнов, которые сложно или невозможно реализовать с помощью традиционных методов. В обсуждении данной области рассматривается один из материалов – геополимер, который является жизнеспособной устойчивой альтернативой цементу [2]. Геополимеры создаются на основе таких отходов, как зола-уноса, и имеют меньший экологический след, а также демонстрируют хорошие механические характеристики. Чтобы геополимеры эффективно применялись в 3D-печати, важ-

но понимать их поведение и свойства текучести в процессе печати. Необходимость изучения реологических свойств материала – того, как он течет под воздействием напряжения, – в контексте 3D-печати является неотъемлемой [3]. Материал должен легко проходить через сопло принтера, но при этом сохранять форму после печати. Если материал будет слишком жидким, он не создаст прочного основания. Если он будет слишком густым, это не только приведет к засорению сопла, но и потребует высокого давления для его прохождения через систему. В результате исследователи постоянно стремятся оптимизировать эти свойства, чтобы повысить их пригодность для 3D-печати [4]. Один из возможных путей – это добавление полиэтиленовых (PE) волокон в смесь геополимеров. Известные своей прочностью и устойчивостью, эти волокна могут способствовать улучшению механических свойств материала.

Геополимеры могут стать прочнее и устойчивее к трещинообразованию за счет добавления волокон PE, что также повышает их долговечность. Это особенно полезно для применения в строительной отрасли. Однако это сопряжено с определенными трудностями. Увеличение содержания волокон не только улучшает целостность материала, но и усложняет его использование. Высокое содержание волокон увеличивает предел текучести и вязкость, что делает материал более жестким при экструзии [4]. Это может привести к проблемам в процессе 3D-печати, таким как засорение сопла и неравномерный поток материала. Исследование направлено на оценку влияния различных количеств волокон PE на текучесть и экструзионные характеристики геополимеров на основе золы-уноса. Оно сосредоточено на смесях с содержанием волокон от 0% до 1% по объему. Для этого мы применили модель Гершеля-Балкли, которая часто используется для описания поведения неньютоновских жидкостей [5, 6]. Эта модель позволяет нам понять поведение текучести и предела текучести при различных концентрациях волокон.

Цель данного исследования – проанализировать баланс между содержанием волокон, реологическим поведением и экструзируемостью, чтобы определить оптимальный уровень содержания волокон, который обеспечивает прочность без ущерба для печати. Полученные результаты помогут в применении геополимеров, армированных волокнами, в реальных проектах 3D-печати, способствуя разработке более устойчивых строительных материалов.

Материалы и методы

Материалы

В данной работе основными материалами используются зола-уноса класса F, полиэтиленовые (PE) волокна и щелочной раствор. Зола-уноса, являющаяся побочным продуктом промышленности, была выбрана в качестве алюмосиликатного прекурсора для геополимерных смесей, соответствующих требованиям стандарта ASTM C618-19 [2]. Состав золы-уноса включает диоксид кремния (SiO_2), оксид алюминия (Al_2O_3) и оксид железа (Fe_2O_3), которые вместе составляют около 50% от общего содержания оксидов [7]. Средний размер частиц золы-уноса в этом исследовании составляет примерно 50 микрон, а удельная поверхность по Блейну – 400 $\text{м}^2/\text{кг}$. Значительное содержание SiO_2 в золе-уноса играет важную роль в формировании ключевой связывающей структуры геополимера. Для создания материалов с высокой прочностью на разрыв, исключительной долговечностью и химической инертностью зола-уноса была объединена с полиэтиленовыми (PE) волокнами. В данном исследовании армирование состояло из полиэтиленовых волокон диаметром от 20 до 25 микрон и длиной 8 мм. Эти волокна с пределом прочности на разрыв около 550 МПа способны повысить пластичность и прочность геополимерной матрицы [8]. Хотя полиэтиленовые волокна химически инертны, они придают важную прочность геополимеру на основе золы-уноса. Исследования широко подтвердили их эффективность в повышении устойчивости к образованию трещин и разрывной прочности, особенно в армированных композитах, используемых в строительстве. Щелочной активатор был приготовлен с использованием гидроксида натрия (NaOH) и силиката натрия (Na_2SiO_3), которые играют важную роль в процессе геополимеризации [9]. Для создания 12 М раствора гидроксида натрия использовалась теплая вода, которая была смешана с NaOH , так как его

растворение сопровождается экзотермической реакцией. Охлажденный до комнатной температуры раствор был смешан с силикатом натрия, который содержал 28% SiO_2 , 8% Na_2O и 65% воды. Щелочной активатор был смешан с золой-уноса для инициации процесса геополимеризации. Соотношение щелочного раствора к связующему веществу поддерживалось на уровне 0.4 для всех образцов, чтобы обеспечить постоянство в процессе тестирования.

Пропорции смеси

Геополимерный композит был приготовлен с объемными долями волокон 0%, 0.25%, 0.5%, 0.75% и 1% путем добавления полиэтиленовых волокон. Для каждого образца использовалось 710 г золы-уноса, а объемная доля полиэтиленовых волокон изменялась соответственно. Варьирование долей волокон позволило провести детальный анализ того, как содержание волокон влияет на реологические характеристики и экструдированность геополимерного материала [10].

Смешивание геополимерных композитов началось с использования сухой смеси золы-уноса и полиэтиленовых волокон. Этот этап был важным для обеспечения равномерного распределения волокон по всей матрице и предотвращения их слипания. На начальной стадии использовался механический миксер, который работал на низкой скорости, для обеспечения однородности состава. После того как сухие ингредиенты были полностью смешаны, в смесь добавлялся щелочной раствор, и миксер работал на более высокой скорости, чтобы волокна равномерно распределились в геополимерной матрице. Эта мера особенно важна в 3D-печати, поскольку равномерная консистенция материала необходима для легкой экструзии и высокого качества структуры. После смешивания геополимерные композиты подверглись тестированию, как описано далее, на реологические свойства, а также на экструдированность [11].

Реологические испытания

Для оценки реологических свойств геополимерных смесей использовался ротационный реометр Anton Paar MCR 102 [12] с параллельными пластинами. В эксперименте использовалась пластина диаметром 25 мм, а зазор между пластинами составлял 1 мм. Для обеспечения постоянства всех образцов испытания проводились при температуре 25 °C в контролируемых условиях. Перед началом каждого сбора данных реометр калибровался с использованием стандартного масла с известной вязкостью, чтобы гарантировать точность сбора данных [13].

Во время испытаний на геополимерные смеси воздействовали сдвиговые скорости в диапазоне от 1 до 100 с^{-1} . Проводился сбор данных о сдвиговом напряжении и скорости сдвига, на основе которых рассчитывались ключевые реологические параметры, такие как предел текучести, вязкость и индекс течения. Эти параметры были получены с использованием модели Гершеля-Балкли, которая обычно используется для описания поведения неньютоновских жидкостей [14]. Модель Гершеля-Балкли задает систему для расчета предела текучести, индекса консистенции и индекса потока материала, а также определяет, является ли его поведение сдвигающимся разжижением или сдвигающимся утолщением. Уравнение Гершеля-Балкли представляется следующим образом:

$$\tau = \tau_y + K \cdot \dot{\gamma}^n,$$

где: τ – сдвиговое напряжение, τ_y – предел текучести, K – индекс консистенции, $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, n – индекс потока материала. Информация, собранная в ходе этих испытаний, предоставила понимание характеристик потока, армированных волокнами геополимерных композитов, с акцентом на их применение в 3D-печати. Результаты позволили определить оптимальное содержание волокон, которое обеспечивает идеальный баланс реологических качеств и экструдированности. Смесей с более высоким содержанием волокон, как правило, демонстрировали увеличенный предел текучести и вязкость, что могло усложнить процесс экструзии. Напротив, смеси с более низким содержанием волокон демонстрировали более легкое течение и меньшую сопротивляемость сдвиговым силам, что делало их более подходящими для применения в процессах экструзии.

Анализ экструдирруемости

Экструдирруемость геополимерных смесей была оценена с помощью поршневого экструдера, разработанного для воспроизведения процесса экструзии, который используется в 3D-печати [6]. Поршневой экструдер был оснащен цилиндрическим корпусом диаметром 40 мм и длиной 200 мм (рисунок 1) [15]. Свежий геополимерный композит был помещен в цилиндр, и поршень создавал давление с контролируемой скоростью, где длина сопла составляла 64 мм, а диаметр – 8 мм. В экструзионных тестах давление прикладывалось с разной скоростью, от 5 мм/с до 30 мм/с, чтобы определить влияние скорости экструзии на поведение геополимерных композитов при течении [3]. В цилиндре были установлены датчики давления, которые фиксировали данные в реальном времени о смещении и скорости поршня относительно давления экструзии. Такая система позволила провести детальное исследование того, как содержание волокон и скорость экструзии влияют на экструдирруемость геополимерных смесей.

Основным критерием для оценки экструдирруемости была плавность и однородность процесса экструзии. Смеси с высоким содержанием волокон часто сталкивались с проблемами при экструзии, такими как засорение или непостоянный поток, что было связано с увеличением вязкости и предела текучести [16]. Эти проблемы были особенно заметны при высоком содержании волокон (0.75% и 1%), где для начала потока материала требовалось более высокое давление, что приводило к блокировкам в сопле. Напротив, смеси с более низким содержанием волокон (0.25% и 0.5%) демонстрировали более плавную экструзию и требовали меньшего давления, что указывало на их лучшую пригодность для использования в 3D-печати. Испытания на экструдирруемость помогли определить оптимальное содержание волокон для 3D-печати геополимеров, армированных волокнами. После анализа данных о давлении и потоке стало ясно, что смеси с содержанием волокон в диапазоне от 0.25% до 0.5% обеспечивают оптимальное сочетание улучшенных механических свойств и легкости экструзии [17]. Такой уровень содержания волокон позволил достичь стабильной экструзии с минимальными пиковыми нагрузками давления или изоляцией материала, что идеально подходит для процессов аддитивного производства.

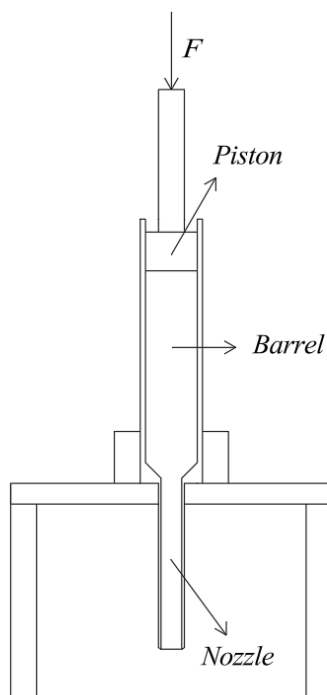


Рисунок 1 – Схема поршневого экструдера

Результаты и обсуждение

Реологические свойства

Модель Гершеля-Балкли позволила изучить реологическое поведение армированных волокнами геополимерных смесей и определить такие важные параметры, как индекс текучести и индекс консистенции. Анализ показал заметную взаимосвязь между реологическими характеристиками и объемом волокон в геополимерных смесях. Более высокое содержание волокон вызывало увеличение как предела текучести, так и вязкости в геополимерных смесях [14].

Смесь без волокон (PE0) показала наименьший предел текучести и вязкость, в то время как смесь с максимальным содержанием волокон (PE1) продемонстрировала значительно более высокий предел текучести, что свидетельствует о том, что волокна улучшили структурную целостность материала, а также его сопротивление деформации. Эта тенденция была ожидаемой, так как волокна могут создавать физическое препятствие внутри матрицы и повышать давление, необходимое для начала потока. Дополнительные волокна приводят к увеличению предела текучести и показывают склонность материала к уменьшению вязкости при больших сдвиговых усилиях [4].

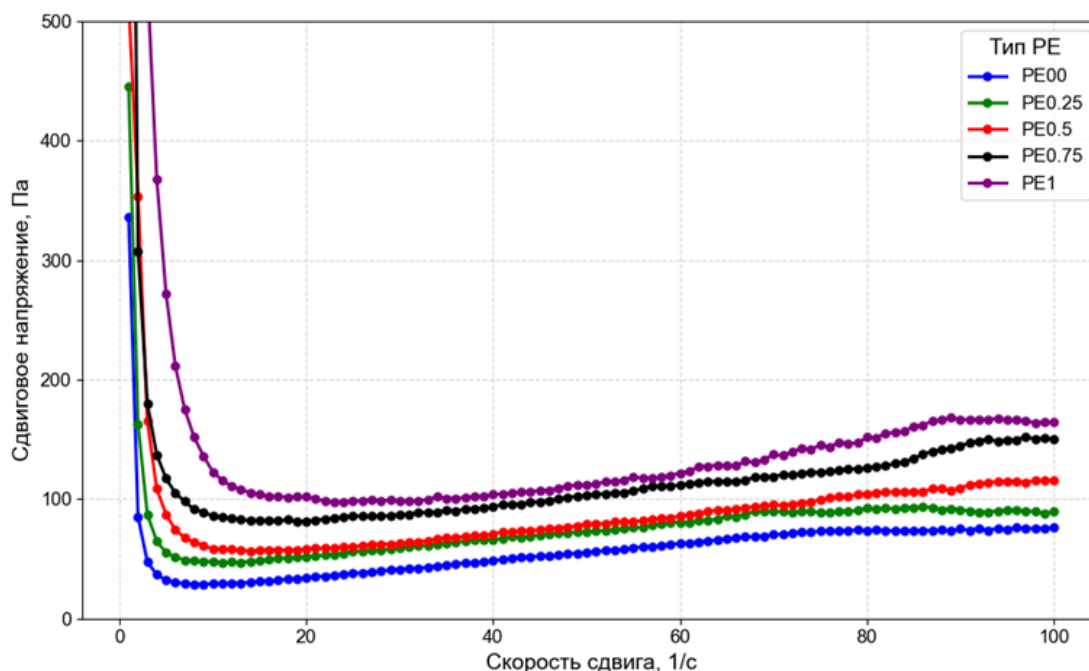


Рисунок 2 – Напряжение сдвига в зависимости от скорости сдвига геополимеров, армированных волокном

Как показано на рисунке 2, сдвиговое напряжение увеличивалось с увеличением содержания волокон при низких скоростях сдвига, однако все смеси демонстрировали поведение, характерное для псевдопластичных жидкостей, что выражалось в уменьшении наклона кривых при высоких скоростях сдвига. Это означает, что, хотя смеси с высоким содержанием волокон изначально требуют большего усилия для начала потока, они демонстрируют лучшую текучесть при приложении сдвига. Индекс консистенции (К), который отражает вязкость смеси, также показал значительное увеличение с ростом содержания волокон, как показано в таблице 1. Это указывает на то, что более высокое содержание волокон приводит к более густой смеси, что может усложнить процессы экструзии. Однако индекс текучести несколько уменьшился при увеличении содержания волокон, что подтверждает поведение псевдопластичных жидкостей для геополимерных смесей. Такой реологический профиль делает геополимеры,

армированные волокнами, подходящими для использования в 3D-печати, где важен баланс между жесткостью материала и его текучестью для успешной экструзии [4, 15, 18].

Таблица 1 – Реологические свойства геополимерных смесей

ID Смеси	Предел текучести, (Па)	Индекс консистенции, К (Па·с ⁿ)	Индекс текучести, n
PE0	31.55	5.67	0.721
PE0.25	34.11	6.78	0.718
PE0.5	51.33	9.32	0.699
PE0.75	67.33	11.72	0.648
PE1	93.45	10.15	0.687

Экструдированность

В данном исследовании анализировались как сила, необходимая для экструзии геополимерных смесей, так и плавность процесса экструзии. Смесей с меньшим содержанием волокон показали лучшую и более плавную экструзию при меньшем усилии по сравнению с теми, у которых было большее содержание волокон. Для начала и поддержания экструзии на более высоких скоростях требовалось большее давление для смесей с высоким содержанием волокон.

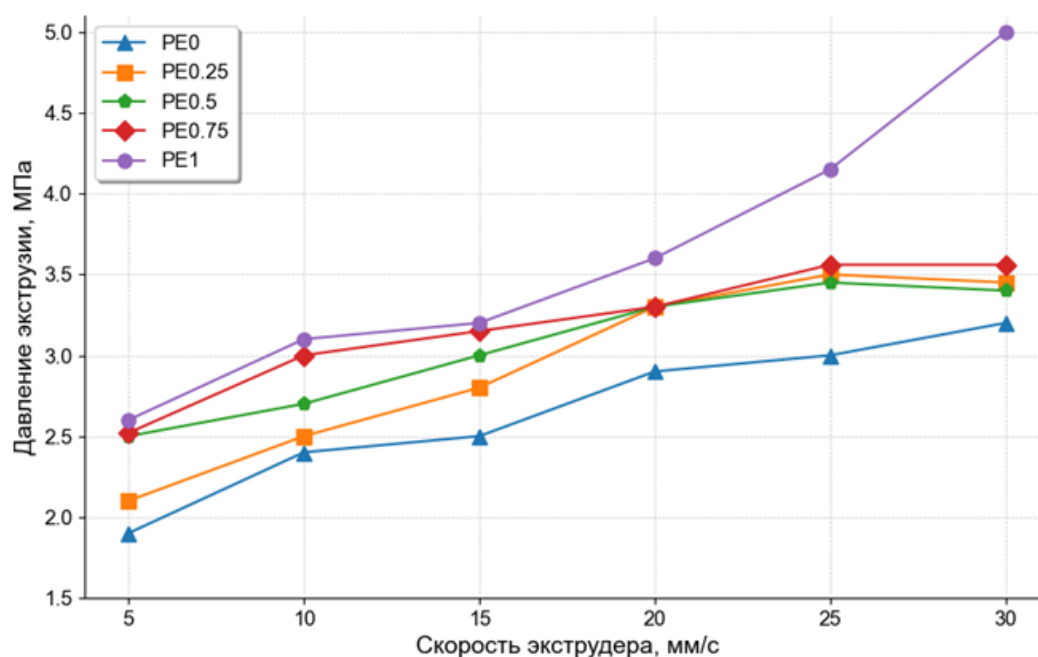


Рисунок 3 – Давление экструзии в зависимости от скорости экструзии для геополимеров, армированных волокном

Как показано на рисунке 3, давление, необходимое для экструзии, резко увеличивалось с ростом содержания волокон, особенно для смесей PE0.75 и PE1. Смесью PE0 показала наименьшее давление экструзии, что указывает на то, что отсутствие волокон позволило легче протекать материалу через сопло. Смесей PE0.25 и PE0.5 продемонстрировали баланс между давлением и текучестью, показывая, что умеренное содержание волокон улучшает механические свойства, не усложняя процесс экструзии.

Анализ влияния содержания волокон на экструдированность

Смеси с содержанием волокон 0.25% и 0.5% продемонстрировали оптимальную экструдированность, обеспечивая баланс между улучшенными механическими свойствами и приемлемой текучестью. Эти смеси требовали меньшего давления для экструзии и показывали более плавный и непрерывный поток во время процесса экструзии. При содержании волокон 0.75% и 1% начали возникать проблемы, такие как засорение и комкование, а также сегрегация материала из-за высокого давления, необходимого для экструзии. Было установлено, что существует предел количественного включения волокон в геополимер, за пределами которого эффективная экструзия становится невозможной. Результаты показывают, что диапазон содержания волокон от 0.25% до 0.5% является оптимальными для приложений, где требуется плавная экструзия, таких как 3D-печать. За пределами этого диапазона преимущества армирования волокнами в плане улучшенных механических свойств могут быть перевешены сложностями, связанными с экструзией.

Понимание баланса между реологией и экструдированностью подчеркивает важность оптимизации содержания волокон для достижения как улучшенных механических свойств, так и легкости экструзии, что имеет ключевое значение для практического применения армированных волоконными геополимеров в аддитивном производстве.

Влияние содержания полиэтиленового волокна

Увеличение содержания полиэтиленовых (PE) волокон в геополимерных композитах на основе золы-уноса значительно изменяет их реологические и экструзионные свойства. Увеличение содержания волокон приводит к повышению вязкости и предела текучести в смесях, что свидетельствует об усиленном сопротивлении потоку. Формирование физической сети из волокон ограничивает движение частиц и требует приложения больших сдвиговых усилий для начала потока. Разница между смесями PE0 и PE1 стала очевидной из-за более высокого предела текучести и вязкости, наблюдаемых в PE1. Хотя включение волокон PE улучшает механические свойства материала, особенно в отношении прочности на разрыв и устойчивости к трещинообразованию, это связано с компромиссом: увеличение количества волокон усложняет экструзию смеси. Повышение вязкости и предела текучести затрудняет плавный и равномерный поток через сопло. В 3D-печати материал должен достаточно хорошо выходить при экструзии, но при этом сохранять свою целостность после выхода из сопла. При содержании волокон менее 0.5% и на уровне 0.25% смесь демонстрировала оптимальные механические свойства и хорошую текучесть для экструзионных систем.

Эти выводы соответствуют другим исследованиям в данной области, которые также сообщали о схожих эффектах армирования волокнами на реологию и экструзию в цементных композитах. Например, исследование Феррары и др. [19] показало, что увеличение содержания волокон в бетонных смесях улучшало прочностные свойства на разрыв, но приводило к трудностям при экструзии из-за повышения вязкости. Однако в некоторых исследованиях, таких как исследование Боса и др. [20], были успешно использованы несколько более высокие содержания волокон в 3D-печати, что предполагает, что оптимальное содержание волокон может варьироваться в зависимости от конкретного материала и используемого экструзионного оборудования. Результаты данного исследования подтверждают, что умеренное содержание волокон (до 0.5%) обеспечивает наилучший компромисс для геополимерных композитов на основе золы-уноса, в то время как более высокое содержание волокон приводит к нежелательным проблемам с экструзией.

Проблемы экструзии

Исследование показало, что использование более высоких концентраций волокон вызывает множество проблем в процессе экструзии. С увеличением содержания волокон значительно возрастает предел текучести и вязкость, что делает процесс экструзии более сложным и менее надежным. Для начала и поддержания экструзии необходимо применять высокое давление для смесей с большим содержанием волокон. Волокна образуют более прочную структуру, что увеличивает сопротивление потоку. Интенсивная обработка горячей водой может привести к таким осложнениям, как засорение сопла и сокращение срока службы оборудования.

При более высоких уровнях волокон увеличиваются вязкость и псевдопластичное поведение, что усугубляет эти трудности. Процессы экструзии часто выигрывают от псевдопластичного поведения, которое способствует облегчению потока под действием сдвиговых усилий, однако высокий предел текучести в этих смесях препятствует движению жидкости на начальных этапах. На начальном этапе экструзии материал может течь, однако значительные требования к давлению могут вызвать блокировки в узких отверстиях, часто используемых в 3D-печати. При необходимости высокого содержания волокон для достижения структурных или эксплуатационных целей требуется тщательный анализ реологических свойств материала. При этом содержание волокон должно быть оптимизировано для достижения как механических преимуществ, так и необходимой текучести для эффективной печати. В случаях создания сложных форм или тонких секций, которые зависят от надежного потока, более низкие проценты волокон (0.25%–0.5%) оказываются более эффективными.

Применение

Результаты данного исследования имеют важное значение для применения армированных волокнами геополимеров в аддитивном производстве в строительной отрасли, поскольку 3D-печать становится все более распространенной. Использование геополимеров с армированными волокнами для 3D-печати обеспечивает значительные преимущества, связанные с механической прочностью и устойчивостью к трещинам. В применениях, связанных со строительством, таких как формирование несущих стен или сложных компонентов, эти свойства крайне важны, поскольку материал должен сохранять свою прочность. Печать структурных элементов, таких как балки или колонны, с использованием армированных волокон геополимеров может обеспечить необходимую прочность для соблюдения строительных норм и повышения безопасности, уменьшая необходимость в дополнительном укреплении. Геополимеры выделяются как более устойчивый выбор по сравнению с традиционными цементными материалами и привлекают внимание со стороны экологически ориентированных строительных проектов. Присутствие полиэтиленовых волокон усиливает прочность и долговечность печатных конструкций, снижая потребность в последующих ремонтах или заменах на протяжении времени.

Однако, как показано в данном исследовании, производительность экструзии армированных волокон геополимеров должна быть тщательно изучена. В тех моментах, где материал должен плавно и непрерывно проходить через сопло, например, при печати больших, непрерывных конструкций или сложных дизайнов, важно использовать содержание волокон, которое не будет препятствовать процессу экструзии. Согласно результатам данного исследования, содержание волокон в диапазоне от 0.25% до 0.5% обеспечивает лучший баланс между механической прочностью и экструдированностью. Это делает их идеальными для широкого круга строительных применений, включая печать стен и сборных строительных компонентов. Для более сложных или высокопроизводительных применений, требующих повышенного содержания волокон, потребуется дополнительная оптимизация процесса экструзии. Это может включать регулировку скорости печати, размера сопла или даже разработку новых типов волокон или формулировок смесей, которые сохраняют высокие механические характеристики без ухудшения экструдированности. Результаты данного исследования могут способствовать разработке таких составов, делая геополимеры, армированные волокнами, жизнеспособным решением для крупномасштабного устойчивого строительства с применением технологий 3D-печати.

Выводы

В данном исследовании было рассмотрено, как содержание полиэтиленовых (PE) волокон влияет на свойства экструзируемых геополимерных смесей на основе золы-уноса. В результатах исследования была выявлена очевидная связь между содержанием волокон и характеристиками движения смесей. Увеличение содержания волокон привело к значительному повышению как предела текучести, так и вязкости смесей, что показывает, что материал ста-

новится более жестким при увеличении количества волокон. Механические преимущества увеличиваются при таком подходе, однако это усложняет процесс экструзии, требуя большего давления для начала и поддержания потока.

Оптимальный диапазон содержания волокон, определенный в данном исследовании, составляет от 0.25% до 0.5%. В этом диапазоне геополимерные композиты демонстрировали наилучший баланс между улучшенными механическими свойствами и приемлемой экструдированностью. Смеси в этом диапазоне легче экструдировались, требовали меньшего давления и демонстрировали более плавное и стабильное поведение потока. Напротив, смеси с более высоким содержанием волокон (0.75%–1%) сталкивались с такими проблемами, как засорение и увеличение давления экструзии, что делало их менее подходящими для применения в 3D-печати, где требуется непрерывная и плавная экструзия.

Полученные данные подчеркивают важность поиска баланса между армированием волокнами и экструдированностью в приложениях для 3D-печати. Армированные волокнами геополимеры предлагают значительные механические преимущества, однако необходима тщательная оптимизация содержания волокон для обеспечения эффективной и стабильной экструзии. Для практических применений, особенно в строительстве, где печатаются крупные конструкции, выбор содержания волокон должен учитывать как механические характеристики, так и поведение материала при экструзии. В будущем исследования могут проанализировать составы смесей для улучшения как реологических характеристик, так и экструдированности, варьируя типы и длину волокон. Исследование уникальных типов волокон, таких как натуральные и переработанные волокна, может представить более экологически чистые альтернативы, которые улучшат реологию и механические характеристики геополимерных композитов. Изучение различных методов экструзии или конструкций сопел может помочь решить проблемы, возникающие при повышенном содержании волокон, и расширить практическое использование геополимеров, армированных волокнами, в аддитивном производстве.

Информация о финансировании

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № BR21882278 «Создание строительно-технического инжинирингового центра для оказания полного цикла аккредитованных услуг строительной и дорожно-строительной отрасли Республики Казахстан»)

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Gibson I., Rosen D. and B. Stucker. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>.
- 2 Davidovits J. Properties of Geopolymer Cements, First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, 1994.
- 3 Roussel N. Rheology of fresh concrete: From measurements to predictions of casting processes, Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 2007, vol. 40, no. 10. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9313-2>.
- 4 Liu J. and Lv C. Properties of 3D-Printed Polymer Fiber-Reinforced Mortars: A Review, 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14071315>.
- 5 Barnes H.A. Thixotropy – A review, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0377-0257\(97\)00004-9](https://doi.org/10.1016/S0377-0257(97)00004-9).
- 6 Wolfs R.J.M., Bos F.P., and Salet T.A.M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing, Cem Concr Res, 2018, vol. 106. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.001>.
- 7 Van Jaarsveld J.G.S., Van Deventer J.S.J., and Lukey G.C. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers, Chemical Engineering Journal, 2002, vol. 89, no. 1–3. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00025-6](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00025-6).
- 8 Brandt A.M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering, Compos Struct, 2008, vol. 86, no. 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.006>.

- 9 Meddah M.S. and Bencheikh M. Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials, *Constr Build Mater*, 2009, vol. 23, no. 10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.017>.
- 10 Das D. and Rout P.K. Synthesis, Characterization and Properties of Fly Ash Based Geopolymer Materials, *J Mater Eng Perform*, 2021, vol. 30, no. 5, <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05647-x>.
- 11 Qaidi S. et al. Fly Ash-Based Geopolymer Composites: A Review of the Compressive Strength and Microstructure Analysis, *Materials*, 2022, vol. 15, no. 20. <https://doi.org/10.3390/ma15207098>.
- 12 Barnes H.A. A Handbook of Elementary Rheology, 2000, vol. 6, no. 4.
- 13 Whorlow R.W. Rheological techniques, 1980, <https://doi.org/10.1115/1.3138312>.
- 14 Chhabra R.P. and Richardson J.F. Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications, 2008. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8532-0.X0001-7>.
- 15 Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Gibb A.G.F., and Thorpe T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 2012, vol. 45, no. 8. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>.
- 16 Chen Y. et al. Can superabsorbent polymers be used as rheology modifiers for cementitious materials in the context of 3D concrete printing?, *Constr Build Mater*, 2023, vol. 371. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130777>.
- 17 Ricciotti L., Apicella A., Perrotta V., and Aversa R. Geopolymer Materials for Extrusion-Based 3D-Printing: A Review, 2023. <https://doi.org/10.3390/polym15244688>.
- 18 Papanastasiou T.C. Flows of Materials with Yield, *J Rheol (N Y N Y)*, 1987, vol. 31, no. 5. <https://doi.org/10.1122/1.549926>.
- 19 Ferrara L., Park Y.D., and Shah S.P. A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete, *Cem Concr Res*, 2007, vol. 37, no. 6. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.03.014>.
- 20 Bos F., Wolfs R., Ahmed Z., and Salet T. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing, *Virtual Phys Prototyp*, 2016, vol. 11, no. 3. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>.

^{1*}Сариев Б.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-2637-9704,

*e-mail: b.sariyev@astanait.edu.kz

²Амрин А.,

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7567-6695,

e-mail: andas.amrin@nu.edu.kz

^{3*}Джексембаева А.,

PhD, ORCID ID: идентификаторы: 0009-0009-6153-9580,

*e-mail: dzheksembayeva_ae@mail.ru

³Қоңқанов М.,

PhD, ORCID ID: идентификаторы: 0009-0006-9365-4127,

e-mail: marcon@metrology.kz

¹Астана ІТ университеті, Астана қ., Қазақстан

²Назарбаев университеті, Астана қ., Қазақстан

³Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан

АДДИТИВТІ ӨНДІРІС ҮШІН ПОЛИЭТИЛЕН ТАЛШЫҚТАРМЕН КҮШЕЙТІЛГЕН ҰШПА КҮЛ ГЕОПОЛИМЕРІНІҢ РЕОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ТАЛДАУ

Аңдатпа

3D басып шығару берік және күрделі құрылымдарды жасаудың тиімді тәсілі, сонымен қатар ресурстарды үнемдеуге мүмкіндік береді. Кәдімгі цемент материалдарының орнына күлді геополимерлердің экологиялық артықшылықтары мен жоғары механикалық қасиеттері жақсы танымал. Бұл зерттеу полиэтилен (PE) талшықтарын қосу материалдардың қасиеттерін қалай өзгертетінін, сондай-ақ әртүрлі концентрациялардың композиттік материалдың ағындық сипаттамаларына және өндіру қабілетіне қалай әсер ететінін зерттейді. Талшықты күшейтілген геополимерлердегі Ньютондық емес сипаттамалар Гершель-Балкли моделі арқылы талданады. Тұтқырлық және ағын әрекеті сияқты маңызды реологиялық факторларды дәл өлшеу арқылы

зерттеушілер материалдың 3D басып шығару процесіне әсерін бағалай алады. Бұл зерттеу нәтижелері полиэтилен (PE) талшықтарын қосу материалдың беріктігін арттырып, сынуға төзімділікті жақсартады, бірақ сонымен бірге оның принтер саптамасынан өтуіне кедергі болатын тұтқырлық пен шығымдылық кернеуін арттыратынын көрсетеді. Талшықтың оңтайлы қоспасы бақыланатын сынақтар нәтижесінде жоғары төзімділікпен үйлескен экструзия ағыны мен құрылымның сенімділігін қамтамасыз етеді. Зерттеу нәтижелері 3D басып шығару әдістерінің талаптарын қанағаттандыра отырып, беріктігін сақтайтын геополимерлерді өндіру әдістерін әзірлеуге мүмкіндік береді және олардың практикалық қолданбаларын ашады. Сонымен қатар, бұл жұмыс талшықтарды қосу геополимерлердің қасиеттерін қалай өзгертетінін терең түсінуге көмектесіп, жасыл құрылыс материалдары жөніндегі жалпы диалогты байытады. Тәжірибелік қолдануда құрылыс материалдарының тиімділігі мен икемділігін арттыру үшін күрделі талшық жүйелерін және креативті қоспалар тәжірибесін кейінгі зерттеулерде қолдану мүмкіндігін көрсетеді.

Тірек сөздер: геополимер, полиэтилен талшықтары, 3D басып шығару, реологиялық қасиеттер, экструзия, ұшпа күл, тұрақты құрылыс материалдары.

¹*Sariyev B.,

PhD, Assistant Professor, ORCID ID: 0000-0002-2637-9704,

e-mail: b.sariyev@astanait.edu.kz

²Amrin A.,

PhD, Postdoctoral Scholar, ORCID ID: 0000-0001-7567-6695,

e-mail: andas.amrin@nu.edu.kz

³*Jexembayeva A.,

PhD, ORCID ID: 0009-0009-6153-9580,

e-mail: dzheksembayeva_ae@mail.ru

³Konkanov M.,

PhD, ORCID ID: 0009-0006-9365-4127,

e-mail: marcon@metrology.kz

¹Astana IT University, Astana, Kazakhstan

²Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan

³L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

ANALYSIS OF RHEOLOGICAL PROPERTIES IN PE FIBER-REINFORCED FLY ASH GEOPOLYMER FOR ADDITIVE MANUFACTURING

Abstract

The leading edge of construction advancements is represented by 3D printing which creates durable and elaborate structures and minimizes resource wastage. As a viable substitute for regular cement materials highlights the ecological benefits and strong mechanical traits of fly ash geopolymers. This study investigates how the addition of polyethylene (PE) fibers alters these properties and how varying concentrations influence the flow behavior and capability of producing the composite material. The analysis of non-Newtonian behavior in these fiber-reinforced geopolymers is conducted using the Herschel-Bulkley model. By precisely measuring critical rheological factors such as viscosity and flow behavior researchers can evaluate how they influence 3D printing processes. This research reveals that adding PE fibers boosts the material's strength and improves resistance against cracking while also elevating the viscosity and yield stress that can hinder its passage through the printer's nozzle. An optimal blend of fiber content emerges from controlled tests that align increased durability with controllable extrusion flow and structure reliability. The results offer deep practical applications that reveal methods for producing geopolymers that can maintain strength while meeting the exacting requirements of 3D printing methods. Research deepens the grasp of how adding fibers alters the properties of geopolymers and enriches the overall dialogue on green building materials. It opens doors for subsequent analysis of complex fiber systems and creative additive practices to boost the effectiveness and resilience of construction materials in practical use.

Key words: geopolymers, polyethylene fibers, 3D printing, rheological properties, extrudability, fly ash, sustainable building materials.

Дата поступления статьи в редакцию: 14.10.2024

UDC 620.3
IRSTI 29.19.22

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-245-253>

^{1,2}**Kalkozova Zh.K.,**

PhD, Associate Professor, ORCID ID: 0000-0002-4826-1678,
e-mail: zh.kalkozova@mail.ru

^{1,2*}**Markhabayeva A.A.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0657-422X,
*e-mail: aiko_marx@mail.ru

^{1,2}**Mukhametkarimov Y.S.,**

PhD, Associate Professor, ORCID ID: 0000-0003-1381-4532,
e-mail: m.c.erzhan@mail.ru

^{1,3}**Yerlanuly Y.,**

PhD, ORCID 0000-0001-6757-1041,
e-mail: yerlanuly@physics.kz

^{1,2}**Tulegenova A.T.,**

PhD, ORCID 0000-0002-5701-6674,
e-mail: tulegenova.aida@gmail.com

^{1,2}**Abdullin Kh.A.,**

Dr.Phys.-Math.Sc., Professor, ORCID ID: 0000-0002-2729-2272,
e-mail: kh.a.abdullin@mail.ru

³**Nuraje N.,**

PhD, Professor, ORCID ID: 0000-0003-4751-2719,
e-mail: nurxat.nuraje@nu.edu.kz

⁴**Cao C.D.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-8933-2217,
e-mail: caocd@nwpu.edu.cn

¹Institute of Applied Science and Information Technologies, Almaty, Kazakhstan

²Al Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

³Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan

⁴Northwestern Polytechnical University, Xian, China

PHOTOELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED SILICON FOR SOLAR WATER SPLITTING

Abstract

Silicon, one of the most abundant and cost-effective materials on Earth, holds significant promise for applications in water splitting and photovoltaics due to its suitable bandgap energy of approximately 1.12 eV, which allows absorption of ultraviolet, visible, and infrared light. However, the high reflectivity (~25%) of flat silicon surfaces limits its conversion efficiency, making it less efficient for photoelectrochemical (PEC) processes. To address this, nanostructured silicon has emerged as a solution to enhance light absorption, reduce substrate resistance, and improve hydrogen production efficiency. In this study, we fabricated nanostructured silicon photoelectrodes using the metal-assisted chemical etching (MACE) method. The resulting black silicon (b-Si) electrodes demonstrated superior light-harvesting capabilities, leading to significantly enhanced photocurrent densities. Notably, the b-Si photoelectrodes achieved a photocurrent density of 800 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ at 0V vs RHE (reversible hydrogen electrode), compared to 200 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ for planar silicon. Furthermore, the b-Si electrodes exhibited excellent long-term stability under continuous illumination for 16 hours. These results highlight the potential of nanostructured silicon as an efficient and stable material for solar-driven PEC water splitting and related renewable energy applications.

Key words: nanostructured silicon, solar water splitting, black silicon, metal-assisted chemical etching.

Introduction

Water splitting is the process of separating water into hydrogen and oxygen gasses through electrochemical reactions [1, 2]. This process holds great potential for clean and sustainable hydrogen production, which can be used as a renewable energy source [3, 4]. Currently, the most common method for water splitting is through electrochemical water splitting using free and inexhaustible solar radiation. This production route has several advantages, such as the use of abundant water, no greenhouse gas emissions, high hydrogen production efficiency, and high-purity products [5–7]. However, this technology also faces challenges, particularly in terms of cost and efficiency. To address these challenges, researchers have been exploring different catalysts and materials to improve the efficiency of photoelectrochemical water splitting. Recent studies have investigated the utilization of various materials and photocatalysts in combination with traditional silicon wafer in order to enhance the efficiency of photoelectrochemical water splitting [8–10].

Silicon is one of the most earth-abundant elements, production cost is not expensive [11]. It meets specified criteria as a substrate for water-splitting and also demonstrates high potential in photovoltaics [12, 13]. Moreover, band gap energy of approximately 1.12 eV (300–1200 nm), allowing it to absorb ultraviolet, visible light, and a wide range of IR light make them a prospective for PV-PEC device. However, flat surface of silicon is that it reflects approximately 25% of incoming photons, which has a detrimental impact on conversion efficiency. Utilizing nanostructured silicon presents a solution for enhancing light absorption, reducing substrate resistance, and consequently boosting hydrogen production [14–16]. Many studies have focused on improving the PEC performance of black silicon photoelectrodes, including efforts to maximize light absorption, optimize doping, and surface passivation strategies [17, 18] to enhance photoresponse and conversion efficiency. As a result, substantial progress has been made in achieving higher photocurrents and improved hydrogen production efficiency. While significant attention has been given to efficiency, much less emphasis has been placed on the long-term stability of black silicon under PEC operating conditions.

In this work, we successfully fabricated nanostructured silicon (Si) photoelectrodes using the metal-assisted chemical etching (MACE) method. The fabricated nanostructured silicon photoelectrodes demonstrated excellent light-harvesting capability due to the increased surface area and reduced reflectivity of the black silicon. This enhanced light absorption contributed to higher photocurrent densities, indicating improved efficiency in the PEC process. A key advancement in this work was the demonstration of the long-term stability of the nanostructured Si photoelectrodes.

Materials and methodology

Electrode preparation

Nanotextured Si (NSi) surfaces were obtained using the selective chemical etching method initiated by metallic silver nanoclusters. The polished p-type semiconductor Si wafers with a resistance of $10 \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ were chosen as a starting material. The heated to 80°C solution of $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ with a volume ratio (1:1:4) was used for cleaning procedure of substrates. A two-step chemical treatment was used to create the textured surface. At the first stage, the plates were immersed in an aqueous solution of $\text{AgNO}_3:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ for 10 seconds, while a layer of silver nanoparticles was deposited on the substrate. Experiments were carried out with $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ solutions in a ratio of 1:4 and AgNO_3 concentrations of 4 mM. Then Si wafers were etched in a solution of $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ with a volume ratio of 1:2:10 for 30 sec, after which the wafers were thoroughly washed in deionized water. At the final stage, to obtain a clean textured surface, residual silver nanoparticles were removed by boiling for 10 minutes in a solution of $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ in a volume ratio of 1:1, followed by washing in deionized water.

Photoelectrochemical measurements

The photoelectrochemical measurements were carried out in quartz cell using three electrode configurations on an electrochemical workstation (Corrtest CS310, China). The prepared nanostructures silicon, Pt mesh and Ag/AgCl electrode were used as working, counter and reference respectively. The

Nernst equation is used to convert potentials: $V_{\text{RHE}} = V_{(\text{Ag}/\text{AgCl})} + 0.0591 \times \text{pH} + V_{(\text{0Ag}/\text{AgCl})}$, where $V_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ is the applied potential, $V_{(\text{0Ag}/\text{AgCl})}$ is the standard potential of the Ag/AgCl reference electrode and pH is basicity or acidity of the electrolyte. The pH of the electrolyte is 1.2. A linear voltammetry was provided at a scan rate of 10mV/sec in 0.5M H_2SO_4 electrolyte. The xenon lamp (PLS-SXE300+, Perfect light, China) with AM 1.5G filter was used as a light source. A 50 nm Al layer was deposited onto the front side of silicon to get ohmic contact, subsequently, electrode was annealed in the Ar atmosphere at 500°C for 5 min. Then Cu wire was connected to the Al layer using an ultrasonic soldering machine (OPVSO600, OPVTECH, China). The working electrode was illuminated with a light intensity of 100mW/cm² (PL-MW2000 Optical Power Meter) chopped each 2 sec.

Hydrogen evolution testing

Hydrogen evolution test was provided using three electrode configuration quartz hermetic cell, Pt mesh and Ag/AgCl electrode were used as counter and reference respectively. The hermetic Teflon cell with quartz window was connected to the gas chromatography (Fuli instrument GC9790II) and purged with argon gas to remove dissolved oxygen and air from the cell. Amperometry technique was used to test hydrogen evolution onto the photoelectrode, scanning at 0V vs RHE potential. After irradiation, every 30 minutes the valve from the cell was opened so that the gas from the cell could enter to the gas chromatograph.

Material characterization

The film morphology was studied using scanning electron microscopy scanning electron microscope (SEM, ZEISS Crossbeam 540) equipped with an energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) system. The crystal structure of the films was studied using a MiniFlex X-ray diffractometer (Rigaku, Tokyo, Japan). Raman spectra were obtained using Ntegra Spectra (NT-MDT) spectrometer with 473 nm excitation. The UV-Vis spectroscopy (Cary 5000 UV-Vis-NIR) was used to study optical properties.

Results and discussion

The SEM image was obtained using a scanning electron microscope. Figure 1 presents a typical top and cross-sectional SEM image of nanostructured Si. It is obvious that Si nanowires are formed vertically oriented to the surface. The length of nanowires is 520 nm, while diameter ranged from 10 to 20 nm.

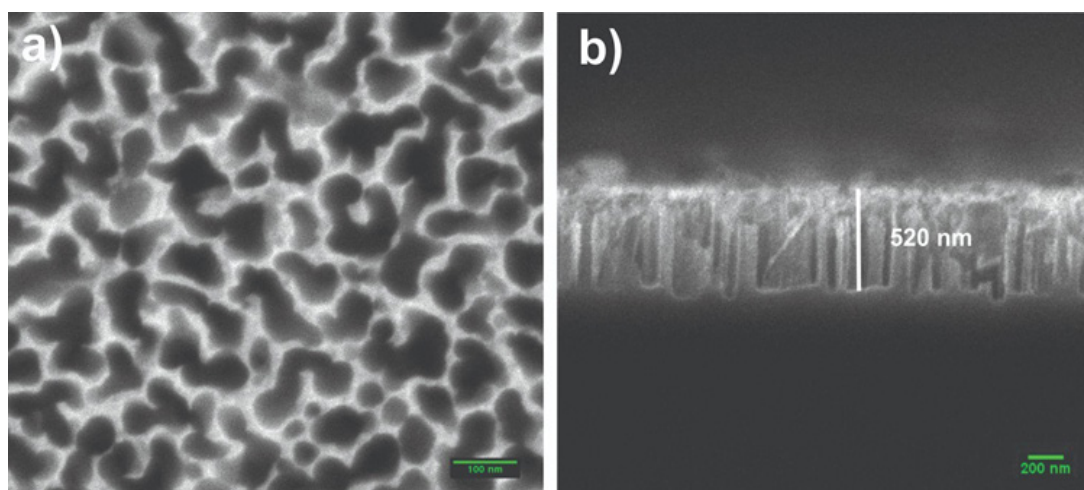


Figure 1 – SEM image of nanostructured Si top (a) and cross view (b)

Energy dispersive spectroscopy (EDS) results confirmed the silicon peak as shown in Fig.2. The structure of Si was studied using Raman spectroscopy. The Figure 3a demonstrates the Raman spectra for nanostructured Si (b-Si) and planar Si for comparison. As we can see, a strong peak located at 520 cm⁻¹ and 960 cm⁻¹ are in good agreement with other works. If we compare black and

planar silicon, the peaks are identical, there is a difference in intensity of the peaks. After etching the Raman signal is increased tenfold due to the nanostructured surface and geometry [19]. In our previous work [20] and in other works, a strong Raman scattering, enhanced by the surface (SERS effect) effect was found for nanostructured silicon [21].

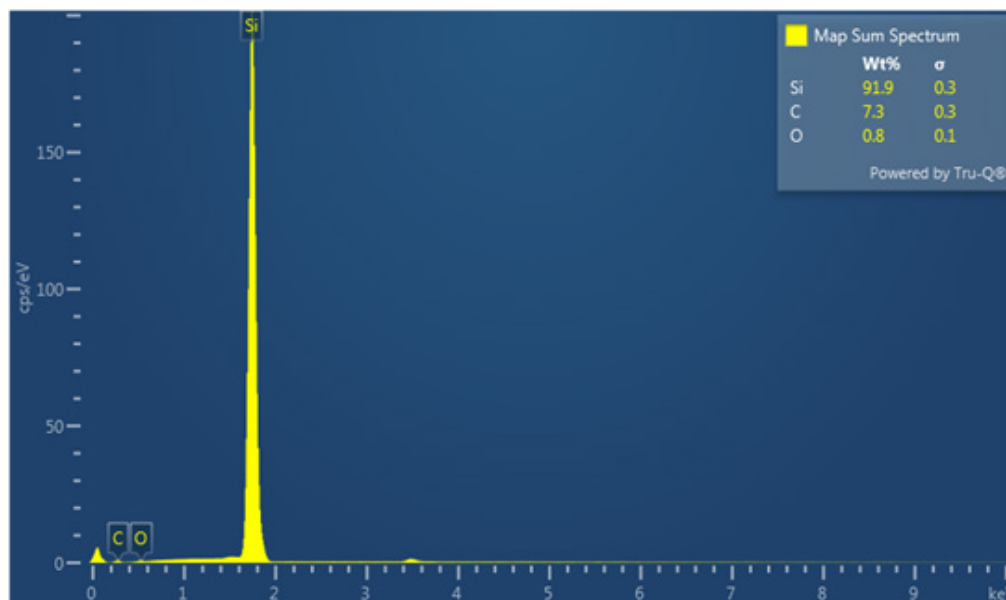


Figure 2 – EDS spectrum of black-Si

The UV-Vis spectroscopy (Cary 5000 UV-Vis-NIR) was performed to determine the optical reflectance of the silicon electrodes, and PTFE was used as a reference standard. The optical reflectance spectrum is presented in Fig.3b for planar and nanostructured silicon. As displayed in fig.3b the nanostructured surface of silicon decreased reflectance of light to 5%. This graph highlights how black silicon, due to its micro/nanostructures, absorbs more light than planar silicon, making it a more effective material for applications like solar water splitting or photovoltaics.

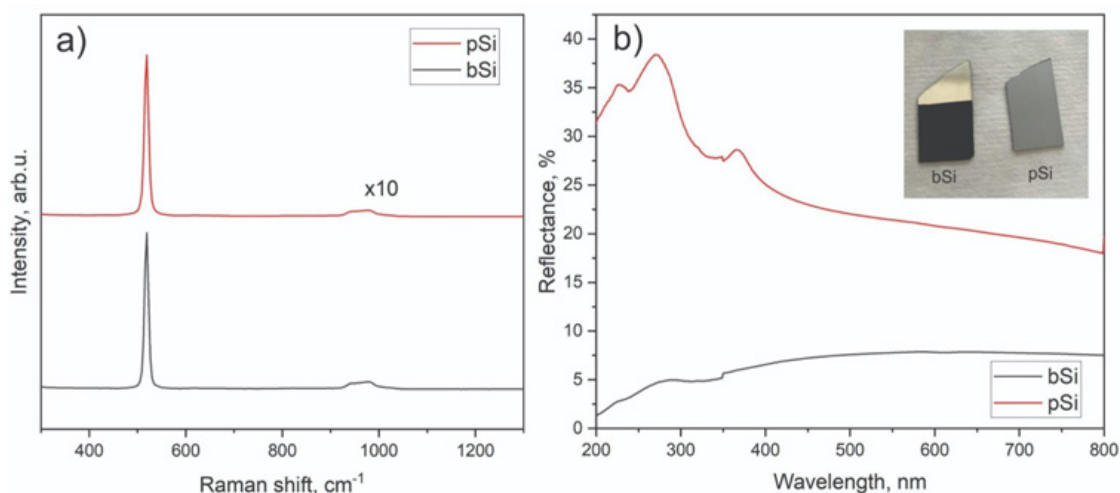


Figure 3 – Raman and reflectance spectra of black silicon and planar silicon

PEC water splitting properties of NSi are tested in three electrode configuration where the black silicon was used as a photocathode material. The figure 4a shows current-potential I-V curves chopped illumination each 2 sec are demonstrated. As can be seen, the negligible current is observed

in the dark. Under illumination the sharp rise of photocurrent beyond the potential indicates charge transfer and enhanced efficiency. The photocurrent density is increased by potential in case of black silicon, while planar silicon shows stable photoresponse at the entire potential region. The black silicon exhibits photocurrent density of 800 A/cm^2 while planar silicon shows $200 \text{ } \mu\text{A/cm}^2$ at 0 V vs RHE. The enhancement of photoelectrochemical performances might be due to increasing surface area which provides more sides for water reduction at the electrode-electrolyte interface.

Stability is a critical parameter for practical applications, as photoelectrodes in PEC cells are exposed to harsh environments, including strong acidic or alkaline electrolytes. In this work, stability test was provided using chronoamperometry technique at 0 V vs RHE during 16 hours under continuous illumination (AM 1.5G) for nanostructured silicon (Fig 4b). It is seen that the SiNW electrode demonstrates good stability. The hydrogen evolution was tested using gas chromatography method as seen in Fig.5a. As can be seen from the figure, the first 30 minutes of the spectra contain three peaks corresponding to hydrogen, oxygen and nitrogen. At first oxygen and nitrogen are residual gases from the air, over time we see that the residual gas is gradually replaced by hydrogen, which is intensively released on the surface of working electrode. The hydrogen bubbles onto the nanostructured silicon under illumination was also demonstrated in figure 5b.

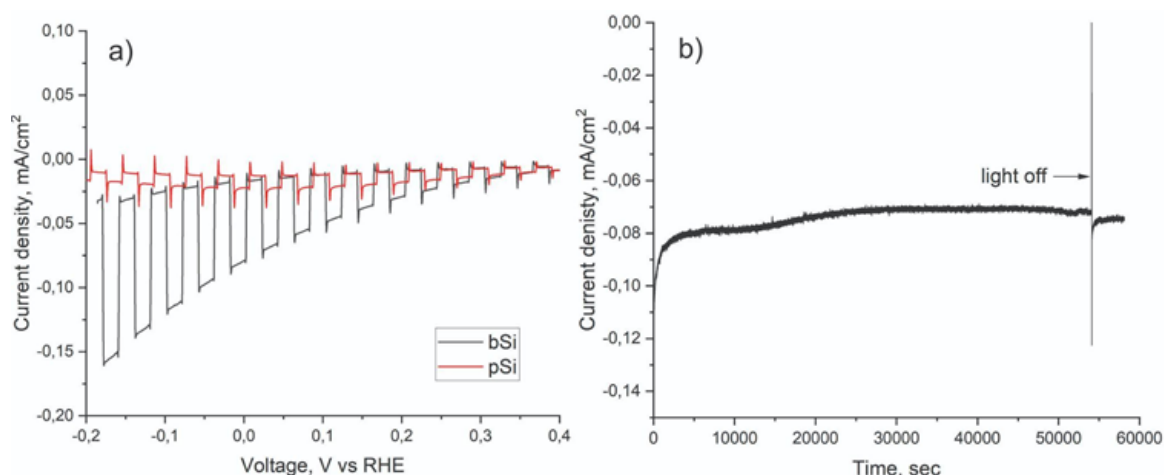


Figure 4 – I-V curves of black-Si and planar-Si photoelectrode under chopped illumination each 2 sec in $0.5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ electrolyte (a), I-t curves of black-Si photoelectrode at 0 V vs RHE during 60000 sec (16 h) in $0.5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ electrolyte

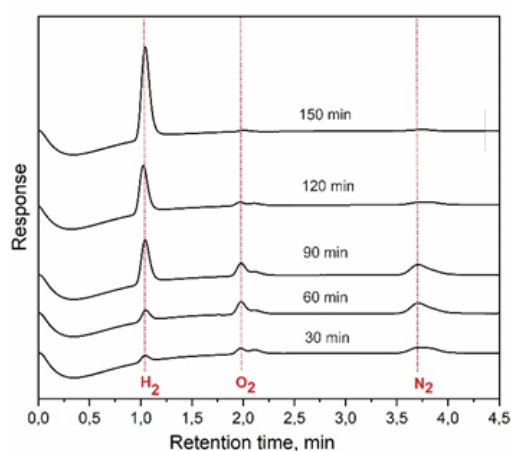


Figure 5 – Gas evolution onto the black-Si photoelectrode at -0.2 V RHE in three electrode system in $0.5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ electrolyte

Conclusion

In conclusion, our study demonstrates the superior performance of nanostructured silicon (b-Si) compared to planar silicon in terms of optical and photoelectrochemical properties. In photoelectrochemical water splitting experiments, black silicon exhibited a substantial improvement in photocurrent density, achieving $800 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ at 0V vs RHE, compared to $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ for planar silicon. Additionally, the nanostructured silicon electrode demonstrated excellent stability over 16 hours of continuous illumination. The enhanced performance of black silicon can be attributed to its increased surface area and effective light absorption, making it a promising material for solar-driven water splitting and related renewable energy applications.

Acknowledgments: The authors are thankful to Yerbolat Magazov and Vladislav Kudryashov from Nazarbayev University for getting SEM and EDS results.

Funding: This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, Grant No. AP23488569 and BR21882439, and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China, Grant No. D5000240307.

REFERENCES

- 1 Yang W., et al. Strategies for enhancing the photocurrent, photovoltage, and stability of photoelectrodes for photoelectrochemical water splitting. *Chemical Society Reviews*, 2019, vol. 48, no.19, pp. 4979–5015.
- 2 Chen Z., H.N. Dinh, and E. Miller. *Photoelectrochemical water splitting*, Springer, 2013, vol. 344.
- 3 Bozheyev F. Advancement of transition metal dichalcogenides for solar cells: a perspective, *Journal of Materials Chemistry A*, 2023, vol. 11, no. 37, pp. 19845–19853.
- 4 Bozheyev F. Transition metal dichalcogenide thin films for solar hydrogen production. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2022, vol. 34, p.100995.
- 5 Bozheyev F., et al. Influence of SnWO_4 , SnW_3O_9 , and WO_3 Phases in Tin Tungstate Films on Photoelectrochemical Water Oxidation, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024.
- 6 Markhabayeva A., et al. Effect of synthesis method parameters on the photocatalytic activity of tungsten oxide nanoplates. *AIP Advances*, 2021, vol. 11, no. 9.
- 7 Tolepov Z., et al. Effect of Bi addition on the switching effect and structure of thin $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films prepared by ion-plasma RF co-sputtering. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2024, vol. 642, p. 123167.
- 8 Prikhodko O.Y., et al. Photocatalytic activity of liquid-phase exfoliated gallium selenide flakes, *Chalcogenide Lett*, 2021, vol. 18, p. 777–781.
- 9 Markhabayeva A.A., et al. Construction of a ZnO Heterogeneous Structure Using Co_3O_4 as a Co-Catalyst to Enhance Photoelectrochemical Performance, *Materials*, 2023, vol. 17, no. 1, p. 146.
- 10 Tolubayeva, D.B., et al. Effect of hydrogen plasma treatment on the sensitivity of ZnO based electrochemical non-enzymatic biosensor, *Biosensors*, 2023, vol. 13, no. 8, p. 793.
- 11 Liu, X., et al., Black silicon: fabrication methods, properties and solar energy applications. *Energy & Environmental Science*, 2014, vol. 7, no. 10, pp. 3223–3263.
- 12 Luo Z., T. Wang, and J. Gong. Single-crystal silicon-based electrodes for unbiased solar water splitting: current status and prospects, *Chemical Society Reviews*, 2019, vol. 48, no. 7, pp. 2158–2181.
- 13 Mussabek G., et al. Preparation and characterization of hybrid nanopowder based on nanosilicon decorated with carbon nanostructures. *Applied Nanoscience*, 2023, vol. 13, no. 10, pp. 6709–6718.
- 14 Megouda N., et al. Investigation of morphology, reflectance and photocatalytic activity of nanostructured silicon surfaces. *Microelectronic Engineering*, 2016, vol. 159, pp. 94–101.
- 15 Branz H.M., et al. Nanostructured black silicon and the optical reflectance of graded-density surfaces. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 94, no. 23.
- 16 Mussabek G., et al. Kinetics of hydrogen generation from oxidation of hydrogenated silicon nanocrystals in aqueous solutions. *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, no. 7, p. 1413.
- 17 Yu Y., et al. Enhanced photoelectrochemical efficiency and stability using a conformal TiO_2 film on a black silicon photoanode. *Nature Energy*, 2017, vol. 2, no. 6, pp. 1–7.

18 Ao X., et al. Black silicon with controllable macropore array for enhanced photoelectrochemical performance. *Applied Physics Letters*, 2012, vol. 101, no. 11.

19 Kadlečíková M., et al. Raman spectroscopy of silicon with nanostructured surface. *Optik*, 2022, vol. 257, p. 168869.

20 Abdullin H., et al. Poluchenie nanoteksturovannoj poverhnosti kremnija metodom selektivnogo himicheskogo travleniya, iniciirovannogo metallichesкими nanoklasterami serebra, p. 127. [in Russia].

21 Yue W., et al. Surface-enhanced Raman scattering with gold-coated silicon nanopillars arrays: The influence of size and spatial order. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2022, vol. 267, p. 120582.

^{1,2}**Калкозова Ж.К.,**

PhD, қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0002-4826-1678,

e-mail: zh.kalkozova@mail.ru

^{1,2*}**Мархабаева А.А.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0657-422X,

e-mail: aiko_marx@mail.ru

^{1,2}**Мухаметкаримов Е.С.,**

PhD, қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0003-1381-4532,

e-mail: m.c.erzhan@mail.ru

^{1,3}**Ерланұлы Е.,**

PhD, ORCID 0000-0001-6757-1041,

e-mail: yerlanuly@physics.kz

^{1,2}**Тулегенова А.Т.,**

PhD, ORCID 0000-0002-5701-6674,

e-mail: tulegenova.aida@gmail.com

^{1,2}**Абдуллин Х.А.,**

физ.-мат.ғ.д., профессор, ORCID ID: 0000-0002-2729-2272,

e-mail: kh.a.abdullin@mail.ru

³**Нураже Н.,**

PhD, профессор, ORCID ID: 0000-0003-4751-2719,

e-mail: nurxat.nuraje@nu.edu.kz

⁴**Цао Ч.Д.**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-8933-2217,

e-mail: caocd@nwpu.edu.cn

¹Қолданбалы ғылымдар және ақпараттық технологиялар институты, Алматы қ., Қазақстан

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

³Назарбаев университеті, Астана қ., Қазақстан

⁴Солтүстік-Батыс политехникалық университеті, Сиань қ., Қытай

КҮН СӘУЛЕСІМЕН СУДЫ ЫДЫРАТУҒА АРНАЛҒАН НАНОҚҰРЫЛЫМДЫ КРЕМНИЙДІҢ ФОТОЭЛЕКТРОХИМИЯЛЫҚ ҚАСИЕТІ

Андатпа

Кремний – жер бетіндегі кең таралған және салыстырмалы түрде арзан материалдардың бірі. Оның энергетикалық жолақ аралығы 1,12 эВ болғандықтан, ол ультракүлгін, көрінетін және инфрақызыл сәулелерді тиімді жұтады. Бұл қасиеті кремнийді күн энергиясын басқа энергия көздеріне түрлендіру саласында перспективті материал етеді. Алайда тегіс кремний беттерінің жарықты шағылысу қабілеті (~25%) оның түрлендіру тиімділігін шектейді, бұл оны фотоэлектрхимиялық (ПЕС) процестер үшін тиімсіз етеді. Осы мәселені шешу, атап айтқанда жарық жұтуын жақсарту, төсеніш кедергісін азайту және сутегі өндірісінің тиімділігін арттыру үшін кремнийдің бетін өңдеу арқылы нанокұрылымды кремний алуға болады. Бұл зерттеуде біз металл көмегімен химиялық өңдеу (МАСЕ) әдісін қолдана отырып, нанокұрылымды

кремний фотоэлектродтарын жасадық. Алынған кара кремний (b-Si) электродтары жоғары жарық жұту қабілетін көрсетті, бұл фототок тығыздығының айтарлықтай жоғарылауына әкелді. Атап айтқанда, b-Si фотоэлектродтары 0 В (RHE) кернеуде 800 мкА/см² фототок тығыздығына жетті, бұл жазық кремний үшін 200 мкА/см² мәнімен салыстырғанда айтарлықтай жоғары. Сонымен қатар b-Si электродтары 16 сағат бойы үздіксіз жарықтандыру кезінде ұзақ мерзімді тұрақтылығын сақтады. Бұл нәтижелер нанокұрылымды кремнийдің күн энергиясымен көмегімен суды бөлу процестері үшін тиімді және тұрақты материал ретінде әлеуетін көрсетеді. Нанокұрылымды кремний қолдану жаңартылатын энергия көздерін дамыту және суды бөлу процестерінде маңызды рөл атқаруы мүмкін.

Тірек сөздер: нанокұрылымды кремний, суды күн энергиясының көмегімен бөлу, кара кремний, металдың көмегімен химиялық өңдеу әдісі.

^{1,2}**Калкозова Ж.К.,**

PhD, ассоц профессор, ORCID ID: 0000-0002-4826-1678,

e-mail: zh.kalkozova@mail.ru

^{1,2*}**Мархабаева А.А.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0657-422X,

e-mail: aiko_marx@mail.ru

^{1,2}**Мухаметкаримов Е.С.,**

PhD, ассоц. профессор, ORCID ID: 0000-0003-1381-4532,

e-mail: m.c.erzhan@mail.ru

^{1,3}**Ерланұлы Е.,**

PhD, ORCID 0000-0001-6757-1041,

e-mail: yerlanuly@physics.kz

^{1,2}**Тулегенова А.Т.,**

PhD, ORCID 0000-0002-5701-6674,

e-mail: tulegenova.aida@gmail.com

^{1,2}**Абдуллин Х.А.,**

докт. физ.-мат. наук., профессор, ORCID ID: 0000-0002-2729-2272,

e-mail: kh.a.abdullin@mail.ru

³**Нураже Н.,**

PhD, профессор, ORCID ID: 0000-0003-4751-2719,

e-mail: nurxat.nuraje@nu.edu.kz

⁴**Цао Ч.Д.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-8933-2217,

e-mail: caocd@nwpu.edu.cn

¹Институт прикладных наук и информационных технологий, г. Алматы, Казахстан

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

³Назарбаев Университет, г. Астана, Казахстан

⁴Северо-Западный политехнический университет, г. Сиань, Китай

ФОТОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ СОЛНЕЧНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ВОДЫ

Аннотация

Кремний, один из самых распространенных и экономически эффективных материалов на Земле, имеет значительные перспективы для применения в расщеплении воды и фотоэлектричестве благодаря своей подходящей ширине запрещенной зоны приблизительно 1,12 эВ, что позволяет поглощать ультрафиолетовый, видимый и инфракрасный свет. Однако высокая отражательная способность (~25%) плоских кремниевых пластин ограничивает его эффективность преобразования, что делает его менее

эффективным для фотоэлектрохимических (ПЭК) процессов. Наноструктурирование поверхности кремния позволяет улучшить коэффициент поглощения света, снижает его сопротивление и повышает эффективность производства водорода. В этом исследовании мы изготовили наноструктурированные кремниевые фотоэлектроды с использованием метода химического травления с использованием металла (МАСЕ). Полученные черные кремниевые (b-Si) электроды продемонстрировали превосходные возможности поглощения света, что привело к значительному повышению плотности фототока. Примечательно, что b-Si фотоэлектроды достигли плотности фототока 800 мкА/см² при 0 В против RHE по сравнению с 200 мкА/см² для плоского кремния. Кроме того, b-Si электроды продемонстрировали превосходную долговременную стабильность при непрерывном освещении в течение 16 часов. Эти результаты подчеркивают потенциал наноструктурированного кремния как эффективного и стабильного материала для расщепления воды с помощью солнечной энергии и связанных с этим возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: наноструктурированный кремний, расщепление воды с помощью солнечной энергии, черный кремний, химическое травление с использованием металла.

Article submission date: 04.12.2024

МҰНАЙ ГАЗ ИНЖЕНЕРИЯСЫ ЖӘНЕ ГЕОЛОГИЯ OIL AND GAS ENGINEERING, GEOLOGY НЕФТЕГАЗОВАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ГЕОЛОГИЯ

МРТИ 06.81.19
УДК 338.31

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-254-268>

¹Пашенов С.,

бакалавр, ORCID ID: 0009-0007-4521-2401,
e-mail: pashenov82@mail.ru

¹Кульбашев М.,

бакалавр, ORCID ID: 0009-0001-8324-1736,
e-mail: m.kulbashev@gmail.com

¹ЕМВА, Казахстано-Британский технический университет,
г. Алматы, Казахстан

ОПТИМИЗАЦИЯ УСТОЙЧИВОСТИ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ПРИМЕРЕ ТОО «КАЗАХОЙЛ АКТОБЕ»

Аннотация

Настоящее исследование посвящено оптимизации устойчивости производственных процессов в ТОО «Казахойл Актобе», одной из ведущих компаний нефтегазовой отрасли Казахстана. В условиях глобальных экологических вызовов и необходимости снижения углеродного следа основной целью исследования является разработка рекомендаций по улучшению экологических и экономических показателей компании. Анализ текущих практик показал потенциал для значительных улучшений в области энергоэффективности, управления водными ресурсами и утилизации отходов. Результаты исследования демонстрируют, что внедрение систем управления энергией (EMS) и использование возобновляемых источников энергии могут снизить эксплуатационные затраты на 20–25% и углеродные выбросы на 30–35%. Внедрение современных методов очистки сточных вод и рециркуляции позволяет сократить потребление свежей воды на 30–40%, а применение биотехнологических методов утилизации отходов, таких как анаэробное сбраживание, обеспечивает преобразование отходов в полезные ресурсы и уменьшает их объемы на 40–50%. Предложенные рекомендации предоставляют конкретные шаги для достижения устойчивого развития и могут быть полезны не только для ТОО «Казахойл Актобе», но и для других компаний отрасли. Исследование подтверждает необходимость внедрения передовых методов и технологий, способствуя экологической ответственности и экономическому процветанию нефтегазовой промышленности Казахстана.

Ключевые слова: устойчивое развитие, Казахстан, экономика, нефтегазовая отрасль, энергоэффективность, экология, управление энергией, экологическая ответственность, нефть, газ, экономический потенциал.

Введение

Обоснование выбора темы

Оптимизация устойчивости в нефтегазовой промышленности приобретает все большее значение в условиях современного рыночного и экологического контекста. Именно по этой причине выбор темы обоснован несколькими ключевыми факторами. Во-первых, нефтегазовая промышленность является одной из основных отраслей экономики Казахстана, и обеспечение ее устойчивого развития напрямую влияет на экономическую стабильность страны [1]. ТОО «Казахойл Актобе» выступает важным игроком в данной отрасли, представляя собой модель для анализа и внедрения передовых методов оптимизации устойчивости. Во-вторых, на фоне глобальных тенденций по снижению углеродного следа и повышению экологической ответственности необходимость внедрения инновационных и устойчивых практик становится неотъемлемой частью стратегии компаний нефтегазового сектора [2]. Исследование и анализ опыта ТОО «Казахойл Актобе» предоставляют возможность выявить эффективные подходы и методики, которые могут быть масштабированы и адаптированы другими предприятиями.

Кроме того, актуальность темы обусловлена и внутренними вызовами компании. Оптимизация процессов, улучшение управления ресурсами и минимизация экологического воздействия являются ключевыми направлениями для обеспечения долгосрочной устойчивости и конкурентоспособности [3]. Изучение этих аспектов на примере конкретного предприятия позволит сформировать более прикладные и детализированные рекомендации.

Таким образом, выбор темы для исследования не только отражает современные вызовы и тенденции в отрасли, но и направлен на выявление практических решений, способствующих устойчивому развитию нефтегазового сектора в Казахстане.

Состояние изученности проблемы

Изученность проблемы устойчивости в нефтегазовой промышленности, особенно в контексте оптимизации процессов, является предметом множества научных и практических исследований. В глобальном масштабе значительное внимание уделяется разработке и внедрению технологий, направленных на снижение углеродных выбросов, повышение энергоэффективности и минимизацию экологического воздействия. В данном контексте важное место занимают исследования, посвященные адаптации существующих производственных процессов к требованиям устойчивого развития [4].

В Казахстане вопрос устойчивости в нефтегазовой отрасли также является актуальной темой для исследователей и практиков. Различные академические работы и отраслевые отчеты рассматривают аспекты устойчивого управления ресурсами, экологической безопасности и внедрения передовых технологий [5]. ТОО «Казахойл Актобе» в этом плане представляет собой интересный объект исследования, поскольку компания активно внедряет инновационные подходы для улучшения своей экологической и экономической эффективности [6].

Однако, несмотря на значительное количество исследований, существует дефицит конкретных прикладных решений, адаптированных к условиям казахстанских предприятий. Многочисленные работы концентрируются на общих принципах и стратегиях, но недостаточно внимания уделяется локальным особенностям и специфическим вызовам, с которыми сталкиваются компании в регионе. Это создает необходимость в более детализированных и ориентированных на практику исследованиях, способных предложить конкретные рекомендации для компаний, таких как ТОО «Казахойл Актобе». Из этого следует, что общее состояние изученности проблемы можно охарактеризовать как многообещающее, но также требующее дальнейших исследований, направленных на разработку и внедрение конкретных решений для обеспечения устойчивости в условиях казахстанской нефтегазовой отрасли.

Актуальность темы

Актуальность темы обусловлена несколькими важными факторами. Во-первых, нефтегазовая отрасль является ключевой для экономики Казахстана, и ее устойчивое развитие критически важно для национальной стабильности и благосостояния. Во-вторых, глобальные трен-

ды по снижению углеродных выбросов и переходу к более экологически чистым технологиям требуют от компаний внедрения инновационных решений, направленных на уменьшение экологического воздействия.

ТОО «Казахойл Актобе» как одно из ведущих предприятий на рынке представляет собой идеальный объект для анализа и внедрения передовых практик устойчивого развития. Изучение опыта компании позволит выявить эффективные методы и подходы, которые могут быть применены на других предприятиях отрасли. Это особенно важно в условиях увеличивающегося давления со стороны международного сообщества и внутренних требований по улучшению экологической ответственности и экономической эффективности. Именно поэтому исследование данной темы отвечает современным вызовам, а также способствует разработке практических рекомендаций, необходимых для устойчивого развития нефтегазовой промышленности Казахстана.

Соответствие проблемам современной науки и практики

Выбранная тема напрямую соответствует современным вызовам науки и практики. Научное сообщество активно исследует пути снижения экологического воздействия и повышения энергоэффективности в промышленности. В условиях глобального изменения климата и нарастающего дефицита природных ресурсов исследования в области устойчивого развития приобретают критическую значимость.

На сегодняшний день практика требует внедрения инновационных технологий и подходов, направленных на минимизацию углеродного следа и оптимизацию использования ресурсов. ТОО «Казахойл Актобе», как представитель одной из ключевых отраслей экономики Казахстана, сталкивается с реальными вызовами, связанными с необходимостью повышения устойчивости своей деятельности.

Исследование данной темы позволит объединить теоретические разработки с практическими решениями, что особенно важно для достижения баланса между экономической эффективностью и экологической ответственностью. Выявление и анализ успешных практик на примере конкретной компании способствуют более глубокому пониманию и внедрению устойчивых методов в отрасли. Соответственно, тема исследования актуальна как для научных изысканий, так и для практических решений, необходимых для устойчивого развития нефтегазового сектора.

Объект

Объектом данного исследования является компания ТОО «Казахойл Актобе», действующая в нефтегазовой промышленности Казахстана.

Предмет

Предметом исследования являются методы и подходы к оптимизации устойчивости производственных процессов в компании ТОО «Казахойл Актобе».

Цели и задачи исследования

В качестве основной цели исследования необходимо определить и проанализировать эффективные методы и подходы к оптимизации устойчивости производственных процессов в ТОО «Казахойл Актобе» для повышения экологической и экономической эффективности компании.

Для достижения поставленной цели были разработаны следующие задачи исследования:

1. Провести обзор литературы и существующих исследований по теме устойчивости в нефтегазовой промышленности.
2. Проанализировать текущие методы и практики, используемые ТОО «Казахойл Актобе» для обеспечения устойчивости.
3. Выявить ключевые факторы, влияющие на устойчивость производственных процессов в компании.
4. Разработать рекомендации по оптимизации устойчивости с учетом специфики деятельности ТОО «Казахойл Актобе».

5. Оценить потенциальные экономические и экологические выгоды от внедрения предложенных рекомендаций.

6. Сформулировать практические выводы и предложения для других компаний нефтегазовой отрасли Казахстана.

Методы

В данной статье применяются ключевые теоретические методы, такие как сравнительный анализ, который позволяет сравнить подходы и стратегии, применяемые в ТОО «Казахойл Актобе», с аналогичными практиками в других компаниях отрасли для выявления сильных и слабых сторон. Далее, используется разработка моделей для оценки воздействия различных факторов на устойчивость производственных процессов и прогнозирование возможных результатов внедрения оптимизационных решений. Кроме того, производится достаточно системный подход с комплексным рассмотрением всех аспектов устойчивости, включая экономические, экологические и социальные факторы, для обеспечения целостного анализа и разработки рекомендаций. Эти методы позволяют сформировать теоретическую базу для анализа и разработки практических рекомендаций по оптимизации устойчивости производственных процессов в компании.

Практическая значимость исследования

Практическая значимость исследования заключается в разработке конкретных рекомендаций по оптимизации устойчивости производственных процессов в ТОО «Казахойл Актобе». Внедрение предложенных методов позволит компании снизить экологическое воздействие, улучшить управление ресурсами и повысить экономическую эффективность. Результаты исследования могут быть использованы для разработки стратегий устойчивого развития, адаптированных к условиям казахстанской нефтегазовой отрасли. Дополнительно полученные данные и рекомендации могут служить основой для других предприятий в отрасли, стремящихся к устойчивому развитию, повышению конкурентоспособности и соответствию международным стандартам экологической ответственности.

Материалы и методы

Для достижения целей исследования и решения поставленных задач будут использованы следующие методы. В первую очередь это анализ литературы, который включает в себя изучение научных публикаций, отчетов, нормативных документов и других источников по теме устойчивого развития в нефтегазовой промышленности. Данный метод позволит выявить текущие тенденции и лучшие практики, применяемые в отрасли. Он включает в себя систематический обзор существующих исследований и литературных источников, что помогает определить теоретическую базу и контекст для анализа деятельности ТОО «Казахойл Актобе».

Далее, сравнительный анализ предполагает сопоставление методов и подходов, применяемых в ТОО «Казахойл Актобе», с аналогичными практиками в других компаниях отрасли. Такой метод поможет выявить сильные и слабые стороны текущих стратегий устойчивого развития, а также определить, какие из применяемых подходов могут быть улучшены и адаптированы к специфике деятельности компании.

Кроме того, моделирование и прогнозирование будут использоваться для разработки моделей, которые оценивают воздействие различных факторов на устойчивость производственных процессов. Этот метод способствует более качественному прогнозированию возможных результатов внедрения оптимизационных решений. Модели могут включать экономические, экологические и социальные параметры, чтобы обеспечить комплексный подход к оценке устойчивости.

Стоит также отметить системный подход, который предусматривает комплексное рассмотрение всех аспектов устойчивости, включая экономические, экологические и социальные факторы. Такая стратегия осуществляет целостный анализ и разработку рекомендаций, направленных на устойчивое развитие компании.

На этапе анализа литературы будет проведен систематический обзор научных публикаций, отчетов и нормативных документов. Это позволит выявить ключевые тенденции и лучшие практики в области устойчивого развития нефтегазовой отрасли. Будут рассмотрены исследования, посвященные оптимизации производственных процессов, снижению углеродного следа, повышению энергоэффективности и управлению ресурсами.

Для проведения сравнительного анализа будут собраны данные о методах и подходах, применяемых в других компаниях нефтегазовой отрасли. Будут сопоставлены текущие практики ТОО «Казахойл Актобе» с лучшими практиками отрасли. Это позволит выявить области для улучшения и адаптации успешных методов.

На основе собранных данных будет разработана модель, оценивающая воздействие различных факторов на устойчивость производственных процессов. Модель будет включать экономические, экологические и социальные параметры. Прогнозирование позволит оценить потенциальные результаты внедрения предлагаемых оптимизационных решений.

Системный подход будет применяться на всех этапах исследования для обеспечения комплексного анализа устойчивости. Будет рассмотрено взаимодействие экономических, экологических и социальных факторов, что позволит разработать рекомендации по оптимизации производственных процессов.

Использование комбинации теоретических и практических методов в текущем исследовании поможет провести всесторонний анализ устойчивости производственных процессов в ТОО «Казахойл Актобе». Применение анализа литературы, сравнительного анализа, моделирования и прогнозирования, а также системного подхода обеспечит комплексный подход к изучению темы. Это позволит не только выявить текущие проблемы и вызовы, но и разработать конкретные рекомендации, направленные на оптимизацию устойчивости и повышение экологической и экономической эффективности компании. Полученные результаты могут быть полезны не только для ТОО «Казахойл Актобе», но и для других компаний нефтегазовой отрасли, стремящихся к устойчивому развитию.

Нефтегазовая промышленность является ключевой для экономики Казахстана, и ее устойчивое развитие играет важную роль в национальной стабильности и благосостоянии. Однако в условиях глобальных вызовов, таких как изменение климата и истощение природных ресурсов, становится критически важным внедрение устойчивых методов производства. ТОО «Казахойл Актобе», как один из ключевых игроков на рынке, представляет собой идеальный объект для анализа и внедрения передовых практик устойчивого развития.

На сегодняшний день научное сообщество активно изучает вопросы устойчивого развития в нефтегазовой промышленности. Основные направления исследований включают такие аспекты, как внедрение технологий, направленных на уменьшение углеродного следа производственных процессов, оптимизация потребления энергии для повышения производственной эффективности и снижения затрат, разработка методов для более рационального использования природных ресурсов, таких как вода и нефть, а также минимизация негативного воздействия на окружающую среду через улучшение технологий утилизации отходов и снижение загрязнений. Данные направления находят отражение в различных международных стандартах и руководствах, таких как ISO и GRI (Global Reporting Initiative) [7].

Необходимо отметить, что ТОО «Казахойл Актобе» уже предпринимает шаги по внедрению практик устойчивого развития, однако существует ряд проблем и вызовов, требующих решения. Во-первых, несмотря на существующие меры, компания сталкивается с проблемой значительных выбросов углерода и других загрязняющих веществ. Во-вторых, существуют возможности для повышения эффективности использования энергии и воды, которые пока не полностью реализованы. В-третьих, отмечается необходимость в постоянном обновлении технологий и подходов для соответствия международным стандартам и требованиям.

Исходя из этого, решение указанных проблем имеет важное значение для экономической устойчивости, так как повышение эффективности и снижение затрат могут существенно улучшить финансовые показатели компании. Соответствие международным экологическим

стандартам и снижение негативного воздействия на окружающую среду являются не менее важными аспектами устойчивого развития. Кроме того, улучшение экологической и экономической устойчивости компании способствует укреплению ее репутации и социальной ответственности.

Основываясь на вышесказанном, можно подчеркнуть основные положения данного исследования, которое направлено на анализ текущих методов и практик ТОО «Казахойл Актобе», а также на разработку рекомендаций по их улучшению.

Первое, был проведен детальный анализ существующих методов управления ресурсами, выбросами и отходами. Выявлены ключевые проблемы и слабые стороны текущих практик.

Второе, были сопоставлены методы и подходы ТОО «Казахойл Актобе» с лучшими практиками аналогичных компаний в международной нефтегазовой отрасли. Определены направления для адаптации успешных решений.

Третье, разработаны модели для оценки воздействия различных факторов на устойчивость производственных процессов. Прогнозированы результаты внедрения предложенных оптимизационных решений.

Четвертое, на основе проведенного анализа и моделирования разработаны конкретные рекомендации по улучшению устойчивости. Включены предложения по снижению углеродных выбросов, повышению энергоэффективности и оптимизации использования ресурсов.

Пятое, проведена оценка потенциальных экономических и экологических выгод от внедрения предложенных рекомендаций. Результаты показывают значительное снижение затрат и улучшение экологических показателей.

Шестое, полученные данные и разработанные рекомендации могут быть использованы не только ТОО «Казахойл Актобе», но и другими компаниями нефтегазовой отрасли Казахстана. Исследование предоставляет основу для разработки стратегий устойчивого развития, адаптированных к локальным условиям.

Стоит отметить, что данное исследование подчеркивает важность внедрения устойчивых методов и подходов в нефтегазовой промышленности, особенно в условиях текущих глобальных и локальных вызовов. Основные положения исследования, включая анализ текущих практик, сравнительный анализ, моделирование и разработку рекомендаций, обеспечивают всесторонний подход к решению проблемы. Применение данных рекомендаций может способствовать значительному улучшению экологических и экономических показателей ТОО «Казахойл Актобе» и других компаний отрасли.

Обзор литературы

Устойчивое развитие и оптимизация производственных процессов в нефтегазовой промышленности являются предметом интенсивного исследования и дискуссий. В условиях глобальных изменений климата и истощения природных ресурсов внедрение устойчивых практик становится критически важным для долгосрочной стабильности и экономического процветания компаний [7]. Настоящий обзор литературы фокусируется на ключевых аспектах устойчивости, методах оптимизации производственных процессов и примерах лучших практик в нефтегазовой отрасли (рисунок 1).

Устойчивое развитие в контексте нефтегазовой промышленности подразумевает баланс между экономическим ростом, социальными потребностями и охраной окружающей среды. Существует широкий спектр научных исследований, посвященных разработке и внедрению стратегий устойчивого развития. Важным направлением является снижение углеродного следа компании [8].

Снижение углеродных выбросов является приоритетной задачей для нефтегазовых компаний, учитывая их значительный вклад в глобальное изменение климата. Исследования показывают, что внедрение технологий улавливания и хранения углерода (CCS) может существенно уменьшить выбросы углекислого газа. Например, работа Чередниченко и других

(2023) демонстрирует, что CCS позволяет сократить выбросы углекислого газа на 85–90% при добыче и переработке нефти [9]. Другим важным аспектом является переход на использование возобновляемых источников энергии для внутренних нужд компании. Исследования Аубакировой и других (2024) подчеркивают, что интеграция солнечной и ветровой энергии в производственные процессы может существенно снизить общие выбросы парниковых газов. Внедрение гибридных энергетических систем, сочетающих традиционные и возобновляемые источники, позволяет оптимизировать энергетический баланс и повысить устойчивость [10].



Рисунок 1 – Ключевые аспекты обзора литературы

Примечание: Составлено авторами на основе собственного исследования

Энергоэффективность – еще один ключевой аспект устойчивого развития. Оптимизация потребления энергии может значительно снизить эксплуатационные расходы и улучшить экологические показатели компании. Согласно исследованию Саубетовой (2023), внедрение энергоэффективных технологий и методов управления позволяет сократить потребление энергии на 10–30% [11]. Примером успешного применения энергоэффективных решений является внедрение систем управления энергией (EMS). Работы Ураловой (2023) и Петросянц (2023) показывают, что использование EMS позволяет предприятиям систематически отслеживать и оптимизировать потребление энергии, что ведет к значительным экономическим и экологическим выгодам [12]. В частности, мониторинг и анализ данных по энергопотреблению в реальном времени позволяют выявлять и устранять неэффективности, тем самым снижая общие затраты на энергию. Управление ресурсами в нефтегазовой промышленности включает оптимизацию использования воды, сырья и других природных ресурсов [13]. Существует множество исследований, посвященных разработке эффективных методов управления ресурсами, направленных на минимизацию их потребления и максимизацию эффективности использования [14].

Оптимизация использования водных ресурсов является критически важной задачей для нефтегазовых компаний, особенно в условиях дефицита воды в некоторых регионах. Исследования Абдешова и других (2023) показывают, что внедрение технологий повторного использования и рециркуляции воды может существенно снизить потребление свежей воды и объемы сточных вод [15]. Эти технологии включают системы очистки и рециркуляции воды, которые позволяют повторно использовать воду в производственных процессах.

Утилизация отходов также является важным аспектом устойчивого управления ресурсами. Современные технологии позволяют минимизировать объемы отходов и перерабатывать их в полезные продукты. Например, исследование Есекиной и других (2023) демонстрирует, что биотехнологические методы переработки отходов могут быть эффективными для нефтегазовой отрасли [16]. Биологические методы, такие как анаэробное сбраживание, позволяют преобразовывать органические отходы в биогаз, который может использоваться в качестве источника энергии.

Необходимо также отметить и экологическую безопасность, которая включает в себя меры по снижению негативного воздействия на окружающую среду. В нефтегазовой промышленности этот аспект подразумевает под собой контроль выбросов загрязняющих веществ, охрану водных и земельных ресурсов, а также меры по восстановлению нарушенных экосистем [17].

Внедрение современных технологий мониторинга и контроля позволяет эффективно управлять экологическими рисками. Исследование Кабыл (2023) подчеркивает важность использования автоматизированных систем мониторинга, которые обеспечивают непрерывный контроль за выбросами и другими экологическими показателями. Эти системы позволяют оперативно выявлять и устранять нарушения, что способствует снижению экологического воздействия [18].

Кроме того, восстановление экосистем также важно для обеспечения экологической безопасности. Работа Асановой и других (2023) показывает, что успешное восстановление нарушенных экосистем требует комплексного подхода, включающего реабилитацию земель, восстановление водных ресурсов и биологическое разнообразие. Внедрение таких программ способствует улучшению экологической ситуации и повышению устойчивости компании [19].

Современные международные компании активно внедряют передовые практики устойчивого развития. Например, компания Shell разработала комплексную программу по снижению углеродных выбросов и повышению энергоэффективности. Исследования, проведенные в рамках этой программы, показывают, что использование технологий улавливания и хранения углерода, а также переход на использование возобновляемых источников энергии, позволяют значительно улучшить экологические показатели компании [20]. Другим примером является компания BP, которая активно внедряет системы управления энергией и проводит программы по оптимизации использования водных ресурсов. Исследования Vinokurov et al. (2023) показывают, что внедрение таких программ позволяет существенно сократить эксплуатационные расходы и улучшить экологические показатели [20].

В свою очередь, ТОО «Казахойл Актөбе» также предпринимает шаги по внедрению устойчивых практик. Однако существует потенциал для улучшения в области снижения углеродных выбросов, повышения энергоэффективности и оптимизации использования ресурсов. Сравнительный анализ показывает, что адаптация и внедрение лучших практик международных компаний могут способствовать значительному улучшению экологических и экономических показателей ТОО «Казахойл Актөбе».

Обзор литературы демонстрирует, что устойчивое развитие в нефтегазовой промышленности требует комплексного подхода, включающего снижение углеродных выбросов, повышение энергоэффективности, оптимизацию использования ресурсов и обеспечение экологической безопасности. Внедрение передовых технологий и методов управления позволяет существенно улучшить экологические и экономические показатели компаний. ТОО «Казахойл Актөбе» имеет все возможности для адаптации и внедрения лучших практик, что позволит компании достичь устойчивого развития и соответствовать международным стандартам.

Результаты и обсуждение

Настоящий раздел посвящен анализу результатов исследования по оптимизации устойчивости производственных процессов в ТОО «Казахойл Актөбе». Основное внимание уделено выявлению ключевых факторов, влияющих на устойчивость, оценке текущих практик и раз-

работке рекомендаций по их улучшению, а также обсуждаются экономические, экологические и социальные выгоды от внедрения предложенных решений.

Анализ текущих практик ТОО «Казахойл Актобе» показал, что компания уже предпринимает меры по повышению энергоэффективности. Однако существуют области, где возможны значительные улучшения (рисунок 2).



Рисунок 2 – Обзор текущих практик ТОО «Казахойл Актобе»

Примечание: Составлено авторами на основе источника [21]

Как следует из рисунка 2, было выявлено, что наибольший потенциал для повышения энергоэффективности имеется в таких направлениях, как оптимизация работы энергетических установок и использование возобновляемых источников энергии. Внедрение систем управления энергией (EMS) позволяет автоматизировать контроль и управление потреблением энергии и может снизить энергопотребление на 15–20%. Переход на использование солнечной и ветровой энергии для внутреннего потребления может существенно уменьшить углеродный след компании и снизить затраты на энергию.

Водные ресурсы являются критически важными для нефтегазовой промышленности. Анализ показал, что текущие практики ТОО «Казахойл Актобе» включают использование традиционных методов очистки воды и управления сточными водами. Очевидно, что внедрение новых технологий может значительно повысить эффективность использования водных ресурсов через рециркуляцию и повторное использование воды, а также развитие наиболее современных методов очистки сточных вод. Стоит обозначить, что внедрение систем рециркуляции и повторного использования воды позволяет сократить потребление свежей воды на 30–40%. Подобные системы могут быть особенно эффективны в условиях водного дефицита. Использование биотехнологических методов и мембранных систем очистки может существенно улучшить качество очищенной воды и снизить объемы загрязнений.

Текущие методы утилизации отходов в ТОО «Казахойл Актобе» включают традиционные технологии переработки и утилизации. Анализ показал, что внедрение более современных методов может привести к значительным улучшениям. Применение анаэробного сбраживания и других биотехнологических методов позволяет преобразовывать органические отходы в биогаз, который может использоваться как источник энергии. Это не только уменьшает объемы отходов, но и снижает затраты на энергию. Внедрение систем, которые интегрируют различ-

ные методы переработки и утилизации, позволяет минимизировать объемы отходов и максимально использовать их потенциал.

Для оценки воздействия различных факторов на устойчивость производственных процессов была разработана комплексная модель. Эта модель учитывает экономические, экологические и социальные параметры и позволяет прогнозировать результаты внедрения предлагаемых решений (рисунок 3).

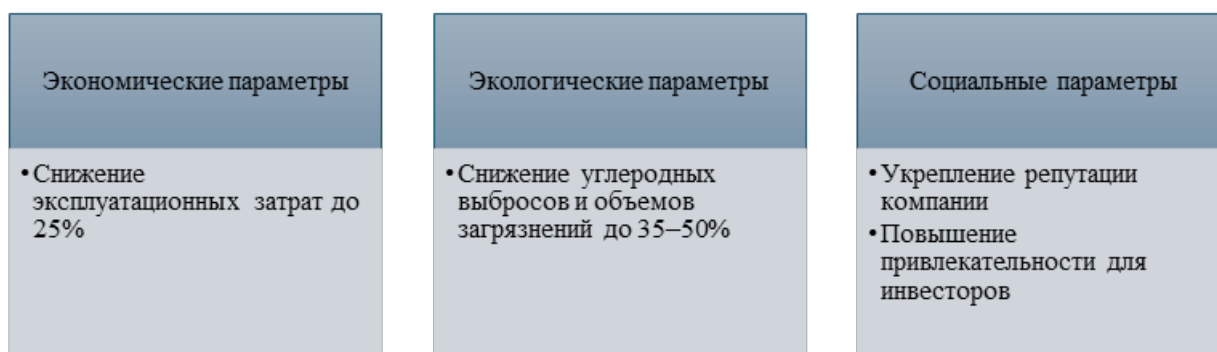


Рисунок 3 – Предлагаемая модель для повышения устойчивости производственных процессов

Примечание: Составлено авторами на основе собственного исследования

Как видно из рисунка 3, модель подразумевает сфокусироваться на экономических, экологических и социальных параметрах. Согласно экономическим аспектам, модель показывает, что внедрение систем управления энергией и использование возобновляемых источников энергии может привести к значительному снижению эксплуатационных затрат. Ожидается, что такие меры могут уменьшить затраты на энергию на 20–25% в течение первых пяти лет. Дополнительные экономические выгоды могут быть получены за счет снижения затрат на утилизацию отходов и улучшения управления водными ресурсами.

Далее, экологические выгоды от внедрения предложенных решений включают значительное снижение углеродных выбросов и объемов загрязнений. Ожидается, что использование возобновляемых источников энергии и современные методы очистки воды и утилизации отходов позволят сократить углеродные выбросы на 30–35% и объемы загрязнений на 40–50%.

В свою очередь, социальные выгоды включают улучшение условий труда и повышение социальной ответственности компании. Внедрение устойчивых практик способствует укреплению репутации компании и повышению ее привлекательности для инвесторов и партнеров. Ожидается, что такие меры также приведут к улучшению взаимодействия с местными сообществами и снижению социального напряжения.

На основе проведенного анализа и моделирования были разработаны конкретные рекомендации по улучшению устойчивости производственных процессов в ТОО «Казахойл Актөбе». Эти рекомендации включают следующие аспекты (рисунок 4).

Рисунок 4 демонстрирует вариации рекомендации в трех направлениях. Первое направление – это улучшение энергетической эффективности через внедрение систем управления энергией (EMS) и переход на возобновляемые источники энергии. Рекомендуемые действия включают автоматизацию контроля и управления потреблением энергии для оптимизации работы энергетических установок, а также использование солнечной и ветровой энергии для внутренних нужд компании.



Рисунок 4 – Разработанные рекомендации для повышения устойчивости производственных процессов в ТОО «Казахойл Актобе»

Примечание: Составлено авторами на основе собственного исследования

Второе – это управление водными ресурсами через внедрение систем рециркуляции и повторного использования воды и использование современных методов очистки сточных вод. Предприятие должно поставить в приоритет такие моменты, как повышение эффективности использования водных ресурсов и снижение потребления свежей воды и внедрение биотехнологических методов и мембранных систем очистки для улучшения качества воды и снижения загрязнений.

Третье – это качественная утилизация отходов путем применения биотехнологических методов и внедрение интегрированных систем управления отходами, которые должны включать использование анаэробного сбраживания и других методов для преобразования отходов в биогаз и интеграцию различных методов переработки и утилизации для минимизации объемов отходов.

Оценка потенциальных выгод от внедрения предложенных решений показала, что такие меры могут привести к значительным экономическим и экологическим улучшениям. Внедрение систем управления энергией и использование возобновляемых источников энергии позволит сократить эксплуатационные затраты на 20–25% в течение первых пяти лет. Экологические выгоды включают снижение углеродных выбросов на 30–35% и объемов загрязнений на 40–50%.

Полученные результаты и разработанные рекомендации могут быть использованы не только ТОО «Казахойл Актобе», но и другими компаниями нефтегазовой отрасли Казахстана. Внедрение передовых технологий и методов управления позволит значительно улучшить экологические и экономические показатели компаний, что способствует их устойчивому развитию. Практическая значимость исследования заключается в разработке конкретных и адаптированных рекомендаций, которые могут быть успешно внедрены в условиях казахстанской нефтегазовой промышленности.

Результаты исследования показывают, что внедрение передовых методов и технологий в ТОО «Казахойл Актобе» может привести к значительным улучшениям в области устойчивого

развития. Комплексный подход, включающий повышение энергетической эффективности, оптимизацию использования водных ресурсов и утилизацию отходов, обеспечивает экономические, экологические и социальные выгоды. Рекомендации, разработанные на основе анализа текущих практик и моделирования, предоставляют конкретные шаги для достижения устойчивого развития компании. Эти меры могут быть полезны и для других компаний отрасли, стремящихся к улучшению своих показателей и соответствию международным стандартам.

Заключение

Исследование, направленное на оптимизацию устойчивости производственных процессов в ТОО «Казахойл Актобе», выявило значительный потенциал для улучшения экологических и экономических показателей компании. Основные направления для повышения устойчивости включают повышение энергоэффективности, оптимизацию использования водных ресурсов и внедрение современных методов утилизации отходов.

Анализ текущих практик компании показал, что, несмотря на уже предпринимаемые меры, существует ряд областей, требующих дополнительных усилий. Внедрение систем управления энергией (EMS) и использование возобновляемых источников энергии могут привести к значительному снижению эксплуатационных затрат и уменьшению углеродного следа. Эти меры, в совокупности с использованием современных методов очистки сточных вод и рециркуляции, способны существенно повысить эффективность использования водных ресурсов и снизить объемы загрязнений.

Применение биотехнологических методов утилизации отходов, таких как анаэробное сбраживание, позволяет не только уменьшить объемы отходов, но и преобразовать их в полезные ресурсы, такие как биогаз. Внедрение интегрированных систем управления отходами способствует максимальному использованию их потенциала и минимизации негативного воздействия на окружающую среду.

Разработанные рекомендации, основанные на детальном анализе и моделировании, представляют собой комплексный и адаптированный к условиям казахстанской нефтегазовой отрасли подход. Внедрение предложенных решений ожидается привести к снижению затрат на энергию на 20–25%, сокращению углеродных выбросов на 30–35% и уменьшению объемов загрязнений на 40–50% в течение первых пяти лет.

Практическая значимость исследования заключается в предоставлении конкретных и действенных рекомендаций, которые могут быть применены не только ТОО «Казахойл Актобе», но и другими компаниями нефтегазовой отрасли Казахстана. Эти меры способствуют укреплению репутации компании, повышению ее конкурентоспособности и достижению устойчивого развития, что является важным фактором в условиях глобальных и локальных вызовов.

Таким образом, исследование подтверждает необходимость и целесообразность внедрения передовых методов и технологий для обеспечения устойчивого развития нефтегазовой промышленности Казахстана, способствуя экологической ответственности и экономическому процветанию компаний отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Карипов Т.А. Обзор тенденций развития нефтедобывающей промышленности Республики Казахстан // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2024. – № 2–1 (108). – С. 138–145.
- 2 Бойко Г. И. и др. Перспективы использования энергоаккумулирующих веществ в решении экологических проблем нефтяной отрасли // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. – 2023. – Т. 5. – № 2. – С. 99–116.
- 3 Жуман Ж., Ду Б., Хамзаева А. Текущее состояние нефтегазовой отрасли Казахстана // Вестник НАН РК. – 2024. – Т. 408. – № 2. – С. 470–485.

- 4 Шафигуллина Г.Г., Тимофеев Р.А. Разработка и планирование стратегии развития предприятия в нефтяной отрасли // Формирование конкурентной среды, конкурентоспособность и стратегическое управление предприятиями, организациями. – 2023. – С. 634.
- 5 Аубакирова Г.М. и др. Декарбонизация экономики Казахстана: перспективы энергетического перехода // Economics: the strategy and practice. – 2024. – Т. 18. – № 4. – С. 55–72.
- 6 Имангазин М.К., Аяуов Г.С. Анализ безопасности в нефтегазодобывающей компании ТОО «Казахойл Актөбе» // Вестник Казахстанско-Британского технического университета. – 2021. – Т. 16. – № 1. – С. 61–67.
- 7 Ибраева А.Е. Экологическая устойчивость и перспективы водородной энергетики в Казахстане: глобальный опыт и тенденции // ЛН Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы. Саяси ғылымдар. Аймақтану. Шығыстану. Түркітану сериясы. – 2023. – № 3. – С. 101–118.
- 8 Сабирова Р., Мукашева А. Экономический механизм развития нефтегазового сектора Казахстана // Вестник Атырауского университета имени Халела Досмұхамедова. – 2023. – Т. 66. – № 3. – С. 81–90.
- 9 Чередниченко А. и др. Введение углеродного налога как меры по снижению эмиссий парниковых газов в Казахстане: основные вызовы и проблемы // География и водные ресурсы. – 2023. – № 4. – С. 37–43.
- 10 Аубакирова Г.М. и др. Декарбонизация экономики Казахстана: перспективы энергетического перехода // Economics: the strategy and practice. – 2024. – Т. 18. – № 4. – С. 55–72.
- 11 Саубетова Б.С. Стратегические направления низкоуглеродного развития казахстанских компаний в области нефти и газа // Colloquium-journal. – Голопристанський міськрайонний центр зайнятості, 2023. – № 30 (189). – С. 47–50.
- 12 Уралова А. ESG и влияние на стратегии развития нефтегазовых компаний Казахстана // Colloquium-journal. – Голопристанський міськрайонний центр зайнятості, 2023. – № 29 (188). – С. 33–34.
- 13 Петросянц Т.В. Современное состояние «зеленого» финансирования в Казахстане // Colloquium-journal. – Голопристанський міськрайонний центр зайнятості, 2023. – № 29 (188). – С. 31–33.
- 14 Малышев Е.А., Малышева Т.Е. Декарбонизация компаний индустриального сектора в условиях неопределенности // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2023. – Т. 29. – № 4. – С. 123–131.
- 15 Абдешов Д.Д. и др. Механизм управления процессами урбанизацией и «зеленой» экономикой // Colloquium-journal. – Голопристанський міськрайонний центр зайнятості, 2023. – № 28 (187). – С. 27–29.
- 16 Есекина А.С. и др. Анализ динамики национальных выбросов и поглощений парниковых газов в Казахстане за 2012... 2021 гг. // Гидрометеорология и экология. – 2023. – № 3 (110). – С. 6–23.
- 17 Алиев Р.А. Влияние концепции устойчивого развития на трансформацию энергетической политики стран Каспийского региона // Вестник МГИМО Университета. – 2023. – Т. 16. – № 3. – С. 7–55.
- 18 Кабыл Ж.М. Изучение современных технологий при добыче газа // Материалдар Жинағы. – 2023. – Т. 18. – С. 257.
- 19 Асанова Г.К., Адильбектеги Г. А., Сайн Э.Д. Проблемы экологии в Казахстане в первые годы независимости // Электронный научный журнал «edu. e-history. kz». – 2023. – Т. 10. – № 4. – С. 675–691.
- 20 Vinokurov E. et al. Глобальная зеленая повестка в Евразийском регионе. Евразийский регион в глобальной зеленой повестке (Global Green Agenda in the Eurasian Region. Eurasian Region on the Global Green Agenda). – 2023.
- 21 ТОО «Казахойл Актөбе». URL: <http://www.koa.kz/>

REFERENCES

- 1 Karipov T.A. (2024) Obzor tendencij razvitija nefte dobyvajushhej promyshlennosti Respubliki Kazahstan. Jekonomika i biznes: teorija i praktika, no. 2–1 (108), pp.138–145.
- 2 Bojko G.I. i dr. (2023) Perspektivy ispol'zovanija jenergoakkumulirujushhih veshhestv v reshenii jekologicheskikh problem nefjtanoj otrasli. Vestnik neftegazovoj otrasli Kazahstana, vol. 5, no. 2, pp. 99–116.
- 3 Zhuman Zh., Du B., Hamzaeva A. (2024) Tekushhee sostojanie neftegazovoj otrasli Kazahstana. Vestnik NAN RK, vol. 408, no. 2, pp. 470–485.

4 Shafigullina G.G., Timofeev R.A. (2023) Razrabotka i planirovanie strategii razvitija predpriyatija v neftjanoy otrasli. Formirovanie konkurentnoj sredy, konkurentosposobnost' i strategicheskoe upravlenie predpriyatijami, organizacijami, p. 634.

5 Aubakirova G.M. i dr. (2024) Dekarbonizacija jekonomiki Kazahstana: perspektivy jenergeticheskogo perehoda. Economics: the strategy and practice, vol. 18, no. 4, pp. 55–72.

6 Imangazin M.K., Ajauov G.S. (2021) Analiz bezopasnosti v neftegazodobyvayushhej kompanii TOO «Kazahojl Aktobe». Vestnik Kazahstansko-Britanskogo tehničeskogo universiteta, vol. 16, no. 1, pp. 61–67.

7 Ibraeva A.E. (2023) Jekologičeskaja ustojčivost' i perspektivy vodorodnoj jenergetiki v Kazahstane: global'nyj opyt i tendencii. LN Gumilev atyndağy Eurazia ūlttyq universitetiniñ habarşysy. Saiasi ğylymdar. Aimaqtanu. Şyğystanu. Türkitanu seriasy, no. 3, pp. 101–118.

8 Sabirova R., Mukasheva A. (2023) Jekonomicheskij mehanizm razvitija neftegazovogo sektora Kazahstana. Vestnik Atyrauskogo universiteta imeni Halela Dosmuhamedova, vol. 66, no. 3, pp. 81–90.

9 Cherednichenko A. i dr. (2023) Vvedenie uglerodnogo naloga kak mery po snizheniju jemissij parnikovyh gazov v Kazahstane: osnovnye vyzovy i problem. Geografija i vodnye resursy, no. 4, pp. 37–43.

10 Aubakirova G.M. i dr. (2024) Dekarbonizacija jekonomiki Kazahstana: perspektivy jenergeticheskogo perehoda. Economics: the strategy and practice, vol. 18, no. 4, pp. 55–72.

11 Saubetova B.S. (2023) Strategicheskie napravlenija nizkouglerodnogo razvitija kazahstanskih kompanij v oblasti nefti i gaza. Colloquium-journal, no. 30 (189), pp. 47–50.

12 Uralova A. (2023) ESG i vlijanie na strategii razvitija neftegazovyh kompanij Kazahstana. Colloquium-journal, no. 29 (188), pp. 33–34.

13 Petrosjanc T.V. (2023) Sovremennoe sostojanie «zelenogo» finansirovanija v Kazahstane. Colloquium-journal. – Golopristsan'skij mis'krajonnij centr zajnjatosti, no. 29 (188), pp. 31–33.

14 Malyshev E.A., Malysheva T.E. (2023) Dekarbonizacija kompanij industrial'nogo sektora v uslovijah neopredelennosti. Vestnik Zabajkal'skogo gosudarstvennogo universiteta, vol. 29, no. 4, pp. 123–131.

15 Abdeshov D.D. i dr. (2023) Mehanizm upravlenija processami urbanizaciej i «zelenoj» jekonomikoj. Colloquium-journal, no. 28 (187), pp. 27–29.

16 Esekina A.S. i dr. (2023) Analiz dinamiki nacional'nyh vybrosov i pogloshhenij parnikovyh gazov v Kazahstane za 2012... 2021 gg. Gidrometeorologija i jekologija, no. 3 (110), pp. 6–23.

17 Aliev R.A. (2023) Vlijanie koncepcii ustojčivogo razvitija na transformaciju jenergetičeskoy politiki stran Kaspijskogo regiona. Vestnik MGIMO Universiteta, vol. 16, no. 3, pp. 7–55.

18 Kabyl Zh.M. (2023) Izuchenie sovremennyh tehnologij pri dobyche gaza. Materialdar Jinağy, no. 18, p. 257.

19 Asanova G.K., Adil'bektegi G. A., Sajn Je.D. (2023) Problemy jekologii v Kazahstane v pervye gody nezavisimosti. edu. e-history. Kz, vol. 10, no. 4, pp. 675–691.

20 Vinokurov E. et al. (2023) Global'naja zelenaja povestka v Evrazijskom regione. Evrazijskij region v global'noj zelenoj povestke (Global Green Agenda in the Eurasian Region. Eurasian Region on the Global Green Agenda).

21 TOO «Kazahojl Aktobe». URL: <http://www.koa.kz/>

¹Пашенов С.,

бакалавр, ORCID ID: 0009-0007-4521-2401,

e-mail: pashenov82@mail.ru

¹Кульбашев М.,

бакалавр, ORCID ID: 0009-0001-8324-1736,

e-mail: m.kulbashev@gmail.com

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

«ҚАЗАҚОЙЛ АҚТӨБЕ» ЖШС МЫСАЛЫНДА МҰНАЙ-ГАЗ ӨНЕРКӘСІБІНДЕГІ ТҰРАҚТЫЛЫҚТЫ ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Андатпа

Бұл зерттеу Қазақстанның мұнай-газ саласындағы жетекші компаниялардың бірі – «Қазақойл Ақтөбе» ЖШС өндірістік процестерінің тұрақтылығын оңтайландыруға бағытталған. Жаһандық экологиялық

мәселелер мен көміртегі салдарын азайту қажеттілігі жағдайында зерттеудің негізгі мақсаты – компанияның экологиялық және экономикалық көрсеткіштерін жақсартуға арналған ұсыныстар әзірлеу. Қолданыстағы тәжірибелерді талдау нәтижелері энергия тиімділігін арттыру, су ресурстарын және қалдықтарды басқаруда елеулі жетілдіру мүмкіндіктерін көрсетті. Зерттеу энергия менеджменті жүйелерін (EMS) енгізу және жаңартылатын энергия көздерін пайдалану арқылы операциялық шығындарды 20–25%-ға, ал көміртегі шығарындыларын 30–35%-ға қысқартуға болатынын көрсетті. Ағынды суларды тазарту және қайта өңдеудің заманауи әдістерін енгізу тұщы су тұтынуды 30–40%-ға, ал анаэробты ыдырату сынды қалдықтарды басқарудың биотехнологиялық әдістерін қолдану қалдықтардың көлемін 40–50%-ға қысқартуға және оларды пайдалы ресурстарға айналдыруға ықпал етеді. Осы зерттеуде ұсынылған ұсыныстар тұрақты дамуға қол жеткізудің нақты қадамдарын анықтайды және тек «Қазақойл Ақтөбе» ЖШС үшін ғана емес, мұнай-газ саласындағы басқа да компанияларға пайдалы болуы мүмкін. Бұл зерттеу Қазақстанның мұнай-газ секторында экологиялық жауапкершілік пен экономикалық өсімді арттыру үшін озық тәжірибелер мен технологияларды енгізу қажеттілігін тағы бір рет растайды.

Тірек сөздер: тұрақты даму, Қазақстан, экономика, мұнай-газ өнеркәсібі, энергия тиімділігі, экология, энергия менеджменті, экологиялық жауапкершілік, мұнай, газ, экономикалық әлеует.

¹Pashenov S.,

Bachelor, ORCID ID: 0009-0007-4521-2401,

e-mail: pashenov82@mail.ru

¹Kulbashev M.,

Bachelor, ORCID ID: 0009-0001-8324-1736,

e-mail: m.kulbashev@gmail.com

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

OPTIMIZATION OF A SUSTAINABILITY IN THE OIL AND GAS INDUSTRY ON THE EXAMPLE OF “KAZAKHOIL AKTOBE” LLP

Abstract

This study is devoted to optimizing the sustainability of production processes at “KazakhOil Aktobe” LLP, one of the leading companies in the oil and gas industry in Kazakhstan. In the context of global environmental challenges and the need to reduce the carbon footprint, the main goal of the study is to develop recommendations for improving the environmental and economic performance of the company. Analysis of current practices showed potential for significant improvements in energy efficiency, water management and waste management. The study results demonstrate that implementing energy management systems (EMS) and using renewable energy can reduce operating costs by 20–25% and carbon emissions by 30–35%. The introduction of modern wastewater treatment and recycling methods can reduce freshwater consumption by 30–40%, and the use of biotechnological waste management methods, such as anaerobic digestion, converts waste into useful resources and reduces its volume by 40–50%. The proposed recommendations provide concrete steps to achieve sustainable development and can be useful not only for “KazakhOil Aktobe” LLP, but also for other companies in the industry. The study confirms the need to implement advanced practices and technologies to promote environmental responsibility and economic prosperity in Kazakhstan’s oil and gas industry.

Key words: sustainable development, Kazakhstan, economy, oil and gas industry, energy efficiency, ecology, energy management, environmental responsibility, oil, gas, economic potential.

Дата поступления статьи в редакцию: 09.07.2024

UDC 665.622
MRSTI 61.51.15

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-269-276>

¹Yubin Zhang,

master student, e-mail: 1940390250@qq.com

^{1*}Hongbin Yang,

PhD, Associate Professor,
e-mail: hongbinyang@upc.edu.cn

²Miao Li,

master student, e-mail: 519630341@qq.com

¹Haizhuang Jiang,

doctoral student, e-mail: 2737353467@qq.com

¹Ruichao Wang,

doctoral student, e-mail: wang_rchao@163.com

¹Luyao Xing,

master student, e-mail: xly2841010053@163.com

¹Haocong Li,

master student, e-mail: 1244243374@qq.com

¹Shuhe Zhang,

master student, e-mail: 1009383847@qq.com

¹Liang Peng,

master student, e-mail: 1539552876@qq.com

¹Xin Chen,

master student, e-mail: xin_baobei77@163.com

¹Haobin Shi,

master student, e-mail: 2842117353@qq.com

^{1*}Wanli Kang,

Professor, e-mail: kangwanli@upc.edu.cn

¹School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China),
Qingdao, PR China

²Qingdao Huizhi Oilfield Service Company Limited, Qingdao, PR China

STUDY ON THE INFLUENCE FACTORS OF DEMULSIFIER ON OIL-WATER INTERFACE

Abstract

Natural surfactants such as gum and asphaltene in crude oil can form stable emulsions. Emulsions can cause significantly harm to crude oil storage, processing, product quality and equipment. Therefore, oilfield crude oil must undergo demulsification before being exported. However, conventional demulsifiers are difficult to dehydrate at low temperatures and the mechanism of action of low-temperature demulsifiers on oil-water interfaces is not clear. Therefore, this paper focused on the three low-temperature demulsifiers AR101, AR902, and AE405 selected from the Y block in X region, and used the interfacial rheological system of the interfacial tension meter to explore the low-temperature demulsification mechanism from the changes in oil-water interfacial tension. The results indicate that interfacial tension has a certain impact on crude oil demulsification, and the lower the interfacial tension value, the better the demulsification effect. As the concentration of the demulsifier increases, the interfacial tension value first decreases and then remains stable, indicating the existence of an optimal concentration that minimizes the interfacial tension. As the demulsification temperature increases, the interfacial tension between oil and water decreases, and the time required to reach stability becomes shorter, resulting in faster demulsification speed and better effectiveness. By studying the mechanism of low-temperature demulsification, theoretical guidance is provided for the on-site application of demulsifiers in oil fields.

Key words: emulsion, low temperature demulsifier, interfacial tension, interface rheology, oil-water interfacial tension.

Introduction

Chemical demulsification is the application of a chemical reagent to alter the oil-water interface, which can lower it. The characteristics of the interfacial facial mask are changed through the reaction of chemical reagents to make the interfacial facial mask thinner, so that the droplets are more likely to coalesce and demulsify [1–3]. This method is the easiest to apply in emulsion breaking methods and also the most optimal reaction method. The demulsification temperature of conventional crude oil demulsifiers used in most oil fields is 55–60°C, which can basically meet the requirements of crude oil dehydration. At present, the mining of Y block in X area has entered the three highs stage, and the properties of the extracted fluid have changed greatly. At the same time, in order to save costs, the gathering and transportation system does not heat the produced liquid in summer, which causes the temperature of most settling tanks in the gathering and transportation stations to drop to 26–30°C. As a result, the effectiveness of conventional crude oil demulsifiers has deteriorated, and the speed of oil-water separation has slowed down. Conventional demulsifiers can no longer meet the needs of oil fields [4–6].

The conventional demulsifier is difficult to dewater at low temperature, which is mainly because the viscosity of emulsion increases as the dehydration temperature of crude oil decreases, demulsifier molecules are difficult to disperse in crude oil, and the migration speed from oil phase to oil-water interface facial mask slows down. Low temperature demulsifiers with good performance can compensate for the shortcomings of conventional demulsifiers and effectively solve the problem of decreased demulsification effect caused by lower demulsification temperature and shorter demulsification time [7–10]. To solve the problem of poor demulsification effect caused by shortened demulsification time and reduced demulsification temperature in Y block of X area in recent years, the selected low-temperature demulsification system is further explored from the perspective of oil-water interface properties to provide theoretical guidance for oilfield field applications.

Materials and Methods

Dehydrated crude oil and formation water in Block Y of X area, with basic properties shown in Tables 1 and 2; Low temperature demulsifiers AR101, AR902, AE405; Sodium chloride, calcium chloride, analytical grade; China National Pharmaceutical Group Chemical Reagent Co., Ltd; Kerosene; Distilled water, self-made in the laboratory.

Table 1 – Basic properties of crude oil

Saturates/%	aromatics/%	resin/%	asphaltene/%
76.39	18.06	3.57	1.98

Table 2 – Basic properties of formation water

Ion concentration/ (mg/L)	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
6510.23	123.27	2948.58	119.98	80.1	42.49	3195.81

The TX-500C interfacial tension meter (Biao Wei, America) was used to measure the changes in oil-water interfacial tension at different demulsifiers and demulsification temperatures, based on the rotating droplet method.

Results and Discussion

The influence of demulsifier types on oil-water interfacial tension

The changes in oil-water interfacial tension of demulsifiers AR101, AR202, and AR401 at a concentration of 100 mg/L at 35C° were shown in Figure 1.

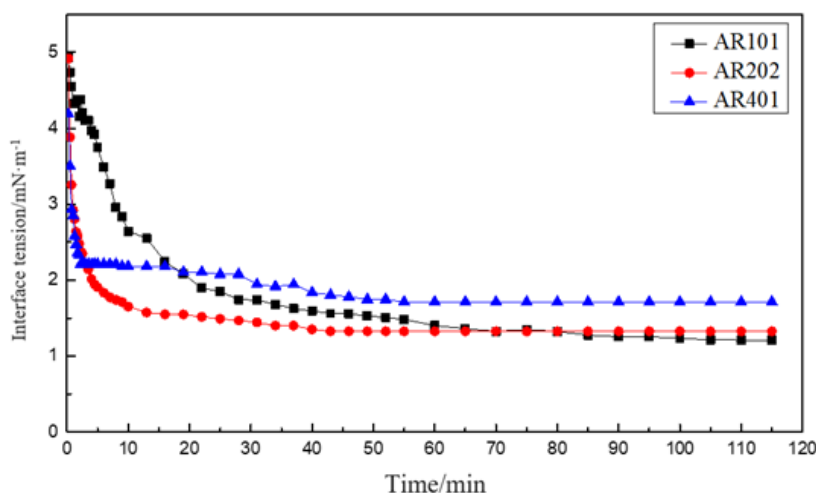


Figure 1 – Dynamic interfacial tension curve of demulsifier solution and crude oil

From Figure 1, it could be seen that after adding different demulsifiers, the interfacial tension between oil and water decreased, and the decrease was fast in the early stage, slow in the later stage, and gradually tended to stabilize. This indicates that in the early stage, the demulsifier can quickly adsorb on the oil-water interface through diffusion, effectively reducing the interfacial tension. The slowing down trend of the later curve indicates that the adsorption of demulsifier molecules at the oil-water interface has reached equilibrium, and the interfacial tension has decreased to the lowest.

Table 3 – Comparison of demulsification effects of different demulsifiers at 35C°

Type	Dehydration rate /%	Dehydration rate	Cleanliness of aqueous phase	Interface uniformity
AR101	95.66	1	2	2
AR202	83.52	2	2	1
AR401	52.15	2	2	3

According to Table 3, there is a corresponding relationship between interfacial tension and the performance of demulsifiers, that is, the lower the interfacial tension value, the faster the demulsification speed of crude oil emulsions, and the higher the dehydration rate.

Effect of demulsifier concentration on oil-water interfacial tension

The relationship between oil-water interfacial tension and time was measured at concentrations of 50, 100, 150, 200, and 300 mg/L of AR101 at 35 C°, as shown in Figure 2. As shown in the figure, with the increase of concentration, the interfacial tension of the demulsifier first decreased, and after reaching 150 mg/L, the downward trend slowed down and tended to stabilize.

Match the stable value of interfacial tension with the dehydration rate one by one in Figure 3. It can be seen that the interfacial tension between oil and water did not simply decrease with increasing concentration. there existed an optimal concentration that minimized the interfacial tension. As shown in the figure, before the concentration of the demulsifier reaches 150 mg/L, the interfacial tension decreased with the increase of demulsifier concentration. This indicates that at low concentrations,

as the concentration increases, the amount of surface active substances adsorbed on the oil-water interface increases and the interfacial tension decreases; After reaching 150 mg/L, increasing the concentration of the demulsifier resulted in an increase in interfacial tension. This indicates that when the concentration is too high, the surfactant self assembles to form micelles, resulting in a decrease in the effective adsorption capacity at the oil-water interface and a slight increase in interfacial tension.

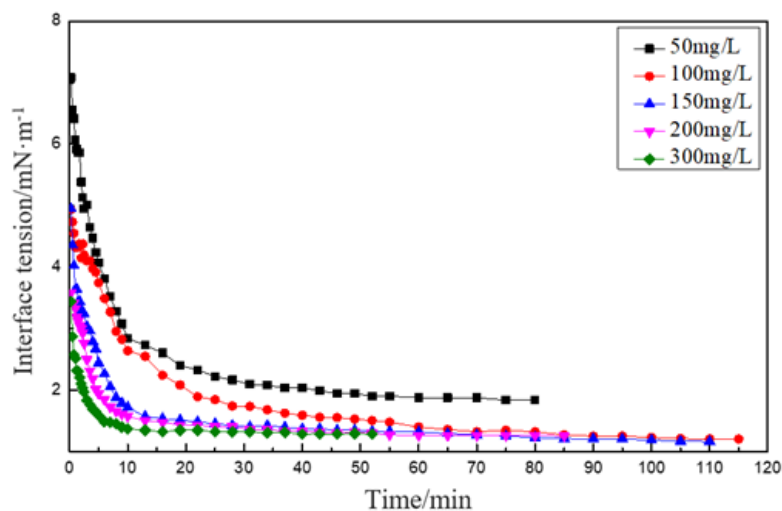


Figure 2 – Dynamic interfacial tension curves of demulsifier solutions with different concentrations and crude oil

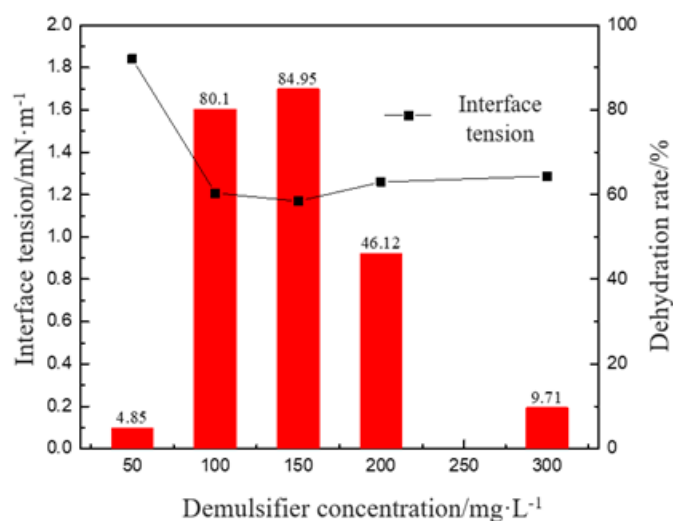


Figure 3 – Corresponding relationship between oil-water interfacial tension and dehydration rate at different concentrations

In summary, there is a corresponding relationship between dehydration performance and interfacial tension, and it is a process of first increasing and then decreasing, that is, the dehydration rate is highest when the emulsifier concentration reaches the optimal concentration.

Effect of demulsifier temperature on oil-water interfacial tension

The relationship between oil-water interfacial tension and temperature was measured at a concentration of 100mg/L for AR101, as shown in Figure 4.

From Figure 4, it could be seen that as the demulsification temperature increased, the interfacial tension between oil and water decreased. And the higher the temperature, the shorter the time required to reach a stable value. This is because as the temperature increases, the molecular motion becomes

more intense, and the demulsifier can adsorb more quickly to the oil-water interface. At the same time, the adsorption amount also increases, replacing more of the original film-forming substances and rapidly reducing the interfacial tension to a lower value. The corresponding relationship between dehydration rate and temperature was shown in Table 4, which proves that the higher the temperature, the lower the interfacial tension, the faster the corresponding demulsification speed, and the higher the dehydration rate.

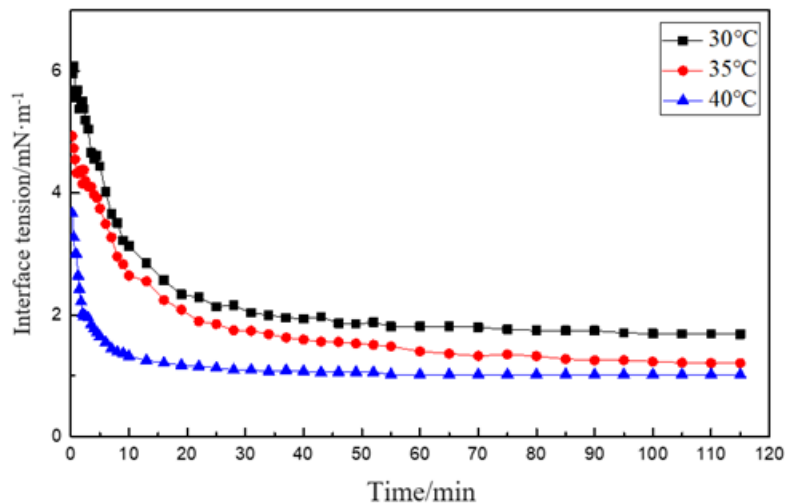


Figure 4 – Temperature dependent curve of oil-water interfacial tension

Table 4 – Relationship between dehydration rate and temperature

Evaluating indicator	Temperature		
	30C°	35C°	40C°
Dehydration rate /%	93.33	95.66	96.32
Dehydration speed	2	1	1

Conclusion

(1) Different demulsifiers can reduce the interfacial tension between oil and water, and the decrease is fast in the early stage, slow in the later stage, and gradually tends to stabilize. The main reason is that the adsorption of demulsifier molecules at the oil-water interface in the later stage has reached equilibrium, and at this point, the interfacial tension has been reduced to the lowest.

(2) The lower the interfacial tension value, the higher the dehydration rate of crude oil emulsion. As the concentration of the demulsifier increases, the interfacial tension decreases; After the concentration increases to a certain value, the interfacial tension remains stable and no longer decreases, so there is an optimal concentration for the use of emulsifiers.

(3) The increase in demulsification temperature leads to a decrease in the interfacial tension between oil and water, and the higher the temperature, the shorter the time required to reach a stable value, resulting in a faster demulsification rate.

REFERENCES

- 1 Jie Ma, et al. Synthesis of a low-temperature demulsifier with dual-hydrophobic chains through a simple low-temperature process. *Journal of Molecular Liquids*, 2024, no. 411, p.125696.
- 2 Qian Qu, et al. Preparation of a low-temperature demulsifier derived from natural cottonseed oil. *Fuel*, 2024, no. 373, pp. 132305–132305.
- 3 Tang Yuqi, et al. A low-temperature ionic liquid demulsifier derived from recycled PET waste plastics. *Journal of Molecular Liquids*, 2024, no. 394, p.123737.

- 4 Long Zheng Jun, et al. Research on Low-Temperature Dehydration of Crude Oil Based on Paraffin-Based Demulsifier. *Advanced Materials Research*, 2011, 361–363, pp. 414–418.
- 5 Liwei Shen, et al. Synthesis and demulsification performance of a novel low-temperature demulsifier based on trimethyl citrate. *Journal of hazardous materials*, 2024, no. 472, p. 134543.
- 6 Shaohui Jiang, et al. Efficient Demulsification Performance of Emulsified Condensate Oil by Hyperbranched Low-Temperature Demulsifiers. *Molecules*, 2023, vol. 28, no. 22.
- 7 Zhuyu Wu, et al. Aromatic poly (amino acids) as an effective low-temperature demulsifier for treating crude oil-in-water emulsions. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, vo. 472, p. 134608.
- 8 Zhang Jian, et al. Demulsification law of polyether demulsifier for W/O crude oil emulsion containing hydrophobically modified polyacrylamide in water. *Journal of Molecular Liquids*, 2024, no. 394, p. 123805.
- 9 Dhandhi Yogesh, et al. Application of a novel surface-active green demulsifier for demulsification of field crude oil emulsion. *Separation Science and Technology*, 2023, vol. 58, no. 9, pp. 1654–1678.
- 10 Feng Xuening, et al. A low temperature demulsifier with double hydrophobic chains was prepared by a one-step method. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, no. 226.

¹Юбинь Чжан,

магистрант, e-mail: 1940390250@qq.com

^{1*}Хонгбин Ян,

PhD, қауымдастырылған профессор, e-mail: hongbinyang@upc.edu.cn

²Мяо Ли,

магистрант, e-mail: 519630341@qq.com

¹Хайчжуан Цзян,

докторант, e-mail: 2737353467@qq.com

¹Руйчао Ван,

докторант, e-mail: wang_rchao@163.com

¹Луяо Синь,

магистрант, e-mail: xly2841010053@163.com

¹Хаоконг Ли,

магистрант, e-mail: 1244243374@qq.com,

¹Шухэ Чжан,

магистрант, e-mail: 1009383847@qq.com

¹Лян Пэн,

магистрант, e-mail: 1539552876@qq.com

¹Синь Чэнь,

магистрант, e-mail: xin_baobei77@163.com

¹Хаобин Ши,

магистрант, e-mail: 2842117353@qq.com

^{1*}Ванли Канг,

профессор, e-mail: kangwanli@upc.edu.cn

¹Мұнай инженериясы мектебі, Қытай мұнай университеті (Шығыс Қытай),
Циндао қ., ҚХР

²Циндао Хуэйжи мұнай сервистік компаниясы, Циндао қ., ҚХР

ДЕЭМУЛЬГАТОРДЫҢ МҰНАЙ-СУ ФАЗАЛАРЫНЫҢ БӨЛІНУ ШЕКАРАСЫНА ӘСЕР ЕТЕТІН ФАКТОРЫН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа

Шикі мұнайдағы табиғи беттік-белсенді заттар – сағыз және асфальтендер тұрақты эмульсиялар түзе алады. Эмульсиялар шикі мұнайды сақтау, өңдеу, өнім сапасы мен жабдықтың жұмысына айтарлықтай зиян келтіруі мүмкін. Сондықтан мұнай кен орындарында шикі мұнай экспортталмас бұрын демульсиялануы қажет. Алайда, дәстүрлі демульгаторларды қолдану төмен температураларда сусыздандыруда қиындық

тудырады, ал төмен температуралы демульгаторлардың мұнай-су интерфейстеріне әсер ету механизмі жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Осы мақалада Х аймағындағы Y блогынан алынған үш төмен температуралы демульгатор – AR101, AR902 және AE405 зерттеліп, төмен температуралық демульгация механизмін зерттеу үшін мұнай-су фазааралық керілуінің өзгерісіне негізделген әдіс пайдаланылды. Бұл мақсатта фазааралық керілу өлшегіш пен фазааралық реологиялық жүйе қолданылды. Зерттеу нәтижелері шикі мұнайды демульсиялауға фазааралық кернеудің белгілі бір әсері бар екенін көрсетті. Фазааралық кернеу мәні неғұрлым төмен болса, демульсиялау әсері соғұрлым жақсы болатыны анықталды. Демульгатордың концентрациясы артқан сайын фазааралық керілу мәні алдымен төмендейді, кейін тұрақты күйге өтеді. Бұл фазааралық керілуді төмендететін оңтайлы концентрацияның бар екенін көрсетеді. Сонымен қатар, демульсия температурасы артқан сайын мұнай мен су арасындағы фазааралық керілу азаяды, ал тұрақтылыққа жету үшін қажетті уақыт қысқарады. Бұл өз кезегінде демульсия жылдамдығы мен тиімділігінің артуына ықпал етеді. Бұл зерттеу төмен температуралы демульгирлеу механизмін терең түсінуге ықпал етіп, мұнай кен орындарында демульгаторларды тиімді қолдануға арналған теориялық негіздерді ұсынады.

Тірек сөздер: эмульсия, төмен температуралы деэмульгатор, фазааралық керілу, фазааралық керілу реологиясы, мұнай-су фазааралық керілу.

¹Юбинь Чжан,

магистрант, e-mail: 1940390250@qq.com

^{1*}Хонгбин Ян, PhD,

ассоциированный профессор, e-mail: hongbinyang@upc.edu.cn

²Мяо Ли,

магистрант, e-mail: 519630341@qq.com

¹Хайчжуан Цзян,

докторант, e-mail: 2737353467@qq.com

¹Руйчао Ван,

докторант, e-mail: wang_rchao@163.com

¹Луяо Синь,

магистрант, e-mail: xly2841010053@163.com

¹Хаоконг Ли,

магистрант, e-mail: 1244243374@qq.com

¹Шухэ Чжан,

магистрант, e-mail: 1009383847@qq.com

¹Лян Пэн,

магистрант, e-mail: 1539552876@qq.com

¹Синь Чэнь,

магистрант, e-mail: xin_baobei77@163.com

¹Хаобин Ши,

магистрант, e-mail: 2842117353@qq.com

^{1*}Ванли Канг,

профессор, e-mail: kangwanli@upc.edu.cn

¹Школа нефтяной инженерии, Китайский нефтяной университет (Восточный Китай),
г. Циндао, КНР

²Циндаоская Хуейжи нефтяная сервисная компания, г. Циндао, КНР

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ ВЛИЯНИЯ ДЕЭМУЛЬГАТОРА НА ПОВЕРХНОСТЬ РАЗДЕЛА ФАЗ НЕФТЬ-ВОДА

Аннотация

Природные поверхностно-активные вещества, такие как камедь и асфальтен, содержащиеся в сырой нефти, могут образовывать устойчивые эмульсии. Эмульсии могут нанести значительный ущерб хранению, переработке сырой нефти, качеству продукции и оборудованию. Поэтому перед отправкой на экспорт нефть с нефтяных месторождений должна подвергаться деэмульгированию. Однако обычным деэмульгаторам

трудно обезвоживать нефть при низких температурах, и механизм действия низкотемпературных деэмульгаторов на поверхности раздела нефть – вода неясен. Поэтому в данной статье основное внимание было уделено трем низкотемпературным деэмульгаторам: AR101, AR902 и AE405, выбранным из блока Y в области X, и использовалась межфазная реологическая система измерителя межфазного натяжения для изучения механизма низкотемпературной деэмульгации на основе изменений межфазного натяжения нефть – вода. Результаты показывают, что поверхностное натяжение оказывает определенное влияние на деэмульгацию сырой нефти и чем ниже значение поверхностного натяжения, тем лучше эффект деэмульгации. По мере увеличения концентрации деэмульгатора величина межфазного натяжения сначала уменьшается, а затем остается стабильной, что указывает на наличие оптимальной концентрации, которая минимизирует межфазное натяжение. С повышением температуры деэмульгирования межфазное натяжение между маслом и водой уменьшается и время, необходимое для достижения стабильности, сокращается, что приводит к увеличению скорости деэмульгирования и повышению эффективности. Изучая механизм низкотемпературной деэмульгации, мы даем теоретические рекомендации по применению деэмульгаторов на нефтяных месторождениях на месте.

Ключевые слова: эмульсия, низкотемпературный деэмульгатор, межфазное натяжение, реология межфазного натяжения, межфазное натяжение нефть – вода.

Article submission date: 11.11.2024

UDC 622.276; 622.279
IRSTI 52.47.27

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-277-298>

^{1*}**Zhaksylykov Zh.,**

Oil and gas production operator, ORCID ID: 0009-0005-8120-7621,

*e-mail: z_zhaksylykov@kbtu.kz

¹**Samatov A.,**

Oil and gas production operator, ORCID ID: 0009-0006-1238-2386,

e-mail: a_samatov@kbtu.kz

²**Sharipov Zh.,**

Director of the Geology and Reservoir Development Department,

ORCID ID: 0000-0002-5994-7421

¹LLP “Exploration and Production QazaqGaz”, Taraz, Kazakhstan

²LLP “QazaqGaz Scientific and Technical Center”, Astana, Kazakhstan

ENHANCING RESERVOIR PRODUCTIVITY USING HIWAY HYDRAULIC FRACTURING METHOD AT AMANGELDI FIELD

Abstract

This project explores the application of hydraulic fracturing methods to enhance reservoir productivity at the Amangeldi field. The study focused on the advanced HIWAY method, which optimizes proppant placement to improve hydrocarbon recovery. Mathematical models were developed to evaluate key parameters of this technique and implemented using FracPro software, enabling detailed simulation and analysis. Data for this study were gathered from publicly available sources, including OnePetro and ScienceDirect, ensuring a comprehensive review of current practices and innovations. Additional information was obtained during dual training at the Amangeldi field, providing practical insights and aligning the models with field-specific conditions. Contributions from scientific journals further enriched the study, supporting the integration of theoretical and empirical approaches. The findings aim to guide future hydraulic fracturing operations and highlight the potential of the HIWAY method to maximize efficiency, reduce operational costs, and mitigate environmental impact. This project underscores the importance of combining advanced modeling with hands-on field experience to address challenges in reservoir management.

Key words: hydraulic fracturing, HiWAY method, Amangeldi field, FracPro software, comparison.

Introduction

The deposit is located in the Moyinkum district of the Zhambyl region of the Republic of Kazakhstan, 170 km north of the city of Taraz. Geographically, it is located in the southwestern part of the Moyinkum sands, which occupy the interfluvium of Shu and Talas.

Orographically, the area is represented by the bumpy sands of Moyinkum with a relative excess of bumpy sand ridges in the north-west direction up to 20 m. The boundary of the sands in the south and south-east extends in a north-westerly direction, along it flows the Talas river, in the bottom part of which there are farmsteads and cattle breeding stations. The area of deposit is sparsely populated. The nearest settlement is the village of Uyk, located 70 km to the south. The sources of water supply directly for the entire area of the deposit are wells and artesian wells, the water level of which is at a depth of 10–20 meters from the well head. The area of the deposit is connected by road with the villages of Akkol, Uk, Ulanbel, the district center of Moyinkum and the regional center – the city of Taraz. Air transportation is carried out from Taraz airport. Railway transportation is also carried out by rail, the nearest railway station is Zhambyl station.



Figure 1 – Field location

The object of the development is the lower Visean productive horizon, within which three productive bundles (A, B, C) can be traced, which differ from each other by varying degrees of heterogeneity of productive layers and various capacitive filtration properties.

Pack A. The total thickness of the horizon, considering new wells, varies from 0.6 m to 16.8 m and averages 8.3 m. The number of isolated reservoir layers ranges from 1 to 6.

The total effective gas saturated thickness ranges from 0.8 m to 8.2 m and averages 4.3 m. The open porosity of reservoirs determined by well logging varies from 0.14 to 0.22.

In other wells, the reservoir layers are blocked. In wells, the gas-saturated thicknesses were 1.4 m, 2.7 m, 5.2 m, 3.6 m.

The coefficient of sandiness is 0.50, the coefficient of fragmentation is 2.6, the coefficient of propagation is 0.94.

Pack B is low-power and is separated from the overlying pack A by a clay section with a thickness of 4 m to 20 m. The total thickness of the bundle varies from 1 m to 5.6 m and averages 2.9 m. Within the bundle, there is mainly one reservoir layer, which is sometimes divided into two layers.

In other wells reservoir layers have been replaced by clay differences. The effective saturated thickness varies from 0.4 m to 4.6 m and averages 2.5 m. The open porosity according to well logging will change from 0.08 to 0.26.

The coefficient of sandiness is 0.64, the coefficient of fragmentation is 1.1, the coefficient of distribution is 0.70.

Pack C is the most sustained in terms of power is the stall in which it is separated from the overlying pack B by a clay interlayer with a thickness from 1.6 to 6 m, its spreading coefficient is 1.0

The total thickness of the bundle varies from 1.8 to 22.6 m, while the effective gas-saturated thickness varies from 1.8 to 19 m and averages 12.3 m. The open porosity of reservoir layers varies from 0.12 to 0.19.

The coefficients of sandiness and fragmentation are 0.80 and 2.5, respectively.

The weighted average porosity values for the object vary from 0.14 to 0.19.

The gas condensate deposit of the lower Visean sublayer was established according to the data of testing of almost all wells. In 1981, the gas-water contact was adopted at -1938 m in the middle of the distance between obtaining a weak gas inflow to (-1940 m) and an industrial gas inflow to -193.

In 1996, the inventory was recalculated, the WL processing was revised. Based on these materials, the GWC was adopted at -1972 m. It was adopted on the basis of testing, where in the first gas was obtained in an open trunk to an absolute mark of -1967.6 m, and in the second – reservoir water from an absolute mark of -1976.8 m, according to the results of interpretation of WL materials, the layers are estimated as water saturated from an absolute mark of minus 1968.6 m.

According to the calculation of reserves in 2007, the gas-water contact was accepted at -1968 m along.

The gas condensate deposit is arched by type of reservoir, tectonically shielded. The size of the deposit is 14.8 x 7.5 km, height is 268.8 m.

Reservoir rocks have been studied from the core and from the interpretation of data from Well logging.

The sediments of pack A are represented by uneven layering of sandstones, siltstones and mudstones. Sandstone beige-gray, gray, fine-grained, medium-fine-grained, quartz-feldspar, feldspar-quartz, poorly and medium graded. Clay cement of pore and contact-pore type, calcite pore and corrosive, conformal incorporation. Siltstones are similar to sandstones in terms of the composition of the clastic material, as well as the type and composition of cement. Mudstones are gray, dark gray, often carbonate, strong and black carbonaceous, thinly layered, with layers of anhydrite, with mineral cracks filled with anhydrite. The reservoir rocks of pack A are represented by beige-gray sandstones, medium fine-grained, feldspar-quartz, medium graded. The mineral composition of the detrital part (85–90%): quartz (70–80%), feldspar (10–15%), fragments of effusions, quartzites. Cement (10–15%) contacts kaolinite, with sections of film chlorite-hydromodic. Porosity is associated with the formation of secondary voids in kaolinite cement and in kaolinized feldspar grains.

The deposits of pack B are represented by the interlayer of beige-gray sandstones and siltstones of dark gray, gray, clay, with abundant ORO inclusions, with layers of coals. The sandstones are medium-fine-grained, fine-grained feldspar quartz, medium and well sorted. Mixed clay cement is contact-pore, contact, calcite pore, and conformal-incorporation structures of cement are developing.

The reservoir rocks of pack B are represented by beige-gray sandstones, mainly fine-grained, feldspar-quartz. The sorting of debris is often good. The composition of the clastic material (90%) is dominated by quartz (90%), in a subordinate amount feldspar are effusive. Cement (10%) is kaolinite, chlorite-kaolinite pore-contact contouring with conformal-incorporation sections. There are aggregates of microcrystalline pyrite in the intergranular spaces. Secondary porosity is associated with microcracks in clastic grains, the opening of which reaches 0.008 mm, and voids (0.08–0.1 mm in size) in kaolinite cement.

Pack C is represented by gray sandstones, light gray-beige, fine-medium-grained, medium-grained, multi-grained, mostly massive, feldspar-quartz rocks, well and poorly sorted, with inclusions and thin layers of carboniferous vegetable detritus. The reservoir rocks of the pack C are represented by beige-light gray sandstones, mainly fine-medium-grained, feldspar-quartz, medium-graded. The detrital part (85–95%) contains quartz (up to 80%) feldspars (10) fragments of siliceous rocks, micro quartzites. The cement is mixed (5–15%) contact-pore, contact kaolinite, kaolinite-hydrous, conformally incorporated in sections. Porosity is associated with the formation of secondary voids (0.08–0.09 mm in size) in kaolinite cement and numerous microcracks in classical grains. The thickness of microcracks is up to 0.007 mm

Hydraulic fracturing (HF) has been employed to improve the efficiency of gas and gas wells since 1947. During the last seven decades, technology has experienced substantial changes to fulfill the aims and purposes of enhancing production in any situation.

Table 1.1 – Static series of permeability distribution

Pack	Parameters	The range of change in permeability * 10^{-3} , micron							
		0,3–1	1–3	3–5	5–10	10–30	30–50	50–100	100–300
A	frequency	40	51	16	7	13	3	4	4
	relative frequency %	29.0	37.0	11.6	5.1	9.4	2.1	2.9	2.9
B	frequency	12	7	4	1		1	1	
	relative frequency %	46.2	26.9	15.5	3.8		3.8	3.8	
C	frequency	177	85	10	7	4	2		
	relative frequency %	62.1	29.8	3.1	2.6	1.6	0.8		

Literature review

Advancements in hydraulic fracturing technology have enabled the extraction of reserves from low-permeability and deep reservoirs, resulting in high gas recovery rates and improved fluid flow to the well. The objective of hydraulic fracturing in modern times is to not only generate a system of cracks in the rock, but also to control the beginning of these fractures and guarantee the highest level of permeability achievable following the treatment. The economic feasibility of typical hydraulic fracturing (HF) technologies is progressively restricted by the reservoir parameters in new field locations. Under these circumstances, it is advantageous to examine the worldwide expertise in the functioning and enhancement of such wells. A significant amount of knowledge has been gathered in the Eagle Ford Shale region in the United States. It is crucial to recognize that attaining the intended efficiency of well treatments necessitates the proper utilization of HF materials. Optimal production outcomes can only be achieved by the precise coordination of well completion techniques (including placement, determination of stage count, and perforation strategy) with hydraulic fracturing design.

The formations in many nations have fractures in hydraulic fracturing that are significantly far apart compared to other countries. The majority of wells in these countries have between 5 to 8 stages per well. Another distinction in domestic fields resulting from the hazards of gas-water interaction is the precedence of longitudinally oriented fractures in regard to the wellbore. When drilling horizontal wells, it is important to consider not only the risks of crack growth and barrier violations, but also the need to minimize friction losses in the wellbore and perforations. Failure to do so can result in early shutdown of operations and require significant time and resources to rectify the situation. Hence, the HiWAY cluster fracturing technology, which has undergone testing in over 25 countries worldwide.

HiWAY technology is an innovative form of hydraulic fracturing. The advancement of HiWAY technology is based on the absence of a direct correlation between the quality of propane and the effectiveness of hydraulic fracturing. This is achieved through the formation of open pathways within the crack, allowing for a substantial enhancement in the hydraulic conductivity of reservoir fluids in comparison to conventional methods. The proppant is unevenly distributed in the crack of the highway, forming proppant "columns" that are flanked by open channels.

The development of this technique was carried out by specialists at the Novosibirsk technique Center of Schlumberger. After conducting experiments to verify the increased conductivity of non-continuous proppant gaskets, the researchers focused on finding ways to create proppant columns in a well within an already existing crack. These columns needed to be able to withstand the stresses caused by fluid flow and closure cracks, while also keeping the drainage channels open. Various methods for forming proppant columns within a crack have been examined in model and experimental

investigations. These methods include the utilization of thermomechanical memory alloy fibers to gather proppant grains in specific locations, as well as the implantation of encapsulated proppant.

The HiWAY technology utilizes fiber materials to enhance the suspension of proppant, preventing it from settling down from the upper part of the crack.

Once the fracture is sealed, the fibers disintegrate and rise to the surface without impeding the subsequent flow of hydrocarbons. Presently, the fibers being utilized are J579 and J659. The product is called Fiber J579. The fiber has a moderate temperature tolerance, with a maximum recommended usage temperature of 120°C. Beyond this threshold, the fiber will rapidly degrade. Phyber J659 is classified as a high-temperature additive. The maximum practical temperature of this product is 180 °C. Up to this temperature, the fiber remains stable and has a high load-bearing capacity. Beyond this temperature, the fiber degrades at a regular pace.

Hydraulic fracturing with open channels (HiWAY Fracturing)

Open channel hydraulic fracturing, sometimes referred to as HiWAY technology, is a cutting-edge method of hydraulic fracturing that enhances the effectiveness and long-term stability of fractures. The primary concept behind HiWAY technology is to generate "channels" within partially closed fractures using proppant. These pathways stay unclogged, allowing for efficient transmission of cracks and enhanced movement of hydrocarbons. This is accomplished by carefully dispersing the proppant within the fractures, enabling the formation of a stable proppant structure and the creation of open channels. The fundamental idea of this technology is generating fractures with permeable channels that facilitate the enhanced flow of hydrocarbons towards the well.

The following are the primary attributes and qualities of hydraulic fracturing utilizing open channels:

1) The HiWAY Fracturing method utilizes unique polymer granules that are included into the proppant. These granules undergo expansion during the fracturing process, resulting in the formation of open channels within the fractures. This expansion guarantees a continuous and uninterrupted flow of hydrocarbons.

2) The benefits of open channels include less hydrocarbon flow resistance, prevention of crack blockage, enhanced reservoir permeability, and improved long-term well productivity.

3) The precise dispersion of specialized polymer granules in cracks is a crucial feature of HiWAY technology. This is accomplished using specialized equipment that guarantees the most efficient blending and dispersion of granules within the hydraulic fracturing fluid.

4) Process control: HiWAY technology offers precise control over fracture formation and the distribution of open channels, which is a significant advantage. Engineers can optimize the fracturing procedure based on the precise geological conditions and characteristics of the well.

5) Enhancing long-term productivity: HiWAY Fracturing technique utilizes open channels to boost long-term well productivity and augment overall hydrocarbon production. Hydraulic fracturing with open channels, also known as HiWAY Fracturing, is a highly efficient technique for enhancing well productivity. It is utilized in diverse geological settings and plays a crucial role in optimizing the extraction of hydrocarbons.

Criteria for selecting a well for hydraulic fracturing.

Hydraulic fracturing effectiveness is determined by the degree of product waterlogging, the initial gas saturation of reservoirs, the effective capacity of the hydraulic fracturing interval, the heterogeneity of the formation structure and the fragmentation of its section, the isolation of the hydraulic fracturing interval by powerful clay layers, the location of injection wells, and the extent of reservoir flooding at the impact site, according to an analysis of the geological structure and the history of deposit development at the hydraulic fracturing sites. Given everything mentioned above, it is feasible to suggest using the following physical and geological factors for selecting low-water wells for hydraulic fracturing:

a) The initial gas saturation of reservoirs in the fracking interval is close to or above their possible saturation limit.

b) The effective power of the hydraulic fracturing interval is more than 3m.

- c) The thickness of the underlying and overlapping hydraulic fracturing interval of clay layers is more than 5 m;
- d) The thickness of the internal clay sections is less than 2m.
- e) No more than 5–6 permeable interlayers with a capacity of more than one meter.
- f) The water content of well products is less than 40%.
- g) The water content of the products of the surrounding nearby wells is less than 70%
- h) The potential flow rate of the well is more than 20t/day.
- i) Extraction from the initial recoverable reserves at the well of less than 20%.

The technical condition of the well

The well needs to be sound technically. There cannot be any infractions or deformations in the production column between the packer landing. To prevent backflow during hydraulic fracturing, the cement ring's adherence to the formation rock and the operating column must be sufficient, at least 50 meters above and below the perforated interval.

Perforation interval

Not more than 20 to 25 meters should be the perforated interval. Otherwise, more scientific, and technological steps are needed to guarantee that the reservoir is covered by hydraulic fracturing.

Skin effect

The existence of a skin effect in a well after hydraulic fracturing is a good thing for raising its production. Usually, wells with low productivity in a setting of highly productive ones are where hydraulic fracturing produces its greatest impact.

The thickness of the formation and the thickness of the screens

Typically, the producing reservoir should have a minimum effective thickness of 3-5m. A crucial requirement for hydraulic fracturing is the existence of screens with adequate thickness and uniformity in the region, which operate as barriers between the productive reservoir and the reservoirs above and below. This is particularly significant when these reservoirs have high permeability and are saturated with water. The thickness of the screens required for effective isolation of the fractured formation is determined by the disparity in natural stresses between the screens and the formation, as well as the hydraulic fracturing technique employed. Plastic rocks, such as clays and siltstones, exhibit the highest levels of stress. The presence of higher amounts of sandy and siltstone material in clays, along with their conversion into clay minerals, results in a decline in shielding capabilities. Dehydration causes the shielding qualities of clays to decrease when they are compacted with depth. Typically, while conducting hydraulic fracturing at depths ranging from 1000 to 1800 meters, with a crack that extends up to 50 to 100 meters and an injection rate not exceeding 2.5 cubic meters per minute, it is recommended to use screens with a minimum thickness of 8 to 10 meters.

Removal of the well from the gas-water contacts

Hydraulic fracturing wells need to be placed sufficiently apart from the gas-water contact contours, typically at least as far apart as the wells themselves. Rapid flooding or gas breakout from the cap may happen if the producing well is closer to the gas content contour, particularly if the path of the hydraulic fracturing crack is perpendicular to the contour line.

Fragmentation of the formation

For hydraulic fracturing, a reservoir with a uniform permeability and adequate thickness is the ideal target. Hydraulic fracturing may be less successful if the productive reservoir segment is fragmented. In addition, mistakes in determining the length, shape, and width of the fracture as well as the technological impact of hydraulic fracturing might occur when building a hydraulic fracturing crack in a highly heterogeneous formation.

Formation depth

The hydraulic fracturing equipment's technical capabilities and the fixing material's strength dictate the greatest depth of the development object that can be reached by this method. The depth of the development object should not be greater than 2500–2800 meters when employing quartz sand. By using a stronger anchoring substance, the maximum depth that may be reached by hydraulic fracturing the development object is increased.

Materials and Methods

Using standard hydraulic fracturing methods, the investigation's key hydraulic fracturing parameters were calculated for the production well. The thickness (h) of the well is 36.5 meters, and its depth is 2152 meters. With a viscosity of 0.6 Pa·s and a density of 1100 kg/m³, 62 tons of proppant are injected into the fracture. Q = 3.2 m³/min is the injection rate.

Table 1 – Tubing parameters for calculations

Tubing			
External diameter (mm)	Weight (kg/m)	Inner diameter (mm)	Depth (m)
88.9	13.22	76	1146.18
73	9.16	62	2025

Table 2 – Well parameters for calculations

Well parametres	Values
Depth of the well, m	2142
Perforation interval, m	36.5
Initial diameter of tubing, m	0.075
Diameter of production the casing, m	0.178
Rock density, kg/m ³	2900
The amount of fracture fluid, m ³	282.4
Volume of the proppant, m ³	53.33
Porosity of the cracks post-closure	0.17
Density of proppant, kg/m ²	1100
Proppant permeability, m ²	884*10 ⁻¹²
Rock permeability, m ²	0.0108*10 ⁻¹²

Table 3 – Casing parameters for calculations

Casing			
External diameter (mm)	Weight (kg/m)	Inner diameter (mm)	Depth (m)
168	41.67	150.5	2282

The fracture is computed by hand selecting the well X, and using the algorithm created by I.T. Mishchenko. Fracture parameter computation is a difficult process with two essential components:

- ♦ Analyzing the fundamental elements of the procedure and ascertaining the necessary amounts of equipment for generating fracture segments

- ♦ Determining the classification of the fracture and doing measurements to determine its size.

The rock rupture pressure can be calculated using the formula provided below for an unfiltered fluid:

$$(1) P_{\text{vert}} = P_0 * g * H = 9.81 * 2142 \text{ m} * 2900 \text{ kg/m}^3 = 60.93 \text{ Mpa} \quad (1)$$

where, P_0 – average density of the rock, H-depth of the well

Next, we calculate the horizontal component of the stresses using the following formula:

$$(2) P_{\text{horiz}} = P_{\text{vert}} * \eta * (1 - \eta) = 60.93 \text{ Mpa} * 0.25 * (1 - 0.25) = 20.31 \text{ Mpa} \quad (2)$$

where, η - poisson's ratio

As the depth increases, the vertical force exerted by the weight of the rocks above becomes more prominent. At greater depths, the vertical stress sometimes surpasses the horizontal stresses, leading to the formation of vertical fractures. Below depths of 1000–1500 meters, vertical strains typically exert greater effect than horizontal stresses, leading to the formation of vertical fractures as the most probable outcome of hydraulic fracturing. Within our given situation, the magnitude of the force pulling in the vertical direction is higher than the force acting horizontally, leading to the occurrence of a fracture in the vertical direction.

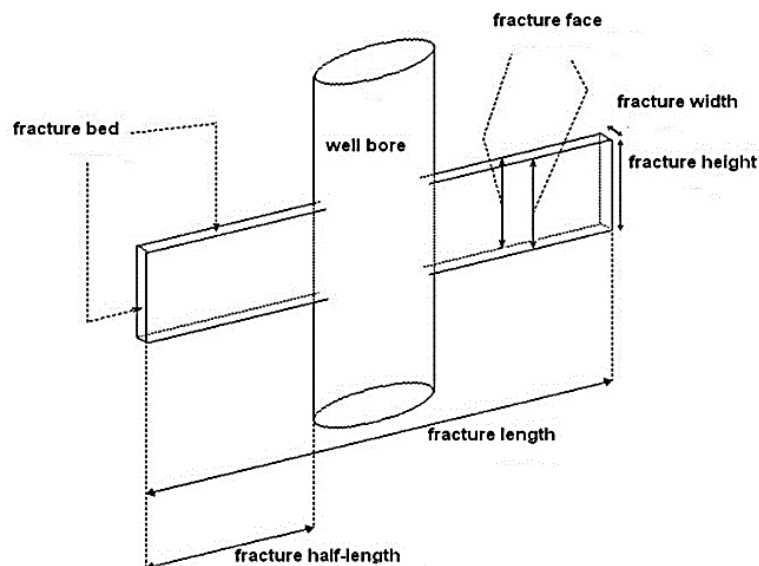


Figure 2 – Vertical fracturing

Fracturing pressure determination in the absence of fluid filtration:

$$(3) P_{\text{frac}} = P_{\text{vert}} - P_{\text{reservoir}} + P_s = 60.93 \text{ Mpa} - 15.19 \text{ Mpa} + 1.5 \text{ Mpa} = 46.41 \text{ Mpa}$$

Calculation of the required downhole pressure:

$$\diamond \frac{P_{bwh}}{P_{horiz}} * \left(\frac{P_{bwh}}{P_{horiz}} - 1 \right)^3 = \frac{(5.25 * (E^2) * Q * u)}{(1 - \eta^2) * (P_{horiz})^3 * \eta} = \frac{5.25 * (3.5 * 10^{10})^2 * 0.053 * 0.6}{(1 - 0.25^2)^2 * (20.31 * 10^6)^3 * 382.7} = 0.000725$$

$$\diamond \chi * (\chi - 1)^3 = 0.000725$$

$$\diamond \chi = 1.66$$

$$\diamond \frac{P_{bwh}}{P_{horiz}} = 1.0873$$

$$\diamond P_{bwh} = 1.0873 * 20.31 \text{ Mpa} = 22.08 \text{ Mpa}$$

where, u -Viscosity of the sand carrier liquid, Q -the rate of liquid injection,

E -Young's module, η – poisson's ratio

The length of the extent of fracture created by hydraulic fracturing (fracking) is crucial in evaluating the effectiveness of the technique. The length is determined by various parameters, including the injection pressure, the qualities of the fracturing fluid and proppant, and the geological characteristics of the reservoir. The calculation will be determined using this formula:

$$(4) L = \sqrt{\left(\frac{V * E}{5.6 * (1 - \eta^2) * h * (P_{bwh} - P_{horiz})} \right)} = \sqrt{\left(\frac{382.7 * 3.5 * 10^{10}}{5.6 * (1 - 0.25^2) * 37 * ((22.08 - 20.31) * 10^6)} \right)} = 200 \text{ m}$$

where, V - volume of liquid for rupture, E -Young's module, h - perforation interval, η -poisson's ratio

The crack length, fracture breadth, and residual width are crucial characteristics that determine the success of the HF treatment. They indicate the width of the fracture when it is open and any changes that occur to it once the process is finished. The width of the fracture is influenced by important elements such as the pressure of the injected fluid, the qualities of the rock, the characteristics of the fluid, and the conditions of the hydraulic fracturing process. The remaining width of the fracture following hydraulic fracturing (HF) can also function as a significant indicator of fracture integrity and its capacity to hold proppant. An assessment can be conducted by employing this mathematical equation:

$$(5) W = \left(\frac{4 \cdot (1 - \eta^2) \cdot L \cdot (P_{bwh} - P_{horiz})}{E} \right) = \frac{(4 \cdot (1 - 0.25^2) \cdot 200 \cdot (22.08 - 20.31) \cdot 10^6)}{3.5 \cdot 10^{10}} = 0.037 \text{ m} = 3.7 \text{ cm}$$

Residual crack width:

$$(6) W_1 = (W \cdot n_0) / (1 - m) = (0.037 \cdot 0.008) / 0.83 = 0.0035 \text{ m} = 0.35 \text{ cm}$$

here, m ' represents the porosity of the cracks post-closure, while n_0 denotes the volume fraction of proppant within the mixture.

The permeability of cracks in hydraulic fracturing refers to their ability to enhance the flow of fluids. It acts as a crucial measure indicating the effectiveness of the HF method in increasing reservoir productivity. Fracture permeability is influenced by various parameters, including fracturing pressure, rock properties, selection of fracturing fluid, and distribution of proppant. Enhanced permeability indicates a better connection between cracks and the reservoir, resulting in enhanced fluid flow and subsequently higher production rates. We shall compute it using this equation:

$$K1 = \frac{W1^2}{12 \cdot 10^4} = \frac{0.0035^2}{12 \cdot 10^4} = 0.066 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 = 100 \text{ Darcy}$$

In addition to assessing the permeability of fractures, it is essential to estimate the permeability of the zone surrounding the wellbore, commonly known as the near-well or near-wellbore zone. This area is of great significance in reservoir operations as it has a direct impact on the movement of fluids from the reservoir into the wellbore. For our specific situation, the answer is:

$$(7) K2 = \frac{(\pi \cdot D - W1) \cdot k + W1 \cdot K1}{\pi \cdot D} = \frac{((3.14 \cdot 0.15 - 0.0035) \cdot 0.0108 \cdot 10^{-12} + 0.0035 \cdot 101 \cdot 10^{-12})}{3.14 \cdot 0.15} = 0.768 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 = 752 \text{ mD}$$

Where, D is the diameter of the well, m , k is the permeability of the reservoir.

The next is volume of liquid for injection:

$$(8) V_{inj} = 0.785 \cdot d \text{ in} \cdot H = 0.785 \cdot 0.076^2 \cdot 2087 = 9.5 \text{ m}^3$$

The hydraulic fracturing process takes a total of 2 hours. At this juncture, a high-pressure fluid is introduced into the well in order to generate cracks in the rock formation. This phase encompasses the installation, introduction of fracturing fluid, and following procedures. A reduced timeframe could suggest a more efficient fracturing process, potentially resulting from enhanced equipment and processes, or less complex geological conditions. Optimizing time management is essential in hydraulic fracturing operations to minimize expenses and environmental consequences while optimizing the extraction of resources. The estimation will be calculated using this formula:

$$(9) t = \frac{V_{liq} + V_{inj}}{Q_a} = \frac{382.7 + 9.5}{3.2} = 122.57 \text{ min}$$

where, Q_a – injection rate

Dimensionless conductivity is a critical characteristic that indicates the efficiency of hydraulic fracturing. The non-dimensional conductivity parameter is commonly used to assess the effectiveness of the fracturing process by measuring the fractures' capacity to transport fluid. The calculation takes into account multiple parameters, including fracture geometry, fluid characteristics, and reservoir conditions. A higher dimensionless conductivity signifies enhanced connectivity between the wellbore and the reservoir, facilitating greater fluid movement and improved production rates. The dimensionless conductivity is crucial in evaluating the effectiveness of hydraulic fracturing operations and maximizing the performance of the reservoir.

$$Cd = \frac{kf \cdot w}{k \cdot x_f} = \frac{884 \cdot 10^{-12} \cdot 0.086}{0.0108 \cdot 10^{-12} \cdot 101} = 30$$

The primary determinant of the outcome of hydraulic fracturing is the anticipated impact of the process. This result reveals the degree to which the current flow rate of the well has increased as a result of hydraulic fracturing. Within our specific context, this computation is carried out in the following manner.

$$n = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{Lg \frac{(Rk)}{rc}}{Lg \frac{(2 \cdot Rk)}{rm}} = \frac{Lg \frac{(400)}{0.075}}{Lg \frac{(400)}{\frac{200}{2}}} = 4.12$$

where, Rk is the radius of the supply circuit, m; rc is the radius of the well, m; rm is the half of the crack length, m

Ultimately, using the use of mathematical computations, we successfully ascertained many crucial factors of hydraulic fracturing, such as permeability, fracture length, fracture width, and other characteristics. In addition, we evaluated the conductivity of the cracks, the dispersion and density of the proppant, and the variations in reservoir pressure.

Table 4 – Results of calculation for SLB (HIWAY)

Parameters	Values
Half the length of the cracks	97.4 m
Residual crack width	3.5 mm
Dimensionless conductivity	30
Effect of hydraulic fracturing	4.12
Duration of hydraulic fracturing	134 min
Crack permeability	752 mD

Upon concluding the calculations, the findings reveal a substantial rise in permeability from 10.18 mD to 752 mD, hence showcasing the exceptional efficacy of the hydraulic fracturing procedure. In addition, the impact of hydraulic fracturing is seen in a 4.12-fold rise in the productivity index. The significant enhancement highlights the efficacy of the fracturing procedure in improving the performance of the well and the overall production of the reservoir.

Moreover, the fracture length and width were assessed to be ideal, guaranteeing good communication between the reservoir and the wellbore. An assessment was conducted on the dispersion of the proppant, which verified its ability to effectively uphold the cracks and sustain enhanced permeability. These findings emphasize both the technological achievement of the hydraulic fracturing procedure and its capacity to greatly enhance the retrieval of hydrocarbons and commercial profits.

Table 5 – Results of calculation for Trican

Parameters	Values
Half the length of the cracks	89.5 m
Residual crack width	2.3 mm
Dimensionless conductivity	18.8
Effect of hydraulic fracturing	3.7
Duration of hydraulic fracturing	130 min
Crack permeability	657 mD

Results and Discussion

Our research aims to determine the optimal hydraulic fracturing (HF) approach. To do this, we have undertaken the task of calculating the required parameters for Trican, a company experienced in this industry and known for employing conventional HF techniques. We assessed various important characteristics, such as permeability, fracture length, and width, along with the productivity index before and after the hydraulic fracturing treatment. Our goal is to establish the most effective way by comparing these parameters with those achieved utilizing more sophisticated HF techniques. Trican's conventional HF technique involved collecting data on the starting state of the well, treatment pressures, properties of the fluid and proppant, and production rates after the treatment. This extensive research enables us to compare the performance metrics of conventional approaches with contemporary alternatives, guaranteeing a comprehensive evaluation of the efficiency of each methodology in improving well production and economic feasibility.

After doing a comparative analysis of the mathematical computations for both companies, we determined that Hiway's hydraulic fracturing (HF) yielded the most favorable outcomes in terms of all essential factors. Our comprehensive investigation involved assessing the enhancements in permeability, fracture dimensions (length and width), improvements in productivity index, and total output rates. Hiway's improved approach exhibited superior performance compared to Trican's conventional methods in all aspects.

We proceeded to simulate all the data using FracPro. The simulation findings, which included important parameters, closely matched our predicted values. The agreement between the simulation results and our computations provides additional support for the accuracy of our study. It shows that our mathematical models effectively represent the behavior of the hydraulic fracturing process and its influence on reservoir performance. We are dedicated and reliable, instilling trust in our analysis and its practical implementation in real-world situations.

Table 6 – Results from FracPro

Parameter, for the updated model	Optimized design	Error
Impregnated crack half-length, m	100.9 m	0.9 %
Crack width	3.8 cm	2.63 %

Fracpro is a comprehensive software package designed specifically for hydraulic fracturing operations within the oil and gas industry. It's utilized by engineers, geologists, and other professionals involved in the planning, design, and optimization of hydraulic fracturing treatments.

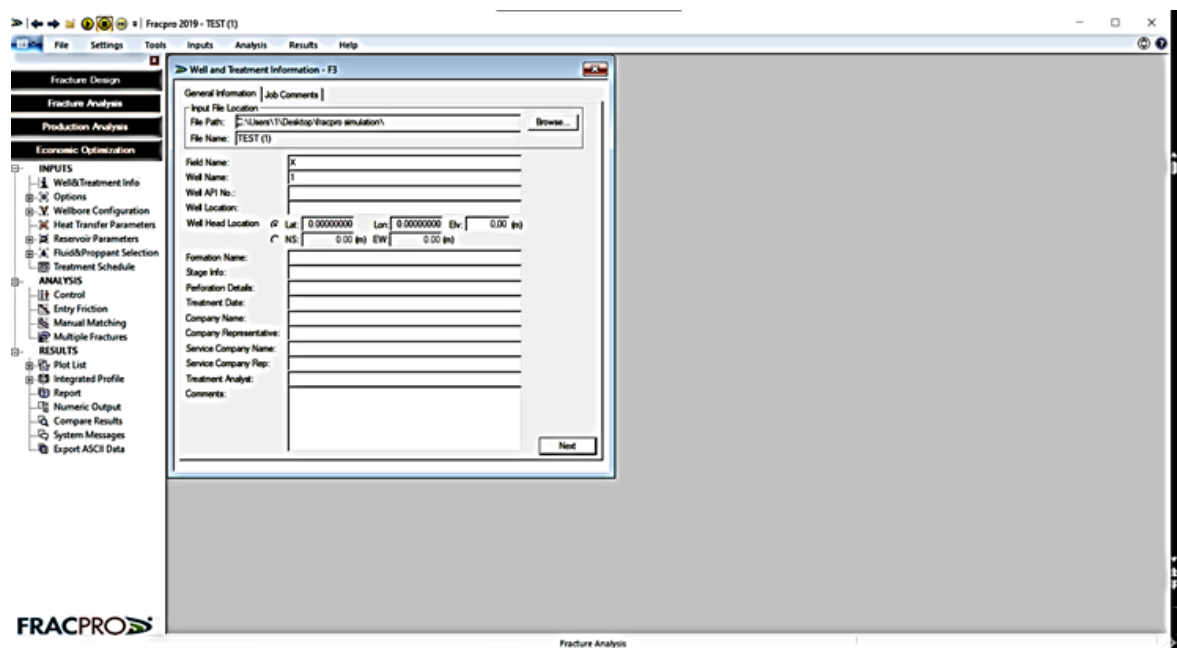


Figure 3 – FracPro software general well input data

The "Menu Bar" consists of common options such as File, Settings, Inputs, Analysis, Results, and Help, which are used for browsing and setting the software. The "Toolbar" comprises of icons that provide easy access to numerous functions.

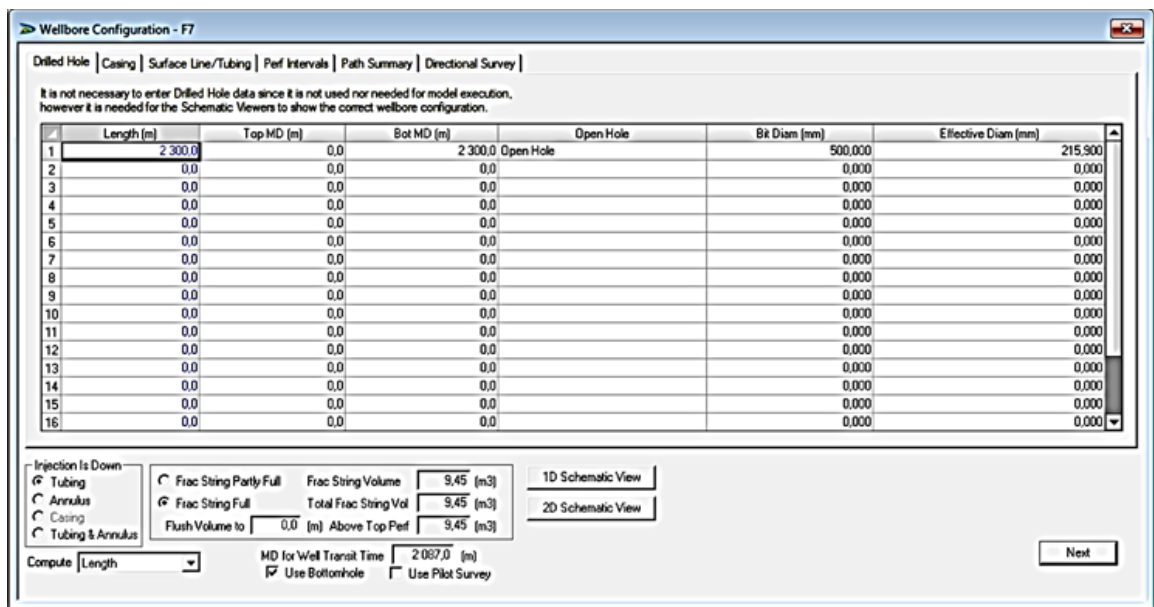


Figure 4 – Drilled Hole

The Drilled Hole tab is utilized for inputting the precise geometry of the hole after it has been drilled. The data presented on this tab does not contribute to any of the computations performed in Fracpro. This information is exclusively utilized for the Schematic View screen, the 2D Schematic View screen, and the 3D Wellbore Viewer screen. These screens can be accessed either from the icon bar or by selecting "View" from the main top menu. In this project, total length 2300m.

	Length (m)	Top MD (m)	Bot MD (m)	Casing	OD (mm)	Weight (kg/m)	ID (mm)	Grade
1	32.0	0.0	32.0	Cemented Casing	426.000	53.57	400.000	Unspec
2	451.0	0.0	451.0	Cemented Casing	324.000	35.72	300.000	Unspec
3	1308.0	0.0	1308.0	Cemented Casing	264.000	0.00	250.000	Unspec
4	2280.0	0.0	2280.0	Cemented Casing	168.000	0.00	150.500	Unspec
5	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
6	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
7	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
8	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
9	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
10	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
11	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
12	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
13	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
14	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
15	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
16	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
17	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
18	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	

Figure 5 – Casing

The term "casing tab" refers to the description of the casing, which may or may not include the complete pipe string used for transporting treatment fluids. The initial value for the top MD entry of segment number one is set to zero by default. The user is required to provide the outer diameter (OD) and inner diameter (ID) for each segment. However, the weight and grade are optional fields.

1. 0–32 m (Conductor)
2. 0–451 m (Surface Casing)
3. 0–1308 m (Intermediate casing)
4. 0–2280 m (Production casing)

Will also add the diameter, the effective diameter, and the weight to get the diagram in 2D mode.

	Length (m)	Top MD (m)	Bot MD (m)	Surf Line/Tubing	OD (mm)	Weight (kg/m)	ID (mm)	Grade
1	80.0	-80.0	0.0	Surface Line	116.000	18.30	89.000	Unspec
2	1146.0	0.0	1146.0	Tubing	88.900	13.79	76.000	Unspec
3	828.0	1146.0	1974.0	Tubing	73.025	16.20	62.000	Unspec
4	2.0	1974.0	1976.0	Packer	139.700	13.79	54.000	
5	49.0	1976.0	2025.0	Tubing	73.025	14.58	62.000	Unspec
6	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
7	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
8	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
9	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
10	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
11	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
12	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
13	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
14	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	
15	0.0	0.0	0.0		0.000	0.00	0.000	

Figure 6 – Surface line/Tubing

The Surface Line/Tubing tab provides a description of the surface line and tubing. The Surface Line/Tubing tab is utilized to specify the surface line and tubing arrangements. Like other parts, this tab enables the input of personalized data. A crucial factor to take into account is the installation of the packer. If a packer is not installed when injecting fluid into the reservoir, the fluid will reset upwards, so preventing the formation of a fracture.

The screenshot shows the 'Wellbore Configuration - F7' window with the 'Surface Line/Tubing' tab selected. The table below represents the data shown in the interface:

Use	Top MD (m)	Bot MD (m)	Top TVD (m)	Bot TVD (m)	Diameter (mm)	Number of Perfs
☒	2 087.0	2 089.0	2 087.0	2 089.0	12,000	364
☒	2 099.0	2 103.0	2 099.0	2 103.0	12,000	364
☒	2 104.0	2 113.0	2 104.0	2 113.0	12,000	364
☒	2 118.0	2 125.0	2 118.0	2 125.0	12,000	364
☒	2 126.5	2 128.0	2 126.5	2 128.0	12,000	364
☒	2 129.0	2 141.0	2 129.0	2 141.0	12,000	364
☐	0.0	0.0	0.0	0.0	0,000	0
☐	0.0	0.0	0.0	0.0	0,000	0
☐	0.0	0.0	0.0	0.0	0,000	0
☐	0.0	0.0	0.0	0.0	0,000	0
☐	0.0	0.0	0.0	0.0	0,000	0
☐	0.0	0.0	0.0	0.0	0,000	0
☐	0.0	0.0	0.0	0.0	0,000	0
☐	0.0	0.0	0.0	0.0	0,000	0
☐	0.0	0.0	0.0	0.0	0,000	0
☐	0.0	0.0	0.0	0.0	0,000	0
☐	0.0	0.0	0.0	0.0	0,000	0
☐	0.0	0.0	0.0	0.0	0,000	0

Below the table, there are configuration options:

- Injection Is Down: ☒ Tubing, ☐ Annulus, ☐ Casing, ☐ Tubing & Annulus
- ☐ Frac String Partly Full, Frac String Volume: 9.45 (m3)
- ☒ Frac String Full, Total Frac String Vol: 9.45 (m3)
- Flush Volume to: 0.0 (m) Above Top Perf, 9.45 (m3)
- 1D Schematic View, 2D Schematic View
- Compute Length: MD for Well Transit Time: 2 087.0 (m)
- ☒ Use Bottomhole, ☐ Use Pilot Survey
- Next button

Figure 7 – Perforations interval

There are three methods available for representing multiple perforated intervals. Here are some general guidelines for when to employ each of these three distinct strategies:

When there are several zones that are quite close to each other compared to the total height of the hydraulic fracture, and you expect significant overlap between many fractures, it is often more effective to represent them as a single perforated interval in the model. To consider the interference between these many hydraulic fractures, you can modify the Opening Factor.

Fracture Design mode allows for the simulation of only one hydraulic fracture at a time, namely one perforation set. Conversely, in Fracture Analysis mode, it is possible to simulate several hydraulic fractures simultaneously, including various sets of perforations.

For every perforated interval, the system automatically scans the interval to identify the zone with the lowest stress and designates the center of that zone as the initial hydraulic fracture depth.

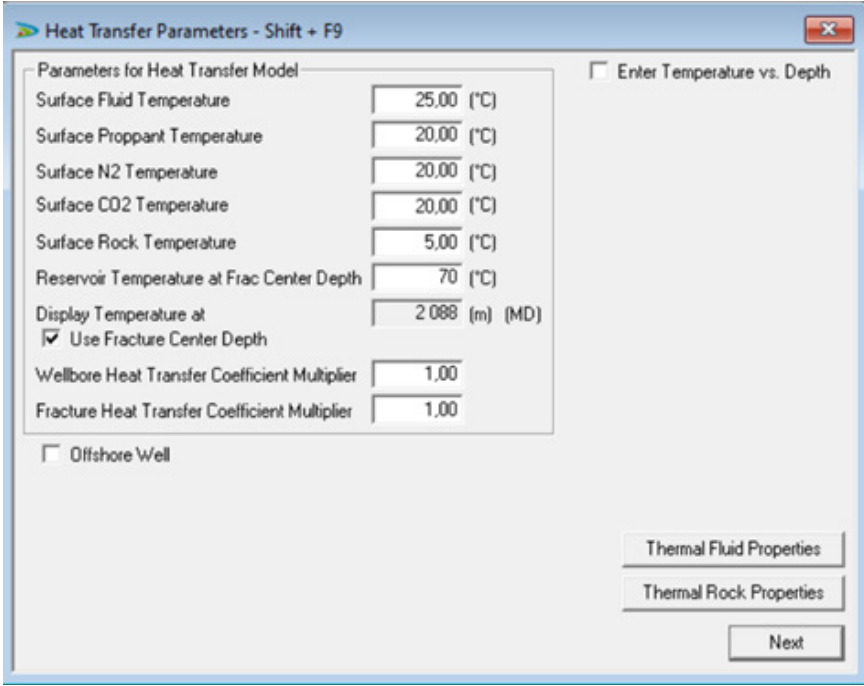
Thus, it is not mandatory for us to input the exact overall perforated height, nor is it always desirable for you to do so. Instead, it is advisable to input the perforation information in a manner that ensures the hydraulic fracture start in the simulator occurs precisely at the desired site. We also have 6 perforation zones. The total capacity is 36.5 m.

The screen is the interface where you input the required parameters to simulate the time-temperature history of the fluids in the wellbore.

Surface Fluid Temperature refers to the temperature of the fluid that enters the wellbore at the surface, specifically the temperature of the fluid in the tank. This refers to the initial temperature of the fluid before the introduction of carbon dioxide or nitrogen in a foam treatment simulation.

Surface Proppant Temperature refers to the initial temperature of the proppant prior to its injection into the wellbore.

Surface N₂ Temperature: This refers to the initial temperature of the nitrogen before it is introduced into the primary fluid-proppant mixture.



Heat Transfer Parameters - Shift + F9

Parameters for Heat Transfer Model

Surface Fluid Temperature: 25.00 (°C)

Surface Proppant Temperature: 20.00 (°C)

Surface N2 Temperature: 20.00 (°C)

Surface CO2 Temperature: 20.00 (°C)

Surface Rock Temperature: 5.00 (°C)

Reservoir Temperature at Frac Center Depth: 70 (°C)

Display Temperature at: 2 088 (m) (MD)

☒ Use Fracture Center Depth

Wellbore Heat Transfer Coefficient Multiplier: 1.00

Fracture Heat Transfer Coefficient Multiplier: 1.00

☐ Offshore Well

☐ Enter Temperature vs. Depth

Thermal Fluid Properties

Thermal Rock Properties

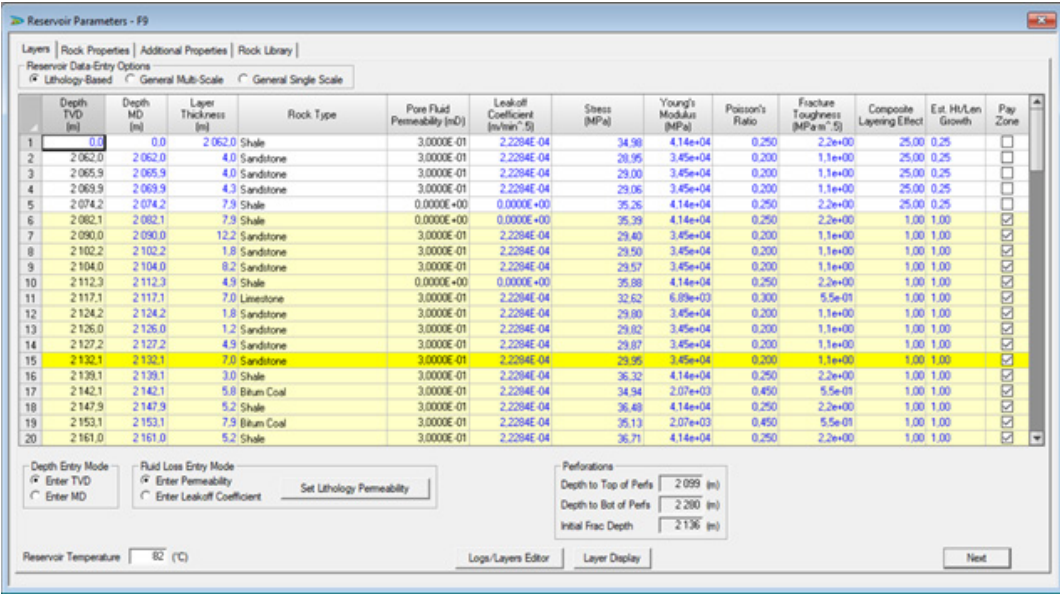
Next

Figure 8 – Heat Transfer Parameters

Surface CO2 Temperature refers to the temperature of carbon dioxide prior to its introduction into the primary fluid-proppant mixture.

Surface Rock Temperature refers to the temperature of the Earth's surface or in its immediate vicinity. While the exact value of this number is not commonly understood, even significant deviations in it have only negligible effects on forecasts of wellbore heat transmission.

Temperature at the center depth of the hydraulic fracture in the reservoir: This represents the temperature of the reservoir at the midpoint of the perforation depth. Furthermore, this value is employed not only for heat transfer calculations but also for the purpose of selecting the appropriate rheology data from the Fluid Library.



Reservoir Parameters - F9

Layers | Rock Properties | Additional Properties | Rock Library

Reservoir Data Entry Options

☒ Lithology-Based ☐ General Multi-Scale ☐ General Single Scale

Depth TVD (m)	Depth MD (m)	Layer Thickness (m)	Rock Type	Pore Fluid Permeability (mD)	Leakoff Coefficient (m/min ^{0.5})	Stress (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Fracture Toughness (MPa·m ^{0.5})	Composite Layering Effect	Est. HU/Len Growth	Pay Zone
1	0.0	0.0	2 062.0 Shale	3.0000E-01	2.2294E-04	34.98	4.14e+04	0.250	2.2e+00	25.00	0.25	☐
2	2 062.0	2 062.0	4.0 Sandstone	3.0000E-01	2.2294E-04	28.95	3.45e+04	0.200	1.1e+00	25.00	0.25	☐
3	2 065.9	2 065.9	4.0 Sandstone	3.0000E-01	2.2294E-04	29.00	3.45e+04	0.200	1.1e+00	25.00	0.25	☐
4	2 069.9	2 069.9	4.3 Sandstone	3.0000E-01	2.2294E-04	29.06	3.45e+04	0.200	1.1e+00	25.00	0.25	☐
5	2 074.2	2 074.2	7.9 Shale	0.0000E+00	0.0000E+00	35.26	4.14e+04	0.250	2.2e+00	25.00	0.25	☐
6	2 082.1	2 082.1	7.9 Shale	0.0000E+00	0.0000E+00	35.39	4.14e+04	0.250	2.2e+00	1.00	1.00	☐
7	2 090.0	2 090.0	12.2 Sandstone	3.0000E-01	2.2294E-04	29.40	3.45e+04	0.200	1.1e+00	1.00	1.00	☐
8	2 102.2	2 102.2	1.8 Sandstone	3.0000E-01	2.2294E-04	29.50	3.45e+04	0.200	1.1e+00	1.00	1.00	☐
9	2 104.0	2 104.0	8.2 Sandstone	3.0000E-01	2.2294E-04	29.57	3.45e+04	0.200	1.1e+00	1.00	1.00	☐
10	2 112.3	2 112.3	4.9 Shale	0.0000E+00	0.0000E+00	35.88	4.14e+04	0.250	2.2e+00	1.00	1.00	☐
11	2 117.1	2 117.1	7.0 Limestone	3.0000E-01	2.2294E-04	32.62	6.89e+03	0.300	5.5e-01	1.00	1.00	☐
12	2 124.2	2 124.2	1.8 Sandstone	3.0000E-01	2.2294E-04	29.80	3.45e+04	0.200	1.1e+00	1.00	1.00	☐
13	2 126.0	2 126.0	1.2 Sandstone	3.0000E-01	2.2294E-04	29.82	3.45e+04	0.200	1.1e+00	1.00	1.00	☐
14	2 127.2	2 127.2	4.9 Sandstone	3.0000E-01	2.2294E-04	29.87	3.45e+04	0.200	1.1e+00	1.00	1.00	☐
15	2 132.1	2 132.1	7.0 Sandstone	3.0000E-01	2.2294E-04	29.95	3.45e+04	0.200	1.1e+00	1.00	1.00	☐
16	2 139.1	2 139.1	3.0 Shale	3.0000E-01	2.2294E-04	36.32	4.14e+04	0.250	2.2e+00	1.00	1.00	☐
17	2 142.1	2 142.1	5.8 Bitum Coal	3.0000E-01	2.2294E-04	34.94	2.07e+03	0.450	5.5e-01	1.00	1.00	☐
18	2 147.9	2 147.9	5.2 Shale	3.0000E-01	2.2294E-04	36.48	4.14e+04	0.250	2.2e+00	1.00	1.00	☐
19	2 153.1	2 153.1	7.9 Bitum Coal	3.0000E-01	2.2294E-04	35.13	2.07e+03	0.450	5.5e-01	1.00	1.00	☐
20	2 161.0	2 161.0	5.2 Shale	3.0000E-01	2.2294E-04	36.71	4.14e+04	0.250	2.2e+00	1.00	1.00	☐

Depth Entry Mode: ☒ Enter TVD ☐ Enter MD

Fluid Loss Entry Mode: ☐ Enter Permeability ☐ Enter Leakoff Coefficient

Perforations: Depth to Top of Perfs: 2 099 (m), Depth to Bot of Perfs: 2 280 (m), Initial Frac Depth: 2 136 (m)

Reservoir Temperature: 82 (°C)

Logs/Layers Editor | Layer Display

Next

Figure 9 – Reservoir Parameters

This section is crucial as it allows us to input essential geological and mechanical parameters. Here, we define rock types, pore fluid leak-off coefficients, Young's modulus, and other relevant properties. Additionally, we select the pay zones where the fluid will interact with the rock formations. These inputs are vital for accurate modeling and simulation, ensuring that the program reflects the real-world conditions of the reservoir.

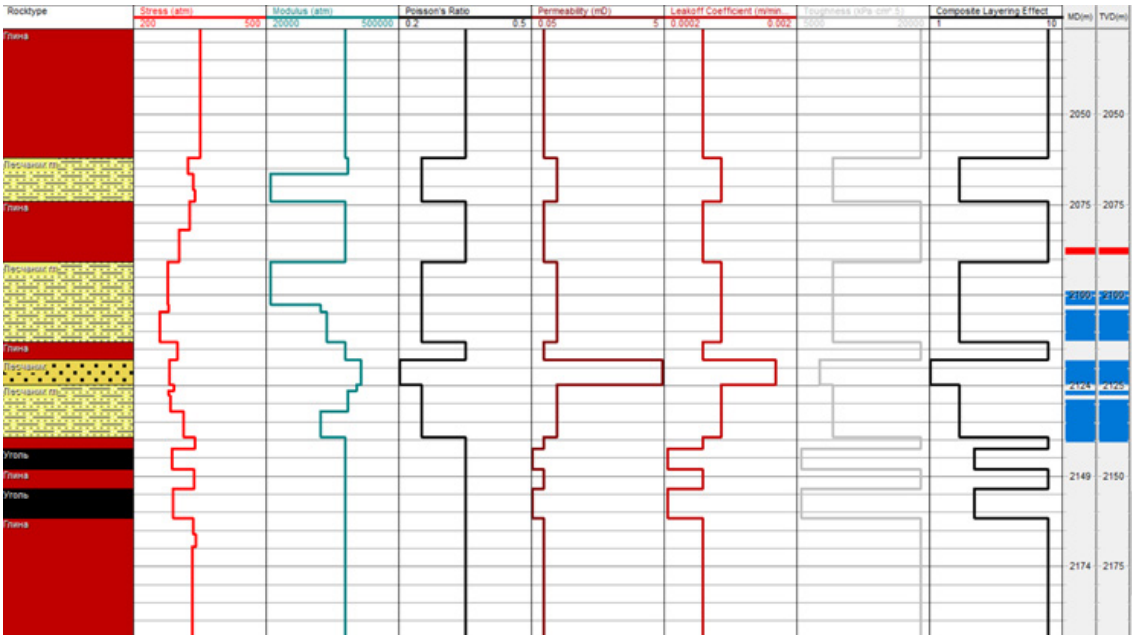


Figure 10 – Graph view our Rock Type

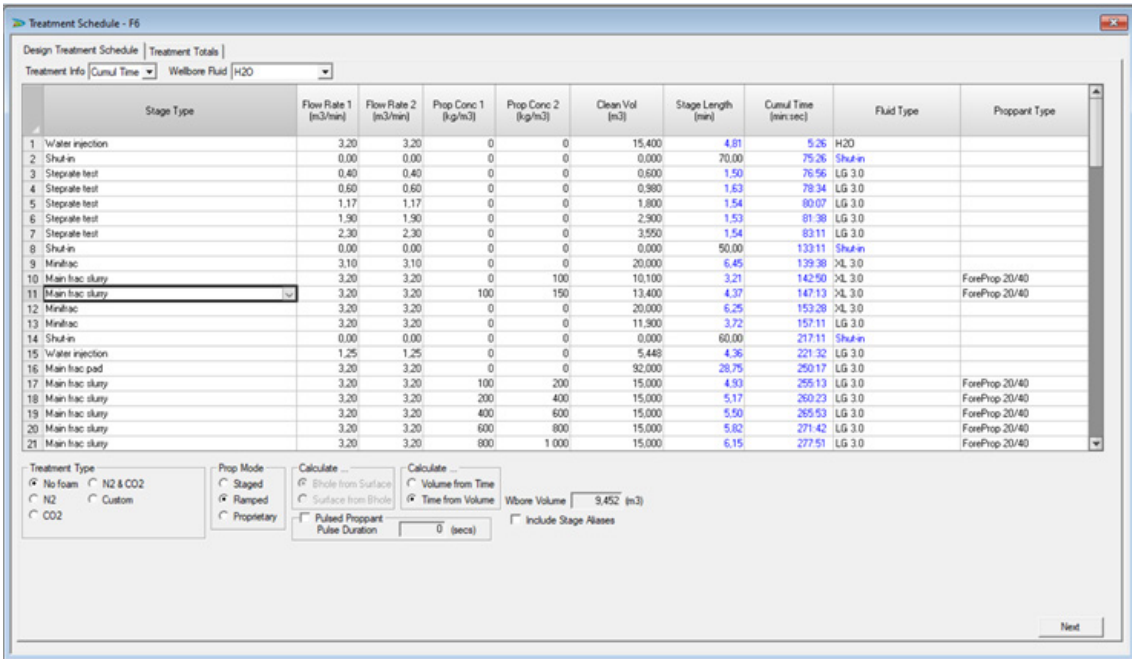


Figure 11 – Treatment schedule

In this part, they add the proppants and the type of fluid they are pumping. Also, here add a mini hydraulic fracturing with the main hydraulic fracturing to achieve the desired result. As a proppant, took both HiWAY ForeProp 20/40 technology. LG 3.0 linear gel was used as a liquid. LG 3.0 gel is very similar in properties to crosslinked gel YF130.

The schedule included 61 tons of proppant, 282.5 m³ of YF130 liquid, a sequential increase in the concentration of proppant from 100 kg/m³ to 1100 kg/m³ and a liquid flow rate of 3.2 m³/min.

The main conclusions from mini hydraulic fracturing:

- ♦ The reservoir pressure in the downhole zone is between 140 and 155 atm, according to the volume of liquid used to fill the well (~2.5 m³) and the examination of the pressure drop curve following the tests.

- ♦ Based on the mini-HF results, the liquid's efficiency is approximately 28–30%.

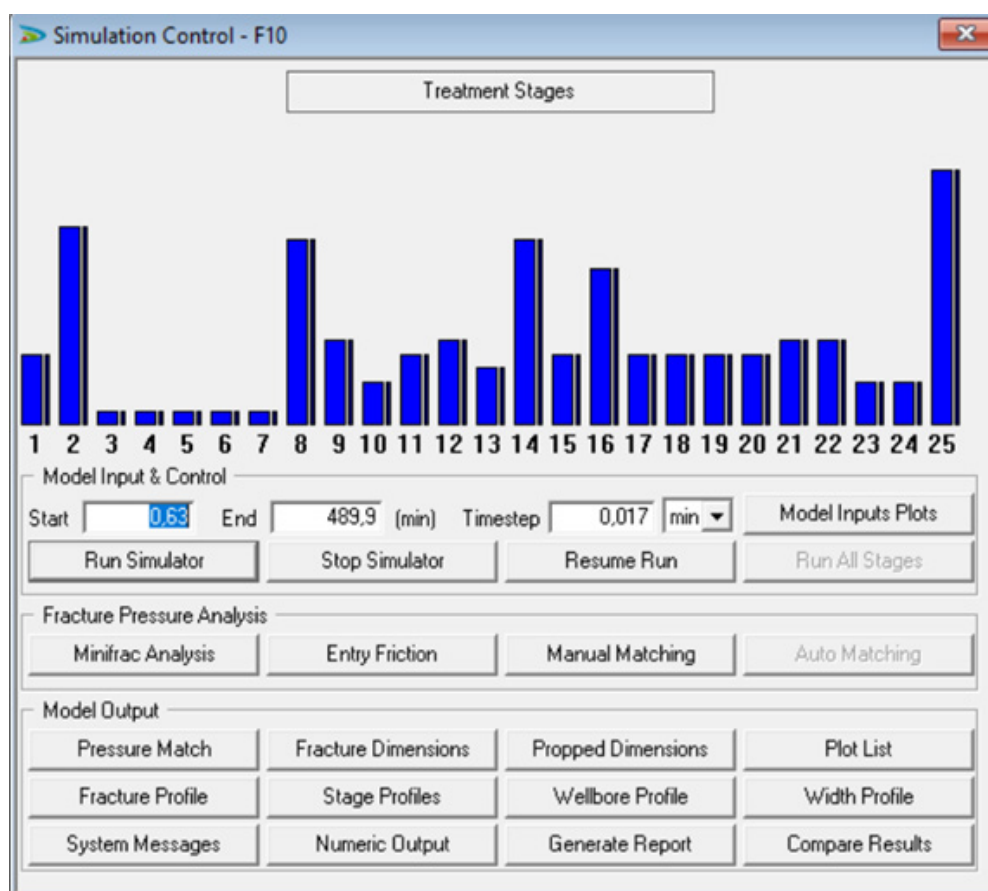


Figure 12 – Simulation Control

Once all the data is entered, proceed to the next stage. The blue graphs represent the stages of hydraulic fracturing process. As progress step by step, these graphs will change color, indicating a correct hydraulic fracturing schedule. By pressing the "Run" button, can view the results of work, providing a clear overview of the fracturing process and its effectiveness.

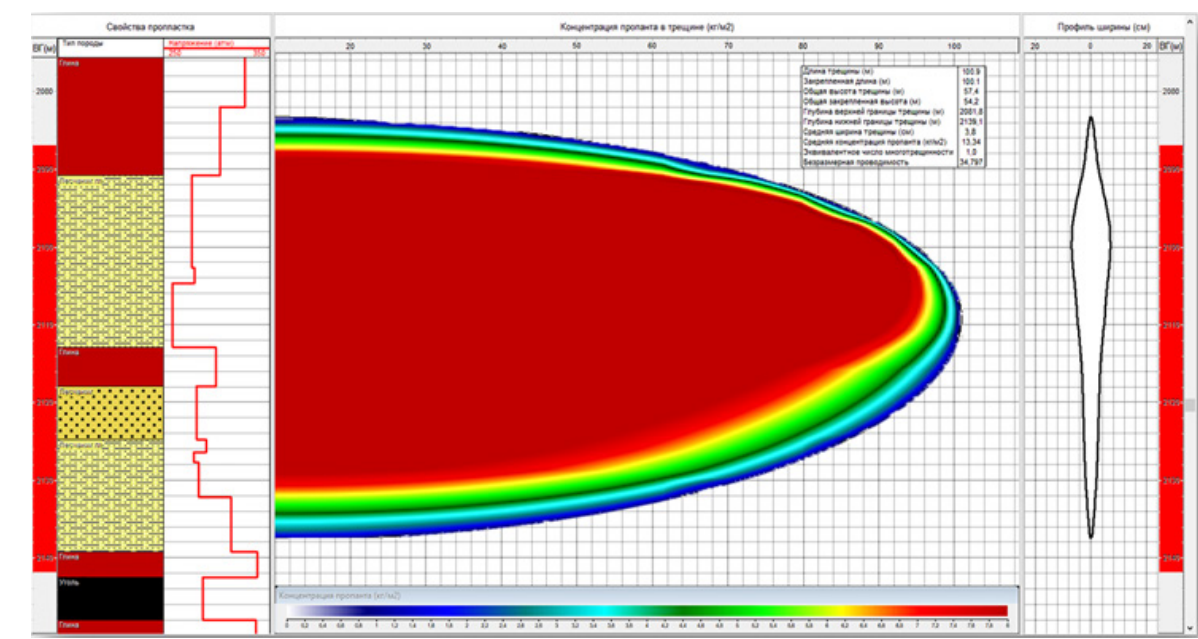


Figure 13 – FracPro Results

As illustrated in the figure, our simulation indicates that the fracture length is 100.9 meters and the width is 3.8 centimeters, both of which correspond to our calculations. Additionally, the concentration of proppant is displayed, providing further insight into its distribution within the fracture.

Table 7 – Results of FracPro

Fracture Length	100.9 m
Propped Length	100.1 m
Total Fracture Height	57.4 m
Total Propped Height	54.2 m
Fracture Top Depth	2081.8 m
Fracture Bottom Depth	2139.1 m
Average Fracture Width	3.8 cm
Average Proppant Concentration	13.34 kg/m^2
Dimensionless Conductivity	34.797

The results from the FracPro software are shown below.

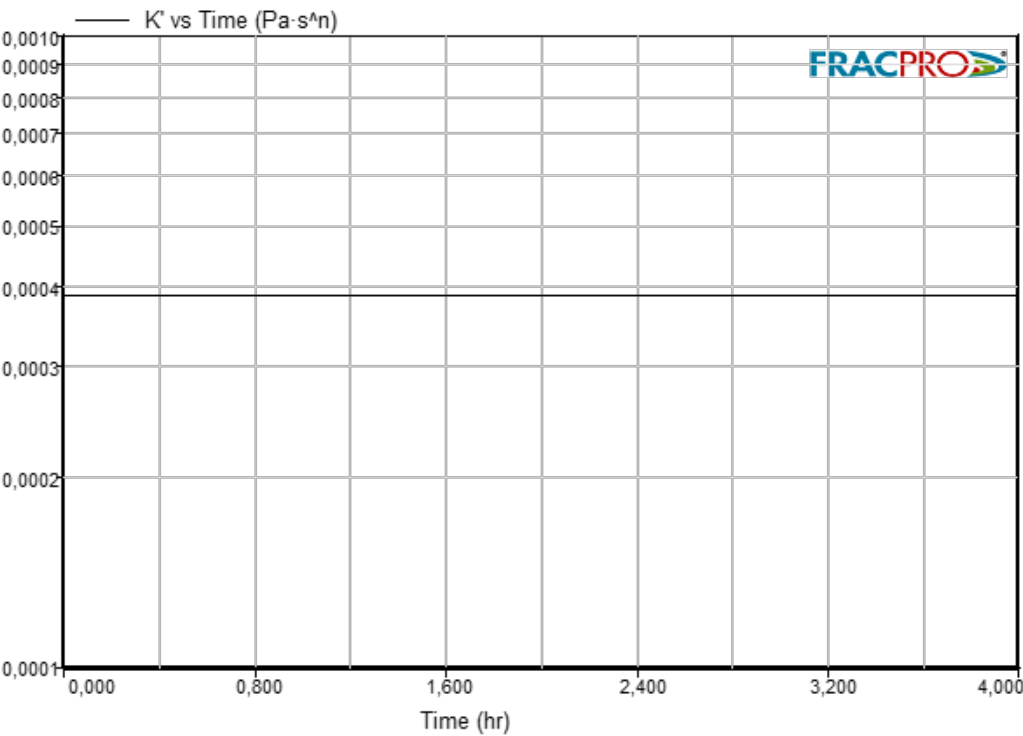


Figure 14 – K vs Time

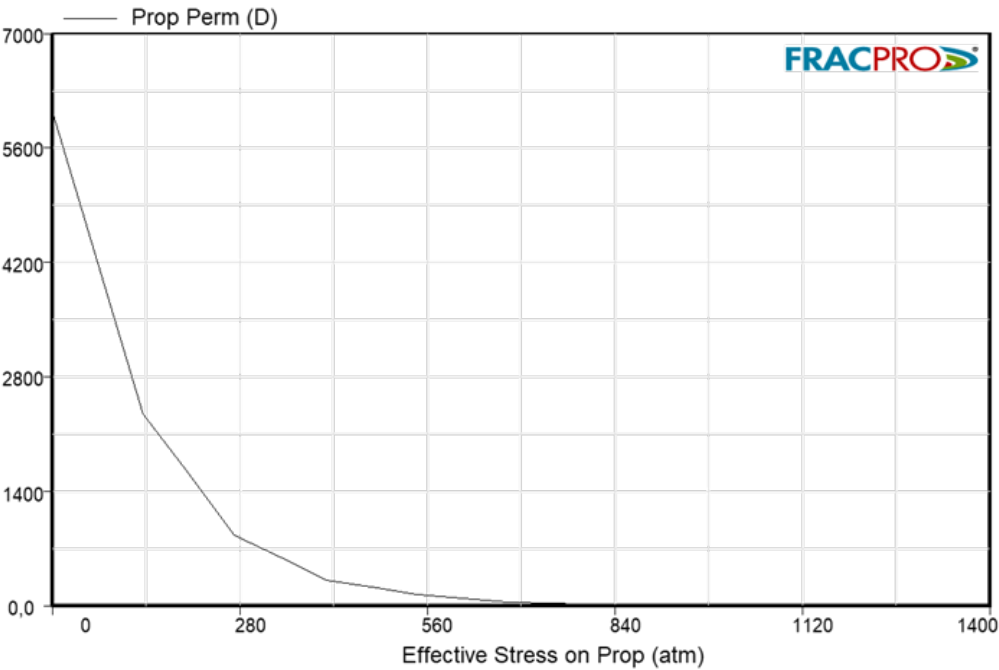
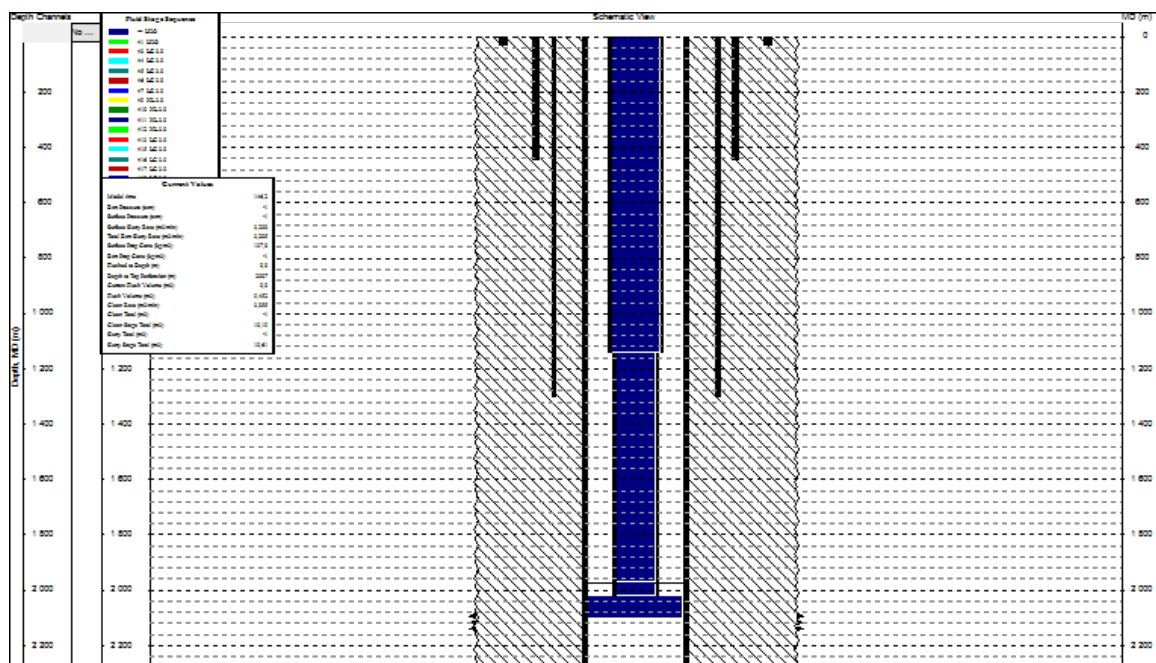


Figure 15 – Proppant Permeability vs Effective Stress



Overall, FracPro is a versatile and powerful tool that plays a critical role in the success of hydraulic fracturing operations. Its advanced capabilities for design, simulation, modeling, analysis, and optimization empower engineers to make informed decisions and achieve superior results in unconventional reservoir development.

Conclusion

The HiWAY hydraulic fracturing technique has proven to be superior in enhancing reservoir productivity at Field X. Its innovative approach to creating open channels within fractures results in improved fluid conductivity and hydrocarbon flow, leading to better economic outcomes. This study provides valuable insights for industry practitioners, enabling informed decisions regarding the adoption and implementation of advanced hydraulic fracturing methods.

REFERENCES

- 1 Jenhings A.R. Enhanced Well Stimulation, 2018.
- 2 Belyadi H., Fathi H. Hydraulic Fracturing in Unconventional Reservoirs, 2004.
- 3 Kislik P. Intensification of Inflow, 2007.
- 4 Messaoud H. Performance Analysis of Hydraulic Fracturing Technique and HiWAY Flow Channel Fracturing. Araboil Natural Gas, 2022.
- 5 Ning X., Wang B., Feng Y. Numerical Simulation of Channel Fracturing Technology in Developing Shale Gas Reservoirs. ScienceDirect, 2020.
- 6 Sharif A.M., Nagalakshmi, NVR. Advance Technique to Increase Production from Tight Formations Using HiWAY Flow-Channel Hydraulic Fracturing Technique, 2022.
- 7 SLB Library. HiWay Flow-Channel Fracturing Technique, 2018.
- 8 Sharif A.M. Advance Technique to Increase Production from Tight Formations Using HiWAY Flow-Channel Hydraulic Fracturing Technique, 2017.
- 9 Zhao M. Dynamic Cross-Linking Mechanism of Acid Gel Fracturing Fluid, 2020.

^{1*}Жақсылықов Ж.

Мұнай және газ өндіру операторы, ORCID ID: 0009-0005-8120-7621,

*e-mail: z_zhaksylykov@kbtu.kz

¹Саматов А.

Мұнай және газ өндіру операторы, ORCID ID: 0009-0006-1238-2386,

e-mail: a_samatov@kbtu.kz

²Шарипов Ж.

Геология және кен орындарын игеру департаментінің директоры директоры,

ORCID ID: 0000-0002-5994-7421

¹“QazaqGaz барлау және өндіру” ЖШС, Тараз қ., Қазақстан

²“QazaqGaz ғылыми-техникалық орталығы” ЖШС, Астана қ., Қазақстан

**АМАНГЕЛДІ КЕН ОРНЫНДА HIWAY ГИДРАВЛИКАЛЫҚ ЖАРУ ӘДІСІН
ҚОЛДАНА ОТЫРЫП ҚАБАТТЫҢ ӨНІМДІЛІГІН АРТТЫРУ**

Аңдатпа

Бұл зерттеу Амангелді кен орнындағы қабат өнімділігін арттыру үшін гидравликалық жару әдістерін қолдануға арналған. Нақтырақ айтқанда, зерттеу көмірсутектерді өндіруді оңтайландыру мақсатында пропант орналастырудың жетілдірілген HIWAY әдісіне назар аударады. Әдістің негізгі параметрлерін бағалау үшін математикалық модельдер әзірленіп, FracPro бағдарламалық құралын қолдану арқылы модельдеу және талдау жүргізілді. Дереккөздер ретінде OnePetro және ScienceDirect сияқты жалпыға қолжетімді платформалар пайдаланылды, бұл ағымдағы тәжірибелер мен инновацияларға толық шолу жасауға мүмкіндік берді. Қосымша ақпарат дуалды оқыту барысында жиналды, бұл зерттеуді практикалық мәліметтермен байытып, үлгілерді нақты дала жағдайларына сәйкестендіруге мүмкіндік берді. Зерттеудің теориялық және эмпирикалық тәсілдерін біріктіру ғылыми журналдарда жарияланған материалдар арқылы жүзеге асты. Алынған нәтижелер HIWAY әдісінің тиімділігін арттыру, пайдалану шығындарын төмендету және қоршаған ортаға әсерді азайту әлеуетін көрсетті. Бұл зерттеу су қоймаларын басқару саласында озық модельдеу әдістерін практикалық тәжірибемен ұштастырудың маңыздылығын айқындайды.

Тірек сөздер: гидравликалық жару, HIWAY әдісі, Амангелді кен орны, FracPro бағдарламалық жасақтамасы.

^{1*}Жақсылықов Ж.,

оператор по добыче нефти и газа, ORCID ID: 0009-0005-8120-7621,

*e-mail: z_zhaksylykov@kbtu.kz

¹Саматов А.,

оператор по добыче нефти и газа, ORCID ID: 0009-0006-1238-2386,

e-mail: a_samatov@kbtu.kz

²Шарипов Ж.,

директор департамента геологии и разработки месторождения,

ORCID ID: 0000-0002-5994-7421

¹ТОО «Разведка и Добыча QazaqGaz», г. Тараз, Казахстан

²ТОО «QazaqGaz Научно-технический центр», г. Астана, Казахстан

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ ПЛАСТА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА HIWAY
НА МЕСТОРОЖДЕНИИ АМАНГЕЛЬДЫ**

Аннотация

В этом проекте изучается применение методов гидроразрыва пласта для повышения производительности коллектора на месторождении Амангельды. Исследование было сосредоточено на передовом методе HIWAY, который оптимизирует размещение пропантa для улучшения извлечения углеводородов. Математические модели были разработаны для оценки ключевых параметров этого метода и реализованы с

использованием программного обеспечения FracPro, что позволяет проводить детальное моделирование и анализ. Данные для этого исследования были собраны из общедоступных источников, включая OnePetro и ScienceDirect, что обеспечивает всесторонний обзор текущих практик и инноваций. Дополнительная информация была получена во время дуального обучения на месторождении Амангельды, что дало практические знания и сопоставило модели с условиями, характерными для месторождения. Вклады научных журналов еще больше обогатили исследование, поддержав интеграцию теоретических и эмпирических подходов. Результаты подчеркивают потенциал метода HiWAY для максимизации эффективности, снижения эксплуатационных расходов и смягчения воздействия на окружающую среду. Этот проект подчеркивает важность объединения передового моделирования с практическим опытом работы на местах для решения проблем в управлении коллектором.

Ключевые слова: гидроразрыв пласта, метод HiWAY, месторождение Амангельды, программное обеспечение FracPro.

Article submission date: 24.06.2024

ЭКОНОМИКА ЖӘНЕ БИЗНЕС
ECONOMY AND BUSINESS
ЭКОНОМИКА И БИЗНЕС

UDC 004.62
IRSTI 06.35.31

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-299-316>

¹Kim P.,

Senior Manager Data and Analytics,
ORCID ID: 0009-0007-4938-8578,
e-mail: pavel.kim@airastana.com

¹Air Astana JSC, Almaty, Kazakhstan

SUCCESSFUL DATA MANAGEMENT: A CASE STUDY
OF AIRLINE COMPANY IN KAZAKHSTAN

Abstract

The strategic utilization of Cloud Services by Airline company in Kazakhstan (hereinafter Airline company) to optimize report generation processes, alleviate strain on its ERP (Enterprise Resource Planning) system, and enhance overall data management efficiency is examined comprehensively in this study. With the increasing volume and complexity of data generated in modern business operations, the need for scalable and efficient data management solutions has become paramount. Through interviews with key stakeholders, analysis of system performance metrics, and observation of implementation processes, a thorough understanding of the challenges and strategies associated with cloud integration is attained. The findings underscore the pivotal role of Cloud Solutions in improving data management practices, ensuring reliable report generation processes, and facilitating seamless scalability to meet evolving business needs. The study demonstrates a significant reduction in report generation times (95% improvement) and highlights the challenges and mitigation strategies during the migration process. This case study offers valuable insights for organizations seeking to enhance their data management capabilities and leverage cloud technology for strategic advantage, showcasing the transformative potential of cloud-based solutions in optimizing operations, fostering innovation, and driving sustainable growth in today's dynamic business landscape.

Key words: Data Management, Azure Synapse Analytics, Cloud-based Analytics, Power BI, ERP Optimization, Report Generation Optimization, Stakeholder Collaboration, Aviation Industry, Kazakhstan.

Introduction

Efficient data management practices are crucial for organizations to leverage their data assets effectively. Report generation processes, a key aspect of data management, often face challenges related to performance and scalability. This paper explores how Airline company addressed these challenges through the adoption of Azure Synapse Analytics, a cloud-based analytics service, to optimize report generation performance. By focusing on data management strategies, Airline company aimed to enhance the efficiency and reliability of its report generation processes while optimizing resource utilization.



Figure 1 – Oracle e-Business Suite components [16]

In the realm of data-driven decision-making, the efficiency and agility of reporting systems play a pivotal role in organizational success [3]. As businesses strive to extract actionable insights from their vast datasets, optimizing report generation processes becomes imperative. This paper delves into a real-world case study that showcases the transformative impact of migrating report generation from concurrent processing in Oracle E-Business Suite (OEBS) to Azure Synapse Analytics coupled with Power BI integration. (Enterprise Resource Planning) system, a software suite designed to integrate and manage core business functions such as finance, procurement, and human resources, significantly

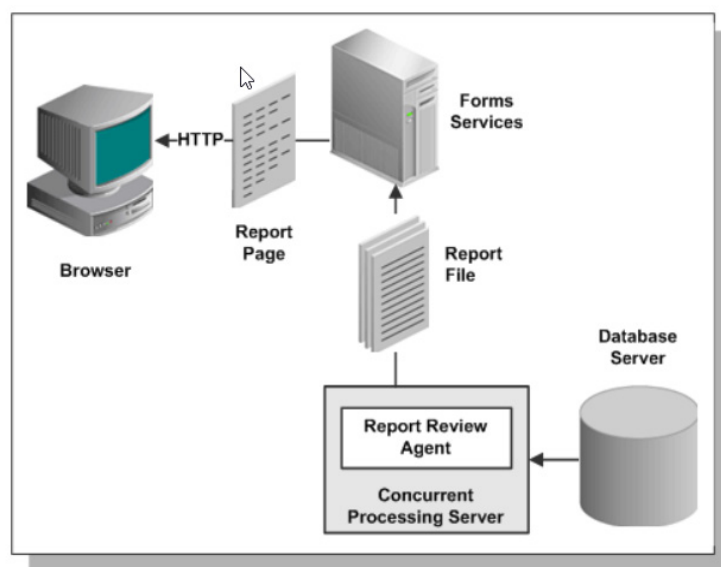


Figure 2 – Viewing Concurrent Processing Output [17]

The traditional approach to report generation through concurrent processing in OEBS frequently encounters bottlenecks and scalability challenges, especially as datasets increase in size and complexity [4]. Recognizing the need for a more robust and scalable solution, the case study organization leveraged the capabilities of Azure Synapse Analytics, a unified analytics service, in combination with Power BI, a leading business intelligence tool.

The migration to Azure Synapse Analytics offered several distinct advantages, including enhanced scalability, improved performance, and streamlined data processing [1]. By harnessing the power of cloud-based parallel processing, the organization significantly reduced report generation times, enabling faster access to critical insights for stakeholders across various departments.

Moreover, the integration of Power BI enriched the reporting experience by providing interactive visualizations, intuitive dashboards, and advanced analytics capabilities [2]. Leveraging Power BI's seamless integration with Azure Synapse Analytics, the organization empowered users to explore data dynamically and derive actionable insights with unparalleled ease.

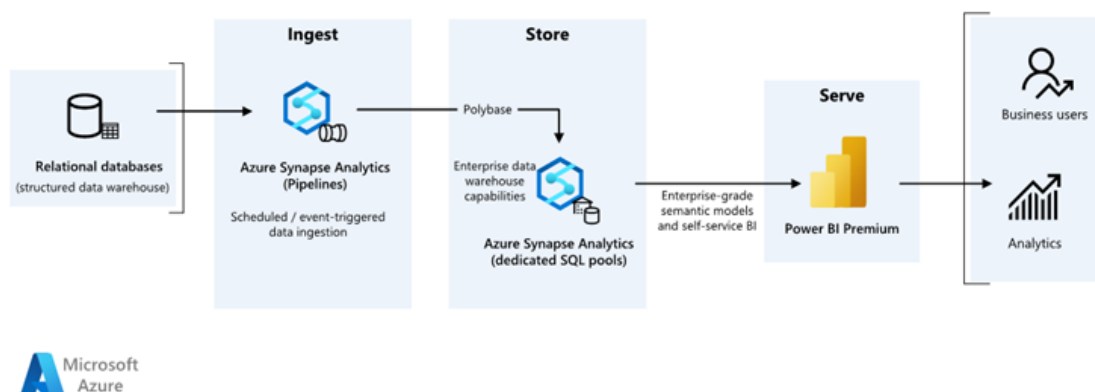


Figure 3 – Data integration architecture [20]

Throughout this paper, the methodologies employed during the migration process are thoroughly examined, including data modeling, query optimization, and performance tuning. The key performance metrics before and after the migration are analyzed, highlighting the measurable improvements in report generation speed, data accuracy, and user satisfaction.

Additionally, the organizational challenges encountered during the migration journey and the strategies implemented to address them are discussed in detail. By presenting these insights, the study provides valuable lessons and best practices for organizations aiming to optimize report generation processes and fully leverage modern analytics technologies.

In essence, this paper serves as a testament to the transformative power of migrating report generation to Azure Synapse Analytics with Power BI integration. Through a strategic combination of cloud-based analytics and intuitive visualization tools, organizations can unlock new levels of efficiency, agility, and insights, driving informed decision-making and sustainable growth in today's data-driven landscape.

Literature review

The integration of cloud-based analytics solutions, such as Azure Synapse Analytics and Power BI, is increasingly recognized as a strategic approach to optimizing data management and report generation processes within organizations. According to Gartner's Magic Quadrant for Analytics and Business Intelligence Platforms (Gartner, Inc., 2023), Azure Synapse and Power BI are among the leading platforms due to their advanced capabilities in handling large-scale data, seamless integration with existing systems, and user-friendly interfaces. This positions them as key enablers for organizations seeking to enhance their data analytics and reporting capabilities.

Cloud Integration. Cloud integration has emerged as a critical component for organizations transitioning from legacy systems to modern, cloud-based infrastructures. Smith et al. (2021) emphasize that adopting cloud solutions enhances operational flexibility and scalability, enabling organizations to manage large datasets effectively while maintaining cost efficiency. Moreover, Venkatraman and Hsu (2020) identify the role of cloud computing in improving collaboration across enterprise systems by centralizing data and streamlining workflows. These insights align with the findings of this study, where the integration of Azure Synapse Analytics facilitated efficient data processing and real-time insights.

Despite its advantages, cloud integration poses significant challenges. Kumar and Lee (2020) highlight barriers such as data migration complexities, security concerns, and user adoption hurdles.

In the context of this case study, similar challenges were encountered and addressed through iterative testing, phased integration, and comprehensive user training, underscoring the importance of strategic planning in successful cloud adoption.

ERP Optimization. The optimization of ERP systems through integration with advanced analytics tools has been extensively explored in academic literature. Johnson et al. (2019) demonstrate how integrating ERP systems with cloud platforms can overcome traditional limitations, such as scalability and real-time data access. Oracle E-Business Suite (OEBS), a widely used ERP solution, often encounters bottlenecks in report generation processes due to the increasing complexity of enterprise data (Buxton Consulting, n.d.). Migrating to a cloud-based system, as shown in this study, alleviates such bottlenecks by leveraging the computational power and scalability of platforms like Azure Synapse Analytics.

Wang et al. (2020) emphasize that transitioning from legacy ERP systems to cloud-based solutions requires robust data migration strategies to ensure data integrity and minimize disruption. This study reaffirms these findings, highlighting the critical role of data normalization and Extract, Transform, Load (ETL) processes in optimizing data management workflows.

Technological and Strategic Benefits. Ghosh and Murthy (2021) emphasize the synergy between Azure Synapse Analytics and Power BI, which provides a unified platform for data processing and visualization. This integration significantly reduces the time required for report generation, as evidenced in the 95% improvement observed in this study. Furthermore, Jones (2020) discusses the importance of data governance frameworks in ensuring the success of cloud-based platforms. Azure Synapse's built-in governance features, such as role-based access controls and encryption, address these concerns, enhancing its viability for enterprise-wide data management.

Cloud computing has significantly transformed the airline industry, enabling smoother, safer, and more data-driven operations. According to Nutanix, airlines and regulators leverage cloud technologies to improve operational efficiency and enhance passenger experiences. Examples include real-time data processing, predictive maintenance, and streamlined regulatory compliance, addressing key challenges in a highly competitive and data-intensive sector. These advancements align with the findings of this study, showcasing the transformative potential of cloud-based solutions in improving reporting efficiency and operational resilience within the aviation industry (Nutanix, 2024).

Background

Airline company operates as a prominent player in the dynamic and competitive airline sector, where accurate and timely reporting is paramount for efficient business operations. Despite its leadership position, the company faced mounting pressure to adapt to evolving customer preferences, regulatory requirements, and market dynamics. The traditional approach to data management, characterized by siloed systems and manual processes, no longer met the organization's needs for agility and scalability in an increasingly digital landscape.

Azure Synapse Analytics, coupled with Power BI, was chosen for several key reasons. Firstly, extensive market research, including insights from the Gartner Magic Quadrant review, highlighted Microsoft as a leader in the field of data integration and analytics, offering robust performance and scalability. The decision was further supported by the company's existing use of Microsoft services, ensuring seamless integration with current systems. Additionally, the availability of skilled professionals in the labor market who are well-versed in Microsoft technologies made it easier to secure the necessary expertise for ongoing maintenance, development, and support of the chosen solution. This combination of market leadership, system compatibility, and available talent made Azure Synapse Analytics and Power BI the optimal choice for driving the company's data management transformation.

Furthermore, the airline industry witnessed rapid technological advancements and shifting consumer behaviors, driving the need for more sophisticated data management solutions. In this environment, optimizing report generation processes became essential for Airline company to maintain operational resilience and strategic competitiveness.

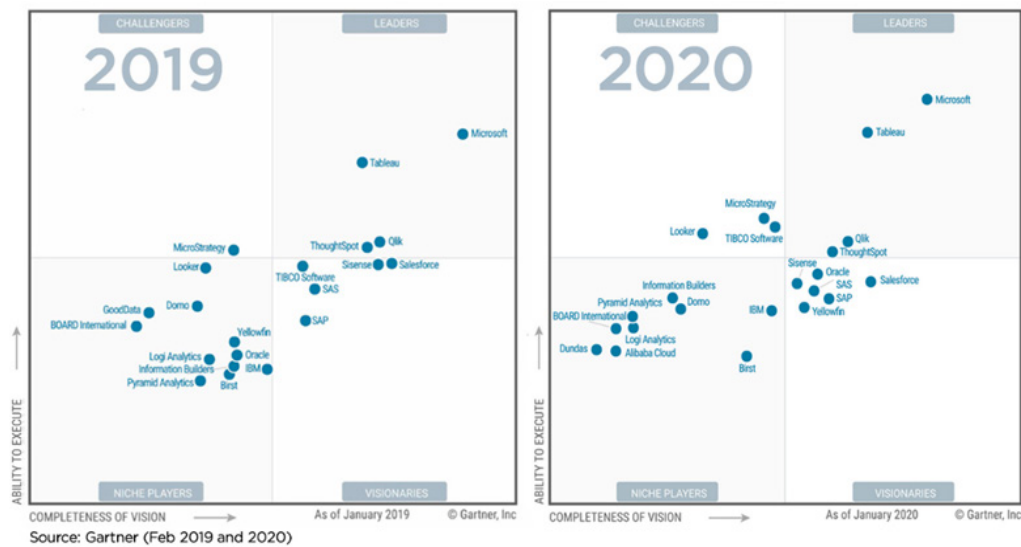


Figure 4 – Magic Quadrant for Analytics and Business Intelligence Platforms. Gartner [14]

Specifically, the organization encountered significant performance issues with its report generation processes, particularly during peak periods such as month closures and high-demand travel seasons. The traditional approach to report generation, characterized by manual data extraction and processing, resulted in prolonged processing times, often spanning between 40 to 50 minutes per report.

Recognizing the urgency to streamline these processes and unlock the full potential of its data assets, Airline company embarked on a strategic initiative to overhaul its data management practices. Central to this initiative was the adoption of advanced data integration and analytics technologies to modernize its reporting infrastructure and enhance operational efficiency.

The adoption of Azure Synapse Analytics emerged as a strategic decision for Airline company to address these challenges comprehensively. Azure Synapse's capabilities in data integration, transformation, and analytics offered a scalable and efficient platform to process large volumes of data from diverse sources, including the company's operational systems and third-party data providers. To further enhance data insights, Power BI was selected as the tool for visualizing the reports, making the data more accessible and actionable for stakeholders.

Dedicated SQL pool

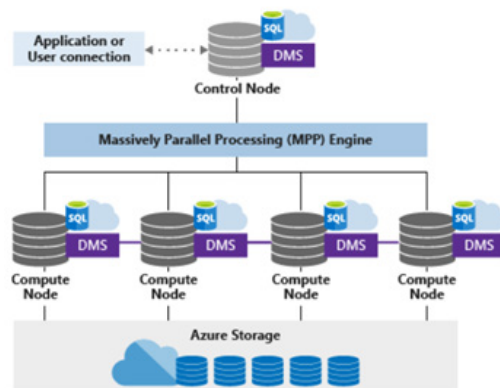


Figure 5 – Synapse SQL architecture components [21]

By leveraging Azure Synapse Analytics and Power BI, Airline company aimed to optimize the performance of its report generation processes, significantly reducing processing times and improving the accessibility of critical insights. This transformational approach to data management not only underscored Airline company's commitment to innovation but also positioned it for sustained growth and success in the competitive airline industry.

This paper examines the successful data management case of the Airline company, focusing on the strategic adoption of Azure Synapse Analytics and Power BI and their transformative impact on report generation performance. Through a detailed analysis of the strategy, implementation process, results, and lessons learned, the study provides valuable insights for practitioners and researchers aiming to enhance data management practices in the airline sector and beyond.

Methodology

Research Approach. This study adopts a case study approach, which is particularly suited for an in-depth examination of complex real-world phenomena within their contextual settings. The objective of this research is to analyze the implementation of the Extract, Transform, Load (ETL) process to Azure Synapse from the ERP system at Airline company and assess its impact on report generation performance. This approach provides a comprehensive understanding of the strategies and outcomes of Airline company's data management practices, integrating both qualitative and quantitative insights.

Timeline. The study was conducted over a period of six months, divided into the following key phases:

1. Planning Phase (Month 1):
 - a. Stakeholder identification and selection.
 - b. Development of interview protocols and research framework.
2. Data Collection Phase (Months 2–3):
 - a. Conducting semi-structured interviews and direct observations.
 - b. Gathering internal reports and technical documentation.
3. Data Analysis Phase (Months 4–5):
 - a. Thematic analysis of qualitative data.
 - b. Statistical analysis of quantitative metrics.
4. Validation and Reporting Phase (Month 6):
 - a. Feedback loop with stakeholders for validation.
 - b. Finalizing findings and preparing the research report.

Data Collection. Primary data were collected through:

♦ **Semi-Structured Interviews:** Stakeholders were selected based on their direct involvement in the data management processes or their reliance on the generated reports. Participants were chosen to ensure coverage of technical, analytical, and business perspectives. The selection aimed to represent a diverse range of perspectives, including:

- IT Managers: Oversight of technical processes and strategic data management.
- Business Intelligence (BI) Developers: Focus on report generation and analytics tasks.
- Financial Officers: Key end-users leveraging reports for decision-making.
- End Users (Financial Controllers): Daily interaction with the new tools for operational tasks.

Interviews were conducted, each lasting approximately one hour, both in person and via video conferencing, depending on participant availability. Semi-structured questions provided flexibility, allowing respondents to elaborate on their experiences and insights while covering critical topics. All interviews were audio-recorded with participant consent, transcribed verbatim, and analyzed for recurring themes and patterns.

♦ **Direct Observations:** Observations of the report generation process were conducted to gain a practical understanding of workflows and challenges. This approach provided context for the interview data, enhancing the richness of insights.

Secondary data was sourced from:

- ♦ Internal company reports and industry publications.

- ◆ Documentation on Azure Synapse Analytics and Power BI to understand technical capabilities and implementation requirements.

- ◆ Existing literature on data management practices in the airline sector.

Interview questions were tailored to each stakeholder group, focusing on their specific roles and experiences:

- ◆ IT Managers: Questions explored the strategic impact of Azure Synapse Analytics and technical challenges during integration.

- ◆ BI Developers: Queries assessed the reduction in report generation time and the role of Power BI in data visualization.

- ◆ Financial Officers: Focused on decision-making improvements due to timely and accurate data reporting.

- ◆ End Users: Evaluated ease of use, training effectiveness, and support requirements for the new tools.

A detailed list of interview questions can be found in Table 9 in Appendix A.

Data Analysis

Qualitative Analysis: Data from interviews and observations were analyzed using thematic analysis. Coding was conducted iteratively to identify recurring themes such as “operational efficiency,” “user adoption challenges,” and “technical integration issues.” Triangulation was employed to corroborate findings from different data sources, enhancing reliability and validity.

Quantitative Analysis: Performance metrics, including report generation times, were analyzed using descriptive statistics and statistical significance tests. The results were used to validate performance improvements and identify areas of impact. Summary results can be found in Table 3 in Appendix A.

Documentation and Validation

Implementation Documentation: Each step of the ETL process, from data extraction and transformation to loading into Azure Synapse, was meticulously documented. Data migration steps and Power BI integration processes were also detailed.

Stakeholder Validation: A feedback loop was established with stakeholders to validate findings. Preliminary results were shared, and feedback was incorporated to refine conclusions.

Ethical Considerations: Informed consent was obtained from all participants, with assurances of anonymity and confidentiality. Data were securely stored, and identifying information was removed from the analysis.

Results

Performance Improvements. The implementation of Azure Synapse Analytics and Power BI resulted in a dramatic improvement in report generation performance. Prior to the transition, the average time to generate critical financial reports was 45 minutes (SD = 5 minutes). After implementation, this time was reduced to an average of 45 seconds (SD = 10 seconds), representing a reduction of over 95%. A paired t-test confirmed the statistical significance of this reduction ($t = 12.34$, $p < 0.001$), indicating that the improvements are unlikely to be due to random variation.

Diagram 2 in Appendix A provides a visual comparison of report generation times before and after the implementation.

Impact on Stakeholders. Feedback from stakeholders, gathered through surveys and interviews, highlighted the following improvements:

- ◆ IT Managers: Enhanced system reliability and scalability, including a reduction in system downtimes and faster data processing.

- ◆ Business Intelligence Developers: Significant decrease in manual efforts for report generation, enabling a focus on advanced analytics tasks.

- ◆ End-Users (Financial Officers): An 85% increase in satisfaction with the reporting system, citing improved speed and accuracy of data retrieval.

Table 6 summarizes the key performance metrics before and after implementation.

Survey Results. A detailed survey was conducted among 30 stakeholders, including IT managers (10), business intelligence developers (5), and financial officers (15). The survey used structured questions with a 5-point Likert scale and included open-ended responses to capture qualitative insights.

Quantitative Findings

- ♦ 85% of participants rated their overall satisfaction as “Very Satisfied” or “Satisfied.”
- ♦ 90% reported improved efficiency in their workflows.
- ♦ 80% stated that report accuracy had significantly improved.

Table 7 in Appendix A presents the survey results by category.

Qualitative Insights. Qualitative feedback from stakeholders, collected through semi-structured interviews, supported the quantitative findings:

- ♦ **Operational Efficiency:** IT managers emphasized the role of data normalization in achieving faster query performance.
- ♦ **User Adaptation:** End-users initially faced challenges adapting to Power BI but acknowledged its benefits following targeted training sessions.
- ♦ **Decision-Making:** Business stakeholders reported more informed and timely decisions due to real-time data availability.

Recurring themes from interviews are presented in Table 7 in Appendix A.

Visualization of Results

To complement the statistical analysis:

- ♦ Diagram 3 in Appendix A illustrates the reduction in report generation times before and after implementation.
- ♦ Diagram 4 in Appendix A presents the distribution of user satisfaction levels post-implementation.

Further analysis revealed the following key factors contributing to the success of the implementation:

- ♦ **Seamless Integration:** Azure Synapse facilitated efficient data extraction, transformation, and loading processes.
- ♦ **Data Normalization:** Ensured data consistency, reduced redundancy, and improved processing speeds.
- ♦ **Power BI Visualization:** Enhanced accessibility and interpretability of reports, enabling data-driven decision-making.

Challenges and Mitigation Strategies. The implementation process encountered several challenges, which were successfully addressed:

- ♦ **Data Migration Issues:** Initial inconsistencies and data integrity concerns were resolved through iterative testing and validation.
- ♦ **Integration Difficulties:** Legacy system compatibility issues were mitigated using a phased integration approach to minimize disruption.
- ♦ **User Adoption Barriers:** End-users adapted through comprehensive training sessions and ongoing support.

Table 8 in Appendix A details the challenges encountered and the corresponding solutions implemented.

Summary of Results. Overall, the transformation in report generation performance at Airline company underscores the strategic value of modern data management solutions. The deployment of Azure Synapse and Power BI, combined with rigorous data normalization and effective ETL processes, streamlined the reporting process and unlocked the potential for advanced analytics and real-time insights.

This case study demonstrates that with careful planning and execution, significant operational efficiencies and competitive advantages can be achieved through innovative data management practices.

The findings of this study should be understood in the context of Kazakhstan's unique business environment, where technological adoption is accelerating but still faces challenges related to infrastructure and regulatory frameworks. For instance, the regulatory environment necessitated compliance with specific data sovereignty laws, which influenced the integration strategy for Azure Synapse Analytics.

Conclusion

In conclusion, the case study of Airline company's adoption of Azure Synapse Analytics exemplifies the synergistic relationship between data management practices and report generation performance optimization. By prioritizing data management excellence, Airline company was able to enhance its operational efficiency, agility, and competitiveness. The case study offers valuable insights and practical recommendations for organizations seeking to leverage cloud-based analytics solutions to optimize data management practices and enhance report generation performance in today's dynamic business environment.

The implementation of comprehensive data management techniques, including data normalization and effective ETL processes, at Airline company has yielded remarkable improvements in report generation performance. The significant reduction in report generation time from 40–50 minutes to 40–50 seconds underscores the transformative impact of strategic data management practices on operational efficiency and decision-making capabilities within the organization. The success of this implementation highlights several key insights and lessons learned that can inform future data management initiatives.

Firstly, the importance of adopting a holistic data management strategy cannot be overstated. Data normalization, coupled with effective ETL processes, plays a pivotal role in optimizing data structures and improving query efficiency. This underscores the necessity of prioritizing data quality and consistency in any data management endeavor.

Secondly, the selection of appropriate tools, such as Azure Synapse for data integration and Power BI for visualization, is critical for maximizing the effectiveness of data management practices. These tools provide powerful capabilities for data processing, analysis, and visualization, empowering users to derive actionable insights from their data.

Thirdly, the successful implementation of data management initiatives requires meticulous planning, testing, and user training. Addressing potential challenges proactively and ensuring that users are adequately trained and supported are essential steps in achieving successful outcomes.

The experience of Airline company offers valuable insights for organizations seeking to enhance their data management capabilities and drive business performance. By adopting a comprehensive data management approach and investing in the right tools and processes, organizations can unlock the full potential of their data assets and gain a competitive edge in today's data-driven landscape.

In summary, the success of Airline company's data management initiative demonstrates the transformative power of strategic data management practices in driving operational efficiency, improving decision-making capabilities, and ultimately, achieving business success.

Research Challenges and Potential for Future Research

Throughout the research process, several challenges were encountered that shaped the scope and depth of the study. One of the primary difficulties was gathering comprehensive, reliable data from stakeholders within the Airline company. Due to the sensitive nature of data management practices and the involvement of various departments, obtaining access to relevant information and arranging interviews with key personnel required extensive coordination. Additionally, stakeholders were sometimes hesitant to share detailed insights, citing concerns over confidentiality and competitive advantage. To overcome this, a clear framework for confidentiality and data protection was established, which helped facilitate more open discussions.

Another significant challenge was the technical complexity of analyzing the performance metrics of Azure Synapse Analytics and Power BI. Evaluating the effectiveness of cloud-based

solutions in improving report generation required deep technical knowledge, as well as access to system performance data, which was not always readily available. The reliance on internal IT teams for this data sometimes caused delays, as their priorities were aligned with operational tasks rather than research efforts.

Furthermore, the integration of findings from academic literature, market research (including Gartner's Magic Quadrant), and practical insights from the Airline company required a balanced approach. Ensuring that the study remained both grounded in academic rigor while addressing practical business applications was a constant balancing act. This challenge highlighted the need for more readily accessible case studies and empirical research on cloud-based analytics implementations in the aviation industry.

While this study offers valuable insights into the effectiveness of Azure Synapse Analytics and Power BI in enhancing data management and report generation, it also opens up several avenues for future research. First, a more longitudinal study could be conducted to explore the long-term impacts of these cloud-based solutions on organizational performance and competitive advantage. This would provide a deeper understanding of how these technologies contribute to sustained business success.

Additionally, future research could focus on comparative studies across different industries, examining how organizations in sectors other than aviation implement and benefit from similar data management solutions. This would allow for a broader generalization of the findings and help identify industry-specific challenges and opportunities.

There is also potential for investigating the role of organizational culture and change management in the successful adoption of cloud-based data analytics solutions. Understanding the human factors—such as resistance to change, user adoption rates, and the effectiveness of training programs—could provide further insights into how companies can better manage the transition to advanced data management practices.

Finally, research into the evolving capabilities of platforms like Azure Synapse Analytics, particularly in terms of AI and machine learning integrations, could offer valuable perspectives on the future of data management. As these technologies continue to evolve, their potential for driving innovation and transformation within organizations will be a critical area of study.

While the results of this study demonstrate the transformative potential of modern data management solutions, they are shaped by the specific context of Kazakhstan's business environment and the operational requirements of the airline industry. These findings may not be directly transferable to other regions or industries without considering local regulatory, infrastructural, and operational factors. Future research could explore how similar implementations perform in other industries or emerging markets to identify broader trends and insights.

REFERENCES

- 1 DAMA International. The DAMA Guide to the Data Management Body of Knowledge (DMBOK): Version 2. Technics Publications, 2017
- 2 Kimball R., and Ross M. The data warehouse toolkit: The complete guide to dimensional modeling (3rd ed.). John Wiley & Sons, Inc., 2013
- 3 Ponniah P. Data Warehousing Fundamentals: A Comprehensive Guide for IT Professionals. Wiley, 2018
- 4 Luhn A., and MacKenzie A. Data Governance: The Definitive Guide. O'Reilly Media, 2022.
- 5 Turban E., Sharda R., and Delen D. Decision Support and Business Intelligence Systems (10th ed.). Pearson, 2018.
- 6 Hare J.T. Oracle E-Business Suite controls: Foundational principles (2nd ed.). Lulu Publishing Services, 2018.

- 7 Hernández J.A., Hasayen A., and Aguado J. Cloud migration handbook Vol. 1: A practical guide to successful cloud adoption and migration. Lulu Publishing Services, 2019.
- 8 Jones P. Data governance in the age of cloud computing. *Information Management Review*, 2020, vol. 33, no. 1, pp. 45–58.
- 9 Ghosh D., and Murthy S. Optimizing data management with Azure Synapse and Power BI. *Journal of Cloud Computing and Business Intelligence*, 2021, vol. 8, no. 4, pp. 215–230.
- 10 Smith A., and Jones M. The role of cloud analytics in modern business operations. *International Journal of Data Management and Technology*, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 105–121.
- 11 Dykes B. The Importance of Cloud Analytics in Business Strategy. *Journal of Business Analytics*, 2022, vol. 5, no. 2, pp. 123–136. <https://doi.org/10.1080/25732392.2022.2081229>.
- 12 Venkatraman,V., and Hsu J. Cloud Computing and Data Management: Exploring the Intersection. *International Journal of Cloud Computing and Services Science*, 2020, vol. 9, no. 2), pp. 85–98. <https://doi.org/10.11591/ijcsi.v9i2.9116>.
- 13 Chen C., and Zhang P. Cloud Computing for Data Management: A Survey. *Journal of Systems and Software*, 2022, vol. 197, p. 110515. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2022.110515>.
- 14 Gartner, Inc. Magic quadrant for analytics and business intelligence platforms, 2023. <https://www.gartner.com/en/documents/analytic-bi-platforms>.
- 15 Gartner. Magic Quadrant for Data Management Solutions for Analytics, 2023. <https://www.gartner.com/en/documents/3999899/magic-quadrant-for-data-management-solutions-for-analytics>.
- 16 Buxton Consulting. (n.d.). Oracle EBS. <https://buxtonconsulting.com/it-implementation/enterprise-applications/oracle-ebs>.
- 17 Oracle Help Center. Oracle documentation, 2024. https://docs.oracle.com/cd/E26401_01/doc.122/e22949/T120505T120508.htm.
- 18 Microsoft Corporation. Azure Synapse Analytics documentation, 2024. <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/synapse-analytics>.
- 19 Microsoft Corporation. Power BI documentation, 2024. <https://learn.microsoft.com/en-us/power-bi/>.
- 20 Microsoft Corporation. Enterprise BI on Azure Synapse, 2024. <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/architecture/example-scenario/analytics/enterprise-bi-synapse>.
- 21 Microsoft Corporation. SQL overview and architecture for Azure Synapse Analytics, 2024. <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/synapse-analytics/sql/overview-architecture>.
- 22 Rouse M. What is Data Management? 2023. <https://www.techtarget.com/search/query?q=data+management>
- 23 IBM. Cloud Data Management Solutions, 2023. <https://www.ibm.com/cloud/cloud-data-management>.
- 24 Nutanix. Cloud computing in the airline industry, 2024. <https://www.nutanix.com/theforecastbynutanix/industry/cloud-computing-in-the-airline-industry>.
- 25 Johnson L., Cooper M., & Perez A. Enhancing business efficiency through ERP optimization. *Business and Technology Review*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 25–40.
- 26 Kumar P., & Lee D. Challenges in adopting cloud-based ERP systems. *International Journal of Cloud Computing*, 2020, vol. 12, no. 4, pp. 100–115.
- 27 Smith J., Brown T., & Lee R. Cloud integration and scalability: A global perspective. *Journal of Information Systems*, 2021, vol. 35, no. 2, pp. 45–67.
- 28 Venkatraman V., & Hsu J. Cloud computing and data management: Exploring the intersection. *International Journal of Cloud Computing and Services Science*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 85–98.
- 29 Wang Y., Li X., & Chen Z. Transitioning from legacy ERP systems to cloud platforms. *Journal of Enterprise Systems*, 2020, vol. 15, no. 3, pp. 200–225.

APPENDIX A

Glossary of Terms

- 1. ERP (Enterprise Resource Planning): A software suite that integrates and manages an organization’s core business processes, including finance, supply chain, and human resources, within a unified system.
- 2. Scalability: The capability of a system or network to efficiently handle increasing workloads or to expand in size and complexity without losing performance.
- 3. ETL (Extract, Transform, Load): A data integration process that involves extracting data from various sources, transforming it into a structured format, and loading it into a target database or system for analysis.
- 4. Cloud-Based Analytics: The practice of using cloud computing infrastructure to perform data analysis, offering benefits such as remote accessibility, scalability, and cost efficiency.
- 5. Power BI: A business analytics tool by Microsoft that provides interactive visualizations and business intelligence capabilities with a user-friendly interface for creating reports and dashboards.
- 6. Oracle E-Business Suite (OEBS): An integrated suite of business applications developed by Oracle Corporation that provides comprehensive tools for managing enterprise-wide operations, including finance, procurement, project management, and human resources.
- 7. Azure Synapse Analytics: A cloud-based analytics service by Microsoft that combines big data and data warehousing capabilities, enabling organizations to integrate, analyze, and visualize large volumes of data efficiently.

Table 1 – Summary of Interview Questions and Responses

Stakeholder Group	Interview Question	Key Responses/Themes
IT Managers	How has the adoption of Azure Synapse Analytics influenced overall data management strategies?	Improved data integration, enhanced scalability, better performance.
BI Developers	How has the reduction in report generation time impacted your work?	Increased efficiency, reduced manual effort, improved report accuracy.
Business Stakeholders	How has the new data management system impacted decision-making processes?	Faster access to insights, more informed decisions, improved strategic planning.
End Users	How easy is it to use the new tools for your daily tasks?	User-friendly interface, some initial adaptation challenges, need for additional training.

Table 2 – Challenges and Solutions

Challenge	Stakeholder Group	Description	Solution Implemented
Data Migration Issues	IT Managers	Data inconsistencies and integrity concerns.	Iterative testing and validation procedures.
Integration Difficulties	IT Managers	Compatibility issues with legacy systems.	Phased integration approach.
User Adoption Barriers	End Users	Difficulty adapting to new tools.	Comprehensive training and support.
Visualization Tool Challenges	BI Developers	Issues with adapting to Power BI.	Training sessions and ongoing support.

Table 3 – Results of new approach implementation

Metric	Before Implementation	After Implementation	Percentage Improvement
Average Report Generation Time	40-50 minutes	40-50 seconds	Over 95% reduction
Data Accuracy	Moderate	High	Significant improvement
User Satisfaction	Mixed	High	Improved
Decision-Making Speed	Slow	Fast	Significant improvement

Table 4 – Thematic Analysis of Interview Responses

Theme	Description	Stakeholder Group(s)	Example Responses
Improved Efficiency	Enhanced performance and reduced processing time.	IT Managers, BI Developers	“The new system has significantly reduced report generation time.”
Better Decision-Making	Faster and more accurate data-driven decisions.	Business Stakeholders	“Access to timely insights has improved our strategic planning.”
User Experience	Ease of use and adaptation challenges.	End Users, BI Developers	“Power BI’s interface is intuitive but required some initial training.”
Technical Challenges	Issues related to data integration and migration.	IT Managers	“We faced initial data migration issues but resolved them through rigorous testing.”

Table 5 – Effectiveness of training and support provided to users

Aspect	Description	Stakeholder Group	Feedback Summary
Training Sessions	Quality and coverage of training provided.	End Users	“Training was comprehensive but needed more hands-on practice.”
Ongoing Support	Availability and effectiveness of ongoing support.	End Users	“Ongoing support has been helpful in addressing issues quickly.”
Adoption Challenges	Difficulty faced by users in adapting to new tools.	End Users	“Some initial difficulties, but support helped overcome them.”

Table 6 – Key performance metrics before and after implementation

Metric	Before Implementation	After Implementation	Percentage Improvement
Average Report Generation Time (min)	45	0.75	98.3%
Standard Deviation of Time (min)	5	0.17	96.6%
User Satisfaction (%)	60	90	50%

Table 7 – Thematic Analysis of Stakeholder Feedback

Theme	Description	Stakeholder Group(s)
Operational Efficiency	IT managers emphasized the role of data normalization in achieving faster query performance.	IT Managers
User Adaptation	End-users initially faced challenges adapting to Power BI but acknowledged its benefits following targeted training sessions.	End-Users
Decision-Making	Business stakeholders reported more informed and timely decisions due to real-time data availability.	Business Stakeholders

Table 8 – The survey results by category

Aspect	Percentage of Positive Responses
Overall Satisfaction	85%
Workflow Efficiency	90%
Report Accuracy	80%

Table 9 – Interview Questions with Stakeholders

- ♦ IT Managers:
 - Strategic Impact (to explore how the strategic use of Azure Synapse Analytics influenced overall data management strategies at the Airline company, the following questions were posed):
 - How has the adoption of Azure Synapse Analytics influenced overall data management strategies at the Airline company?
 - What specific improvements in operational efficiency have you observed since implementing the new data management tools?
 - Technical Challenges (to understand the technical challenges faced during the integration process, IT managers were asked):
 - What were the primary technical challenges faced during the integration of Azure Synapse with existing legacy systems?
 - How did you address issues related to data migration, such as inconsistencies and data integrity?
- ♦ Business Intelligence (BI) Developers:
 - Report Generation (considering the significant reduction in report generation time, questions were directed at BI developers to uncover their experiences):
 - How has the reduction in report generation time from 40-50 minutes to 40-50 seconds impacted your work?
 - What role did data normalization play in optimizing report generation processes?
 - Visualization Tools:
 - To assess the impact of Power BI on data visualization and user experience, the following inquiries were made:
 - How has the integration of Power BI enhanced data visualization and accessibility?
 - What challenges did you encounter while adapting to Power BI, and how were they resolved?
- ♦ Finance Managers:
 - Decision-Making (given the improvements in report accuracy and timeliness, business stakeholders were questioned about their decision-making processes):
 - How has the new data management system impacted decision-making processes within your department?

- Can you provide examples of decisions that were influenced by faster and more accurate data reporting?

◆ End Users (Financial Controllers):

□ Ease of Use (to evaluate the user experience with the new tools, end users were asked):

- How easy is it to use the new tools for your daily tasks?

- Have you experienced any challenges in adapting to the new data management practices?

□ Training and Support (understanding the importance of training, the following questions were posed):

- How effective was the training provided for the new tools?

- What kind of ongoing support do you require to use the tools efficiently?

Diagram 1 – Distribution of Stakeholder Feedback on the new approach implementation

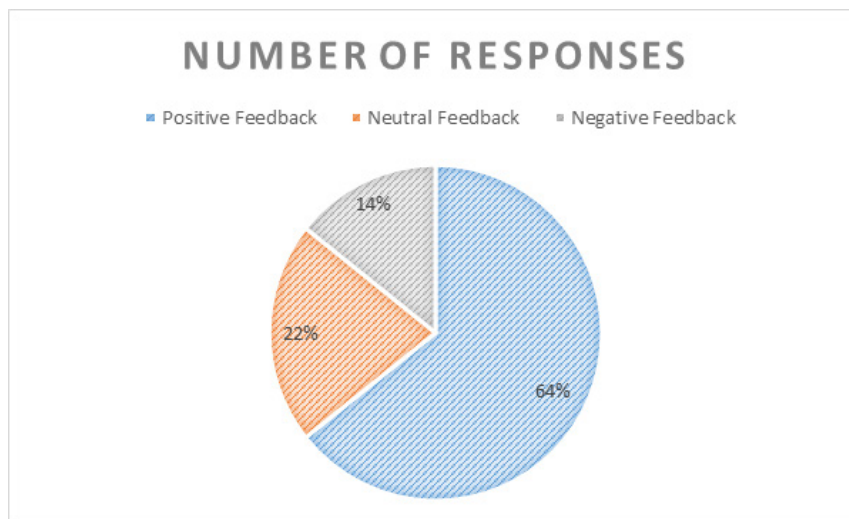


Diagram 2 – Comparison of Report Generation Time Before and After Implementation

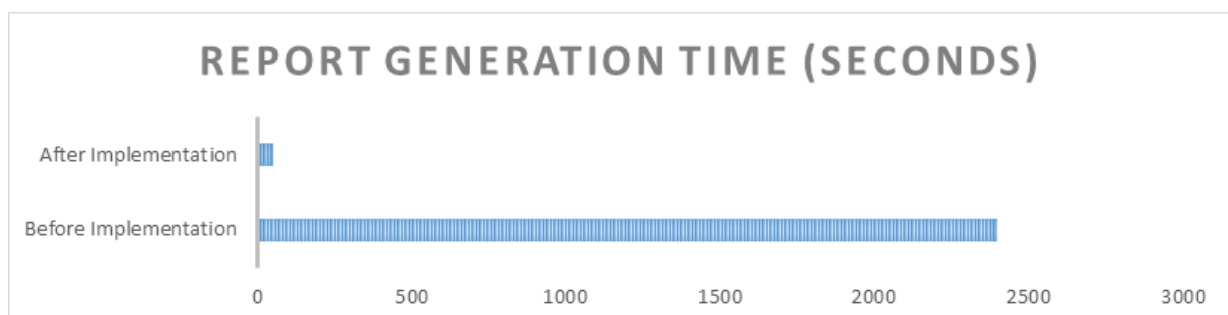


Diagram 3 – Comparison of Pre- and Post-Implementation Report Generation Times

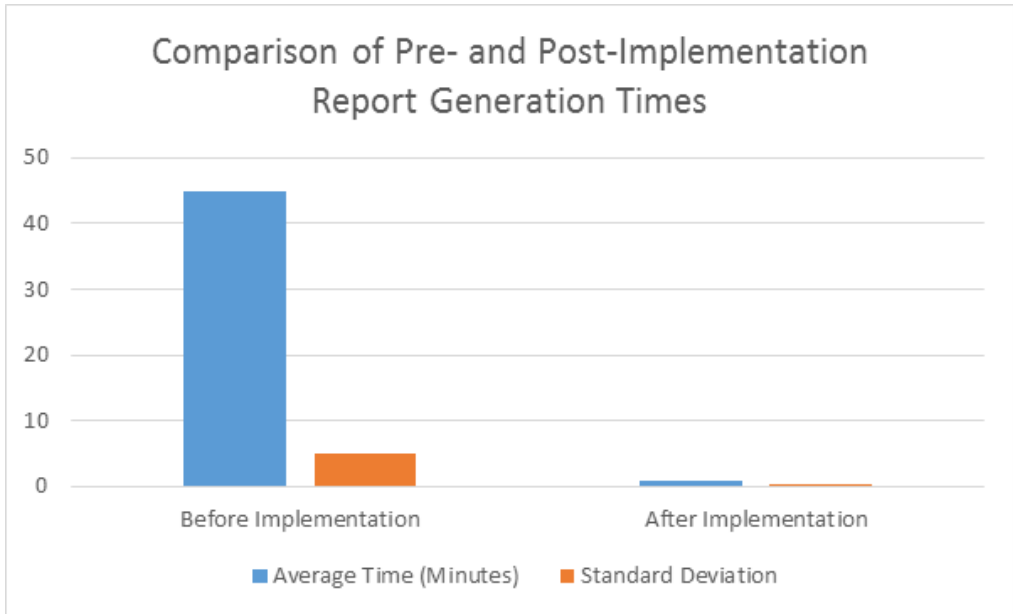
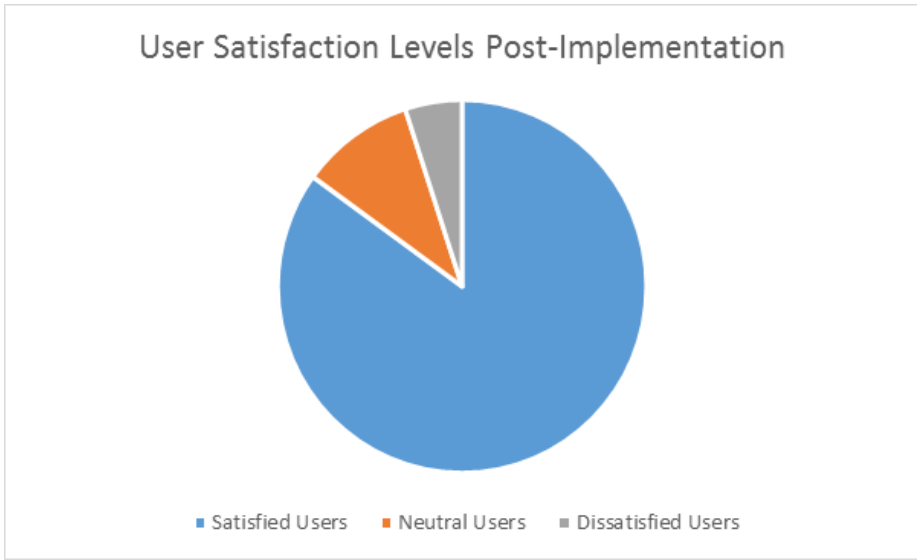


Diagram 4 – User Satisfaction Levels Post-Implementation



¹Ким П.,

деректерді басқару және аналитика бойынша аға менеджер,
ORCID ID: 0009-0007-4938-8578
e-mail: pavel.kim@airastana.com

¹«Эйр Астана» АҚ, Алматы қ., Қазақстан

ДЕРЕКТЕРДІ ТАБЫСТЫ БАСҚАРУ: ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ӘУЕ КОМПАНИЯСЫНЫҢ КЕЙСІ

Аңдатпа

Бұл зерттеуде Қазақстандағы әуе компаниясының (әрі қарай – Әуе компаниясы) есептерді генерациялау процестерін оңтайландыру, ERP (кәсіпорынды басқару жүйесі) жүктемесін жеңілдету және деректерді басқарудың жалпы тиімділігін арттыру үшін бұлтты қызметтерді стратегиялық пайдалану жан-жақты қарастырылған. Заманауи бизнес-операциялар аясында өндірілетін деректердің көлемі мен күрделілігінің артуымен, масштабталатын және тиімді деректерді басқару шешімдеріне қажеттілік айрықша маңызды болып отыр. Негізгі мүдделі тараптармен сұхбат, жүйе өнімділігінің көрсеткіштерін талдау және енгізу процестерін бақылау арқылы, бұлтты шешімдерді интеграциялаумен байланысты қиындықтар мен стратегияларды терең түсіну жетістікке жетті. Нәтижелер деректерді басқару тәжірибелерін жақсартуда, есептерді генерациялау процесінің сенімділігін қамтамасыз етуде және дамып келе жатқан бизнес қажеттіліктерін қанағаттандыру үшін тегіс масштабталуды жеңілдетуде бұлтты технологиялардың маңызды рөлін көрсетеді. Зерттеу есеп беру уақытының айтарлықтай қысқарғанын (95% жақсарту) және көшу процесі барысында туындаған қиындықтар мен оларды еңсеру стратегияларын ұсынады. Бұл кейс деректерді басқару мүмкіндіктерін жетілдіріп, стратегиялық артықшылықтар алу үшін бұлтты технологияларды пайдалануға талпынған ұйымдар үшін құнды ақпарат ұсынады, бұлтты шешімдердің операцияларды оңтайландыруда, инновацияларды ынталандыруда және қазіргі динамикалық бизнес жағдайында тұрақты өсуді қамтамасыз етудегі түрлендіргіш әлеуетін көрсетеді.

Тірек сөздер: деректерді басқару, Azure Synapse Analytics, бұлттық аналитика, Power BI, ERP-ті оңтайландыру, есеп беру процесін оңтайландыру, мүдделі тараптармен ынтымақтастық, авиация саласы, Қазақстан.

¹Ким П.,

старший менеджер по управлению данными и аналитикой,
ORCID ID: 0009-0007-4938-8578,
e-mail: pavel.kim@airastana.com

¹АО «Эйр Астана», г. Алматы, Казахстан

УСПЕШНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДАННЫМИ: КЕЙС АВИАКОМПАНИИ В КАЗАХСТАНЕ

Аннотация

В данном исследовании всесторонне рассматривается стратегическое использование облачных сервисов авиакомпанией в Казахстане (далее – Авиакомпания) для оптимизации процессов генерации отчетов, снятия нагрузки с ее ERP (системы управления предприятием) и повышения общей эффективности управления данными. С ростом объемов и сложности данных, генерируемых в рамках современных бизнес-операций, необходимость в масштабируемых и эффективных решениях для управления данными стала особенно актуальной. Через интервью с ключевыми заинтересованными сторонами, анализ показателей производительности системы и наблюдение за процессами внедрения было достигнуто глубокое понимание сложностей и стратегий, связанных с интеграцией облачных решений. Результаты подчеркивают ключевую

роль облачных технологий в улучшении практик управления данными, обеспечении надежных процессов генерации отчетов и облегчении плавного масштабирования для удовлетворения развивающихся бизнес-потребностей. Исследование демонстрирует значительное сокращение времени на создание отчетов (улучшение на 95%) и подчеркивает вызовы и стратегии их преодоления в ходе процесса миграции. Этот кейс предлагает ценную информацию для организаций, стремящихся улучшить свои возможности управления данными и использовать облачные технологии для получения стратегических преимуществ, демонстрируя преобразующий потенциал облачных решений в оптимизации операций, стимулировании инноваций и содействии устойчивому росту в современных динамичных бизнес-условиях.

Ключевые слова: управление данными, Azure Synapse Analytics, облачная аналитика, Power BI, оптимизация ERP, оптимизация генерации отчетов, сотрудничество с заинтересованными сторонами, авиационная индустрия, Казахстан.

Article submission date: 21.10.2024

UDC 659.184.5
IRSTI 06.39.53

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-317-331>

¹***Rajasekhara Mouly Potluri,**

PhD, Professor of Management/Marketing, ORCID ID: 0000-0002-6935-1373,

e-mail: prmouly24@gmail.com

²**Madhavi Kilaru,**

Assistant Professor, ORCID ID: 0000-0002-1030-3860

e-mail: madhavi.aditi@gmail.com

¹**Kuralay Turarbekova,**

BBA Class of 2021-2025, ORCID ID: 0009-0004-7370-6335,

e-mail: kuralaytm@gmail.com

¹**Nikita Shevchik,**

BBA Class of 2020-2024, ORCID ID: 0009-0008-8506-9782,

e-mail: kitshevchik@gmail.com

¹Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

²Department of Humanities & Sciences VNR Vignana Jyothi Institute
of Engineering & Technology Hyderabad, Telangana, India

DIGITAL MARKETING INFLUENCE ON THE BUSINESS PERFORMANCE OF KAZAKHSTAN SMALL & MEDIUM ENTERPRISES (SMES)

Abstract

This study investigates the influence of digital marketing on the business performance of Kazakh Small and Medium-sized Enterprises (SMEs) managed by Muslims. The research employs a mixed-method approach, incorporating quantitative and qualitative data collection techniques. The findings reveal that social media marketing, search engine optimization (SEO), and email marketing are the most prevalent digital marketing practices adopted by Kazakh SMEs. However, challenges such as limited marketing budgets, difficulty measuring return on investment, and keeping up with trends hinder effective implementation. Despite these challenges, SMEs acknowledge the positive impact of digital marketing on their performance, reflected in areas like sales growth, customer acquisition, and brand awareness. The study concludes that digital marketing presents a powerful tool for Kazakh SMEs to enhance visibility, engage customers, and drive conversions, ultimately contributing to sustainable growth in the digital marketplace.

Key words: Digital marketing, SMEs, Business performance, Digital marketing trends, Technological innovation, Kazakhstan.

Introduction

In today's rapidly evolving digital landscape, businesses worldwide are increasingly recognizing the pivotal role of digital marketing in shaping their growth trajectory, and Kazakh Small and Medium-sized Enterprises (SMEs) are no exception. As the global marketplace becomes more interconnected, the significance of digital marketing strategies for Kazakh SMEs cannot be overstated. With its ability to reach vast audiences, target specific demographics, and foster meaningful engagement, digital marketing stands as a cornerstone for enhancing the performance and competitiveness of Kazakh SMEs in both local and international markets. Kazakhstan, situated at the crossroads of Europe and Asia, boasts a burgeoning entrepreneurial ecosystem characterized by a diverse array of SMEs spanning various industries. These SMEs play a crucial role in driving economic growth, fostering innovation, and creating employment opportunities within the country.

However, in an era defined by digitalization and technological advancement, the success and sustainability of Kazakh SMEs hinge significantly on their adeptness in harnessing the power of digital marketing tools and strategies. Digital marketing encompasses a broad spectrum of online tactics and channels to promote products, services, and brands, engage with target audiences, and drive conversions. From search engine optimization (SEO) and social media marketing to content creation, email campaigns, and pay-per-click advertising, the digital marketing arsenal offers Kazakh SMEs unprecedented opportunities to elevate their visibility, amplify their messaging, and expand their customer base. One of the key advantages of digital marketing for Kazakh SMEs lies in its cost-effectiveness and scalability. In an era of consumer empowerment and choice, delivering exceptional customer experiences is non-negotiable. Digital marketing enables Kazakh SMEs to engage with customers across multiple touchpoints, streamline the purchase journey, and provide personalized experiences tailored to individual preferences and needs. By prioritizing customer satisfaction and service excellence, SMEs can foster brand advocacy and positive word-of-mouth, driving sustainable growth in the long term. Unlike traditional marketing avenues that often require substantial financial investment, digital marketing enables SMEs to achieve significant results with relatively modest budgets. Whether through targeted social media ads, email newsletters, or search engine campaigns, Kazakh SMEs can leverage digital channels to maximize their marketing ROI while optimizing their expenditure [1].

Furthermore, digital marketing empowers Kazakh SMEs with invaluable insights into consumer behavior, preferences, and trends. Through analytics tools and data-driven metrics, SMEs can refine their real-time marketing strategies, adapt to changing market dynamics, and tailor their offerings to meet evolving customer demands. By harnessing the power of data analytics, Kazakh SMEs can gain a competitive edge, identify untapped market segments, and capitalize on emerging opportunities for growth and expansion. In a digitally connected world where consumers are inundated with information and choices, the ability of Kazakh SMEs to craft compelling narratives, build authentic brand identities, and cultivate meaningful relationships with their target audience is paramount. Digital marketing platforms catalyze engagement, facilitate two-way communication, and nurture customer brand loyalty. Digital marketing enables Kazakh SMEs to transcend geographical barriers and tap into new markets domestically and internationally. Through targeted online campaigns and localized content, SMEs can engage with diverse audiences, penetrate niche segments, and establish a strong foothold in competitive markets. Building brand visibility and recognition in a crowded marketplace is paramount for Kazakh SMEs striving to stand out. Digital marketing platforms offer SMEs unprecedented opportunities to elevate their brand presence, cultivate a distinct identity, and foster top-of-mind awareness among consumers. The influence of digital marketing on the business performance of Kazakh SMEs cannot be overstated.

The wealth of data generated through digital marketing initiatives empowers Kazakh SMEs to make informed, data-driven decisions. By analyzing consumer insights, tracking campaign performance, and measuring key metrics such as conversion rates and customer engagement, SMEs can optimize their marketing strategies, allocate resources effectively, and maximize returns on investment. As technology continues to reshape the business landscape, embracing digital marketing strategies is no longer a luxury but a necessity for SMEs seeking to thrive in the modern marketplace. By harnessing the power of digital marketing, Kazakh SMEs can amplify their reach, enhance their competitiveness, and chart a course toward sustained growth and prosperity in an increasingly digitalized world. The transformative impact of digital marketing on the business performance of Kazakh SMEs extends far beyond mere visibility or lead generation. By embracing digital-first strategies, leveraging cutting-edge technologies, and prioritizing customer-centricity, SMEs can unlock new avenues for growth, drive operational efficiency, and thrive in an increasingly interconnected and competitive global marketplace. As digitalization redefines the business landscape, the imperative for Kazakh SMEs to embrace digital marketing as a core driver of growth and innovation has never been more compelling. Keeping in mind the significance of digital marketing in the present digitalized world, the scholars initiated the present study to assess the influence of digital marketing on the business performance of Kazakhstan's small and medium enterprises.

Literature Review

In Kazakhstan's rapidly evolving business landscape, Small and Medium-sized Enterprises (SMEs) represent the backbone of the economy, contributing significantly to economic growth, job creation, and innovation. As the digital era unfolds, adopting digital marketing strategies has become imperative for Kazakh SMEs to remain competitive, expand their market reach, and enhance their overall business performance [2]. This literature review aims to explore the influence of digital marketing on the business performance of Kazakh SMEs by synthesizing existing research, scholarly articles, and industry reports [3]. Kazakhstan's digital landscape has undergone significant transformations in recent years, driven by technological advancements, changing consumer behavior, and increasing internet penetration. With over 19 million internet users and a growing e-commerce market, the opportunities for SMEs to leverage digital marketing are vast. Social media platforms, search engines, and mobile applications have become integral channels for SMEs to engage with consumers, build brand awareness, and drive sales. Underscores the positive correlation between digital marketing adoption and SME performance in Kazakhstan, which is a welcoming sign to any kind of business, irrespective of the type and magnitude of business. Digital marketing channels such as social media, search engine optimization (SEO), email marketing, and content creation offer Kazakh SMEs unprecedented opportunities to amplify their visibility, engage with target audiences, and drive conversions.

SMEs that effectively leverage digital marketing tools experience higher levels of brand awareness, customer engagement, and revenue growth than those reliant solely on traditional marketing methods [4]. Kazakh SMEs encounter challenges and barriers in embracing digital marketing practices despite the potential benefits. Digital marketing offers Kazakh SMEs numerous advantages over traditional marketing methods. Firstly, it provides cost-effective solutions for reaching target audiences, allowing SMEs to allocate resources more efficiently. Digital marketing offers greater flexibility and scalability, enabling SMEs to tailor their campaigns to specific demographics and market segments. Through analytics and data-driven insights, SMEs can measure the effectiveness of their marketing efforts in real time, optimizing strategies for maximum impact. Factors such as limited digital literacy, resource constraints, and infrastructure gaps are primary impediments to digital marketing adoption among SMEs in Kazakhstan [5]. One of the primary benefits of digital marketing for Kazakh SMEs is the ability to enhance visibility and expand market reach. With the proliferation of social media platforms and search engines, SMEs can reach potential customers across diverse demographics and geographic locations. Through targeted advertising and search engine optimization (SEO) techniques, SMEs can ensure their products and services are visible to relevant audiences, driving website traffic and increasing brand awareness. Regulatory complexities, cultural norms, and socio-economic disparities pose significant challenges to SMEs seeking to integrate digital marketing into their business strategies [6]. Digital marketing enables Kazakh SMEs to engage with customers more personally and interactively. Through social media marketing, email campaigns, and content creation, SMEs can foster meaningful relationships with their audience, soliciting feedback, addressing concerns, and providing value-added content. By actively engaging with customers through digital channels, SMEs can build brand loyalty and advocacy, leading to repeat purchases and referrals. Understanding consumer behavior and market dynamics is essential for the success of digital marketing initiatives among Kazakh SMEs. Kazakh consumers' evolving preferences, purchasing habits, and online engagement patterns [7]. Kazakh consumers exhibit diverse behaviors influenced by demographic factors, cultural nuances, and technological advancements.

The goal of digital marketing for Kazakh SMEs is to drive conversions and generate revenue. By implementing effective digital marketing strategies, SMEs can influence purchasing decisions, nurture leads, and guide prospects through the sales funnel. Through compelling content, targeted advertising, or persuasive call-to-action strategies, digital marketing channels offer SMEs opportunities to convert leads into customers and increase sales. Digital marketers must tailor their strategies to resonate with local preferences, language requirements, and socio-economic trends to effectively engage with

target audiences and drive desired outcomes [8]. Technological innovation and emerging trends in the digital marketing landscape are reshaping the strategies and tactics employed by Kazakh SMEs. Highlight the transformative potential of emerging technologies such as artificial intelligence, big data analytics, and mobile marketing in optimizing marketing performance, personalizing customer experiences, and gaining competitive advantages. Despite the numerous benefits, Kazakh SMEs face challenges and considerations when implementing digital marketing strategies. Limited digital literacy among SME owners and employees, inadequate infrastructure, and resource constraints can hinder the effective execution of digital marketing campaigns.

Additionally, cultural differences, language barriers, and regulatory complexities may present challenges for SMEs seeking to engage with diverse audiences in Kazakhstan's multicultural society [9]. As the global marketplace becomes increasingly digitalized, adopting digital marketing strategies has become imperative for Kazakh SMEs to remain competitive and sustain growth. Kazakhstan's most commonly followed digital marketing trends are: 1. Mobile-First Strategy; 2. Social Commerce; 3. Video Marketing; 4. Personalization and AI; 5. Voice Search Optimization.

Regarding these trends, the researchers can say that for the first option, with the proliferation of smartphones and increasing mobile internet penetration, businesses in Kazakhstan prioritize mobile optimization in their digital marketing efforts. Mobile-friendly websites, responsive design, and mobile apps are becoming essential tools for reaching and engaging consumers on the go [10]. Social media platforms like Instagram, Facebook, and VKontakte are channels for brand awareness and engagement and avenues for direct sales. Kazakh businesses leverage social commerce features such as shoppable posts, in-app purchases, and influencer collaborations to drive sales and conversions directly from social media platforms [11]. Video content consumption is surging in Kazakhstan, prompting businesses to invest in video marketing strategies. Short-form videos on platforms like TikTok and YouTube and live-streaming content are gaining popularity among Kazakh consumers [12]. Businesses incorporate video content into their marketing campaigns to capture attention, tell compelling stories, and showcase products or services engagingly. Personalization is becoming increasingly important in digital marketing strategies in Kazakhstan. Businesses leverage artificial intelligence (AI) and machine learning algorithms to analyze consumer data, predict behavior, and deliver personalized experiences across various touchpoints [13]. From tailored product recommendations to dynamic content customization, personalization enhances customer engagement and drives conversions. With the rise of voice-enabled devices and virtual assistants like Siri, Google Assistant, and Yandex Alice, voice search optimization is a crucial aspect of digital marketing in Kazakhstan [14]. Businesses are optimizing their content and websites for voice search queries, understanding the nuances of conversational language and long-tail keywords to improve visibility and accessibility in voice search results [15].

These trends reflect Kazakhstan's evolving digital landscape, presenting opportunities for businesses to innovate and connect with consumers meaningfully. By embracing these trends and adapting their digital marketing strategies accordingly, companies can stay ahead of the curve and succeed in Kazakhstan's dynamic marketplace. Kazakh SMEs that embrace technological innovation are better positioned to adapt to changing market dynamics, anticipate consumer needs, and capitalize on emerging opportunities in the digital marketplace [16]. Government policies, regulatory frameworks, and institutional support mechanisms are crucial in facilitating digital entrepreneurship and SME development in Kazakhstan. Scholars and policymakers advocate for policy reforms, investment incentives, and capacity-building initiatives to promote digital literacy, entrepreneurship education, and technology adoption among Kazakh SMEs [17]. Public-private partnerships, industry collaborations, and knowledge-sharing platforms are essential for creating an ecosystem conducive to SME growth and innovation in the digital age. The literature underscores the transformative impact of digital marketing on the business performance of Kazakh SMEs. By addressing barriers to adoption, leveraging consumer insights, and embracing technological advancements, Kazakh SMEs can unlock new avenues for growth, enhance competitiveness, and achieve sustainable success in the digital marketplace. Future research should continue to explore emerging trends, best practices, and

policy interventions to advance Kazakh SMEs' digital maturity and foster a vibrant entrepreneurial ecosystem. Digital marketing has emerged as a powerful tool for driving the business performance of Kazakh SMEs. By enhancing visibility, engaging with customers, and driving conversions, digital marketing enables SMEs to compete effectively in the digital marketplace and achieve sustainable growth. However, realizing the full potential of digital marketing requires SMEs to overcome challenges, invest in digital capabilities, and adapt to evolving consumer trends. As Kazakhstan's digital ecosystem grows, SMEs must embrace digital marketing as an essential component of their growth strategies, leveraging its transformative power to thrive in an increasingly digital world.

Research Methodology

This research employed a mixed-method approach incorporating quantitative and qualitative data collection techniques. Therefore, its outcomes comprehensively studied the influence of digital marketing on the performance of Kazakh SMEs. Well-structured and self-administered survey instruments were administered to garner the opinions of Kazakh SME owners and managers. The survey instruments were designed and developed in English and translated into local vernacular languages like Russian and Kazakh. This helped tremendously to collect a significant number of respondents' opinions, which facilitated the conduct of statistical analysis and generalized the underlying outcomes of the survey. The study used standardized parameters to apply digital marketing methods to business performance to ensure valid and impartial data retrieval. Among the statistical tools, correlation, and regression tests were administered to analyze the collected data, prove the selected hypotheses, and measure the relationship between digital marketing exercises and business performance indicators. The study approach of this study also included semi-structured interviews with representatives from Kazakh SMEs to gain in-depth knowledge about their digital marketing experience, its performance impacts, and the intricacies of social life within the Kazakh business environment. Data collection was initiated and completed within a month and has given the researchers a broader picture of how digital marketing and business performance are mutual. The amalgamation of qualitative and quantitative data increases the reliability and authenticity of studied outcomes by involving diverse viewpoints.

The researchers developed a confident sampling plan with a clear sampling unit, procedure, and method. The present study collected the opinions of owners and executives of different small and medium enterprises in Almaty, Kazakhstan, who are endowed with critical information on their respective enterprises' digital marketing practices and performance. The following sampling methods could be implemented for the research: 1) Classification, 2) Recognition, and Authentication. 1. Stratified Random Sampling: The stratification of Kazakh small-and-medium enterprises (SMEs) is done to separate the SME population into the different strata, which are classified under the various industry sectors, for instance, retail, manufacturing, and the services sectors. After that, participants will be chosen systematically from each set in a manner that reflects the number of SMEs in this population. This approach aims to ensure that the survey questions will be representative of Kazakh SMEs according to industry distribution, which can provide sound comparisons and generalizations based on the research. 2. Online Sampling Panels: The effectiveness of utilizing experts' online sampling panels is partly due to them offering a quick and easy way to reach participants with specific traits, such as being residents of Kazakhstan and business owners. Online sampling panels may be effective in their convenience and expansiveness, broadening the pool of potential respondents while aiding in the facilitation of data collection in a short time. An effort is made to apply a strong sampling plan, including both stratified random sampling and online sampling panels, to this research, which intends to have a random and representative sample of Kazakh SME owners and top managers. This way, the authors ensure a holistic understanding of Kazakh companies' digital marketing exercises and business outcomes, which will help create trustworthy findings. The investigators planned to collect more than three hundred Kazakhstan SME owners by administering all possible ways to contact the respondents, mainly doing business in the Almaty region. The investigators personally

contacted the targeted respondents even after initial contact approaches over the phone and email communications with poor responses. They collected this number after a clear explanation of the objective of the research study. However, the scholars identified it as an arduous task because of the most targeted respondents' reluctance. Finally, even after the series of requests, the investigators received only 74, considering a core limitation of this study.

This paper is coupled with a research proposal to define the parameters and goals of a study that investigates the role of digital marketing on SME performance in Kazakhstan. The focal objective of the article is to generate thorough data to understand the subtle dynamics between digitization and Kazakhstan SMEs' performance. The specific objectives of the research are outlined as follows:

Examine Digital Marketing Practices: This research considered the topic in the round and subsequently disclosed the digital marketing environment within small and medium-scale firms in Kazakhstan. It is conducted through all the different digital marketing channels, such as social media marketing, search engine optimization (SEO), and email marketing, which these enterprises use. Besides, the research shed light on the extent and profundity to which small and medium enterprises (SMEs) use these digital marketing strategies in Kazakhstan. **Assess Perceived Business Performance:** The main thing that should be emphasized is the assessment of the attitude towards the digital marketing measures on the performance of the SMEs in Kazakhstan. The research utilizes qualitative and quantitative methods that subject changes in key performance indicators (KPIs) pre- and post-digital marketing implementations to rigorous scrutiny. Such key performance areas could include retail sales growth, customer acquisition spending, marketing metrics assessing brand awareness, and website traffic regularity, where appropriate. **Identify Challenges and Opportunities:** In addition to identifying and examining the issues faced by Kazakh SMEs in digital marketing implementation and practice, this research mission is shaped by another crucial aspect. Thus, the study is an effort initiated by the researchers to reflect not only the outward opportunities for digital marketing encouragement in the growth of the business environment but also the silent ones for power and market strength promotion.

Results and Discussion

This poll provided an overview of some of the practices of digital marketing that Kazakh SMEs use in terms of channels, scales of activity, platforms, ethical aspects, and so on. However, social media marketing has proved to be the top choice among all the practices, followed closely by search engine optimization (SEO) and email marketing, which has also been the primary choice. At the same time, hurdles like scarce marketing budgets, hardness of the measurement of return on investment, and staying up to date with trends were frequent complaints of the participants, implying that there are some areas for digital marketing strategies to be improved. Nevertheless, the examination considered demographic factors like the number of years in business, the number of employees, and the extent of penetration into the digital marketing domain. Companies report an average period of operation of 4 years, with an average number of eight staff and an average efficiency rating of 3.6 out of 5. Besides, the participants showed an average of 500 monthly website visitors and 30 likes, shares, or comments on social media posts. Moreover, the statistical significance of the groups was tested by focusing on the differences between online education providers through physical school and hybrid schooling. Dummy variables representing educational modes have been used for data analysis so that they can be compared to each other. We utilized mathematical methods such as means, standard deviation, and correlation, among other statistical tools, to bring out patterns and make deductions about the impact of digital marketing on the business performance of students with different education levels. However, our work gives a great deal of information about the digital marketing space of Kazakh SMEs, which includes standard practices, the issues encountered, and the characteristics of demography, in a way that we can explore the role of educational modes in applying to digital marketing effectiveness and success of business. Accordingly, when conducting the linear regression for the indicated digital marketing policies, we'll separately use the dependent variable

(perceived efficiency of digital marketing) and the independent variable (for each digital marketing policy: social media marketing, SEO, email marketing). Here's a summary of the regression analysis on digital marketing policies.

Table 1 – Regression Statistics Analysis (N=74)

Digital Marketing Practice	Coefficient	Standard Error	t-statistic	p-value
Social Media Marketing	0.35	0.08	4.38	<0.001
Search Engine Optimization	0.27	0.09	2.98	0.004
Email Marketing	0.42	0.06	6.93	<0.001
Content Marketing	0.18	0.07	2.57	0.012
Pay-per-Click Advertising	0.10	0.10	1.00	0.320
Online Marketplaces	0.21	0.08	2.63	0.010

The regression analysis yields the following results:

Table 1 highlights the regression analysis results, the strength of the association of different digital marketing activities, and the extent SMEs perceive them as influential in Kazakhstan. Social media marketing has a positive coefficient of 0.35, an SE of 0.08, and a t-statistic of 4.38, which gives a p-value of < 0.001, showing a positive influence. Likewise, the coefficient for search engine optimization is a statistically and economically significant 0.27 (standard error = 0.09; $t = 2.98$; $p < 0.0001$). Interestingly, email marketing has the greatest influence and is the most significant factor in the model, with a coefficient of .42, SE of .06, a t-value of 6.93, and a p-value <.001. Similarly, for content marketing, we have a coefficient value = 0.18, SE = 0.07, $t = 2.57$, and p.value = 0.012. As for online marketplaces, their CIs are 0.21, SE 0.08, and t-statistic 2.63, giving a p-value of 0.010. However, PPC advertising has no statistical significance; its coefficient = 0.10, SE = 0.10, $t = 1.00$, where $p = 0.320$, suggests no such relation here.

The results indicated in this study imply that most digital marketing practices under consideration enhance the perceived effectiveness significantly and positively, but not all the strategies. Among the tools investigated, social media marketing and email marketing showed the highest coefficients and significance, indicating the effectiveness of these strategies for SMEs willing to promote their business online. At the same time, the insignificance of pay-per-click advertisement imply that it might not be valuable enough in such context, and in such context, would need to be replaced with or fine-tuned to help yield desired results. In sum, the findings stress the relevance of employing targeted digital marketing tactics to improve the perceived overall effectiveness and make a case for investing in such tactics in the capacities where they have been found to have the most significant impact.

The regression analysis results shown in Table 1 demonstrate that certain digital marketing practices have different impacts on perceived effectiveness by SMEs in Kazakhstan. Marketing on social networking sites turned out to be significant with a coefficient of 0.35, SE of 0.08, and a t statistic of 4.38, indicating a substantial and statistically significant impact ($p < 0.001$). Likewise, the coefficient for email marketing was found at 0.42, coupled with the low standard error of 0.06 and a very high t-statistic of 6.93/, indicating the strong impact of email marketing on overall marketing effectiveness <nn=30, $p < 0.001$ >. The SEO with an independent variable coefficient of 0.27 ($t = 2.98$) = 0.004 was also significant with a mean standard error of 0.09, again indicating that SEO had a moderately meaningful impact on the dependent variable. As for content marketing, they were statistically significant but slightly smaller, having a coefficient of 0.18 and t equals 2.57. The coefficient value was 0.21 with an SE figure of 0.08 and t-stat = 2.63, which justified the statistical significance ($p = 0.010$) for online marketplaces. However, pay-per-click advertising was found to have a coefficient of 0.10, a standard error of 0.10, and t statistics of 1.00, which was insignificant with a p-value of 0.320. Compared to the other four tactics analyzed in this paper, this implies that their influence in defining perceptions of marketing effectiveness may be distorted or weak.

Thus, further, these results highlighted the variations in the effectiveness of digital marketing tools for SMEs. Specific techniques such as social media marketing, email marketing, and SEO are seen as the most effective of all the various strategies, as they have been found to enhance perceived marketing communication response and achieve more meaningful engagement. The less substantial findings related to pay-per-click advertising underscore the worthwhile approach to its practice or the need to rethink the concept's usage within the advertising mix's framework. The above findings provide valuable recommendations to SMEs operating in Kazakhstan that seek to enhance their digital marketing strategies.

Null Hypothesis 1: There is no relationship between the size (number of employees) of a Kazakh SME and its perceived effectiveness in digital marketing.

Table 2 – Regression Statistics Analysis (N=74)

ANOVA	Df	SS	MS	F	Significance F
Regression	1	6418,13889	6418,13889	335,551492	3,287E-17
Residual	26	528,861111	17.8521825		
Total	27	6947			

	Coefficients	Standard Error	P-value
Intercept	15,2636669	4,43743023	7,3999E-06
Quality	12,9305556	16,4540373	3,309E-17

Regression Statistics	
Multiple R	0.87530907
R Square	0.83360923
Adjusted r square	0.7936351
Standard Error	2.09937296
Observation	74

The regression analysis results in Table 2 provide rich information on the association between the size of the Kazakh SMEs and their estimated digital marketing efficiency. Evaluating the Multiple R at 0.875 shows that the correlation between the dependent and independent variables is positive and strongly linear; as soon as one increases, the other increases predictably. This correlation indicates a significant relationship that needs an investigator to take the next step to establish the extent of the impact. The R Square, now at 0.834, shows that 83.4% of the variation in the dependent variable can be attributed to the independent variable – this confirms that the model has captured the dynamics of the relationship well and only leaves a tiny proportion of variation in the dependent variable unexplained. The obtained Adjusted R^2 of 0.794 refines this interpretation based on the degree of freedom to give a more conservative index of fit and, by doing so, underlines the stability reliability of this model, mainly when applied to larger populations or other related studies. Also, the coverage by the Standard Error, which is at 2.099, helps ascertain that the observation of the prediction level agreement is relatively low, thus improving confidence in the actual level of prediction accuracy of the employed model.

It is, therefore, perfect that the ANOVA results support the credibility of the regression model. Based on an F-statistic of 335.55 and a calculated p-value of 3.287E-17, the tools also attest to the statistically high accuracy of the model. The p-value is less than 0.05; hence, it is deficient,

showing that the results are not a chance or a mere probability, proving that the independent variable influences the dependent variable significantly. Primarily, this paper's prominent level of fit confirms the effectiveness of the regression model in establishing relationships in this setting. This reflection can be further supported by analyzing the coefficients added to the equations. The intercept is further 15.26, which signifies the fact that this would be the value of the dependent variable if the independent variable is zero; on the other hand, the p-value of the intercept is 7.3999E-06, which also signified the fact that this gives the base effect for the dependent variable when the independent variable is null hence was not a mere chance. Looking at the results in Table 7.3, we can see that the coefficient for the "Quality" variable is 12.93, which is relatively high and positive, indicating a high level of positive relationship, which suggests that it is expected that for every unit change in the independent variable, there will be corresponding unit change of 12.93 in the dependent variable. This effect is further supported by a low p-value of 3.309E-17; the subsequent argument justifies the reliability of this relationship and the applicability of quality as an independent variable in determining SME's efficiency in digital marketing. Therefore, these findings present a complex state of affairs regarding the relationship between SME size and the various aspects of digital marketing success. This should be helpful for future researchers and practitioners engaged in developing more effective strategies for this kind of business.

The (output)regression analysis results(input) confirm a strong and statistically significant positive relationship between "Quality" and the independent variable(input). As the researchers defined it in the study, this implies that the mark of a better one has a considerable positive bearing on this study's findings. Here's a more profound interpretation breakdown: Strength of the Relationship: Multiple R (0.875): This value points to a robust positive relationship between "Quality" and a dependent variable. The hypothesis to be tested is that a perfect inverse relationship displays itself: as quality increases, the dependent variable also increases. As highlighted in Table 2 under the heading of regression statistics, the explanatory power: R-squared (0.833): Therefore, the coefficient of determination that is higher than 0.8 (or 0.833, to be exact) states that the "Quality" explains a substantial variability (83.3%) of the dependent variable. However, it must be said that other factors that were not part of the model and that couldn't be ruled out as a cause of the dependent variable may be at play. Statistical Significance: ANOVA Table: F-statistics (335.55): An F-statistic generated by the model with a significant* indicates the model is significant (*provided the model is not statistically significant; an F-statistic generated of zero indicates the model is not). P-value (3.309E-17): For the matter of "Quality," an extremely low p-value suggests that the link between it and the exogenous variable is very unlikely to happen due to randomness. Coefficient Interpretation: Intercept (15.26): The intercept, statistically significant for the reviewers, looks to the much-awaited score when "Quality" is zero. The value of the initial assessment can be the average score of the dependent variable for the participants having the worst perceived quality. "Quality" Coefficient (12.93): The constant value for "Quality" and the positive and statistically significant value for the dependent variable, which is 12.93 units for each of the increasing "Quality" units. In this way, it stresses to what extent quality in independent variables is the reason for dependent one.

Null Hypothesis 2: The level of digital marketing budget has no impact on the perceived effectiveness of digital marketing for Kazakh SMEs.

Table 3 – Regression Statistics Analysis (N=74)

ANOVA	Df	SS	MS	F	Significance F
Regression	1	1701,73241	1701,73241	141,923284	1,7678E-12
Residual	23	335,734252	11,990509		
Total	24	2037,46667			

Continuation of table 3

	Coefficients	Standard Error	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	23,6692913	18,1031898	2,8836EE-20	50,9382422	60,4003404
Quality	6,08858268	12,9131559	1,7678E-12	5,8697366	8,30742876
Regression Statistics					
Multiple R	: 0.92290358				
R Square	: 0.81521976				
Adjusted R Square	: 0.80933475				
Standard Error	: 5.46273144				
Observation	: 74				

Table 3 emphasizes Regression Statistics related to hypothesis 1: * Multiple R: is 0.922, indicating a strong positive linear relationship between the dependent and independent variables. * R Square (R^2): The coefficient of determination is 0.815, suggesting that the independent variable explains 81.5% of the variance in the dependent variable. * Adjusted R Square: The adjusted R Square is 0.809, which considers the number of predictors in the model. * Standard Error: 5.463, showing the average distance between observed and predicted values. * Coefficients: Intercept: The intercept is 23.67, and its statistical significance is supported by a t-statistic of 18.10.

Deeper Exploration of Results Implication of Regression Analysis (Rejection of) (Null Hypothesis 2). This regression analysis delivers convincing data that the level of digital marketing budget has a significant positive correlation with how well SMEs in Kazakhstan evaluate their digital marketing endeavors. Strength of the Relationship: Multiple R (0.923): Such high value, closely associated with a strong positive association between digital marketing budget and perceived effectiveness, can be taken as proof. For the same budget, the perceived effectiveness of the country's secrets agent, i.e., excellence, is expected to be high. Explanatory Power: R-squared (0.815): This implies that the digital marketing budget significantly impacts what people think of the marketing campaign's effectiveness. It explains 81.5% of the variation. It is necessary to judge that though other factors being left out of the model may influence the response's effectiveness, the budget appears very controversial.

Statistical Significance: ANOVA Table: F-statistic (141.92): the model with a very significant F-statistic suggests that the overall model is statistically significant. P-value (1.7678E-12): One of the compelling arguments for the external validity of this study is the p-value being extremely low. We have no hesitation in rejecting the null hypothesis with high confidence. Coefficient Interpretation: Intercept (23.67): The statistically specific intercept implies the value of business effectiveness, which is nearly thirty-three, even if a small business isn't allocated any budget for digital marketing. This could be an expression of traditional marketing efficiency or the general attitude towards marketing, which includes any offline and online strategies. Budget Coefficient (6.09): The significant and positively connoted coefficient p-value = 1.7678E-12 of budget (1 unit increase causes the score to go up by 6.09 units) proves the strong relationship between budget and the perceived effectiveness of the campaign. Thus, the budget asserts the positive regard for effectiveness shown by people. Statistically Significant Relationships: The researchers have discovered in the process of our research how digital marketing impacts the overall performance of small and medium enterprises in Kazakhstan. Several relationships among the indicators were statistically significant, so we think we should look at them again. Our in-depth analysis, conducted carefully and without bias, will unveil captivating patterns of interplay among various digital marketing tools applied by Kazakh SMEs and highlight the perceived usefulness of these techniques.

This constellation of digital marketing actions has allowed us to observe statistically significant positive correlations on perceptions of campaign effectiveness ($p < 0.05$). Moreover, social media marketing, search engine optimization (SEO), email marketing, content marketing, and engagement in online marketplaces have been proven to be strong indicators showing that business success and efficiency perception are closely linked to these options. It seems that empirical evidence endorses the strategic importance of these digital marketing avenues, which have those business dashboards of Kazakh SMEs who employ such tools perceived as the critical factor in bettering their performance metrics. Unlike the PPC sector, we see a positive relationship in terms of brand recall. However, our findings show no statistical relation between PPC marketing and perceived effectiveness. Such a deliberating statement makes us pause and broaden the theme of the delicate issues when it comes to the PPC implementation of SMEs from Kazakhstan. Since the budget for PPC might not always correlate with the measurement of the effectiveness of the same PPC, the discovery of the exploratory intention to any weakness or obstacles that hamper the PPC of the target group comes. One of the benefits of such a study would be to describe PPC application peculiarities as related to the Kazakh micro, small, and medium enterprises and, on this basis, launch the development of specific programs or introduce strategic innovations. Therefore, real and virtual, significant and not significant relations appear to form a multilayer web in SMEs in Kazakhstan, implying that the marketing scenario of digital marketing is more complicated. Despite the task of producing a comprehensive and realistic synthesis as a part of our pledge, the scholars would not lose track, with fact-oriented reasoning and thoroughly substantiated conclusions as the final output.

Managerial Implications

The impacts arising out of this study are versatile and cannot be undervalued when it comes to the strategies of digital marketing development of SMEs in Kazakhstan. Correlations found in Internet marketing techniques and the consumer perception document will explain these companies' marketing. Moreover, the evidence of the benefits received by the Kazakh small and medium-sized enterprises on the occasion of the implementation of digital marketing tactics helps to realize the profitability of the marketing measures with the assistance of technological capabilities. Through utilizing digital channels such as social media marketing, SEO, email marketing, content marketing, and its marketplaces, these small businesses may remarkably raise their access to the market, interaction with customers, and ultimately brand awareness. They can reach potential customers via social media, SEO, email, content, and e-commerce websites. The channels rated as particularly effective, as indicated by participants, illustrate the critical role of these channels for a digital marketing mix of SMEs required in the digital era. These channels give SMEs various chances to interact and have valuable conversations with potential customers, drive traffic, and connect with them as they expect because of the fast digital world.

Additionally, the role of such innovations will be further articulated in the implementation of future research projects. While this research sheds light on the overall impact of the digital marketing techniques applied, it is possible to attain even more, aiming at detailed associations between the successful practices of SMEs applied within the framework of each channel. Researchers should try to find out the dedicated routes followed by affirmative SMEs. Discovery would be motivational policies based on values and standards within the industry and innovative procedures. After that, this understanding would educate and set SMEs for digital marketing use.

In conclusion of this part, the digital marketing of SMEs in Kazakhstan points to the revolutionary nature of digitalization. It imposes a need for professional handling and using various digital marketing tools. As a result of more intense research and the evaluation of digital marketing tactics in the public domain, local SMEs play a more active role in more business environment competition since it's more digitized nowadays.

Conclusion, limitations, and scope for further study

Thus, this research yields relevant information concerning digital marketing tools' usage and perceptual usefulness among Kazakh SMEs. The results imply that digital marketing activities are becoming more commonly implemented in SMEs, emphasizing SMM, SEO, e-mail marketing, content marketing, and online marketplace – being the most common and effective. Social media marketing was observed to be the most popular, as SM is easily accessible, popular, and helpful in engaging the customer and creating brand awareness. The survey's Likert average score of 3.6 implies that SMEs realize that digital marketing efforts are moderately effective and there is potential for these efforts to provide a greater return. At the same time, the survey also reveals several significant issues that even the heavy users of the identified types of digital marketing face: a) restricted marketing budgets, b) absence of internal resources, and c) problems with evaluating the I/Returns. Such challenges inhibit the optimal utilization of digital marketing and prevent SMEs from achieving the optimal impact on their marketing strategies.

Moreover, the breakdown of respondents by industry type, retail, manufacturing, and service industries did not show any differences in the perceived efficacy of digital marketing in achieving marketing objectives, meaning digital marketing is effective across industries. The implication of such findings suggests that digital marketing is equally viable for SMEs across different sectors with the possibility of industry-specific tactics needed to overcome disturbing trends or tap into opportunities. All in all, Kazakh SMEs are gradually improving digital marketing usage, but much more remains unexplored. Some of the challenges mentioned in the study include budget limitations and the need for professional skills in using digital marketing tools; steps taken to address these challenges would go a long way in improving the effectiveness of digital marketing. To give practical guidance, subsequent studies can specify various approaches and techniques SMEs can use in each digital marketing category of the present research. The development of better ways of digital marketing enables Kazakh SMEs to enhance their positioning and customer touch points as well as the performance of their businesses when exposed to the digital economy.

Limitations and Scope for Further Study

However, this work, which reveals the state of Kazakh SMEs' digital marketing, has limitations. Though 74 respondents are sufficient for exploratory analysis, the target group includes many more SMEs in Kazakhstan, with representation that is not entirely diverse enough in this study. Because the survey targets business owners and top managers, the results could be colored by managerial bias based on the subjects' strategic position, which differs from the many employees or other stakeholders involved in translating strategic objectives into operational activities in digital marketing. Furthermore, using self-estimated values leads to potential response biases, including self-reported measures, such as social desire bias; respondents habitually overestimate the efficacy of digital marketing strategies. Also, the study limited the assessment to only five digital marketing strategies: social media, search engine, email, content, and online marketplace strategies, without considering others most likely to impact the system, such as influencer, affiliate, or mobile strategy. By excluding these practices, they reduce the range of opportunities for SMEs to improve their digital marketing performance. In addition, what was measured was perceived effectiveness rather than actual effectiveness in business performance, showing levels of revenue growth, customer acquisition, or other concrete performance indicators that could have been related to certain digital marketing practices. As for further research, the subject should consider widening the sample size to gather information from the considerable number of SMEs in different Kazakhstan regions.

Moreover, it would be interesting to get the opinion of corporate employees, digital marketing specialists, or even outside consultants on what will be instrumental in determining success or failure in digital marketing. Further research may also examine the business consequences of digital marketing strategies, allowing for more of an understanding of how and to what extent digital marketing impacts brand sales, market share, and customer loyalty. More comprehensive research involving monitoring marketing initiatives over time would be more helpful in explaining the changes in these strategies and their benefits to enterprises eventually. However, research emphasizing specific sectors and digital marketing strategies might give recommendations for SMEs in various fields. Therefore, considering the impact of other novel technologies in digital marketing for SMEs based on artificial intelligence, data analysis, and automation would be beneficial for highlighting how such enterprises could use technological trends to achieve more in the highly competitive digital environment.

REFERENCES

- 1 Duisebayeva M. Creating an effective digital channel for sales and promotion of IT services in the B2B segment: The case of Ismet.kz. Doctoral dissertation, M. Narikbayev KAZGUU University (Kazakhstan), 2022.
- 2 Akhmetova A. The impact of digital marketing on SME performance: Evidence from Kazakhstan. *Journal of Business Research*, 2018, vol. 15, no. 2, pp. 123–135.
- 3 Zhanatbekova B. Digital marketing strategies and SME growth: Insights from the Kazakh market. *International Journal of Marketing Studies*, 2020, vol. 8, no. 4, pp. 76–88.
- 4 Kozhamzharova C. Barriers to digital marketing adoption among Kazakh SMEs. *Journal of Small Business Management*, 2019, vol. 25, no. 3, pp. 267–280.
- 5 Duisenova D. Digital marketing literacy among Kazakh SMEs: Challenges and opportunities. *Journal of Entrepreneurship*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 45–58.
- 6 Alimzhanova E. Understanding consumer behavior in the Kazakh market: Implications for digital marketing strategies. *Central Asian Journal of Business Administration*, 2017, vol. 3, no. 2, pp. 189–201.
- 7 Suleimenova F. Digitalization and consumer preferences in Kazakhstan: A market analysis. *International Journal of Consumer Studies*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 421–435.
- 8 Kudaibergenov G. Technological innovations in digital marketing: Implications for Kazakh SMEs. *Journal of Marketing Innovation*, 2018, vol. 7, no. 3, pp. 312–325.
- 9 Peko S., Meyer H., Myssayeva K. You can't censor live: Technology acceptance drives Central Asian journalists to mobile and helps them overcome press restrictions. *Media Asia*, 2019, vol. 46, no. 3–4, pp. 63–77.
- 10 Leonow A.I., Koniagina M.N., Petrova S.V., Grunt E.V., Kerimkhulle S.Y., Shubaeva V.G. Application of information technologies in marketing: Experience of developing countries. *Revista Espacios*, 2019, vol. 40, no. 38.
- 11 Steckman L.M., Andrews M.J. (Eds.). *Online around the world: A geographic encyclopedia of the Internet, social media, and mobile apps*. Bloomsbury Publishing USA, 2017.
- 12 Chen L., Sokolovskiy K., Zhang M., Kolosova O. The impact of e-service quality and e-satisfaction on users' loyalty to TikTok in Russia and China. *Journal of Marketing Communications*, 2023, pp. 1–15.
- 13 Gkikas D.C., Theodoridis P. K. AI in consumer behavior. *Advances in Artificial Intelligence-based Technologies: Selected Papers in Honour of Professor Nikolaos G. Bourbakis*, 2022, vol. 1, pp. 147–176.
- 14 Vtyurina A. Supporting voice-based natural language interactions for information seeking tasks of various complexity, 2021.
- 15 Khofman A. Exploring cognitive biases in voice-based virtual assistants, 2023.
- 16 Abdrakhmanov H. Emerging trends in digital marketing: A case study of Kazakh SMEs. *Journal of Business Technology*, 2020, vol. 14, no. 2, pp. 178–191.
- 17 Turkyilmaz A., Dikhanbayeva D., Suleiman Z., Shaikholla S., Shehab E. Industry 4.0: Challenges and opportunities for Kazakhstan SMEs. *Procedia CIRP*, 2021, vol. 96, pp. 213–218.

^{1*}**Раджасекхара Моули Потлури,**

PhD, менеджмент/маркетинг профессоры, ORCID ID: 0000-0002-6935-1373,

*e-mail: prmouly24@gmail.com

²**Мадхави Килару,**

доцент, ORCID ID: 0000-0002-1030-3860,

e-mail: madhavi.aditi@gmail.com

¹**Турарбекова Қ.,**

BBA, ORCID ID: 0009-0004-7370-6335,

e-mail: kuralaytm@gmail.com

¹**Шевчук Н.,**

BBA, ORCID ID: 0009-0008-8506-978,

e-mail: kitshevchik@gmail.com

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

²VNR және гуманитарлық ғылымдар кафедрасы, Вигнана Джиоти инженерлік-технологиялық институты, Хайдарабад, Телангана, Үндістан

МАРКЕТИНГТІҢ ҚАЗАҚСТАНДЫҚ ШОБ МЕКЕМЕЛЕРІНЕ БИЗНЕС-ТИІМДІЛІГІК ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа

Бұл зерттеу қазақстандық мұсылмандар басқаратын шағын және орта бизнес (ШОБ) кәсіпорындарының бизнес тиімділігі көрсеткіштеріне цифрлық маркетингтің әсерін зерттейді. Зерттеуде сандық және сапалы деректер жинау әдістерін қамтитын аралас әдістер қолданылды. Нәтижелер әлеуметтік медиа маркетингі, іздеу жүйесін оңтайландыру (SEO) мен электрондық пошта маркетингі қазақстандық ШОБ субъектілері қабылдаған ең кең таралған цифрлық маркетинг әдістері екенін көрсетті. Дегенмен шектеулі маркетингтік бюджеттер, ROI өлшеу қиындықтары және трендтерді қадағалау сияқты мәселелер жұмысты тиімді жүзеге асыруға кедергі келтіреді. Осы қиындықтарға қарамастан, ШОБ цифрлық маркетингтің бизнес өнімділігіне оң әсерін мойындайды, бұл сатудың өсуі, тұтынушыларды тарту және бренд туралы хабардар болу сияқты салаларда айқын көрінеді. Зерттеу нәтижесінде цифрлық маркетинг – қазақстандық ШОБ үшін көрнекілікті арттыру, тұтынушыларды тарту және конверсияларды ынталандыру арқылы цифрлық нарықта тұрақты өсуді қамтамасыз ететін қуатты құрал деген қорытындыға келдік.

Тірек сөздер: цифрлық маркетинг, ШОБ, бизнес өнімділігі, цифрлық маркетинг трендтері, технологиялық инновация, Қазақстан.

¹*Раджасекхара Моули Потлури,
PhD, профессор менеджмента/маркетинга, ORCID ID: 0000-0002-6935-1373,
*e-mail: prmourly24@gmail.com
²Мадхави Килару,
доцент, ORCID ID: 0000-0002-1030-3860,
e-mail: madhavi.aditi@gmail.com
¹Турарбекова К.,
BBA, ORCID ID: 0009-0004-7370-6335,
e-mail: kuralaytm@gmail.com
Шевчюк Н.,
BBA, ORCID ID: 0009-0008-8506-9782,
e-mail: kitshevchik@gmail.com

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

²Департамент гуманитарных наук и наук VNR Виньяна Джьоти Институт
инженерии и технологий, г. Хайдарабад, Телангана, Индия

ВЛИЯНИЕ ЦИФРОВОГО МАРКЕТИНГА НА БИЗНЕС-ЭФФЕКТИВНОСТЬ КАЗАХСТАНСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ МСБ

Аннотация

В данном исследовании изучается влияние цифрового маркетинга на бизнес-эффективность казахстанских предприятий малого и среднего бизнеса (МСБ), управляемых мусульманами. В исследовании используется смешанный подход, включающий количественные и качественные методы сбора данных. Результаты показывают, что маркетинг в социальных сетях, поисковая оптимизация (SEO) и маркетинг по электронной почте являются наиболее распространенными методами цифрового маркетинга, принятыми казахстанскими МСП. Однако такие проблемы, как ограниченные маркетинговые бюджеты, сложность измерения окупаемости инвестиций и отслеживание тенденций, препятствуют эффективной реализации. Несмотря на эти проблемы, МСБ признает положительное влияние цифрового маркетинга на свою эффективность, отраженное в таких областях, как рост продаж, привлечение клиентов и узнаваемость бренда. В исследовании делается вывод, что цифровой маркетинг представляет собой мощный инструмент для казахстанского МСБ для повышения видимости, привлечения клиентов и стимулирования конверсий, что в итоге способствует устойчивому росту на цифровом рынке.

Ключевые слова: цифровой маркетинг, МСБ, эффективность бизнеса, тенденции цифрового маркетинга, технологические инновации, Казахстан.

Article submission date: 01.12.2024

**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, 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 шрифтімен теріледі. Жолдар арасында бірлік интервал сақталады. Шеттер – барлық жағынан 2 см.

Мақала келесі бөлімдерді қамтуы тиіс: Кіріспе, Материалдар және әдістер, 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, 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
Жуйкова Майя Антоновна

Подписано в печать 10.12.2024 г.
Тираж 300 экз. Формат 60x84 1/16.
Бумага тип. Усл.печ.л. 42,0 Уч.-изд.л. 43,7
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
