

ISSN 2518-1483 (Online),
ISSN 2224-5227 (Print)

2025 • 1



«ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҰЛТТЫҚ ФЫЛЫМ
АКАДЕМИЯСЫ» РҚБ

«ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҰЛТТЫҚ ФЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫ» РҚБ

БАЯНДАМАЛАРЫ

ДОКЛАДЫ
РОО «НАЦИОНАЛЬНОЙ
АКАДЕМИИ НАУК РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН»

REPORTS
OF THE ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PUBLISHED SINCE JANUARY 1944

ALMATY, NAS RK

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ БАЯНДАМАЛАРЫ

2025 • 1

Бас редактор:

ЖҮРҮНОВ Мұрат Жұрынұлы, химия ғылымдарының докторы, профессор, КР ҰФА академигі, КР ҰФА РКБ президенті м.а., АҚ «Д.В. Сокольский атындағы Отын, катализ және электрохимия институтының» бас директоры (Алматы, Казакстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960>

Редакция ұжымы:

ҚАЛИМОЛДАЕВ Мақсат Нұрәділұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, КР ҰФА академигі (Алматы, Қазакстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>

ӘДЕКЕНОВ Сергазы Мыңжасарұлы, химия ғылымдарының докторы, профессор, КР ҰФА академигі, «Фитохимия» халықаралық ғылыми-өндірістік холдингінің директоры (Қарағанды, Қазакстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>

РАМАЗАНОВ Тілекқабыл Сабитұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, КР ҰФА академигі, әл-Фараби атындағы Қазак ұлттық университетінің ғылыми-инновациялық қызмет жөніндегі проректоры, (Алматы, Қазакстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701328029>

ӘБИЕВ Руфат, техника ғылымдарының докторы (биохимия), профессор, Санкт-Петербург мемлекеттік технологиялық институты «Химиялық және биотехнологиялық аппаратураны оңтайландыру» кафедрасының меншерушісі, (Санкт-Петербург, Ресей) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602431781>

ОЛИВЬЕРО Rossi Cesare, PhD (химия), Калабрия университетінің профессоры (Калабрия, Италия) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>

ТИГИНИЯНУ Ион Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, академик, Молдова Ғылым Академиясының президенті, Молдова техникалық университеті (Кишинев, Молдова) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935>

САНГ-СУ Квак, PhD (биохимия, арохимия), профессор, Корея Биогылым және биотехнология ғылыми-зерттеу институты (KRIBB), осміндіктердің инженерлік жүйелері ғылыми-зерттеу орталығының бас ғылыми қызметкері, (Дэчон, Корея) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>

БЕРСІМБАЕВ Рахметқажы Ескендерұлы, биология ғылымдарының докторы, профессор, КР ҰФА академигі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті. (Астана, Қазакстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004012398>

КАЛАНДРА Пьетро, PhD (физика), наноқұрьылымды материалдарды зерттеу институтының профессоры (Рим, Италия) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>

БОШКАЕВ Қуантай Авғазұлы, Ph.D. Теориялық және ядролық физика кафедрасының доценті, әл-Фараби атындағы Қазак ұлттық университеті (Алматы, Қазакстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54883880400>

Бүркітбаев Мұхамбетқали, химия ғылымдарының докторы, профессор, КР ҰФА академигі, (Алматы, Қазакстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>

QUEVEDO Hernando, профессор, Мексика ұлттық автономиялық университеті (UNAM), Ядролық ғылымдар институты (Мехико, Мексика), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>

ЖУСІПОВ Марат Абжанұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, теориялық және ядролық физика кафедрасының профессоры, әл-Фараби атындағы Қазак ұлттық университеті (Алматы, Қазакстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602166928>

КОВАЛЕВ Александр Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, Украина ҰФА академигі, Қолданбалы математика және механика институты (Донецк, Украина), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=720279931>

ТАКІБАЕВ Нұргали Жабагаұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, КР ҰФА академигі, әл-Фараби атындағы Қазак ұлттық университеті (Алматы, Қазакстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24077239000>

ХАРИН Станислав Николаевич, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, КР ҰФА академигі, (Алматы, Қазакстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>

ДАВЛЕТОВ Асқар Ербуланович, физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент, ҰЯЗУ МИФИ әл-Фараби атындағы Қазак ұлттық университеті (Алматы, Қазакстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602642543>

ӘБІШЕВ Меде Ержанұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, КР ҰФА академигі, (Алматы, Қазакстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>

ӘБІЛМАҒЖАНОВ Арлан Зайнутталайұлы, химия ғылымдарының кандидаты, Д.В. Сокольский атындағы "Отын, катализ және электрохимия институты" АҚ Бас директорының бірінші орынбасары, (Алматы, Қазакстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197468109>

«Қазақстан Республикасы Ұлттық ғылым академиясының баяндамалары»

ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)

Меншіктеуші: «Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы» Республикалық қоғамдық бірлестігі (Алматы қ.)

Ақпарат агенттігінің мерзімді баспасоз басылымын, ақпарат агенттігін және желілік басылымды кайта есепке қою туралы КР Медениет және Ақпарат министрлігі «Ақпарат комитеті» Республикалық мемлекеттік мекемесі 31.01.2025 ж. берген № KZ31VPY00111215 Күләлік.

Такырыптық бағыты: *физика, химия*.

Мерзімділігі: жылдан 4 рет.

<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>

© «Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы» РКБ, 2025

Главный редактор:

ЖУРИНОВ Мурат Журинович, доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, и.о. президента РОО НАН РК, Генеральный директор АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского» (Алматы, Казахстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960>

Редакционная коллегия:

КАЛИМОЛДАЕВ Максат Нурадилович, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>

АДЕКЕНОВ Сергазы Мынжасарович, доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, директор Международного научно-производственного холдинга «Фитохимия» (Караганда, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>

РАМАЗАНОВ Тлеккабул Сабитович, (заместитель главного редактора), доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701328029>

АБИЕВ Руфат, доктор технических наук (биохимия), профессор, заведующий кафедрой «Оптимизация химической и биотехнологической аппаратуры», Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Санкт-Петербург, Россия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602431781>

ОЛИВЬЕРО Rossi Чезаре, доктор философии (PhD, химия), профессор Университета Калабрия (Калабрия, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>

ТИГИНИЯНУ Ион Михайлович, доктор физико-математических наук, академик, президент Академии наук Молдовы, Технический университет Молдовы (Кишинев, Молдова), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=700615935>

САНГ-СУ Квак, доктор философии (PhD, биохимия, агрохимия), профессор, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский центр инженерных систем растений, Корейский научно-исследовательский институт бионауки и биотехнологии (KRIBB), (Дэчон, Корея), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>

БЕРСИМБАЕВ Рахметкали Исекендирович, доктор биологических наук, профессор, академик НАН РК, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева (Астана, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004012398>

КАЛАНДРА Пьетро, доктор философии (PhD, физика), профессор Института по изучению наноструктурированных материалов (Рим, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>

БОШКАЕВ Куантай Авгазыевич, PhD, преподаватель, доцент кафедры теоретической и ядерной физики, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=548833880400>

БҮРКИТБАЕВ Мухамбеткали, доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, (Алматы, Казахстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>

QUEVEDO Hernando, профессор, Национальный автономный университет Мексики (UNAM), Институт ядерных наук (Мехико, Мексика), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>

ЖУСУПОВ Марат Абжанович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и ядерной физики, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602166928>

КОВАЛЕВ Александр Михайлович, доктор физико-математических наук, академик НАН Украины, Институт прикладной математики и механики (Донецк, Украина), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>

ТАКИБАЕВ Нургали Жабагаевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24077239000>

ХАРИН Станислав Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>

ДАВЛЕТОВ Аскар Ербуланович, кандидат физико-математических наук, доцент, Филиал НИЯУ МИФИ Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602642543>

АБИШЕВ Медеу Ержанович, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>

АБИЛЬМАГЖАНОВ Арлан Зайшутталаевич, кандидат химических наук, первый заместитель генерального директора АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197468109>

Доклады Национальной академии наук Республики Казахстан»

ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)

Собственник: Республиканское общественное объединение «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы).

Свидетельство №**KZ31V ру00111215** о повторной регистрации периодического печатного издания информационного агентства, информационного агентства и сетевого издания, выданное Республиканским государственным учреждением «Комитет информации» Министерства культуры и информации Республики Казахстан **31.01.2025**

Тематическая направленность: *физика, химия*.

Периодичность: 4 раза в год.

<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>

Editor-in-Chief:

ZHURINOV Murat Zhurinovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Acting President of RPA NAS RK, General Director of JSC "Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry named after D.V. Sokolsky" (Almaty, Kazakhstan) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960>

Editorial Board:

KALIMOLDAYEV Maksat Nuradilovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>

ADEKENOV Sergazy Mynzhasarovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Director of the International Science and Production Holding "Phytochemistry" (Karaganda, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>

RAMAZANOV Tlekkabul Sabitovich, (Deputy Editor-in-Chief), Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701328029>

ABIEV Rufat, Doctor of Technical Sciences (Biochemistry), Professor, Head of the Department of Optimization of Chemical and Biotechnological Equipment, St. Petersburg State Technological Institute (St. Petersburg, Russia) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602431781>

OLIVIERO Rossi Cesare, PhD (Chemistry), Professor at the University of Calabria (Calabria, Italy), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>

TIGINYANU Ion Mihailovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician, President of the Academy of Sciences of Moldova, Technical University of Moldova (Chisinau, Moldova), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935>

SANG SU Kwak, PhD (Biochemistry, Agricultural Chemistry), Professor, Chief Scientist, Research Center for Plant Systems Engineering, Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology (KRIBB), (Daejeon, Korea), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>

BERSIMBAEV Rakhatkazhi Iskenderovich, Doctor of Biological Sciences, Professor, Academician of NAS RK, L.N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004012398>

CALANDRA Pietro, PhD (Physics), Professor, Institute for the Study of Nanostructured Materials (Rome, Italy), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>

BOSHKAEV Kuantai Avgazeyevich, PhD, Associate Professor, Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54883880400>

BURKITBAEV Mukhambetkali, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, (Almaty, Kazakhstan) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>

QUEVEDO Hernando, Professor, National Autonomous University of Mexico (UNAM), Institute of Nuclear Sciences (Mexico City, Mexico), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>

ZHUSUPOV Marat Abzhanovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602166928>

KOVALEV Alexander Mikhailovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of NAS of Ukraine, Institute of Applied Mathematics and Mechanics (Donetsk, Ukraine), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>

TAKIBAEV Nurgali Zhabagayevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24077239000>

KHARIN Stanislav Nikolaevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Kazakh-British Technical University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>

DAVLETOV Askar Erbulanovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Branch of NRNU MEPhI Kazakh National University named after Al-Farabi (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602642543>

ABISHEV Medeu Erzhanovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>

ABILMAGZHANOV Arlan Zainutallaevich, PhD in Chemistry, First Deputy Director General of JSC "Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry named after D.V. Sokolsky" , (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197468109>

Reports of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)

Owner: RPA «National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan» (Almaty).

The certificate of registration of a periodical printed publication in the Committee of Information of the Ministry of Information and Social Development of the Republic of Kazakhstan **No.KZ31VPY00111215** issued **31. 01. 2025**

Thematic scope: *physics and chemistry*.

Periodicity: 4 times a year.

<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>

PHYSICAL

REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ISSN 2224-5227

Volume 1. Number 353 (2025), 5–15

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.319>

УДК 532.536. МРНТИ 29.17.01

©B.Zh. Abdikarimov, A.Zh. Seitmuratov, B.K. Kaliev, A.G. Ganiulla,
T.M. Karabala*, 2025.

Kyzylorda University named after Korkyt Ata, Kyzylorda, Kazakhstan.

E-mail: togzhanmaratqyzy@gmail.com

VISCOSITY PROPERTIES OF THE ISOBUTYRIC ACID-WATER SOLUTION NEAR THE CRITICAL SEPARATION TEMPERATURE

Abdikarimov Bakhytkan – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Kyzylorda University named after Korkyt Ata, Kyzylorda, Kazakhstan, E-mail : abdikarimov59@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4434-7677>;

Seitmuratov Angysyn – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Kyzylorda University named after Korkyt Ata, Kyzylorda, Kazakhstan, E-mail: angisin_@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9622-9584>;

Kaliev Bakhyt – Candidate of Technical Sciences, Kyzylorda University named after Korkyt Ata, Kyzylorda, Kazakhstan, E-mail: kalievbakyt1957@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5409-309X>;

Ganiulla Aliya – Senior Lecturer, Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan, E-mail aliya_ganiulla@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2113-5725>;

Karabala Togzhan – Master of Pedagogical Sciences, Kyzylorda University named after Korkyt Ata, Kyzylorda, Kazakhstan, E-mail: togzhanmaratqyzy@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5569-3336>.

Abstract. In this work, the concentration dependences of viscosity along the thermodynamic directions of the interface and the critical isotherm are investigated on the basis of experimental data for the shear viscosity of isobutyric acid-water double solution near the critical stratification temperature. It is shown that the values of critical indices describing the concentration dependences of the fluctuation parts of viscosity for these thermodynamic directions are the same and agree with the results of the fluctuation theory of phase transitions; the amplitude of the concentration dependence of the shear viscosity value for the interface is larger than the corresponding amplitude for the critical isotherm. Experimental and theoretical studies of the properties of individual substances and double solutions in the vicinity of the critical point, especially the kinetic properties of matter, are an urgent task of condensed matter physics. This is due to the active practical use of the unique properties of matter in the critical state in the latest technologies. Understanding of these processes that occur in critical media is extremely important for the most effective choice of technological parameters in industrial processes. This determines the relevance, scientific and practical significance of studying the viscosity of double solutions in the vicinity of the critical temperature.

The dependences of the fluctuation part of viscosity on concentration at the interface and at the critical isotherm were compared. As follows from the results obtained, the concentration dependence of the fluctuation part of viscosity at the interface and at the critical isotherm is described by power laws with the same critical exponents but with different amplitudes. It was obtained that the amplitude of the concentration dependence of the inverse value of shear viscosity for the interface is smaller than the amplitude at the critical isotherm.

Keywords: isobutyric acid-water, critical temperature, critical isotherm, fluctuation theory of phase transitions, kinetic properties of matter, critical point, shear viscosity.

**© Б.Ж. Әбдікәрімов, А.Ж. Сейтмұратов, Б.К. Калиев, Ә.Ғ. Ғаниұлла,
Т.М. Қарабала*, 2025.**

Корқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, Қазақстан.

E-mail: togzhanmaratqyzy@gmail.com

СЫНДЫҚ ТЕМПЕРАТУРА МАҢЫНДАҒЫ ИЗОМАЙ ҚЫШҚЫЛЫ – СУ ЕРІТІНДІСІНІҢ ТҮТҚЫРЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРИ

Әбдікәрімов Баҳытхан – физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, Корқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, Қазақстан, E-mail : abdikarimov59@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4434-7677>;

Сейтмұратов Аңғысын – физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, Корқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, Қазақстан, E-mail: angisin_@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9622-9584>;

Калиев Бақыт – техника ғылымдарының кандидаты Корқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, Қазақстан, E-mail: kalievbakyt1957@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5409-309X>;

Ғаниұлла Әлия – аға оқытушы, Корқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, Қазақстан, E-mail aliya_ganiulla@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2113-5725>;

Қарабала Тоғжан – педагогика ғылымдарының магистрі, Корқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, Қазақстан, E-mail: togzhanmaratqyzy@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5569-3336>.

Аннотация. Зерттеу жұмысында изомай қышқылы-су қос ерітіндісінің ғысы түтқырлығына қатысты эксперименттік деректер негізінде, фазалар шекарасы мен сындық изотерма бойындағы термодинамикалық бағыттар бойынша түтқырлықтың концентрациялық тәуелділіктері зерттелген. Бұл термодинамикалық бағыттар үшін түтқырлықтың флуктуациялық бөліктерінің концентрациялық тәуелділіктерін сипаттайтын сындық көрсеткіштердің мәндері бірдей екендігі және фазалық ауысулардың флуктуациялық теориясының нәтижелерімен сәйкес келетіні көрсетілген; фазалар шекарасы үшін ығысу түтқырлығының концентрациялық тәуелділік амплитудасы сындық изотерма үшін сәйкес амплитудадан үлкен. Жеке заттар мен қос ерітінділердің, әсіресе заттың кинетикалық қасиеттерінің, сындық нұктес аймағындағы қасиеттерін эксперименттік және теориялық зерттеу – конденсацияланған күй физикасының өзекті мәселесі болып табылады. Бұл заттың сындық күйдегі ерекше қасиеттерін

жаңа технологияларда белсенді түрде практикалық қолданумен байланысты. Сындық ортада жүретін осы үдерістерді түсіну өнеркәсіптік процестерде технологиялық параметрлерді барынша тиімді таңдау үшін өте маңызды. Бұл сындық температура аймағындағы қос ерітінділердің тұтқырлығын зерттеудің өзектілігін, ғылыми және практикалық маңыздылығын анықтайды. Фазалар шекарасы мен сындық изотермада тұтқырлықтың флюктуациялық бөлігінің концентрацияға тәуелділіктерін салыстыру жүргізілді. Алынған нәтижелерден байқалғандай, фазалар шекарасы мен сындық изотермадағы флюктуациялық тұтқырлық бөлігінің концентрацияға тәуелділігі бірдей сындық көрсеткіштермен сипатталады, бірақ амплитудалары әртүрлі. Сондай-ақ, фазалар шекарасындағы ығысу тұтқырлығының көрі мәнінің концентрациялық тәуелділігінің амплитудасы сындық изотермадағы амплитудадан кіші екені анықталды.

Түйін сөздер: изомай тұзды қышқылы-су, сынни температура, сынни изотерма, фазалық ауысулардың флюктуациялық теориясы, заттың кинетикалық қасиеттері, сындық нүктесі, ығысу тұтқырлығы.

**©Б.Ж. Абдикаримов, А.Ж. Сейтмуратов, Б.К. Калиев, А.Г. Ганиулла,
Т.М. Карабала*, 2025.**

Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан.

E-mail: togzhanmaratqyzy@gmail.com

СВОЙСТВА ВЯЗКОСТИ РАСТВОРА ИЗОМАСЛЯНАЯ КИСЛОТА – ВОДА ВБЛИЗИ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ РАССЛОЕНИЯ

Абдикаримов Бахытхан – доктор физико-математических наук, профессор, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан, E-mail : abdikarimov59@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4434-7677>;

Сейтмуратов Ангысын – доктор физико-математических наук, профессор, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан, E-mail: angisin_@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9622-9584>;

Калиев Бакыт – кандидат технических наук, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан, E-mail: kalievbakyt1957@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5409-309X>;

Ганиулла Алия – старший преподаватель, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан, E-mail aliya_ganiulla@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2113-5725>;

Карабала Тогжан – магистр педагогических наук, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан, E-mail: togzhanmaratqyzy@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5569-3336>.

Аннотация. В работе на основе экспериментальных данных для сдвиговой вязкости двойного раствора изомасляная кислота – вода вблизи критической температуры расслоения исследованы концентрационные зависимости вязкости вдоль термодинамических направлений границы раздела фаз и критической изотермы. Показано, что величины критических показателей, описывающих концентрационные зависимости флюктуационных частей вязкости для этих термодинамических направлений одинаковы и согласуются с результатами

флуктуационной теории фазовых переходов; амплитуда концентрационной зависимости величины сдвиговой вязкости для границы раздела фаз больше соответствующей амплитуды для критической изотермы. Экспериментальные и теоретические исследования свойств индивидуальных веществ и двойных растворов в окрестности критической точки, особенно кинетических свойств вещества, являются актуальной задачей физики конденсированного состояния вещества. Это связано с активным практическим использованием уникальных свойств вещества в критическом состоянии в новейших технологиях. Понимание этих процессов, которые происходят в критических средах, чрезвычайно важно для наиболее эффективного выбора технологических параметров в промышленных процессах. Это определяет актуальность, научную и практическую значимость изучения вязкости двойных растворов в окрестности критической температуры. Было проведено сравнение зависимостей флуктуационной части вязкости от концентрации на границе раздела фаз и на критической изотерме. Как следует из полученных результатов, концентрационная зависимость флуктуационной части вязкости на границе раздела фаз и критической изотерме описывается степенными законами с одинаковыми критическими показателями, но с разными амплитудами. Было получено, что амплитуда концентрационной зависимости обратного значения сдвиговой вязкости для границы раздела фаз меньше амплитуды на критической изотерме.

Ключевые слова: изомасляная кислота-вода, критическая температура, критическая изотерма, флуктуационная теория фазовых переходов, кинетические свойства вещества, критическая точка, сдвиговая вязкость.

Введение. Изучение свойств вязкости растворов вблизи критических температур является важной задачей физики конденсированного состояния и физической химии, поскольку такие исследования помогают лучше понять поведение жидкостей и растворов в условиях фазовых переходов. Особое внимание в данной работе уделяется изучению двойного раствора изомасляная кислота-воды, поведение которого вблизи критической температуры расслоения демонстрирует сложные закономерности в изменении вязкости.

Метод капиллярного вискозиметра был выбран для исследования сдвиговой вязкости раствора в широком диапазоне температур и при различных массовых концентрациях, что позволяет детально проследить концентрационные зависимости и выявить особенности вязкости вдоль границы раздела фаз и при критической изотерме. На сегодняшний день аналогичные исследования проводились для ряда других двойных растворов, однако детализированный анализ раствора изомасляная кислота-воды до сих пор остается недостаточно исследованным. Понимание механизма изменений вязкости и критических флуктуаций в таких растворах позволяет улучшить теоретические модели фазовых переходов и более точно предсказывать поведение веществ в экстремальных условиях. Кроме того, исследование вязкостных свойств вблизи критической точки имеет практическую значимость, поскольку результаты могут быть полезны

для разработки технологий в таких областях, как химическая промышленность, материаловедение и термодинамика.

Целью данной работы является исследование концентрационных зависимостей сдвиговой вязкости раствора изомасляная кислота-воды при приближении к критической температуре расслоения. Полученные результаты позволяют дополнить флуктуационную теорию фазовых переходов и расширят представления о кинетических свойствах растворов вблизи критических состояний, что также имеет значительное прикладное значение в современных технологических процессах.

Материалы и основные методы. В работе методом капиллярного вискозиметра были проведены комплексные исследования особенностей поведения сдвиговой вязкости в двойном растворе изомасляная кислота-вода в широком диапазоне температур вблизи критической температуры расслоения для различных массовых концентраций раствора ($c_{m1} = 20\%$, $c_{m2} = 24\%$, $c_{m3} = 29\%$, $c_{m4} = 33\%$, $c_{m5} = 38\%$, $c_{m6} = 39\%$, $c_{m7} = 45\%$, $c_{m8} = 52\%$, $c_{m9} = 58\%$). На рис. 1 показаны полученные данные вязкости $\eta(T,c)$ исследуемого двойного раствора вдоль различных термодинамических критических направлений: границы раздела фаз (I), критической изотермы (II), критической изоконцентраты (III).

Анализ этих данных показал, что при критических значениях концентрации $c_m = c_{mk}$ и температуры $T = T_k$, вязкость принимает конечное значение (Plevachuk, 2008: 175; Alekhin, 2007: 793). Этот результат подтверждается анализом многих экспериментальных данных температурного поведения вязкости различных растворов вблизи критической температуры расслоения (Oleinikova, 1999: 895). В связи с этим полученные нами экспериментальные данные (рис. 1) были проанализированы с помощью уравнения для критической вязкости (Alekhin, 2000:1067; Alekhin, 2004:139) учитывавшего пространственную дисперсию системы.

$$\eta(T) = \eta_r(T) + \eta_f(T) = A \exp \frac{B}{T} + \frac{C R_c(T, c)}{\left[1 + (q \cdot R_c(T, c))^2\right]^{1/2}} \quad (1)$$

здесь $\eta_r = A \exp B/T$ - регулярная часть вязкости, в которой не учтены флуктуации параметра порядка в системе; $\eta_f(t, \Delta c)$ – флуктуационная часть вязкости. Радиус корреляции вдоль направления границы раздела фаз и критической изотермы соответственно имеет вид: $R_{c1}(t) = r_1 \cdot t^{-\nu}$, $R_{c2}(c) = r_2 \cdot \Delta c^{-\delta\xi}$; $t = (T - T_{\hat{e}})/T_{\hat{e}}$, $\Delta c = (c - c_{\hat{e}})/c_{\hat{e}}$. Форма флуктуационной части вязкости (1) обеспечивает конечную вязкость системы $\eta_{\hat{e}}(t = 0, c = 0) = C/q$ в критическом состоянии при $qR_c \Rightarrow \infty$.

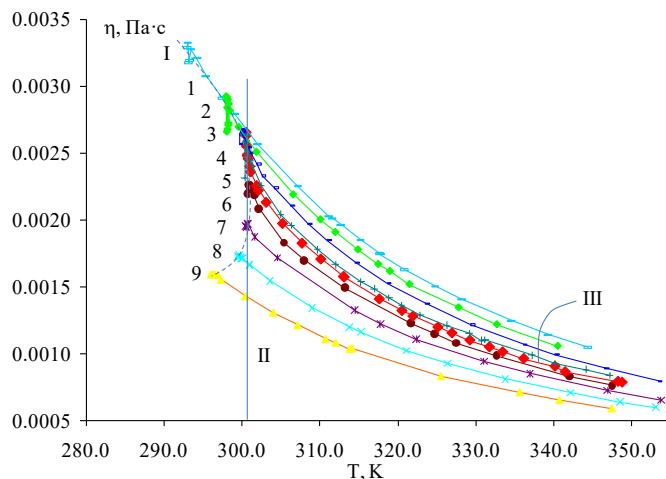


Рис. 1 Вязкость раствора изомасляная кислота-вода в широком диапазоне температур вблизи критической температуры расслоения для различных концентраций раствора

Из полученных экспериментальных данных поведения вязкости $\eta(T,c)$ (рис. 1) по формуле $\eta_r(T,c) = A(T,c)\exp B(T,c)/T$ рассчитана регулярная часть вязкости. Для поиска величины η_r вязкости была использована температурная зависимость вязкости $\eta(T)$ при температурах, далеких от критической температуры ($\Delta T = T - T_c \geq 10$ К). При этих температурах были определены величины параметров $A(T,c)$ и $B(T,c)$ регулярной части вязкости η_r для всех исследованных температур и концентраций раствора.

На основе этих экспериментальных данных $\eta(T,c)$ (рис. 1) и проведенных расчетов $\eta_r(T,c)$ на рис. 2 показано поведение величины полной вязкости и ее регулярной части от концентрации на границе раздела фаз.

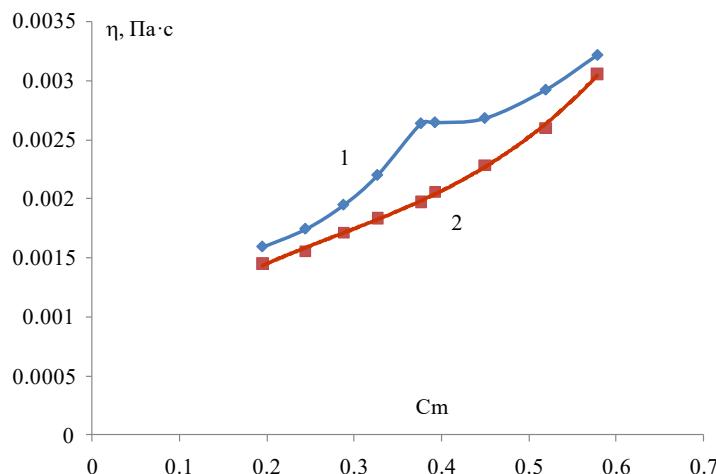


Рис. 2 Зависимость полной вязкости (1) и регулярной части вязкости (2) от концентрации на границе раздела фаз

На основе этих данных рис. 2 в работе была проанализирована зависимость флуктуационной части вязкости $\eta_f = \eta - \eta_r$ от концентрации на границе раздела фаз (рис. 2). Эти данные показаны на рис. 3а.

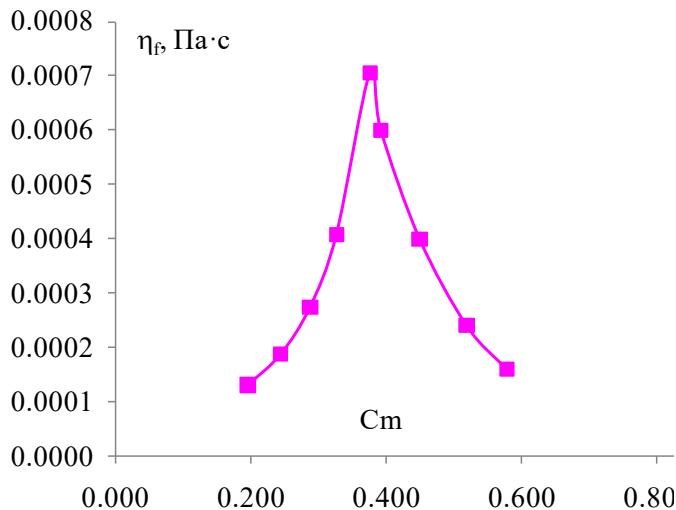


Рис. 3а. Зависимость флуктуационной части вязкости от концентрации на границе раздела фаз

Концентрационное поведение обратных значений флуктуационной части вязкости $\eta_f^{-1}(c, t)$ показано на рис. 3б.

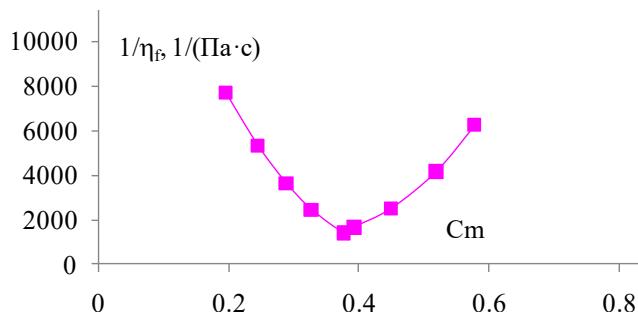


Рис. 3б. Зависимость обратного значения флуктуационной части вязкости от концентрации на границе раздела фаз

Как видно из рис. 3б, при приближении к критической концентрации ($\Delta c \rightarrow 0$) и критической температуре ($t \rightarrow 0$) обратная величина $\eta_f^{-1}(\Delta c \rightarrow 0, t \rightarrow 0)$ стремится к постоянному значению $\eta_f^{-1}(\Delta c \rightarrow 0, t \rightarrow 0) = \eta_{f_k}^{-1} = q / C$ (1). Этот результат свидетельствует о том, что вязкость раствора в критическом состоянии является конечной величиной. (Мартынов, 2018: 360), (Ландау, 2002: 541)

Для количественного анализа поведения флуктуационной части вязкости на границе раздела фаз была исследована концентрационная зависимость разности

величин $\Delta\eta_f^{-1} = \eta_f^{-1} - \eta_{f_k}^{-1} = \eta_f^{-1} - q/C$. В дальнейшем эта разность описывалась степенным соотношением в соответствии с скейлинговыми представлениями (Стенли, 1982:353) о поведении флуктуационной части вязкости $\eta_f(\Delta c)$ в близкой окрестности КТ в виде:

$$\Delta\eta^{-1}(\Delta c) = 1/\eta_f - 1/\eta_{f_k} = N_1(c - c_k)^{\nu/\beta} = N_1(\Delta c)^{n_1} \quad (2)$$

Для нахождения величины этого показателя n_1 в двойном логарифмическом масштабе была построена зависимость (2). Эти данные показаны на рис. 4.

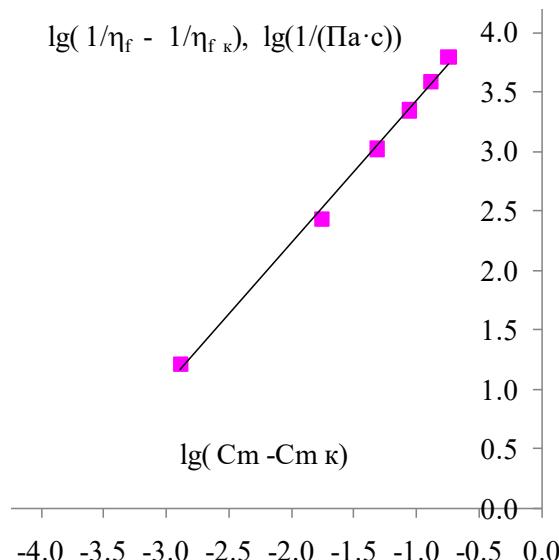


Рис. 4. Логарифм обратного значения флюктуационной части вязкости на границе раздела фаз

На основе этих данных было получено, что величина показателя для границы раздела фаз n_1 в формуле (2) равна $n_1 \approx 1,9$.

Это значение $n_1 = \nu/\beta \approx 1,9$ согласуется с величинами критических показателей ФТФП (Паташинский, 1982) $\nu=0,636$, $\beta=0,337$. Был также найден коэффициент $N_1=145\,000 \text{ (Pa}\cdot\text{c)}^{-1}$ для границы раздела фаз.

Результаты и обсуждение. Полученные результаты подтверждают вид флюктуационной части вязкости, предложенный ранее в (Алексин, 2013:141).

Наряду с представленной выше информацией о поведении флюктуационной части вязкости для кривой сосуществования, на основе проведенных экспериментальных исследований (рис. 1) аналогичный анализ был проведен еще

для одного термодинамического направления - критической изотермы $T_k=300,6K$. На рис. 5а представлена концентрационная зависимость флуктуационной части вязкости $\eta_f(\Delta c = c - c_k)$ для различных массовых концентраций вдоль термодинамического направления критической изотермы $T=T_k$.

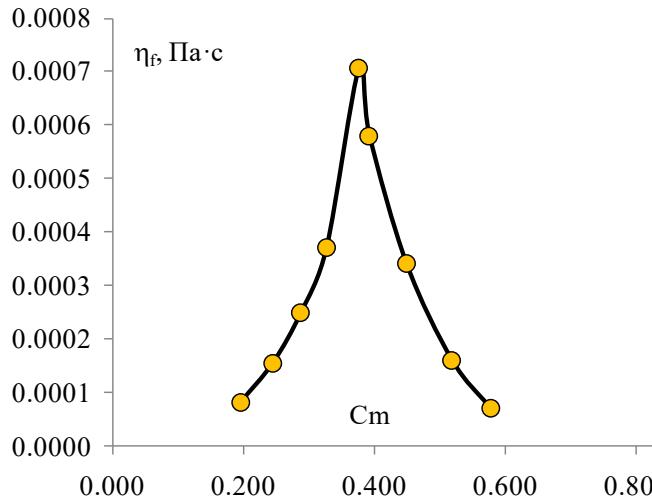


Рис. 5а Концентрационная зависимость флуктуационной части вязкости на критической изотерме T_k раствора изомасляная кислота-вода.

Анализ этих данных (рис. 5а) проводился аналогично представленному выше анализу данных для кривой сосуществования (рис. 3, 4). На рис. 5б показана концентрационная зависимость обратного значения флуктуационной части вязкости $\eta_f^{-1}(\Delta c)$ вдоль критической изотермы $T=T_k$.

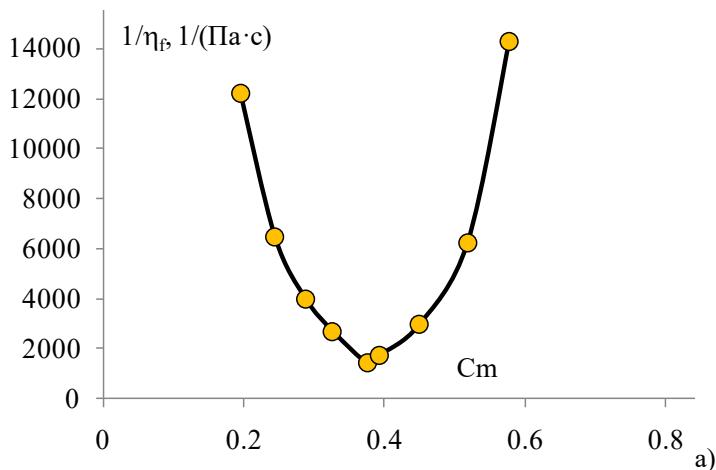


Рис. 5б Обратное значение флуктуационной части вязкости на критической изотерме $T=T_k$

Из рис. 5б, как и раньше (рис. 3б) следует, что вдоль направления критической изотермы при концентрации $\Delta c \rightarrow 0 (c \rightarrow c_k)$ величина η_{fk}^{-1} принимает конечное значение $\eta_f^{-1}(t=0) = \eta_{fk}^{-1} = q / C$. Для количественного анализа поведения флюктуационной части вязкости $\eta_f(c)$ (рис. 5) были построены в двойном логарифмическом масштабе обратные значения флюктуационной части вязкости на критической изотерме (рис. 6)

$$\Delta\eta^{-1}(\Delta c) = 1/\eta_f - 1/\eta_{fk} = N_2(c - c_e)^{\delta\xi} = N_2(\Delta c)^{n_2} \quad (3)$$

Из этих данных вдоль направления критической изотермы была получена величина показателя $n_2 \approx 1,9$. Оказалось, что она согласуется со значением величин критических показателей (3) ФТФП [7,8] ($\xi = 0,405$; $\delta = 4,63$, $n_2 = \xi\delta \approx 1,9$). Согласно ФТФП $\nu/\beta = \xi\delta$, поэтому $n_1 = n_2$. Найден коэффициент $N_2 = 250\,000 \text{ (Pa}\cdot\text{c)}^{-1}$ уравнения критической изотермы.

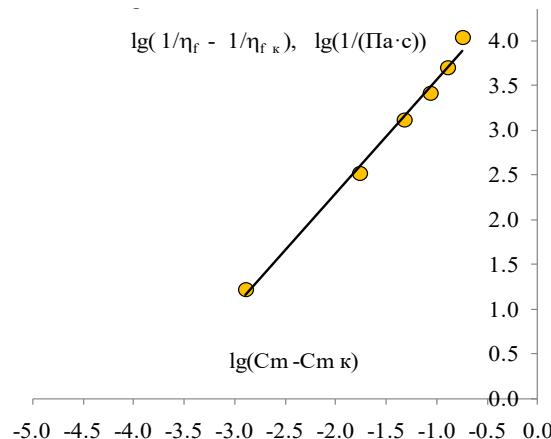


Рис. 6. Логарифм обратного значения флюктуационной части вязкости на критической изотерме T_k

Было проведено сравнение зависимостей флюктуационной части вязкости от концентрации на границе раздела фаз и на критической изотерме (Алехин, 2009 а: 91; Алехин, 2010 б: 35), (Абдикаримов, 2009: 31) Как следует из полученных результатов, концентрационная зависимость флюктуационной части вязкости на границе раздела фаз и критической изотерме описывается степенными законами с одинаковыми критическими показателями, но с разными амплитудами.

Было получено, что амплитуда концентрационной зависимости обратного значения сдвиговой вязкости для границы раздела фаз N_1 меньше амплитуды на критической изотерме N_2 .

Заключение. Впервые одновременно исследованы и проанализированы концентрационные зависимости вязкости двойного раствора изомасляная

кислота - вода вдоль двух термодинамических направлений: границы раздела фаз и критической изотермы. (Savoy, 2016: 59). Рассчитаны критические показатели и амплитуды степенных законов для концентрационных зависимостей флуктуационной части вязкости раствора вдоль предельных критических направлений границы раздела фаз и критической изотермы. Полученные величины критических показателей для этих термодинамических направлений одинаковы и согласуются с результатами флуктуационной теории фазовых переходов. Сопоставление амплитуд концентрационных зависимостей флуктуационной части вязкости раствора на кривой сосуществования и критической изотерме показало, что амплитуда концентрационной зависимости значения сдвиговой вязкости для границы раздела фаз N_1^{-1} больше соответствующей амплитуды для критической изотермы N_2^{-1} .

Литература

- Alekhin A.D., Bilous O.I. (2007) Behavior of the Viscosity of Liquid Systems near the Critical Temperature of Stratification. Ukr. J. Phys. Vol. 52, No. 8, -793-797 p.
- Plevachuk Yu., Sklyarchuk V., Alekhin O., Bulavin L. (2008) Viscosity of liquid In-Se-Tl alloys in the miscibility gap region. Journal of Alloys and Compounds. V. 452. p. 174-177.
- A. Oleinikova, L. Bulavin, V. Pipich. (1999) The Viscosity Anomaly Near the Lower Critical Consolute Point. International Journal of Thermophysics No. 20(3), 889-898
- Alekhin A.D. (2004) Equations of Critical Viscosity and Limits of their Application. Ukr. J. Phys. Vol. 49, No. 2, p.138-140.
- Alekhin A.D., Sperkach V.S., Abdikarimov B.Zh., Bilous O.I. (2000). Viscosity of Liquid Crystal Pentylcyanobiphenyl Close to the Point of the Nematic - Dielectric Liquid Phase Transition. Ukr. J. Phys. Vol. 45, No. 9, 1067-1069 p.
- А.Д. Алексин, Б.Ж. Абдикиров, Ю.Л. Остапчук, Е.Г. Рудников, А.В. Войтешенко. (2013) Концентрационная зависимость вязкости раствора изомасляная кислота-вода на границе раздела фаз и критической изотерме. Известия НАН РК, серия: Физико-математическая. №. 6(292), с.140-146.
- Паташинский А.З., Покровский В.Л. (1982) Флуктуационная теория фазовых переходов. М.: Наука, 381 с.
- Стенли Г. (1973) Фазовые переходы и критические явления. М.:Мир, 419 с.
- Г.А. Мартынов. (2018) Флуктуационная теория жидкостей. Термофизика высоких температур. Math – Net.ru, том 56, №3 353-364 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. (2002) Теоретическая физика: Учеб. пособ.: Для вузов. Статистическая физика. 5-е изд., стереот. М.: ФИЗМАТЛИТ, с. 537-544.
- А.Д. Алексин, Л.А. Булавин, Е. Рудников, Б.Ж. Абдикиров.(2009). Влияние корреляции в системе и ее размеров на величину гравитационного эффекта вблизи критической точки. Известия НАН РК, серия: физико-математическая, 5(267), с. 91-95.
- А.Д. Алексин, Б.Ж. Абдикиров, О.И. Билоус, Б.Т. Елеусинов. (2010) Анализ уравнений вязкости двойных растворов вблизи критической температуры. Вестник Евразийского национального университета им. Л. Гумилева, № 6(73) с.35-41.
- Б.Ж. Абдикиров. (2009) Особенности поведения неод-нородных двойных растворов в малых ограниченных системах вблизи критической точки. Известия НАН РК, серия: физико-математическая, 1(263) с.30-35.
- А.Д. Алексин, Б.Ж. Абдикиров, Булавин Л., Рудников Е., Шиманская Е.Т. (2009) Расширенное уравнение состояния широкого класса жидкостей вблизи критической точки. Сборник трудов XII Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ с.266-273.

А.Д. Алексин, Е. Рудников (2009) Теплоемкость наносистем вблизи критической точки. Доклады НАН РК, серия: физика, № 6, с.27-30.

JD Savoy, JK Baird, JR Lang. (2016) Journal of Chromatography A, Elsevier Vol. 1437, 58-66 p.

References

- Alekhin A.D., Bilous O.I. (2007) Behavior of the Viscosity of Liquid Systems near the Critical Temperature of Stratification. Ukr. J. Phys. Vol. 52, No. 8, 793-797 p. (in Eng.)
- Plevachuk Yu., Sklyarchuk V., Alekhin O., Bulavin L. (2008) Viscosity of liquid In-Se-Tl alloys in the miscibility gap region. Journal of Alloys and Compounds. V. 452. p. 174-177. (in Eng.)
- A.Oleinikova, L.Bulavin, V.Pipich. (1999) The Viscosity Anomaly Near the Lower Critical Consolute Point. International Journal of Thermophysics. No. 20(3), 889-898 (in Eng.)
- Alekhin A.D. (2004) Equations of Critical Viscosity and Limits of their Application. Ukr. J. Phys. Vol. 49, No. 2, p.138-140. (in Eng.)
- Alekhin A.D., Sperkach V.S., Abdikarimov B.Zh., Bilous O.I. (2000) Viscosity of Liquid Crystal Pentylcyanobiphenyl Close to the Point of the Nematic - Dielectric Liquid Phase Transition. Ukr. J. Phys. Vol. 45, No. 9, 1067-1069 p. (in Eng.)
- A.D. Alehin, B.Zh.Abdikarimov, Ju.L. Ostapchuk, E.G. Rudnikov, A.V. Vojteshenko. (2013) Koncentracionnaja zavisimost' vjazkosti rastvora izomaslanaja kislota-voda na granice razdela faz i kriticheskoy izoterme [Concentration dependence of the viscosity of an isobutyric acid-water solution at the phase boundary and critical isotherm]. Izvestija NAN RK, серия: fiziko-matematicheskaja. No. 6(292), 140-146 p. (in Rus.)
- Patashinskij A.Z., Pokrovskij V.L. (1982) Fluktuationnaja teorija fazovyh perehodov [Fluctuation theory of phase transitions]. M.: Nauka, 381 p. (in Rus.)
- Stenli G. (1973) Fazovye perehody i kriticheskie javlenija [Phase transitions and critical phenomena] M.:Mir, 419 p. (in Rus.)
- G.A. Martynov. (2018) Fluktuationnaja teorija zhidkostej. Teplofizika vysokih temperature [Fluctuation theory of liquids]. Math – Net.ru, tom 56, №3 353-364 p. (in Rus.)
- Landau L. D., Lifshic E. M. (2002) Teoreticheskaja fizika: Ucheb. posob.: Dlja vuzov. Statisticheskaja fizika. [Statistical Physics]. 5-e izd., stereot. M.: FIZMATLIT, 537-544 p. (in Rus.)
- A.D..Alehin, L.A..Bulavin, E..Rudnikov, B.Zh. Abdikarimov.(2009) Vlijanie korreljacii v sisteme i ee razmerov na velichinu gravitacionnogo jeffekta vblizi kriticheskoy tochki [The influence of correlation in the system and its size on the magnitude of the gravitational effect near the critical point]. Izvestija NAN RK, серия: fiziko-matematicheskaja, 5(267), 91-95 p. (in Rus.)
- A.D..Alehin, B.Zh..Abdikarimov, O.I..Bilous, B.T..Eleusinov. (2010) Analiz uravnenij vjazkosti dvojnyh rastvorov vblizi kriticheskoy temperatury [Analysis of the viscosity equations of binary solutions near the critical temperature]. Vestnik Evrazijskogo nacional'nogo universiteta im. L.Gumileva, № 6(73) 35-41 p. (in Rus.)
- B.Zh.Abdikarimov. (2009) Osobennosti povedenija neod-norodnyh dvojnyh rastvorov v malyh ogranicennyh sistemah vblizi kriticheskoy tochki [Peculiarities of the behavior of inhomogeneous binary solutions in small limited systems near the critical point]. Izvestija NAN RK, серия: fiziko-matematicheskaja, 1(263). 30-35 p. (in Rus.)
- A.D. Alehin, B.Zh. Abdikarimov, Bulavin L., Rudnikov E., Shimanskaja E.T. (2009) Rasshirennoe uravnenie sostojanija shirokogo klassa zhidkostej vblizi kriticheskoy tochki [Extended equation of state for a wide class of fluids near the critical point]. Sbornik trudov XII Rossijskoj konferen-cii po teplofizicheskim svojstvam veshhestv 266-273 p. (in Rus.)
- A.D. Alehin. Rudnikov.E. (2009) Teploemkost' nanosistem vblizi kriticheskoy tochki [Concentration dependence of the viscosity of an isobutyric acid-water solution at the phase boundary and critical isotherm]. Doklady NAN RK, серия: fizika, № 6, 27-30 p. (in Rus.)
- JD Savoy, JK Baird, JR Lang. (2016) Ion exchange at the critical point of solution. Journal of Chromatography A, Elsevier Vol. 1437, 58-66 p. (in Eng.)

МРНТИ: 41.23.39

УДК: 524.387

D.T. Agishev*, S.A. Khokhlov, A.T. Agishev, N.L. Vaidman, A.T. Agishev, 2025.

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: agishev.dt@phystech.edu

THE STUDY OF RADIATIVE AND CONVECTIVE TRANSPORT IN CLOSE BINARY SYSTEMS WITH LOW ACCRETION RATES

Damir Talgatovich Agishev – PhD student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: agishev.dt@phystech.edu, <https://orcid.org/0009-0008-7289-1347>;

Serik Anatolyevich Khokhlov – PhD, professor of the Department of Electronics and Astrophysics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: skhokh88@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5163-508X>;

Aldiyar Talgatovich Agishev – PhD, associate professor of the Department of Electronics and Astrophysics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: aldiyar.agishev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9788-7485>;

Nadezhda Leonidovna Vaidman – master in Physics and Astronomy, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: nvaldmann@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7449-0108>;

Almansur Talgatovich Agishev – PhD student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: almansur97@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-8989-238X>.

Abstract. The study of accretion disks is one of the essential tasks in modern astrophysics. The mechanisms of interaction between stars and the formation of accretion disks vary based on the physical conditions of the environment. For instance, stars can create an accretion disk through both Roche lobe overflow and strong stellar winds. In this paper, we examine a model of an accretion disk for a standard close binary system with a low accretion rate resulting from Roche lobe overflow. Systems with accretion rates $\dot{M} = 10^{-7} - 10^{-9} M_{\odot}/\text{year}$ are classified as low accretion rates systems.

The parameters used in simulations of this paper are as follows: the central star mass $M = 1 M_{\odot}$, accretion rate $\dot{M} = 10^{-11} - 10^{-12} M_{\odot}/\text{year}$, and disk radius $R = 10^8 - 10^{10} \text{ cm}$. The numerical model of the accretion disk is developed by solving a system of equations for viscous heating, radiative cooling, and convective transport. The model incorporates the hydrostatic equilibrium equation for the vertical axis and the equation of state for both an ideal gas and a photon gas. The radiative flux is calculated using the diffusion equation, while the convection is based on the Schwarzschild model, which used the mixing length parameter as the main factor to account for convection. Additionally, to ensure accurate simulation, optical thicknesses are taken into consideration. The

opacity coefficients for determining optical thickness are derived from the OPAL and Opacity Project results.

This research obtained distributions of temperature, density, and pressure at varying distances from the center of the star. The findings also include a comparison of convective and radiative transport at different distances from the star.

Keywords: close binary stars, accretion disk: modeling, radial structure, convection, radiative transfer.

Д.Т. Агишев*, С.А. Хохлов, А.Т. Агишев, Н.Л. Вайдман, А.Т. Агишев, 2025.

Әл-Фараби атындағы Қазақ Үлттүк университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: agishev.dt@phystech.edu

АККРЕЦИЯ ҚАРҚЫНЫ ТӨМЕН ТЫҒЫЗ ҚОС ЖҮЙЕЛЕРДЕГІ РАДИАЦИЯЛЫҚ ЖӘНЕ КОНВЕКТИВТІ ТАСЫМАЛДАУДЫ ЗЕРТТЕУ

Дамир Талгатович Агишев – PhD докторант, әл-Фараби атындағы Қазақ Үлттүк университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: agishev.dt@phystech.edu, <https://orcid.org/0009-0008-7289-1347>;

Серик Анатольевич Хохлов – PhD, Электроника және Астрофизика кафедрасының профессоры, әл-Фараби атындағы Қазақ Үлттүк университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: skhokh88@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5163-508X>;

Алдияр Талгатович Агишев – PhD, Электроника және Астрофизика кафедрасының қауымдастырылған профессоры, әл-Фараби атындағы Қазақ Үлттүк университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: aldiyar.agishev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9788-7485>;

Надежда Леонидовна Вайдман – Физика және Астрономия магистры, әл-Фараби атындағы Қазақ Үлттүк университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: nvaldmann@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7449-0108>;

Алмансур Талгатович Агишев – PhD докторант, әл-Фараби атындағы Қазақ Үлттүк университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: almansur97@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-8989-238X>.

Аннотация. Аккрециялық дискілерді зерттеу қазіргі астрофизиканың маңызды мәселелерінің бірі. Жұлдыздардың өзара әрекеттесу механизмдері және аккрециялық дискілердің пайда болуы коршаған ортаның физикалық жағдайларына байланысты ерекшеленеді. Мысалы, жұлдыздар Рош қуысының толып кетуіне байланысты да, күшті жұлдызың желдің әсерінен де аккреция дискісін түзе алады. Бұл жұмыста біз Рош қуысының толып кетуі нәтижесінде аккреция жылдамдығы төмен стандартты жақын екілік жүйе үшін аккрециялық диск моделін карастырамыз. Аккреция жылдамдығы $\dot{M} = 10^{-7} - 10^{-9} M_{\odot}/\text{жыл}$ болатын жүйелер аккреция жылдамдығы аз жүйелер.

Бұл жұмыста модельдеу параметрлері ретінде орталық жұлдыздың массасы $M = 1 M_{\odot}$ аккреция жылдамдығы $\dot{M} = 10^{-11} - 10^{-12} M_{\odot}/\text{жыл}$ және дискінің радиусының өлшемі $R = 10^8 - 10^{10} \text{ см}$ етіп таңдалды. Аккрециялық дискінің сандық моделі тұтқыр қыздыру, радиациялық салқыннату және конвективтік тасымалдау үшін тендеулер жүйесін шешу арқылы алынады. Модель биіктік осі үшін гидростатикалық тепе-тендік тендеуін, идеалды және фотонды газдар үшін күй

тендеуін қамтиды. Сәулелену ағыны диффузиялық тендеу арқылы есептеледі, ал конвекция Шварцшильд моделіне негізделген және конвекцияны есепке алу үшін негізгі параметр ретінде араластыру ұзындығы параметрлері пайдаланылды. Сондай-ақ дұрыс модельдеу үшін оптикалық қалындықтар ескеріледі. Оптикалық қалындықты есептеуге арналған мөлдірлік факторлары OPAL және Opacity Project нәтижелеріне негізделген.

Жұмыстың нәтижесінде жұлдыздың центрінен әртүрлі қашықтықтағы температураның, тығыздықтың және қысымның үлестірімдері алынды. Нәтижелер жұлдыздан әртүрлі қашықтықтағы конвективті және радиациялық тасымалдауды салыстыруды қамтиды.

Түйін сөздер: жақын қос жұлдыздар, аккрециялық диск: модельдеу, радиалды құрылым, конвекция, радиациялық тасымалдау.

Д.Т. Агишев*, С.А. Хохлов, А.Т. Агишев, Н.Л. Вайдман, А.Т. Агишев, 2025.

Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан.

E-mail: agishev.dt@phystech.edu

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО И КОНВЕКТИВНОГО ПЕРЕНОСА В ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ С МАЛЫМ ТЕМПОМ АККРЕЦИИ ВЕЩЕСТВА

Дамир Талгатович Агишев – PhD докторант, Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан, E-mail: agishev.dt@phystech.edu, <https://orcid.org/0009-0008-7289-1347>;
Серик Анатольевич Хохлов – PhD, профессор кафедры Электроники и Астрофизики, Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан, E-mail: skhokh88@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5163-508X>;

Алдияр Талгатович Агишев – PhD, ассоциированный профессор кафедры Электроники и Астрофизики, Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан, E-mail: aldiyar.agishev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9788-7485>;

Надежда Леонидовна Вайдман – магистр по Физике и Астрономии, Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан, E-mail: nvaldmann@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7449-0108>;

Алмансур Талгатович Агишев – PhD докторант, Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан, E-mail: almansur97@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-8989-238X>.

Аннотация. Исследование аккреционных дисков является одной из важных задач современной астрофизики. Механизмы взаимодействия между звездами и образование аккреционных дисков различаются исходя из физических условий среды. Так, например, звезды могут формировать аккреционный диск как из-за переполнения полости Роша, так и за счет сильного звездного ветра. В рамках данной работы мы рассматриваем модель аккреционного диска для стандартной тесной двойной системы с малым темпом акреции в результате переполнения полости Роша. Системы, в которых темп акреции составляет $\dot{M} = 10^{-7} - 10^{-9} M_{\odot}/\text{год}$ являются системами с низкими темпами акреции.

В качестве параметров моделирования в настоящей работе выбрана масса

центральной звезды $\dot{M} = 1 M_{\odot}$, темп акреции $\dot{M} = 10^{-11} - 10^{-12} M_{\odot}/\text{год}$ и размер радиуса диска $R = 10^8 - 10^{10} \text{ см}$. Численная модель акреционного диска получается путем решения системы уравнений для вязкостного нагрева, радиационного охлаждения и конвективного переноса. Модель включает в себя уравнение гидростатического равновесия для вертикальной оси, и уравнение состояния для идеального и фотонного газа. Радиационный поток вычисляется с помощью диффузационного уравнения, а конвекция основывается на модели Шварцшильда и использует параметр длины смешивания как основной параметр для учета конвекции. Также, для верного моделирования учтены оптические толщины. Коэффициенты непрозрачности для вычисления оптической толщины основаны на результатах OPAL и Opacity Project.

Результатом работы стало получение распределений температуры, плотности и давления на разных расстояниях от центра звезды. Результаты включают сравнение конвективного и радиационного переноса на различных расстояниях от звезды.

Ключевые слова: тесные двойные звезды, акреционный диск: моделирование, радиальная структура, конвекция, радиационный перенос.

Благодарности. Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, грант № AP19678376.

Введение. Данная работа представляет собой теоретическое исследование акреционных дисков в тесных двойных системах (ТДС). Тесными двойными системами называются двойные звезды, в которых компоненты системы влияют на эволюцию друг друга. Такие системы называются тесными из-за большой близости звезд, которая приводит к перетеканию звездного вещества с одной звезды на другую. Как известно, существует множество разных классов и подклассов ТДС. Системы, в которых темп акреции составляет $\dot{M} = 10^{-7} - 10^{-9} M_{\odot}/\text{год}$ называют системами с высокими темпами акреции. А системы с малым темпом акреции имеют $\dot{M} = 10^{-11} - 10^{-12} M_{\odot}/\text{год}$. В рамках данной работы мы фокусируемся на ТДС с малым темпом акреции вещества.

В ходе перетекания вещества с звезды-донора образуется акреционный диск вокруг звезды-аккретора. Вертикальная структура по диску играет важное значение в формировании и физических характеристиках акреционных дисков. В дисках происходят процессы вязкостного нагрева, радиационного охлаждения и конвективного переноса. Баланс этих эффектов приводит к возникновению равновесной температуры. В некоторых звездных системах диски не являются стационарными, так как процессы нагрева и охлаждения приводят системы в нестабильное состояние. Такие эффекты, например, рассмотрены в работах (Warner, 1995; Amantayeva, и др., 2021). Следовательно, в структурах акреционных дисков возникают сложные структуры. В рамках данной работы мы будем рассматривать стационарные модели дисков.

Классическими примерами в данной сфере являются работы (Cannizzo, и др., 1984) и (Meyer, и др., 1982), которые исследуют конвективный и радиационный перенос в аккреционных дисках. В работе (Meyer, и др., 1983) авторами описано влияние α -параметра кинематической вязкости Шакуры-Сюняева на структуру дисков.

Материалы и методы исследования. Для теоретического описания диска требуется система из 5 уравнений, учитывающая механизмы нагрева, охлаждения, перераспределения плотности и уравнение состояния. Поток вязкостного нагрева определяется следующим уравнением:

$$F = \nu \Sigma (r \frac{d\omega}{dr})^2 = \frac{3GM\dot{M}}{8\pi r^3} (1 - \sqrt{\frac{r_{in}}{r}}). \quad (1)$$

Здесь \dot{M} - темп акреции, r_{in} - радиус внутреннего края диска и $\omega = \sqrt{GM/r^3}$ - угловая скорость вращения. Σ - плотность вертикальной поверхности диска:

$$\Sigma = \int_0^H \rho dz \quad (2)$$

Для решения задачи необходимо ввести другую формулу для потока вязкостного нагрева. Кинематическая вязкость определяется уравнением $\nu = \alpha c_s H$, которое введено Шакуром и Сюняевым (Shakura, и др., 1984). Здесь α представляет собой безразмерный свободный параметр, который называется параметром Шакуры-Сюняева. Идея заключается в том, что в аккреционных дисках присутствуют турбулентности, приводящие к высокой вязкости в диске. Размеры турбулентностей не могут превышать вертикальных размеров диска H и не могут иметь скорости выше звуковой скорости c_s . Даже если скорости будут выше скорости звука, это приведёт к сверхзвуковому течению и, как следствие, огромному вязкому трению. В конечном счёте скорость течения обязана будет прийти в дозвуковой уровень, поэтому коэффициент α не может превышать единицы.

Уравнение для объемной мощности вязкостного нагрева определяется как:

$$e = t_{\phi r} \left(-r \frac{d\omega}{dr} \right) = -\frac{3}{2} \eta \sqrt{\frac{GM}{r^3}} = -\frac{3}{2\rho\nu c_s H \sqrt{\frac{GM}{r^3}}}. \quad (3)$$

Здесь $t_{\phi r}$ - тензор напряжения акреции, η - коэф. динамической вязкости, ν - коэф. кинематической вязкости, ρ - плотность вещества, c_s – скорость звука в среде и H – вертикальная высота диска. От уравнения для объемной мощности (3) нагрева необходимо будет перейти к потоку энергии.

Пусть диск находится в равновесном состоянии относительно вертикальной оси z , тогда уравнение для гидростатического равновесия (Ландау, и др., 1986):

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g_z = -\rho \omega^2 z. \quad (4)$$

Уравнение состояния идеального и фотонного газа:

$$P = \frac{\rho R T}{\mu} + a T^4 / 3. \quad (5)$$

Также, требуется уравнение для радиационного охлаждения и конвективного переноса:

$$F = \frac{4}{3} ac \frac{T^3}{\kappa \rho} \nabla T + c_p \rho \sqrt{g_z/T} l^2 / 4 (\nabla T - \nabla T_{ad})^{3/2}. \quad (6)$$

Здесь первое слагаемое представляет собой выражение для радиационного переноса, а второе слагаемое для конвекции. l - длина смещивания, т. е. вертикальная длина, на которой перемешиваются конвективные потоки. Если $l=H$, значит конвекция протекает по всей вертикальной высоте диска. Поэтому, удобно ввести параметр $\delta = l/H$, который называется параметром длины смещивания.

Решение данной системы дифференциальных уравнений проблематично, из-за нелинейности относительно T и ρ . Поэтому, необходимо упростить систему, заменив ∇T и ∇P на T/H и P/H . В результате получается алгебраическая система уравнений, состоящая из 5 уравнений и 5 неизвестных T, P, H, F и ρ . Данные величины усреднены по всей высоте z . Вид системы уравнений после упрощения:

Поток вязкостного нагрева остается без изменений:

$$F = \nu \Sigma (r \frac{d\omega}{dr})^2 = \frac{3GM\dot{M}}{8\pi r^3} (1 - \sqrt{\frac{r_{in}}{r}}), \quad (7)$$

поток вязкостно нагрева с учетом свободного параметра Шакуры-Сюняева:

$$F = 3/2 \alpha \omega PH, \quad (8)$$

уравнение гидростатического равновесия после упрощения:

$$P = \rho \omega^2 H^2, \quad (9)$$

уравнение состояния:

$$P = \frac{\rho RT}{\mu} + aT^4/3, \quad (10)$$

поток для радиационного и конвективного переноса:

$$F = \frac{4}{3} ac \frac{T^4}{\kappa \rho H} + c_p \rho \sqrt{g_z} / 4 \frac{l^2}{H^2} (\nabla - \nabla_{ad})^{3/2} T \sqrt{H}. \quad (11)$$

Для упрощения введем величины A, B, C, D, E, G и I , которые являются константами при фиксированном радиусе r (т. е. они не зависят от T, P, H, F и ρ , а зависят только от r). Данные константы существенно упрощают решение задачи. Тогда уравнения (7)-(11) будут иметь следующий вид:

$$F = A, \quad A = \frac{3GM\dot{M}}{8\pi r^3} \left(1 - \sqrt{\frac{r_{in}}{r}} \right), \quad (12)$$

$$F = D \cdot PH, \quad D = 3/2 \alpha \omega, \quad (13)$$

$$P = E \cdot \rho H^2, \quad E = \omega^2, \quad (14)$$

$$P = B \cdot \rho T + C \cdot T^4, \quad B = \frac{R}{\mu}, \quad C = a/3, \quad (15)$$

$$F = G \cdot \frac{T^4}{\kappa \rho H} + I \cdot \rho T \sqrt{H}, \quad G = \frac{4}{3} ac, \quad I = c_p \sqrt{g_z} / 4 \frac{l^2}{H^2} (\nabla - \nabla_{ad})^{3/2} \quad (16)$$

Система уравнений (12) - (16) после упрощений сводится к системе из двух уравнений:

$$A = GS \cdot \frac{T^4}{\kappa \rho^{2/3}} + I \sqrt{S} \cdot T \rho^{5/6}, \quad (17)$$

$$A = (BT^4 + C\rho T) \cdot \frac{DS}{\rho^{1/3}}, \quad (18)$$

Здесь $S = \sqrt[3]{(A/DE)}$ второе уравнение (18) является кубическим уравнением относительно плотности ρ . Вещественные решения возможны только при дискриминанте $D < 0$. Дискриминант относительно температуры T будет выглядеть следующим образом:

$$T^{2/9} < \frac{2}{3\sqrt{3}} \frac{AE^{1/2}}{DBC^{1/2}} \quad (19)$$

То есть решение уравнений (17) и (18) существует при наличии верхней границы для температуры. Вещественные решения уравнения (18) имеют 3 корня: 2 положительных корня ρ и 1 отрицательный корень ρ . Ясно, что отрицательное значение не соответствует физическому смыслу. Один из положительных корней даёт слишком маленькие значение плотности (около 10^{-15} - 10^{-25} г/см 3), это также не соответствует наблюдательным данным. Остается последний положительный корень, который дает значения близкие к наблюдаемым (Subebekova, и др., 2020). В монографии (Бисикало, и др., 2013) автор пишет, что первый положительный корень соответствует газам с преобладающим давлением излучения, а второй положительный корень соответствует газу с преобладающим газовым давлением. Подставляя решение (18) в (17), получается единственное уравнение, зависящее только от температуры. Решение этого уравнения можно найти численно.

Результаты и обсуждение. Перед тем как перейти к результатам решения необходимо обсудить модель оптической толщины. Оптическая толщина τ - безразмерная физическая величина, определяющая насколько сильно излучение поглощается средой (плазмой). Ее учет необходим для правильного моделирования радиационного переноса. Изменение интенсивности излучения зависит экспоненциально от оптической толщины:

$$I = I_0 e^{-\tau} = I_0 e^{-\kappa \rho l}, \quad (20)$$

здесь κ - коэффициент оптической непрозрачности, l - расстояние, пройденное излучением.

Вычисление оптической толщины является сложной задачей так, как это требует учета разных механизмов поглощения и рассеяния, ионизации, заселенности уровней для множества химических элементов в плазме. Поэтому в

данной работе используется модель оптической толщины, рассчитанная группами Opacity Project (OP) (Badnell, и др., 2005) и OPAL (Iglesias, и др., 1996). Их данные практически идентичны для диапазона температур 6.000К-100.000К.

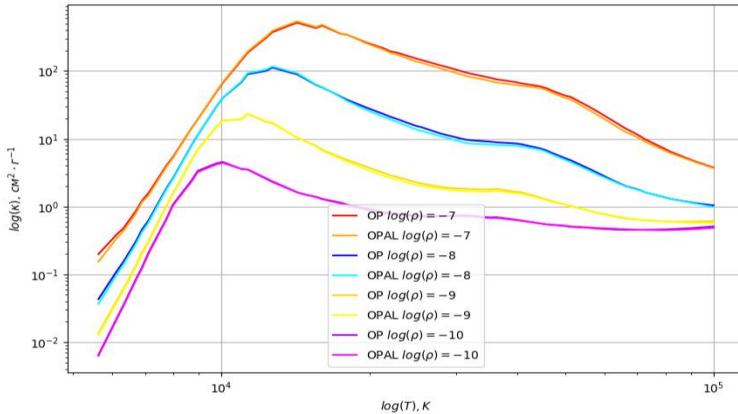


Рисунок 1. Сравнение коэффициентов непрозрачности, полученных группами Opacity Project (OP) и OPAL для 4 плотностей газа.

Единственным недостатком OP является отсутствие данных свыше 1.000.000 К, поэтому в работе будут использоваться данные OPAL. Для температур ниже 6.000 К требуется учет молекулярных и атомарных колебаний, которые учтены в работе (Alexander, и др., 1994). Поэтому кривая коэффициента непрозрачности будет состоять из данных статей (Iglesias, и др., 1996) (OPAL) и (Alexander, и др., 1994) (AFG).

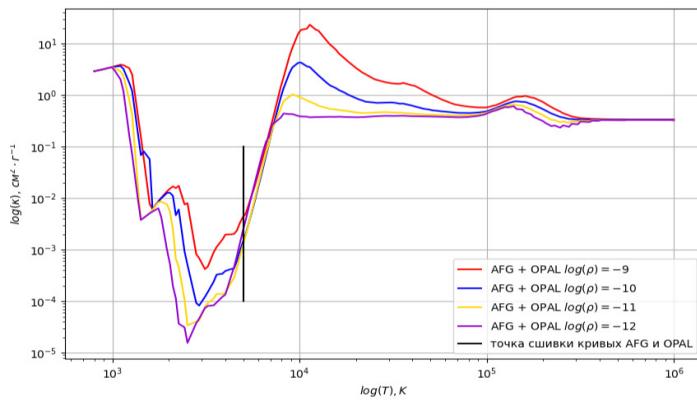


Рисунок 2. Оптическая толщина для диапазона температур 800 К - 1.000.000 К для 4 плотностей.

Черная линия соответствует месту сшивки моделей оптической толщины OPAL и AFG.

Решение системы уравнений (12)-(16) при $M = 1M_{\odot}$, $\dot{M} = 10^{-12}M_{\odot}/\text{год}$, $R = 10^8 - 10^{10} \text{ см}$, $\alpha = 1$, $\delta = 0.02 - 0.09$, (параметр длины смешивания $l = \delta H$) дает следующее распределение температуры Т, плотности ρ и вертикальной высоты Н:

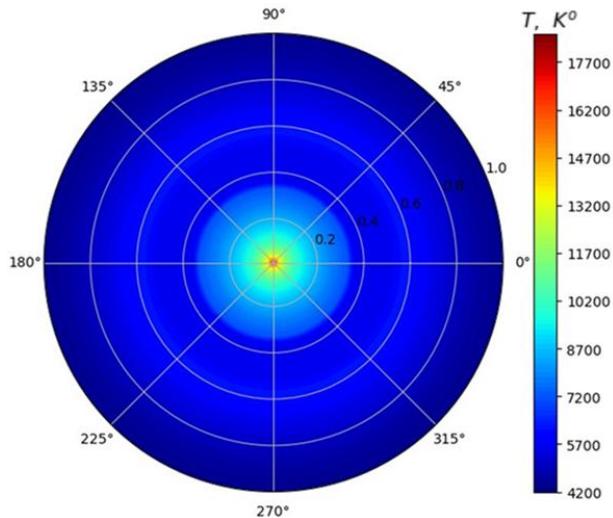


Рисунок 3. Радиальное распределение температуры в диске в диапазоне $r = 10^8 - 10^{10}$ см. Как видно на рисунке, внутренним областям диска ($r = 10^8 - 10^9$ см) соответствует температура 10.000 К и выше, это связано с увеличением вязкостного нагрева в диске. Во внешних областях ($r = 10^8 - 10^{10}$ см) температура заметно ниже и падает примерно до 4.000 К к краю диска.

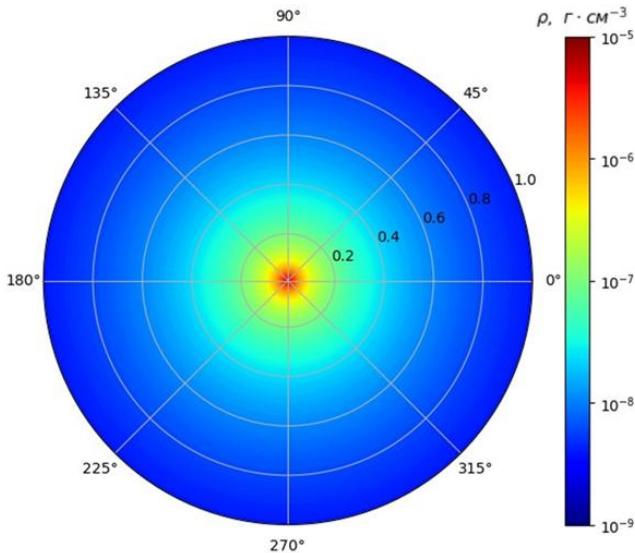


Рисунок 4. Радиальное распределение плотности в диске в диапазоне $r = 10^8 - 10^{10}$ см. Во внутренних областях диска ($r = 10^8 - 10^9$ см) плотность составляет около $\rho = 10^{-5} - 10^{-7}$ г · см⁻³. Во внешних областях ($r = 10^8 - 10^{10}$ см) плотность ниже на 1–2 порядка и составляет около $\rho = 10^{-7} - 10^{-9}$ г · см⁻³.

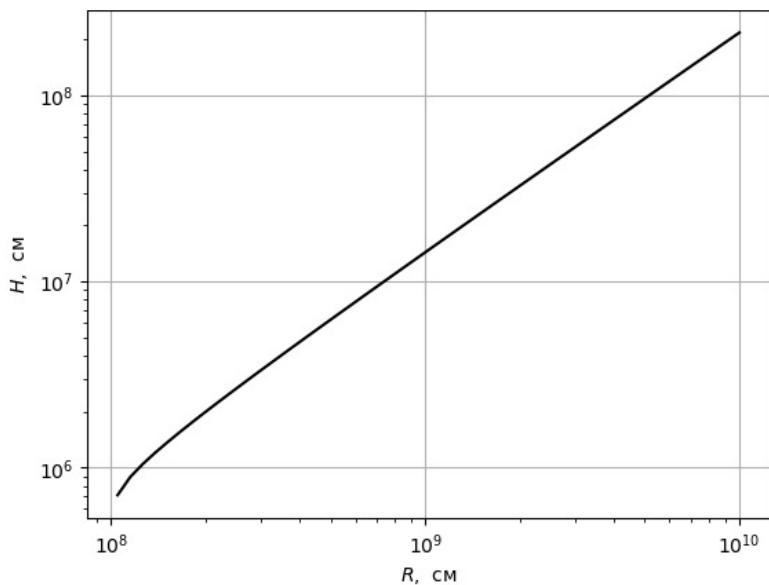


Рисунок 5. Радиальная зависимость вертикальной высоты диска в диапазоне $r = 10^8 - 10^{10}$ см.

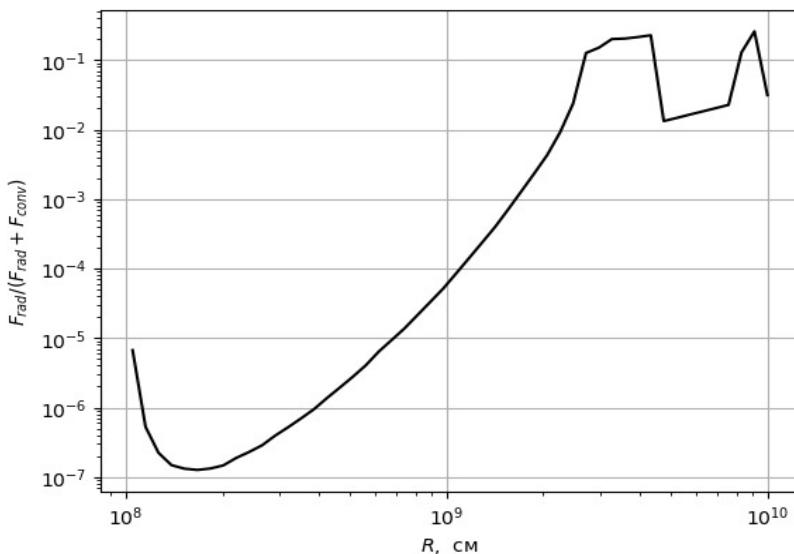


Рисунок 6. Радиальная зависимость ($r = 10^8 - 10^{10}$ см) отношения вклада потока радиационного переноса к полному потоку для. Видно, что во внутренних областях основным механизмом переноса является конвекция, а во внешних областях в основном перенос происходит за счет радиации.

Результаты моделирования показывают, что внутренние области диска имеют высокий уровень вязкостного нагрева по сравнению с внешними областями. Плотность вещества во внутренних областях на 2–3 порядка выше плотности во внешних областях. Поэтому, во внутренних областях баланс нагрева и охлаждения

достигается преимущественно конвекцией, в то время как для внешних менее плотных областей вклад радиационного переноса больше.

Заключение. Приведенный в настоящей работе метод представляет собой относительно простой способ исследования структуры аккреционных дисков. Решение системы алгебраических уравнений дает описание структуры диска в первом приближении. Преимущества данного метода заключаются в относительной простоте и скорости вычислений. Метод хорошо подходит для описания общих характеристик, но не подходит для исследования локальных особенностей в диске, таких как ударные волны, волны разрежения и волны плотности.

Для дальнейшего совершенствования исследования является возможным решение представленной системы уравнений в конечно-разностной схеме. Это позволит построить более точную структуру диска и откроет новые особенности в нем, в частности по вертикальной составляющей диска. Также, вместо диффузионного уравнения для радиационного переноса имеет место применение диффузного уравнения с ограниченным потоком, либо функции нагрева-охлаждения для более точного определения радиационного переноса (Sandee, и др., 2021). Учет диссоциации, ионизации и условие Шварцшильда для конвекции (Juhan, и др., 2002) и (Shakura, 2018), позволит получить более точную модель конвективного переноса.

Литература

- Alexander, D.R., Ferguson J.W. (1994) Low-Temperature Rosseland Opacities. *The Astrophysical Journal*. Vol. 437., p. 879. DOI: <https://doi.org/10.1086/175039>.
- Amantayeva A., Zharikov S., Page K.L., Pavlenko E., Sosnovskij A., Khokhlov S., and Ibraimov M. (2021) Period Bouncer Cataclysmic Variable EZ Lyn in Quiescence. *The Astrophysical Journal*. Vol. 918(2.), p. 58. DOI: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac0e36>
- Badnell, N. R., Bautista M. A., Butler K., Delahaye F., Mendoza C., Palmeri P., Zeippen C.J., Seaton M. J. (2005) Updated Opacities from the Opacity Project. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* Vol. 360(2.), pp. 458–464. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.08991.x>
- Бисикало Д.В., Жилкин А.Г., Боярчук А.А. (2013) Газодинамика тесных двойных звезд. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2013. — 632 с.
- Cannizzo J. K., Wheeler J.C. (1984) The Vertical Structure and Stability of Alpha Model Accretion Disks. *The Astrophysical Journal Supplement Series*. Vol. 55., pp. 367-388. DOI: <https://doi.org/10.1086/190959>
- Iglesias, C. A., and Rogers F. J. (1996) Updated Opal Opacities. *The Astrophysical Journal* Vol. 464 p. 943. DOI: <https://doi.org/10.1086/177381>
- Juhan F., King A., and Raine D. (2002) *Accretion Power in Astrophysics*. Cambridge University Press, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139164245>
- Kumar S., Poser A. J., Schöttler M., Kleinschmidt U., Dietrich W., Wicht J., French M., and Redmer R. (2021) Ionization and Transport in Partially Ionized Multicomponent Plasmas: Application to Atmospheres of Hot Jupiters. *Physical Review E*. Vol. 103(6.), id:063203 DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.103.063203>
- Ландау Л.Д., Лицшиц Е.М. (1986) Теоретическая физика Гидродинамика. 3-е изд., испр. - Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., - 736 с. (т. VI)
- Meyer F., Meyer-Hofmeister E. (1982) Vertical structure of accretion disks. *Astronomy and Astrophysics*. Vol. 106(1.), pp. 34–42.
- Meyer F., Meyer-Hofmeister E. (1983) Accretion disks in cataclysmic variables - The influence of the frictional parameter alpha on the structure. *Astronomy and Astrophysics*. Vol. 128(2.), pp 420–425

- Shakura N.I., Sunyaev R.A. (1973) Black Holes in Binary Systems. Observational Appearance. *Astronomy and Astrophysics*. Vol. 24., pp 337–355
- Shakura, Nikolay, (2018) ed. Accretion Flows in Astrophysics. *Astrophysics and Space Science Library*. Cham: Springer International Publishing, 2018. Vol. 454. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93009-1>
- Subebekova, G, Zharikov S., Tovmassian G., Neustroev V., Wolf V., Hernandez M-S., Kučáková H., and Khokhlov S. (2020) Structure of Accretion Flows in the Nova-like Cataclysmic Variable RW Tri. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Vol. 497(2)., pp. 1475–1487. DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/staa2091>
- Warner B. (1995) Cataclysmic Variable Stars. Cambridge University Press, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511586491>

References

- Warner B. (1995) Cataclysmic Variable Stars. Cambridge University Press, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511586491> (in English)
- Amantayeva A., Zharikov S., Page K.L., Pavlenko E., Sosnovskij A., Khokhlov S., and Ibraimov M. (2021) Period Bouncer Cataclysmic Variable EZ Lyn in Quiescence. *The Astrophysical Journal*. Vol. 918(2), p. 58. DOI: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac0e36> (in English)
- Cannizzo J.K., Wheeler J.C. (1984) The Vertical Structure and Stability of Alpha Model Accretion Disks. *The Astrophysical Journal Supplement Series*. Vol. 55., pp. 367–388. DOI: <https://doi.org/10.1086/190959> (in English)
- Meyer F., Meyer-Hofmeister E. (1982) Vertical structure of accretion disks. *Astronomy and Astrophysics*. Vol. 106(1)., pp. 34–42. (in English)
- Meyer F., Meyer-Hofmeister E. (1983) Accretion disks in cataclysmic variables - The influence of the frictional parameter alpha on the structure. *Astronomy and Astrophysics*. Vol. 128(2)., pp 420–425 (in English)
- Shakura N. I., Sunyaev R. A. (1973) Black Holes in Binary Systems. Observational Appearance. *Astronomy and Astrophysics*. Vol. 24., pp 337–355 (in English)
- Bisikalo D.V., Zhilkin A.G., Boyarchuk A.A. (2013) *Gazodinamika tesnykh dvoynykh zvezd* [Gas dynamics of close binary stars]. Moscow: PHYSMATLIT, 2013. - 632 c. (in Russian)
- Badnell, N. R., Bautista M. A., Butler K., Delahaye F., Mendoza C., Palmeri P., Zeippen C. J., Seaton M. J. (2005) Updated Opacities from the Opacity Project. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* Vol. 360(2)., pp. 458–464. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.08991.x> (in English)
- Iglesias, C. A., and Rogers F.J. (1996) Updated Opal Opacities. *The Astrophysical Journal* Vol. 464 p. 943. DOI: <https://doi.org/10.1086/177381> (in English)
- Alexander, D.R., Ferguson J.W. (1994) Low-Temperature Rosseland Opacities. *The Astrophysical Journal*. Vol. 437., p. 879. DOI: <https://doi.org/10.1086/175039> (in English)
- Landau L.D., Lifshits E.M. (1986) *Teoreticheskaya fizika Gidrodinamika* [Theoretical Physics Hydrodynamics]. Theoretical Physics Hydrodynamics. 3rd edition, revised. - Moscow: Nauka. Gl. ed. of Phys.-Math. lit., - 736 p. (vol. VI) (in Russian)
- Juhan F., King A., and Raine D. (2002) Accretion Power in Astrophysics. Cambridge University Press, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139164245> (in English)
- Subebekova, G, Zharikov S., Tovmassian G., Neustroev V., Wolf V., Hernandez M-S., Kučáková H., and Khokhlov S. (2020) Structure of Accretion Flows in the Nova-like Cataclysmic Variable RW Tri. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Vol. 497(2)., pp. 1475–1487. DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/staa2091> (in English)
- Kumar S., Poser A. J., Schöttler M., Kleinschmidt U., Dietrich W., Wicht J., French M., and Redmer R. (2021) Ionization and Transport in Partially Ionized Multicomponent Plasmas: Application to Atmospheres of Hot Jupiters. *Physical Review E*. Vol. 103(6)., id:063203 DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.103.063203> (in English)
- Shakura, Nikolay, (2018) ed. Accretion Flows in Astrophysics. *Astrophysics and Space Science Library*. Cham: Springer International Publishing, 2018. Vol. 454. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93009-1> (in English)

T.M. Aldabergenova*, M.F. Vereshchak, A.S. Dikov, S.B. Kislitsin, 2025.

Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: tamaramus@inp.kz

**FINE STRUCTURE OF COATING BASED ON HIGH ENTROPY ALLOY
NITRIDES (ALTIZRYNB)N, DETERMINED BY THE CAMS METHOD ON
IMPLANTED IRON-57 CORES**

Vereshchak Michael – Candidate of physics and mathematics science Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan, email:m.Vereshchak@inp.kz, OrcidID: 0000-0003-3461-9066;

Aldabergenova Tamara – PhD, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan, email: tamaramus@inp.kz, OrcidID: 0000-0001-5276-0042;

Dikov Alexey – Candidate of Technical Sciences, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan, email: dikov@inp.kz, OrcidID: 0000-0002-5279-694X;

Kislitsin Sergey – Candidate of physics and mathematics science, Almaty, Kazakhstan, email: skislitsin@inp.kz, OrcidID: <https://orcid.org/0000-0003-4903-1185>.

Abstract. The effect of implanted iron ions with energies on the structure of a coating based on the nitride of the high-entropy alloy Al–Ti–Zr–Y–Nb (HEA) was studied using the method of Mössbauer spectroscopy on ^{57}Fe nuclei in the electron backscattering geometry (EBS), with the use of X-ray diffraction (XRD) data. The initial structure of the alloy, before the implantation of iron-57, is represented by two fcc structures with lattice parameters corresponding to the nitriles of the elements included in the high-entropy alloy. The implantation of iron-57 ions was carried out at the UKP-2-1 heavy ion accelerator of the Institute of Nuclear Physics (Almaty, Kazakhstan) by irradiation with ^{57}Fe ions with an energy of 200 keV to a fluence of $5 \cdot 10^{16}$ ion/cm². The range of iron-57 ions with an energy of 200 keV is ~ 150 nm, KEMS studies provide information on the coating structure from a depth of ~ 100 nm. According to KEMS data, immediately after implantation, the Mössbauer spectrum is significantly broadened and is characteristic of amorphous structures. This is caused by the presence of radiation defects in the implanted layer ~ 100 nm and is a consequence of ion irradiation. Subsequent isochronous annealing of the samples leads to the formation of a singlet characteristic of a cubic structure and a doublet with a crystal structure different from cubic. In this case, the group of elements Al, Ti, and Nb with a cubic structure are responsible for the singlet; and Zr and Y, having a hexagonal close-packed (HCP) lattice, generated a doublet in the surface layers of the coating. It was found that ion irradiation led to restructuring of the coating to a depth corresponding to the range

of implanted ions. Subsequent isochronous annealing leads to the appearance of a new phase with an hcp crystal lattice.

Keywords: Mössbauer spectroscopy, high-entropy alloy, Fe⁵⁷ ion implantation, isochronous annealing.

Т.М. Алдабергенова*, М.Ф. Верещак, А.С. Диков, С.Б. Кислицин, 2025.

Ядролық физика институты, Алматы Казахстан.

E-mail: tamaramus@inp.kz

ИМПЛАНТАЦИЯЛАНГАН ТЕМІР-57 ЯДРОЛАРЫНДА КИМС ӘДІСІМЕН АНЫҚТАЛҒАН ЖОҒАРЫ ЭНТРОПИЯЛЫҚ ҚОРЫТПА НИТРИДТЕРИ (ALTIZRYNB) Н НЕГІЗІНДЕГІ ЖҰҚА ЖАБЫН ҚҰРЫЛЫМЫ

Верещак Михаил – физика-математика ғылымдарының кандидаты, Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан, email m.Vereshchak@inp.kz, OrcidID: 0000-0003-3461-9066;

Алдабергенова Тамара – PhD, Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан, email: tamaramus@inp.kz, OrcidID: 0000-0001-5276-0042;

Диков Алексей – техника ғылымдарының кандидаты, Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан, email: dikov@inp.kz, OrcidID: 0000-0002-5279-694X;

Кислицин Сергей – физика-математика ғылымдарының кандидаты, Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан, email: skislitsin@inp.kz, OrcidID: <https://orcid.org/0000-0003-4903-1185>.

Аннотация. Имплантацияланған темір иондарының энергиялары бар Al-Ti-Zr-Y-Nb (РДА) жоғары энтропиялық қорытпасының нитриді негізіндеңі жабынның құрылымына әсері электрондардың кері шашырау геометриясын (КЭМС) пайдалана отырып, ⁵⁷Fe ядроларындағы Мессбауэр спектроскопиясы әдісімен зерттелді. Қорытпаның бастапқы құрылымы, темір-57 имплантациясына дейін, жоғары энтропиялық қорытпага кіретін элементтердің нитрилдеріне сәйкес келетін тор параметрлері бар екі ГЦК құрылымымен ұсынылған. Темір-57 иондарын имплантациялау Ядролық физика институтының УКП-2-1 ауыр ионды үдептішінде (Алматы, Қазақстан) энергиясы 200 кВ ⁵⁷Fe иондарымен $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² флюспен сәулелену арқылы жүзеге асырылды. 200 кВ энергиясы бар темір-57 иондарының диапазоны ~ 150 нм, КЭМС зерттеулері ~ 100 нм тереңдіктен жабын құрылымы туралы ақпарат береді. КЭМС мәліметтері бойынша, имплантациядан кейін бірден Мессбауэр спектрі айтартылғанда кеңе аморфты құрылымдарға тән. Бұл имплантацияланған қабатта ~ 100 нм радиациялық ақаулардың болуынан туындайды және иондық сәулеленудің салдары болып табылады. Үлгілердің кейінгі изохронды құйдіруі текше құрылымның синглет сипаттамасының және кубтықтан өзгеше кристалдық құрылымы бар дублеттің пайда болуына әкеледі. Бұл жағдайда текше құрылымы бар Al, Ti және Nb элементтер тобы синглет үшін жауап береді; және Zr және Y алтыбұрышты тығыз оралған (ГПУ) торы бар, жабынның беткі қабаттарында дублет құрады. Иондық сәулелену жабынның имплантацияланған иондар диапазонына сәйкес тереңдікте қайта құрылымдауға әкелетіні анықталды. Кейінгі изохронды құйдіру ГПУ кристалдық торы бар жаңа фазаның пайда болуына әкеледі.

Түйін сөздер: Мессбауэр спектроскопиясы, жоғары энтропиялық қорытпа, Fe⁵⁷ ионын имплантациялау, изохронды күйдіру.

Т.М. Алдабергенова*, М.Ф. Верещак, А.С. Диков, С.Б. Кислицин, 2025.

Институт Ядерной Физики, Алматы, Казахстан.

E-mail: tamaramus@inp.kz

ТОНКАЯ СТРУКТУРА ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ НИТРИДОВ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА (ALTiZrYNb)N, ОПРЕДЕЛЕННАЯ КЭМС МЕТОДОМ НА ЯДРАХ ИМПЛАНТИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗА-57

Верещак Михаил – кандидат физико-математических наук, Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан, E-mail: m.Vereshchak@inp.kz, ORCID ID: 0000-0001-5276-0042;

Алдабергенова Тамара – PhD, Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан, E-mail: tamaramus@inp.kz, ORCID ID: 0000-0001-5276-0042;

Диков Алексей – кандидат технических наук, Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан, E-mail: dikov@inp.kz, ORCID ID: 0000-0002-5279-694X;

Кислицин Сергей – кандидат физико-математических наук, Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан, E-mail: skislitsin@inp.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4903-1185>.

Аннотация. Методом Мёссбауэрской спектроскопии на ядрах ⁵⁷Fe в геометрии обратного рассеяния по электронному каналу (КЭМС), с привлечением данных по рентгеновской дифракции (РДА), исследовано влияние имплантированных ионов железа с энергией на структуру покрытия на основе нитрида высокoenтропийного сплава Al – Ti – Zr – Y – Nb (ВЭС). Исходная структура сплава, до имплантации железа-57, представлена двумя ГЦК-структурами с параметрами решётки, соответствующими нитрилам элементов, входящих в состав высокoenтропийного сплава.

Имплантацию ионов железа-57 осуществляли на ускорителе тяжёлых ионов УКП-2-1 ИЯФ (Алматы, Казахстан) облучением ионами ⁵⁷Fe с энергией 200 кэВ до флюенса $5 \cdot 10^{16}$ ион/см². Пробег ионов железа-57 с энергией 200 кэВ составляет ~150 нм, КЭМС-исследования предоставляют информацию о структуре покрытия с глубины ~100 нм.

По данным КЭМС следует, что непосредственно после имплантации мёссбауэрский спектр значительно уширен и характерен для аморфных структур. Это вызвано присутствием радиационных дефектов в имплантированном слое (~100 нм) и является следствием ионного облучения. Последующий изохронный отжиг образцов приводит к образованию синглета, характерного для кубической структуры, и дублета с кристаллической структурой, отличной от кубической. При этом группа элементов Al, Ti и Nb с кубической структурой ответственна за синглет, а Zr и Y, имеющие гексагональную плотноупакованную (ГПУ) решётку, породили дублет в приповерхностных слоях покрытия.

Установлено, что ионное облучение привело к перестройкам структуры покрытия на глубину, соответствующую пробегу имплантированных ионов.

Последующий изохронный отжиг приводит к появлению новой фазы с ГПУ-кристаллической решёткой.

Ключевые слова: Мёссбауэрская спектроскопия, высокоэнтропийный сплав, имплантация ионов Fe⁵⁷, изохронный отжиг.

Финансирование. Работа выполнена за счет средств Программы целевого финансирования Министерства науки и образования РК № BR 20280986.

Введение. В конце прошлого века был открыт (Zhang, 2014: 2; Firstov, 2011:6) новый класс материалов, получивший название «высокоэнтропийные сплавы» (ВЭС). Патент зарегистрирован на имя тайваньского ученого J-W. Yeh, за материалы такого типа в 2002 году (Krause-Rehberg, 2013:675). Состав таких сплавов представлен, как правило, 5 - 6 элементами. Содержание каждого элемента составляет от 5 до 35 %.

За короткий период опубликовано более 5000 научных работ. Исследование существующих ВЭС и разработка новых осуществляется во всех экономически развитых странах. Такой большой интерес к исследованию ВЭС обусловлен уникальными свойствами этих материалов, такими как долговечность, пластичность, износстойкость, коррозионная стойкость и другие (Firstov, 2011; Gorban, 2017:25). До синтеза ВЭС, в основном изучались металлические сплавы, состоящие из одного или двух основных компонентов и с меньшим количеством других легирующих элементов. Одной из особенностей новых материалов является то, что в этих сплавах нет понятия «базовый». Все содержащиеся элементы являются базовыми. Одной из глобальных идей развития ВЭС является получение однофазной структуры в виде неупорядоченного твердого раствора замещения. Стабильность ВЭС зависит от свободной энергии Гиббса (изобарно-изотермического потенциала):

$$G=H-T\cdot S, \quad (1)$$

где H – энталпия; T-абсолютная температура; S – энтропия.

Система находится в устойчивом термодинамическом равновесии при постоянных давлении и температуре, т.е. когда G имеет минимальные значения. Таким образом, ВЭС представляют собой новый класс материалов с повышенной энтропией смешивания. Высокая энтропия смесей таких систем препятствует образованию интерметаллических фаз и твердых растворов внедрения в процессе кристаллизации. Идея ВЭС основана на простом утверждении, что пять и более компонентов, взятых в равных или близких пропорциях, могут образовывать однофазный кристаллический сплав. Равное количество компонентов ВЭС является обязательным. Возникает вопрос: почему такая простая идея не была реализована раньше? Объяснение можно найти в (Pogrebnyak, 2013: 1135; Sobol, 2012: 168). Первая причина связана со сложностью изучения многокомпонентных систем. Вторая причина – интуитивное ожидание, что чем больше компонентов

содержится в сплаве, тем больше фаз образуется согласно фундаментальному правилу Гиббса (Yeh J.-W, 2015: 2254)..

Исследования кристаллической структуры нитридных покрытий на основе ВЭС представляют собой перспективное направление исследований, т.к. они обладают прекрасными прочностными свойствами (высокие значения модуля Юнга), трибологическими свойствами (износостойкость, низкий коэффициент трения и др.), демонстрируют высокую термическую стабильность (Yeh J.-W, 2007:5Miracle D.B, 2019 б:7).

Обобщая сказанное, следует заметить, что смещение пяти и более элементов приводит к образованию стабильного твердого раствора замещения с относительно простыми кубическими (ГЦК или ОЦК) или гексагональной кристаллическими решетками. Интерметаллические или многофазные структуры, как в случае традиционных многоэлементных систем (Yum-Roseri, 1965:203; Wang, Huang, 2015:28), отсутствуют.

Целью настоящей работы являются изучение радиационно – индуцированных процессов в приповерхностных слоях нитридных покрытий ($\text{AlTiZrYNb})\text{N}$, имплантированных ионами ^{57}Fe . Получение экспериментальных данных из зоны влияния этих ионов на структурно фазовое состояние имплантированных образцов и установление эволюции структуры покрытий из ВЭС при последовательных изохронных отжигах.

Материалы и методы исследования. В настоящей работе исследовано влияние изохронного отжига на структуру и свойства покрытия из нитридов ВЭС ($\text{TiZrAlYNb})\text{N}$, полученных методом вакуумно-дугового испарения катода. Катоды из высокоэнтропийных сплавов системы Ti-Zr-Al-Y-Nb изготавливались методом вакуумно-дуговой плавки в атмосфере высокочистого аргона. В таблице 1 приведен элементный состав покрытий. (O.V.Sobol, 2012:168)

Таблица 1.

Материал	Концентрация/погрешность измерений, at.%					
	N	Ti	Zr	Al	Y	Nb
($\text{TiZrAlYNb})\text{N}$	46.00	15.55	11.47	10.28	10.74	5.96
	± 0.12	± 0.05	± 0.16	± 0.03	± 0.17	± 0.15

Покрытия были получены при использовании вакуумно-дуговой установки «Булат-6» по методике, изложенной в (Sobol, 2012). В качестве подложки была взята ферритно-мартенситная сталь (Fe-12%Cr). Для изучения ВЭС использовалась в качестве основного метода мессбауэровская спектроскопия в режиме обратного рассеивания по электронному каналу (КЭМС). Следует заметить, что мессбауэровская спектроскопия в режиме на пропускание (МС) не пользуется большой популярностью среди исследователей, занимающихся проблемами ВЭС. Это связано с тем, что ВЭС являются разупорядоченными твердыми растворами замещения с неярко выраженной (аморфной) структурой. Метод КЭМС в сравнение с МС имеет ряд положительных особенностей. В случае

КЭМС с поглотителем из железа энергия конверсионных электронов равна 7.3 кэВ, что соответствует толщине эффективного слоя порядка 100нм. Это значит, что можно исследовать относительно тонкие приповерхностные слои образцов, т.е. существенно расширить по сравнению с методом МС круг решаемых научных и прикладных задач. Еще одна важная особенность метода КЭМС состоит в том, что этот метод не вызывает искажение резонансных линий при сколь угодно больших толщинах образца и более чем на два порядка повышает чувствительность метода ядерного гамма-резонанса.

Поскольку для применения эффекта Мессбауэра нужны мессбауэровские ядра в образцах, то была выполнена имплантация ионов Fe⁵⁷ с энергией 200кэВ до флюенса

$5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Программа SRIM - 2008 (Gasan, 2019:15; Krapivka, 2015:57) в режиме QuickCalculation использовалась для оценки степени воздействия ионного пучка на кристаллическую решетку имплантированных материалов. Рассчитана концентрация имплантированных ионов Fe⁵⁷ в мишени, концентрация вакансий в матрице; оценено количество обратно рассеянных ионов Fe⁵⁷. Пробег ионов Fe⁵⁷ 150 нм, что соизмеримо с пробегом конверсионных электронов. КЭМС метод позволяет получить информацию о структуре приповерхностного слоя покрытия такой толщины. Облучение выполняли током ионного пучка ~ 100 нА на ускорителе тяжелых ионов УКП-2 -1 Института ядерной физики (Алматы Казахстан). Мишенная камера дополнительно была оснащена магниторазрядным насосом, что позволяло получить вакуум $\sim 1,5 \times 10^{-7}$ мм рт. ст. и минимизировать скорость нагорания углеродной пленки на мишени при имплантации. Температура мишени при выбранных режимах облучения не превышала 60⁰С.

Последовательные изохронные двухчасовые отжиги проводили в вакуумной печи при 870К, 1070К, 1170К, 1220К, 1270К. После каждого из этапов отжига выполняли исследования структуры покрытия.

Элементный состав синтезированных образцов определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа HITACHI 4000, оснащенного энергодисперсионным анализатором IncaX-act с разрешением 3 нм при ускоряющем напряжении 5-15 кВ. Изменения кристаллической структуры исследуемых материалов до и после имплантации регистрировали на дифрактометре BrukerD8 ADVANCE с Cu-Кα- излучателем в геометрии Брэгга-Брентано. Фазы идентифицировали с помощью картотеки ASTM и TCPDS.

Электронное окружение атомов Fe⁵⁷ после завершения процесса имплантации оценивали КЭМС методом. Мессбауэровские исследования проводили на спектрометре MC-1104Эм при комнатной температуре, источником γ-квантов служил Co⁵⁷ в матрице хрома. Обработку мессбауэровских спектров осуществляли методом модельной расшифровки с помощью программы Spectr Relax (Gu, 2019:289).

Результаты и обсуждение. Известно, что разнородные атомы могут образовывать твердые растворы замещения в случае выполнения четырех критериев, разработанных Юм-Розери (Yum-Roseri, 1965:203). Первое правило

– размерный фактор. Размеры атомов компонентов не должны отличаться более чем на 14%. Второй фактор – электрохимический. Электроотрицательности атомов должны быть близки. Третий и четвертый критерии состоят в том, что расширению области твердого раствора способствуют близкие валентности и одинаковые кристаллические структуры компонентов сплава. Дополнительно для ВЭС был предложен энталпильный критерий (Yeh J.-W, 2015:2254), согласно которому образуется неупорядоченный твердый раствор.

Ранее был выполнен цикл работ (Kislitsin, 2013:22; Manakova, 2021: a:17) по исследованию влияния имплантации ионов Fe^{57} на структуру и свойства ряда металлов, в том числе и содержащихся в ВЭС (Al, Ti, Zr, Y, Nb). Результаты этих исследований сведены в таблице 1.

Таблица 2. Мессбауэровские параметры твердых растворов железа в металлических матрицах.

Компоненты матрицы	Тип решетки	Изомерный сдвиг δ , мм/с	Квадрупольное расщепление Δ , мм/с	Атомный радиус R , нм	Валентность	Литература
Al	ГЦК	0,24	-	0,143	3^+	[16]
Ti	ОЦК	0,47	-	0,146	$2,3^+4^+$	[17]
Zr	ГПУ	-0,34	0,85	0,160	4^+	[18]
Y	ГПУ	-0,12	0,70	0,181	3^+	[20]
Nb	ОЦК	-0,025	-	0,145	$4^+,5^+$	[19]
Ta	ОЦК	0,04	0,54			[18]
Mo	ОЦК	0,04	0,30			[18]

δ: изомерный сдвиг относительно металлического железа при 300 К; Δ: квадрупольное расщепление.

Параметры решетки бинарных нитридов образованных покрытий при осаждении ВЭС $(\text{TiZrAlYNb})\text{N}$.

Таблица 3. Параметры решетки, образования бинарных нитридов (Погребняк, 2015:72)

Параметры решетки,мм	TiN	ZrN	AlN	YN	NbN
	0,4242	0.4578	0.436	0.4877	0.4394
Энтропия образования,J/mole grad	0.31	8.93	0.93	6.05	3.96
Энталпия образования,kJ/mole	36.62	65.51	20.29	99.36	37.81

Из таблицы 2 видно, что ВЭС $(\text{TiZrAlYNb})\text{N}$ состоит из двух групп элементов. Элементы первой группы (Al, Ti, Nb) имеют кубическую ГЦК и ОЦК структуру; вторая группа (Zr, Y), имеют гексагональную плотноупакованную (ГПУ) решетку.

Гексагональная плотноупакованная кристаллическая решетка представляет сложную структуру в виде шестигранной призмы. Элементарная ячейка содержит 17 атомов. 14 атомов из этого числа располагаются в узлах каждого основания призмы. Три атома располагаются в середине призмы, образуя равносторонний треугольник. Кристаллическая ГПУ решетка вытянута вдоль оси С, отклоняясь от кубической симметрии. Поэтому мессбауэровские спектры соединений с ГПУ структурой представляют квадрупольный дублет. Т.е. если резонансный атом

(в данном случае Fe⁵⁷) находится в не кубическом окружении, то вокруг ядра возникает градиент электрического поля (ГЭП), как мера отклонения электронного окружения ядра от кубической симметрии.

В работе (Погребняк, 2015) представлены результаты исследования распределения элементов по поверхности покрытия ВЭС (TiZrALYNb)N. Показано, что элементы покрытия распределены равномерно. Также показано, что важным условием стабильности покрытия является постоянство давления газа (N) при напылении.

На рис.1 приведены КЭМС спектры покрытий на основе нитридов ВЭС. Результаты обработки этих спектров сведены в таблице 4.

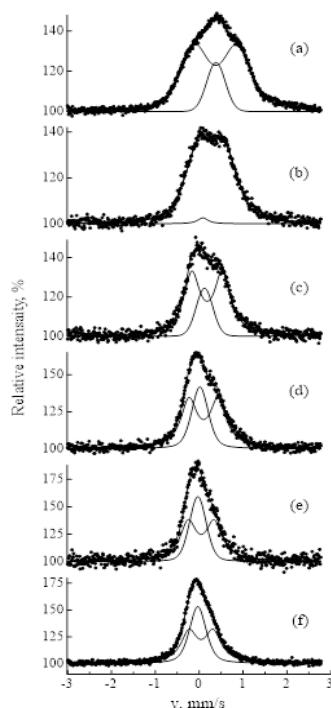


Рисунок 1. КЭМС спектры покрытий на основе нитридов до (а) и после отжига при 600°C (б), 800°C (в), 900°C (г), 950°C (д) и 1000°C (е).

Таблица 4 Мессбаузеровские параметры покрытия на основе нитридов ВЭС

T, °C	ГЦК и ОЦК		ГПУ		
	I, %	δ, мм/с	I, %	δ, мм/с	Δ, мм/с
20	16.7	0.39	83.3	0.38	0.42
600	2.0	0.09	98.0	0.28	0.30
800	22.0	0.13	78.0	0.19	0.35
900	34.7	0.02	65.3	0.11	0.33
950	39.5	-0.02	60.5	0.05	0.30
1000	44.0	-0.03	56.0	0.04	0.27

I: относительная спектральная область.

Это упрощенный вариант обработки мессбауровских спектров. Действительная картина по всей видимости гораздо сложнее. Пять элементов в составе покрытия с близким количеством и равной вероятностью могут дать как минимум 5 подспектров. Кроме того при напылении покрытия под давлением азота образуются нитриды (см.таблицу 3). Поэтому предстоит детальный анализ полученных экспериментальных данных.

В работе (Vereshak, 2023: a: 127) проведены мессбауэровские и рентгеновские исследования радиационно-индуцированных процессов в Nb (элемент первой группы покрытия ВЭС с кубической структуры). А в работе (Manakova, 2021:127) похожие исследования проведены с Zr (вторая группа с ГПУ структурой). Установлено что в результате облучения Nb и Zr ионами Fe⁵⁷ образуется пересыщенные твердые растворы замещения Nb(Fe⁵⁷) и Zr(Fe⁵⁷). Кроме синглетов в спектрах присутствовали дублеты, вызванные интерметаллидами Nb₂Fe⁵⁷, Zr₃Fe⁵⁷ и Zr Fe².

При облучении Nb и Zr ионами Fe⁵⁷ в результате рекомбинации вакансий и межузельных атомов, происходит формирование интерметаллидов Nb₂Fe, Zr₃Fe, ZrFe₂ и твердых растворов Nb(Fe) и Zr(Fe) равновесного состава.

Заключение. Методами ядерной гамма-резонансной спектроскопии на ядрах Fe⁵⁷ в режиме обратного рассеивания по электродному каналу (КЭМС) и рентгеновской дифракции (РДА) проведены исследования покрытия из высокоэнтропийных сплавов (Al, Ti, Zr, Y, Nb)N, полученных вакуумно-дуговым испарением катода в парах азота. Приготовленные образцы ВЭС были имплантированы ионами Fe⁵⁷, что позволило получать информацию о структуре приповерхностного слоя покрытия толщиной, соизмеримой с пробегом конверсионных электронов.

Проведено исследование влияния изохронного отжига образцов на кристаллическую структуру ВЭС. Показано, что до отжига покрытия на основе нитридов ВЭС представлено значительно уширенной парамагнитной линией. Это указывает на сильное искажение электронной структуры в области примесного атома Fe, приводящее к аморфизационному состоянию структуры ВЭС. Изохронный отжиг приводил к монотонному уменьшению ширины резонансных линий. На последнем этапе процесса отжига (T=1270K) образец демонстрирует неупорядоченный твердый раствор замещения. Признаков твердого раствора внедрения и интерметаллидных фаз не обнаружено. Показаны возможности метода КЭМС на примесных (имплантированных) атомах Fe в исследовании ВЭС.

References

- Zhang Y, Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C, Dahmen K.A, Liaw P.K., Lu Z.P. (2014) Microstructures and properties of high-entropy alloys Prog. Mater. Sci. Vol. 61. P. 1-93. (in English)
- Firstov S.A., Gorban V.F., Krapivka N.A., Pechkovsky E.P. (2011) Composites and Nanostructures. № 2. P. 5-20. (in English)
- Krause-Rehberg R., Pogrebnyak A.D., Borisyuk V.N., Kaverin M.V., Ponomarev A.G., Bilokur M.A., Oyoshi K., Takeda Y., Beresnev V.M., Sobol' O.V. (2013) Phys. Met. Metallogr. Vol. 114. N 8. C. 672-680. (in English)
- Gorban V.F., Krapivka N.A., Firstov S.A. .(2017) High-entropy alloys-electron concentration-phase composition-lattice parameter-properties. FMM. Vol.118. No.10. .P.1017-1029 (in English)

Pogrebnyak A.D., Bratishka S.N., Beresnev V.M., Leviant-Zaionts N. Russ. Chem. Rev. (2013) Shape memory effect and superelasticity of titanium nickelide alloys implanted with constant doses of ions Vol. 82. N 12. P. 1135-1159. (in English)

Sobol O.V., Andreev A.A., Stolbovoi V.A., Filchikov V.E. (2012). Effect of bias potential on the phase composition, structure, substructure and mechanical properties of the TiN/ZrN multilayer system obtained by vacuum arc evaporation. Tech.phys.leet.38 №2, 168. (in English)

Yeh J.-W. (2015) Physical metallurgy of high-entropy alloys JOM. V. 67. № 10. P. 2254-2261. (in English)

Yeh J.-W., Chen Y.-L., Lin S.-J., Chen S. - K. (2007). High-entropy alloys—a new era of exploration. Mater. Sci. Forum. V. 560. P. 1-9 (in English)

Miracle D.B. (2019) High entropy alloys as a bold step forward in alloy development. Nature Communications. V. 10. P. 1805. (in English)

Yum-Roseri V. (1965). Introduction to physical material science. M.: Metallurgy, 203 p. (in English)

Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. (2014) Microstructures and properties of high-entropy alloys. Progress in Mater. Sci. V. 61. P. 1-93. (in English)

Wang Z., Huang Y., Yang Y., Wang J., Liu C.T. (2015) Atomic-size effect and solid solubility of multicomponent alloys. Scripta Mater. V. 94 P. 28-31. (in English)

Gasan H., Ozcan A. (2019) New eutectic high-entropy alloys based on Co-Cr-Fe-Mo-Ni-Al: design, characterization and mechanical properties. Met. Mater. International. P. 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00515-9> (in English)

Krapivka N.A., Firstov S.A., Karpets M.V., Myslivchenko A.N., Gorban V.F. (ФММ. 2015). Features of phase formation and structure formation in high-entropy alloys of the system AlCrFeCoNiCu, ($x = 0; 0.5; 1.0; 2.0; 3.0$) // T. 116. № 5. P. 496-504.

Gu J., Ni S., Liu Y., Song M. (2019) Regulating the strength and ductility of a cold rolled FeCrCoMnNi high-entropy alloy via annealing treatment. Mater. Sci. Eng. A. V. 755. P. 289-294. (in English)

Kislitsin S.B.; Vereschak M.F., Manakova I.A., Ozernoi A.N., Satpaev D.A., Tuleushev Y.Z. (2013) Blistering and $\alpha \rightarrow \gamma$ phase transitions at annealing of stainless steel C12Cr18Ni0Ti irradiated by low energy alpha-particles. Probl. At. Sci. Tech. 2, 17-22. (in English)

Kadyrzhanov K.K., Vereshchak M.F., Manakova I.A., Ozernoy A.N., Rusakov V.S. (2013) Structure-phase transformations in the Be-Fe-Be layered system subjected to irradiation and thermal treatment.). Phys. Chem. Solids 74, 1078-1085. Aluminum influence on fine structure and distribution of chemical elements in highly en-tropic alloys Al_xFeNiCoCuCr. ФММ. (in English)

Andrianov V.A., Bedelbekova K.A., Ozernoi A.N., Vereshak M.F. and Manakova I.A. (2020) Nukl. Instrum.Methods Phys. Res., B 475 71-76. Mossbauer and x-ray of radiation-induced processes Al alloy implanted with ⁵⁷Fe ions. (in English)

Vereshak M.F., Manakova I.A. and Shokanov A.K. (2023) Mossbauer and x-ray of radiation-induced processes in nb-zr alloy implanted with ⁵⁷Fe ions. Materials 16 (10) 3813(in English)

Manakova I.A., Vereshchak M.F., Shokanov A.K., Suslov E.E., Tleubergenov Z.K., Smikhan E.A. (2021) Study of structural transformations in metallic zirconium irradiated with high-energy ⁵⁷Fe ions. In International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect. Book of Abstracts: Brasov, Romania, p. 127. (in English)

Pogrebnyak A.D., Yakushchenko I.V., Sobol O.V. et al. (2015) Effect of residual pressure and ion implantation on the structure, elemental composition, and properties of (TiZrAlYNb)N nitrides. Journal of Technical Physics Vol. 85, Issue 8, pp. 72-79. (in English)

© E. Bondar, A. Shongalova, A. Fedosimova, S. Ibraimova,
A. Kemelbekova*, 2025.

Institute of Physics and Technology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: a.kemelbekova@sci.kz

ENHANCING HYDRONIUM ION MOBILITY IN GRAPHENE OXIDE-BASED PROTON EXCHANGE MEMBRANES

Bondar E. – PhD, senior researcher, Institute of Physics and Technology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, E-mail:bondar@sci.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6745-5462>;

Shongalova A. – PhD, senior researcher, Institute of Physics and Technology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, shongalova.aigul@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7352-9007>;

Fedosimova A. – PhD, Associate Professor, Institute of Physics and Technology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: ananastasia@list.ru , <https://orcid.org/0000-0001-9607-6074>;

Ibraimova S. – IPT engineer, Institute of Physics and Technology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: sayara_ibraimova@mail.ru , <https://orcid.org/0000-0002-6652-9252>;

Kemelbekova A. – PhD, researcher, Institute of Physics and Technology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: a.kemelbekova@sci.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4813-8490>.

Abstract. This study delves into the atomistic insights surrounding the use of task-specific Deep Eutectic Solvents (DES) to enhance hydronium ion mobility in Graphene Oxide (GO)-based Proton Exchange Membranes (PEMs). Employing advanced computational modeling techniques, the research meticulously examines the optimized structures and interaction energies of DES, hydronium ions, water molecules, GO, and their various complexes. The findings reveal a strategic alignment of hydronium ions and water molecules between the GO layers and DES, indicating robust interactions that significantly facilitate proton transport. Notably, DES demonstrates favorable energetic profiles, while the complex comprising GO, DES, water, and hydronium ions showcases markedly enhanced stability relative to their isolated counterparts. This enhanced stability underscores the efficacy of DES as potent additives for improving the performance of PEMs. The study's insights offer invaluable guidance for the rational design of task-specific solvents and the development of customized membranes. By highlighting the strong interactions and favorable energetics within these complexes, the research provides a foundational understanding that can be leveraged to optimize PEM performance, ultimately advancing the field of energy materials and fuel cell technologies.

Keywords: proton exchange membrane, graphene oxide, hydronium ion, mobility, density functional theory, quantum chemical calculations.

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan, grant number AP19574404.

© Е. Бондарь, А. Шонгалова, А. Федосимова, С. Ибраимова,
А. Кемелбекова*, 2025.

Физика-Техникалық Институты, Сәтбаев Университеті, Алматы, Қазақстан.
E-mail: a.kemelbekova@sci.kz

ГРАФЕН ОКСИДІ НЕГІЗІНДЕГІ ПРОТОН АЛМАСУ МЕМБРАНАЛАРЫНДА ГИДРОНИЙ ИОНДАРЫНЫҢ ҚОЗГАЛҒЫШТЫҒЫН АРТТЫРУ

Бондар Е. – PhD, ағағылыми қызметкер, Физика-техникалық институты, Сәтбаев Университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: bondar@sci.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6745-5462>;

Шонгалова А. – PhD, ағағылыми қызметкер, Физика-техникалық институты, Сәтбаев Университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: shongalova.aigul@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7352-9007>;

Федосимова А. – PhD, қауымдастырылған профессор, Физика-техникалық институты, Сәтбаев Университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: ananastasia@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9607-6074>;

Ибраимова С. – инженер, Физика-техникалық институты, Сәтбаев Университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: sayara_ibraimova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6652-9252>;

Кемелбекова А. – PhD, ғылыми қызметкер, Физика-техникалық институты, Сәтбаев Университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: a.kemelbekova@sci.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4813-8490>.

Аннотация. Бұл зерттеу графен Оксиді (GO) негізіндеңі протон алмасу мембранныңда (PEMs) гидроний иондарының қозғалғыштығын арттыру үшін тапсырмаға тән терең әвтективалық еріткіштерді (DES) пайдалану туралы атомистік түсініктерді зерттейді.

Жетілдірілген есептеу модельдеу әдістерін қолдана отырып, зерттеу DES, гидроний иондарының, су молекулаларының, GO және олардың әртүрлі кешендерінің онтайланырылған құрылымдары мен өзара әрекеттесу энергияларын мұқият зерттейді. Нәтижелер гидроний иондары мен су молекулаларының арасындағы стратегиялық сәйкестікі, GO қабаттары мен DES протондардың тасымалдануын айтартықтай жөнілдететін сенімді өзара әрекеттесулерді көрсетеді.

Бір қызығы, DES қолайлы энергетикалық профильдерді көрсетеді, ал GO, DES, су және гидроний иондарынан тұратын кешен оқшауланған аналогтарымен салыстырғанда айтартықтай жақсартылған тұрақтылықты көрсетеді. Бұл жақсартылған тұрақтылық DES-тің PEMs өнімділігін арттыру үшін қоспалар ретіндегі тиімділігін көрсетеді. Зерттеу нәтижелері тапсырмаға арналған еріткіштерді ұтымды жобалау және теңшелген мембранның әзірлеу бойынша баға жетпес ұсыныстар береді. Осы кешендердегі өзара әрекеттесулер мен қолайлы энергетиканы көрсете отырып, зерттеу PEM өнімділігін онтайланыру үшін пайдаланылуы мүмкін іргелі түсініктерді қамтамасыз етеді, сایып келгенде, энергетикалық материалдар мен отын ұшықтары технологиялары саласын ілгерілетеді.

Түйін сөздер: протон алмасу мембранасы, графен оксиді, гидроний ионы, козғалғыштығы, тығыздықтың функционалдық теориясы, кванттық химиялық есептеулер.

**©Е. Бондарь, А. Шонгалова, А. Федосимова, С. Ибраимова,
А. Кемелбекова*, 2025.**

Физико-Технический Институт, Сатпаев университет, Алматы, Казахстан.
E-mail: a.kemelbekova@sci.kz

ПОВЫШЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ ИОНОВ ГИДРОНИЯ В ПРОТОНООБМЕННЫХ МЕМБРАНАХ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ГРАФЕНА

Е. Бондарь – PhD, старший научный сотрудник, Физико-технический институт, Сатпаев университет, Алматы, Казахстан, E-mail: bondar@sci.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6745-5462>;

А. Шонгалова – PhD, старший научный сотрудник, Физико-технический институт, Сатпаев университет, Алматы, Казахстан, E-mail: shongalova.aigul@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7352-9007>;

А. Федосимова – PhD, ассоциированный профессор, Физико-технический институт, Сатпаев университет, Алматы, Казахстан, E-mail: ananastasia@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9607-6074>;

С. Ибраимова – инженер, Физико-технический институт, Сатпаев университет, Алматы, Казахстан, E-mail: sayara_ibraimova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6652-9252>;

А. Кемелбекова – PhD, научный сотрудник, Физико-технический институт, Сатпаев университет, Алматы, Казахстан, E-mail: a.kemelbekova@sci.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4813-8490>.

Аннотация. Это исследование раскрывает атомистические идеи, связанные с использованием специальных глубоких эвтектических растворителей (DES) для повышения подвижности ионов гидрония в протонообменных мембранах на основе оксида графена (GO). Используя передовые методы компьютерного моделирования, в ходе исследования были тщательно изучены оптимизированные структуры и энергии взаимодействия DES, ионов водорода, молекул воды, GO и их различных комплексов. Полученные данные свидетельствуют о стратегическом расположении ионов гидрония и молекул воды между слоями GO и DES, что указывает на устойчивые взаимодействия, которые значительно облегчают перенос протонов. Примечательно, что DES демонстрирует благоприятные энергетические характеристики, в то время как комплекс, состоящий из GO, DES, воды и ионов гидрония, демонстрирует заметно повышенную стабильность по сравнению с их изолированными аналогами. Эта повышенная стабильность подчеркивает эффективность DES в качестве мощных добавок для улучшения характеристик PEMS.

Результаты исследования являются бесценным руководством для рационального подбора растворителей для конкретных задач и разработки индивидуальных мембран. Подчеркивая тесное взаимодействие и благоприятную энергетику в этих комплексах, исследование дает фундаментальное понимание, которое может быть использовано для оптимизации производительности ПЭМ, что в конечном итоге приведет к развитию области энергетических материалов и технологий топливных элементов.

Ключевые слова: протонообменная мембрана, оксид графена, ион гидрония, подвижность, теория функционала плотности, квантово-химические расчеты.

Introduction

Fuel cells stand as a beacon of innovation in the realm of energy conversion, offering a highly efficient alternative to traditional combustion-based power generation methods. These electrochemical current sources facilitate the direct conversion of fuel and oxidizer energy into electrical energy, circumventing the inefficiencies inherent in combustion processes and boasting energy efficiency levels that can soar to remarkable heights, ranging from 70% to 90%. The unique design of fuel cells, featuring specialized porous electrodes (anode and cathode), catalyzed predominantly by palladium, enables the efficient conversion of chemical energy from hydrogen and oxygen into electrical energy, heat, and water (Jiao, et al, 2021). With their low emission footprint, fuel cells emerge as environmentally friendly energy generation solutions, emitting only water vapor and minimal amounts of carbon dioxide when pure hydrogen is utilized as the fuel.

Among the diverse array of fuel cell technologies, proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) have garnered significant attention due to their advantageous characteristics, including high proton ion conductivity, flexibility in fuel input, and compact design. Proton exchange membranes (PEMs), serving as the heart of PEMFCs, facilitate the transportation of protons through hydrophilic channels, thereby enabling efficient electrochemical reactions at the anode and cathode interfaces (Peighambardoust, et al, 2021; Wakizoe, et al, 1995; Sopian, et al, 2006; Le, et al, 2008; Cheddie, et al, 2005).

Graphene oxide (GO)-based proton exchange membranes emerge as promising candidates to address the aforementioned challenges, offering high efficiency in energy conversion and low ohmic resistance. In our previous work (Kemelbekova, 2023) we investigated the ion transport in poly(acrylic acid) and graphene oxide-based proton exchange membranes, which provided the foundation for the current study focused on enhancing membrane performance using deep eutectic solvents (DES). In addition to serving as efficient separators of electrochemical reactions, these membranes play a pivotal role in enhancing proton conductivity within fuel cells (Myrzabekova, 2014; Ren, 2020; Kahraman, 2024; Um, 2000; Luo, 2018; Boettner, 2002; Majlan, 2018). To further enhance the performance of PEMs, researchers have explored the incorporation of various solvents, including deep eutectic solvents (DESs), ionic liquids, and benzimidazole derivatives, as substitutes for water in facilitating proton transportation. DESs, in particular, represent a novel generation of ionic liquids characterized by their cost-effectiveness, environmentally friendly nature, and ease of synthesis.

The utilization of DESs in PEMs necessitates careful consideration of several factors, including thermal stability, viscosity, and the method of integration into the PEM matrix. Notably, DESs composed of ethylene glycol (EGL) and sodium halides exhibit favorable proton conductivity ranges for PEMFC applications (Janssen, 2001; Sivertsen, 2005; Pandey, 2017; He, 2014; Huang, 2018; Peng, 2016). However, gaining insights into the formation mechanisms of DESs and their structural organization within

GO-based PEMs at the molecular level is imperative to optimize fuel cell operations and develop PEMs with enhanced functional characteristics.

Computer modeling and simulations emerge as indispensable tools for elucidating the formation mechanisms of DESs and their applications in PEMs for hydronium ion transportation. By leveraging computational techniques, researchers can expedite the exploration of DES candidates with desirable properties, thereby reducing both time and costs associated with experimental endeavors (Xu, 2023; Wong, 2018; Zhang, 2019; Cheddie, 2005; Moreira, 2009). Furthermore, Density Functional Theory (DFT) calculations offer a platform for gaining detailed insights into the formation and applications of DESs in PEMs at the molecular level, paving the way for the development of innovative fuel cell technologies with enhanced efficiency and sustainability.

In this work, we delve into the atomistic insights into task-specific deep eutectic solvents, focusing on their role in enhancing hydronium ion mobility in graphene oxide-based proton exchange membranes for fuel cell applications. Through computational modeling and simulations, coupled with experimental validation, we aim to unravel the intricate molecular mechanisms underlying the formation and functionality of task-specific DESs within PEMs, thereby advancing the frontier of fuel cell technology towards greater efficiency and sustainability.

Materials and Methods

The investigation into the quantum chemical and structural properties of task-specific deep eutectic solvents (DESs) and their interaction with graphene oxide-based proton exchange membranes (PEMs) was conducted using computational simulations. Herein, the representative model of DESs comprised a mixture of choline chloride and urea in a 1:2 ratio. At the same time, PEM model consisted of graphene oxide (GO), water, and hydronium ions.

In this study, DFT calculations were employed to investigate the interactions between choline chloride, urea, and their mixture with hydronium ions in the presence of graphene oxide. The software Gaussian09 Rev. E.01, utilizing the PM6 method, was utilized for these calculations, which were further visualized using the GaussView 5.0 program package.

The first step in the computational analysis involved the optimization of initial structures. Pure choline chloride, pure urea, and the task-specific deep eutectic solvent (DES) were subjected to DFT calculations to obtain their optimized structures. Subsequently, complexes involving choline chloride, urea, and DES with hydronium ions and graphene oxide were generated and further optimized.

Following the structure optimization, various parameters were calculated to characterize the complexes. Additionally, frequency calculations were performed to verify the stability of the optimized structures. The absence of negative frequencies indicates that the structures correspond to the global energy minimum, ensuring their reliability for further analysis.

The structural and energetic parameters obtained from the DFT calculations were then analyzed to gain a deeper understanding of the quantum chemical and structural properties of the DESs and their interactions with the PEMs (Proton Exchange Membranes).

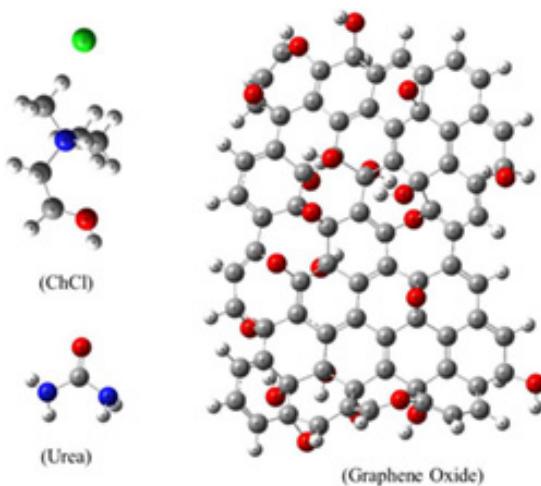


Fig 1. 3D representation of ChCl, Urea, and Graphene Oxide

To aid in the visualization and interpretation of the computational results, Figure 1 was generated to represent all the optimized structures and complexes. Visual representation of the molecular structures offers an intuitive understanding of their spatial arrangement and interactions, facilitating the interpretation of the computational data.

Results and Discussions

The study delves into the structural optimization and orbital energies of Choline Chloride (ChCl), Urea, and Deep Eutectic Solvent (DES) formed by their combination. Through molecular modeling, the researchers explored the configurations and electronic properties of these compounds, shedding light on their potential applications in various fields. This analysis aims to dissect the implications of the findings and their significance in the realm of chemical research and application.

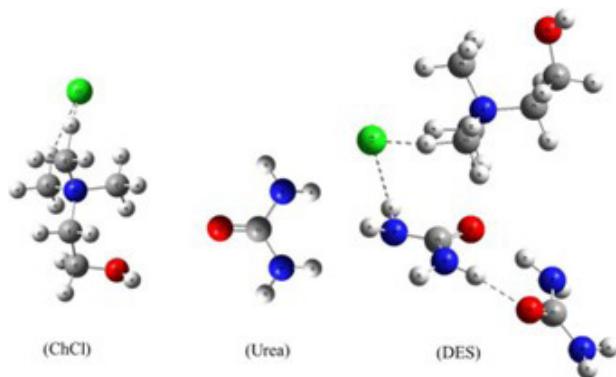


Fig 2. Optimized structures of ChCl, Urea, and DES

Table 1 – Energies of ChCl, Urea, and DES

	ChCl	Urea	DES
Energy (kJ/mol)	-277.87	-205.79	-791.73

The structural optimization of molecules such as ChCl (choline chloride), urea, and DES (deep eutectic solvent) through computational methods offers invaluable insights into their preferred configurations and the intricate network of intermolecular interactions governing their behavior. In Figure 2, a detailed depiction of these optimized structures reveals the spatial arrangement of atoms and the formation of molecular complexes. Notably, in the case of ChCl, the chloride ion tends to position itself proximal to the nitrogen atom of choline. This arrangement suggests a favorable interaction between the chloride ion and the choline moiety, likely facilitated by electrostatic forces and hydrogen bonding.

Upon the addition of two urea molecules to ChCl, the formation of DES occurs. In this complex, the chloride ion assumes a pivotal role, sandwiched between the nitrogen atom of choline and one urea molecule. Simultaneously, the second urea molecule interacts with the first one, forming a cohesive molecular structure. This arrangement underscores the intricate nature of DES formation, where multiple molecules coordinate to create a stable solvent environment.

To quantitatively assess the stability of these molecular species, optimized energies are computed and presented in Table 1. The energy associated with a single ChCl molecule is determined to be -277.87 kJ/mol, reflecting the stability of this individual component within the system. Similarly, the energy of a lone urea molecule is calculated to be -205.79 kJ/mol, indicating its inherent stability in isolation.

However, the most intriguing observation arises from the formation of DES. When one ChCl molecule associates with two urea molecules to form the DES complex, a significant decrease in energy is noted, resulting in an energy value of -791.73 kJ/mol. This substantial reduction in energy compared to the sum of individual components underscores the remarkable stability achieved within the DES structure. The emergence of such a stable configuration highlights the synergistic effects arising from the interactions between ChCl and urea molecules. These interactions likely involve a combination of hydrogen bonding, electrostatic forces, and van der Waals interactions, which collectively contribute to the enhanced stability of the DES complex.

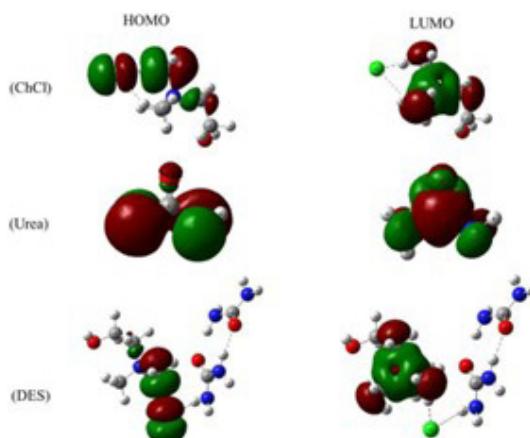


Fig 3. HOMO-LUMO orbitals of ChCl, Urea, and DES

The analysis of Highest Occupied Molecular Orbital (HOMO) and Lowest Unoccupied Molecular Orbital (LUMO) energies provides crucial information about the electronic structure and reactivity of the molecules (Figure 3). In ChCl, the HOMO is observed at -8.41 eV, primarily populated around the chloride ion, indicating its involvement in electron donation or sharing. Conversely, the LUMO at 0.30 eV is populated around the nitrogen, carbon, and carboxy groups of choline, suggesting potential sites for electron acceptance or interaction. Urea exhibits different orbital characteristics, with a HOMO at -10.66 eV, predominantly populated around nitrogen atoms and carbons. This suggests its potential as an electron donor. The LUMO at 1.00 eV is distributed around nitrogen, carbon, and oxygen atoms, indicating its ability to accept electrons. Upon the formation of DES, changes in orbital energies reflect the altered electronic interactions within the system. The HOMO of DES is found to be -8.65 eV, with significant population around the chloride ion, indicating its involvement in the electron-sharing process. The LUMO at 0.046 eV is primarily populated around choline, suggesting its role in electron acceptance.

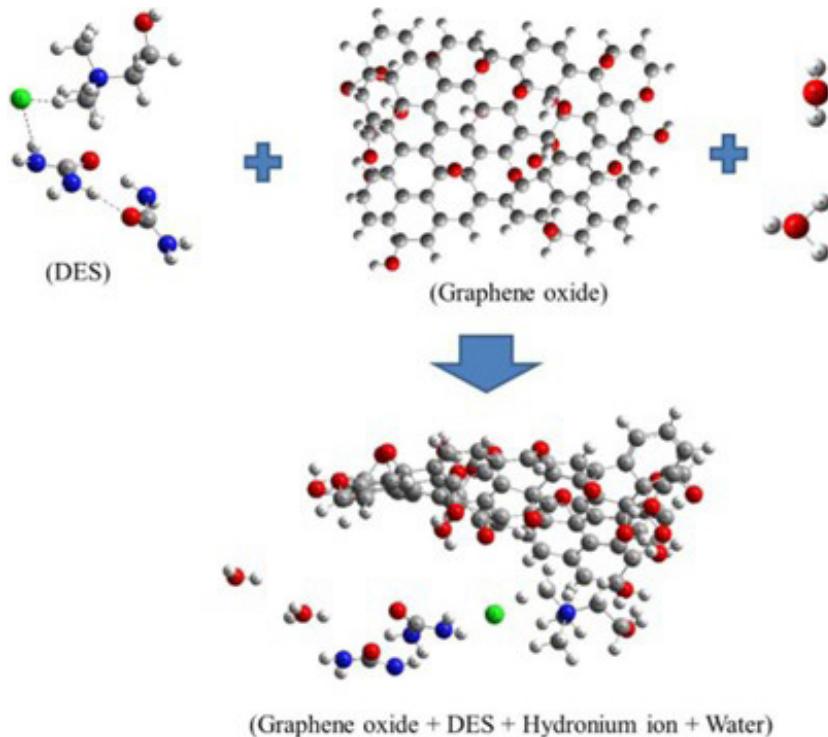


Fig 4. Optimized structures of DES, hydronium ion, water, GO, and GO+DES complex in the presence of hydronium ion and water

The study delves into the atomistic insights of task-specific Deep Eutectic Solvents (DES) and their role in enhancing hydronium ion mobility in Graphene Oxide-based Proton Exchange Membranes (PEMs) (Figure 4). Through computational modeling, the researchers investigated the optimized structures and energies of DES, hydronium

ion, water, Graphene Oxide (GO), and their complexes. This analysis aims to elucidate the molecular interactions and energy landscapes within these systems, shedding light on their potential applications in PEM technology. The figures presented illustrate the optimized structures of DES, hydronium ion, water, GO, and the GO+DES complex in the presence of hydronium ion and water. It is observed that hydronium ions and water molecules are strategically positioned between GO and DES molecules, particularly near oxygen or carboxy group sides. This arrangement suggests strong interactions between the components, potentially facilitating proton transport and enhancing membrane conductivity.

Table 2: Energies of DES, Hydronium ion, water, GO, and GO+DES complex in the

	DES	Water	Hydronium	GO	GO+DES+Hydronium+Water
Energy (kJ/mol)	-791.73	-226.86	-268.61	-823.76	-1491.91

The optimized energies obtained from computational simulations offer profound insights into the stability and energetics of the molecular systems under investigation, as illustrated in Table 2. One of the key findings is that DES (Deep Eutectic Solvent) demonstrates a notably favorable energy of -791.73 kJ/mol, suggesting a configuration that is highly stable. This insight is crucial for understanding the behavior of DES in various applications where stability is a critical factor. Similarly, the energies associated with water and the hydronium ion are determined to be -226.86 kJ/mol and -268.61 kJ/mol, respectively. These values indicate the stable presence of both water and the hydronium ion within the molecular system, providing essential information for studies related to aqueous environments and electrolyte solutions.

On the other hand, graphene oxide (GO) exhibits a relatively high energy of -823.76 kJ/mol. This higher energy level is indicative of the complex structure and intricate interactions within GO. Understanding the energetics of GO is crucial due to its wide-ranging applications in fields such as electronics, energy storage, and biomedicine. The relatively high energy of GO underscores the need for careful consideration of its behavior and interactions in various environments.

Of particular interest is the energy of the complex formed by GO, DES, water, and the hydronium ion, which is significantly lower at -1491.91 kJ/mol compared to the sum of the energies of the individual components. This observation highlights the presence of strong synergistic effects within the complex, resulting in enhanced stability. The substantial decrease in energy suggests that the interactions between GO, DES, water, and the hydronium ion are highly favorable, leading to a more stable configuration than what would be expected from the mere sum of individual energies.

Conclusion

Our study provides valuable insights into the role of task-specific Deep Eutectic Solvents (DES) in enhancing hydronium ion mobility within Graphene Oxide (GO)-based Proton Exchange Membranes (PEMs). The optimized structures and energetic landscape elucidate the strategic positioning of hydronium ions and water molecules between GO and DES, indicating strong molecular interactions conducive to proton

transport. Moreover, the favorable energetics of DES and the significant decrease in energy observed in the GO+DES+water+hydronium ion complex underscore the synergistic effects and enhanced stability imparted by the incorporation of DES into PEMs.

These findings hold promising implications for the advancement of PEM technology, particularly in applications such as fuel cells and water electrolysis, where proton conductivity and membrane stability are critical. By leveraging task-specific DES as additives, researchers can effectively tailor PEM properties to meet specific performance requirements, thus accelerating the development of next-generation proton exchange membranes.

Moving forward, further experimental validations and performance assessments are warranted to corroborate the computational predictions and elucidate the practical implications of DES-enhanced PEMs. Additionally, continued research into the design and optimization of task-specific solvents and membrane materials will be instrumental in realizing the full potential of DES-based approaches for PEM technology. Overall, this study contributes to the ongoing efforts in advancing proton exchange membrane systems for sustainable energy and environmental applications.

References

- Jiao K., Xuan J., Du Q., Bao Z., Xie B., Wang B., Zhao Y., Fan L., Wang H., Hou Z., Brandon N.P., Yin Y., Guiver M. D. (2021) Designing the next generation of proton-exchange membrane fuel cells. *Nature*. – Vol. 595, No. 7867. – P. 361-369. (in English)
- Peighambarioust S.J., Rowshanzamir S., Amjadi M. (2010) Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy*. – Vol. 35, No. 17. – P. 9349-9384. (in English)
- Wakizoe M., Velev O.A., Srinivasan S. (1995) Analysis of proton exchange membrane fuel cell performance with alternate membranes. *Electrochimica Acta*. – Vol. 40, No. 3. – P. 335-344. (in English)
- Sopian K., Daud W.R.W. (2006) Challenges and future developments in proton exchange membrane fuel cells. *Renewable Energy*. – Vol. 31, No. 5. – P. 719-727. (in English)
- Le A.D., Zhou B. (2008) A general model of proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*. – Vol. 182, No. 1. – P. 197-222. (in English)
- Cheddie D., Munroe N. (2005) Review and comparison of approaches to proton exchange membrane fuel cell modeling. *Journal of Power Sources*. – Vol. 147, No. 1-2. – P. 72-84. (in English)
- Kemelbekova A., Umirzakov A., Shongalova A., Almas N., Yelemessov K., Serikkanov A. (2023) Implementation of molecular modeling to investigate ion transportation in proton exchange membranes comprising graphene oxide and polyacrylate nanocomposites. *Physical Sciences and Technology*. – Vol. 10, No. 3-4. – P. 73-79. (in English)
- Myrzabekova M.M., Sarkar S., Baigarinova G.A., Guseinov N.R., Ilyin A.M. (2014) Obtaining and research of new composite materials polymer-graphene. *Physical Sciences and Technology*. — Vol. 1, No. 1. – P. 4-9. (in English)
- Ren P., Pei P., Li Y., Wu Z., Chen D., Huang S. (2020) Degradation mechanisms of proton exchange membrane fuel cell under typical automotive operating conditions. *Progress in Energy and Combustion Science*. – Vol. 80. – Article 100859. (in English)
- Kahraman H., Akin Y. (2024) Recent studies on proton exchange membrane fuel cell components, review of the literature. *Energy Conversion and Management*. – Vol. 304. – Article 118244. (in English)
- Um S., Wang C.Y., Chen K.S. (2000) Computational fluid dynamics modeling of proton exchange membrane fuel cells. *Journal of the Electrochemical Society*. – Vol. 147, No. 12. – P. 4485. (in English)
- Luo Y., Jiao K. (2018) Cold start of proton exchange membrane fuel cell. *Progress in Energy and Combustion Science*. – Vol. 64. – P. 29-61. (in English)

Boettner D.D., Paganelli G., Guezenne Y.G., Rizzoni G., Moran M.J. (2002) Proton exchange membrane fuel cell system model for automotive vehicle simulation and control. *Journal of Energy Resources Technology*. – Vol. 124, No. 1. – P. 20-27. (in English)

Majlan E.H., Rohendi D., Daud W.R. W., Husaini T., Haque M.A. (2018) Electrode for proton exchange membrane fuel cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – Vol. 89. – P. 117-134. (in English)

Janssen G. J. M., Overvelde M. L. J. (2001) Water transport in the proton-exchange-membrane fuel cell: measurements of the effective drag coefficient. *Journal of Power Sources*. – Vol. 101, No. 1. – P. 117-125. (in English)

Sivertsen B. R., Djilali N. (2005) CFD-based modelling of proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*. – Vol. 141, No. 1. – P. 65-78. (in English)

Pandey R. P., Shukla G., Manohar M., Shahi V. K. (2017) Graphene oxide based nanohybrid proton exchange membranes for fuel cell applications: An overview. *Advances in Colloid and Interface Science*. – Vol. 240. – P. 15-30. (in English)

He Y., Tong C., Geng L., Liu L., Lü C. (2014) Enhanced performance of the sulfonated polyimide proton exchange membranes by graphene oxide: Size effect of graphene oxide. *Journal of Membrane Science*. – Vol. 458. – P. 36-46. (in English)

Huang Y., Cheng T., Zhang X., Zhang W., Liu X. (2018) Novel composite proton exchange membrane with long-range proton transfer channels constructed by synergistic effect between acid and base functionalized graphene oxide. *Polymer*. – Vol. 149. – P. 305-315. (in English)

Peng K. J., Lai J. Y., Liu Y. L. (2016) Nanohybrids of graphene oxide chemically-bonded with Nafion: Preparation and application for proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Membrane Science*. – Vol. 514. – P. 86-94. (in English)

Xu J., Hao J., Zhai Y., Wang Y. (2023) Deep eutectic solvents based on N, N, N-trimethyl propylsulphonate ammonium hydrosulfate-urea as potential electrolytes for proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*. – Vol. 580. – Article 233385. (in English)

Wong C.Y., Wong W.Y., Walvekar R., Loh K. S., Khalid M., Lim K. L. (2018) Effect of deep eutectic solvent in proton conduction and thermal behaviour of chitosan-based membrane. *Journal of Molecular Liquids*. – Vol. 269. – P. 675-683. (in English)

Zhang N., Huang Z., Zhang H., Ma J., Jiang B., Zhang L. (2019) Highly efficient and reversible CO₂ capture by task-specific deep eutectic solvents. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – Vol. 58, No. 29. – P. 13321-13329. (in English)

Cheddie D., Munroe N. (2005) Review and comparison of approaches to proton exchange membrane fuel cell modeling. *Journal of Power Sources*. – Vol. 147, No. 1-2. – P. 72-84. (in English)

Moreira M.V., Da Silva G.E. (2009) A practical model for evaluating the performance of proton exchange membrane fuel cells. *Renewable Energy*. – Vol. 34, No. 7. – P. 1734-1741. (in English)

UDC 538.9

IRSTI 44.41.35

© N.N. Zhanturina¹, G.K. Beketova¹, Z.K. Aimaganbetova¹, K.B. Bizhanova²,
L.U. Taimuratova², 2025.

¹ K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan;

² Caspian University of Technology and Engineering named after Sh. Yessenov,
Aktau, Kazakhstan.

E-mail: taimuratova@mail.ru

MODERN PEROVSKITE SOLAR CELLS: INNOVATIONS IN MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR ENHANCED EFFICIENCY

Zhanturina Nurgul – PhD, Associate Professor, docent of the Physics department of K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan, e-mail: nzhanturina@zhubanov.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9540-6334>;

Beketova Gulnara – PhD student of the Educational program «Physics» of K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan, e-mail: diko_2006@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9213-7586>;

Aimaganbetova Zukhra – PhD, Associate Professor, docent of the Physics department of K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan, e-mail: zukhraaimaganbetova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8765-516X>;

Bizhanova Karlygash – candidate of physical and mathematical sciences, head of the Department of Natural sciences, Aktau, Kazakhstan, e-mail: bizhanovakar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4586-3742>;

Taimuratova Lidiya – candidate of physical and mathematical sciences, head of the Department of Natural sciences, Aktau, Kazakhstan, e-mail: taimuratova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1692-4350>.

Abstract. This review analyzes current research on perovskite solar cells as an alternative to traditional silicon-based solar cells. The paper discusses various types of solar cell architectures, including different combinations of the main layers, materials for electron and hole transport, as well as the anode, cathode, and conductive substrates. Different approaches to improving the stability and efficiency of these cells are examined through the use of new innovative materials for electron and hole transport layers (ETL and HTL), such as organic and inorganic analogs, as well as tandem and heterostructural elements. A review of the performance and limitations of solar cells with various perovskite materials, including hybrid ones, is also provided. A key issue discussed in the paper is the enhancement of the stability of perovskite solar cells, which can degrade significantly under the influence of moisture, ultraviolet light, and heat. The conclusion is drawn that the use of coatings, additives, and innovative materials contributes to the improvement of the stability of high-efficiency perovskite solar cells. The role of

ETL and HTL in enhancing the efficiency and stability of solar cells is also analyzed. The paper emphasizes the importance of research in the field of perovskite solar cells for the development of new efficient, stable cell structures for mass production and commercialization.

Key words: perovskite solar cells, layers, ETL, HTL, MAPbI₃, conducting substrate, stability, Spiro-OMeTAD, ultraviolet, absorption coefficient

© Н.Н. Жантурина¹, Г.К. Бекетова¹, З.К. Аймаганбетова¹, К.Б. Бижанова²,
Л.У. Таймуратова², 2025.

¹Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан;

² Ш. Есенов атындағы Каспий технологиялар және инжинириング университеті,
Ақтау, Қазақстан.

E-mail: taimuratova@mail.ru

ҚАЗІРГІ ЗАМАНҒЫ ПЕРОВСКИТТІ КҮН БАТАРЕЯЛАРЫ: ТИМДІЛІКТІ АРТТЫРУҒА АРНАЛҒАН МАТЕРИАЛДАР МЕН ТЕХНОЛОГИЯЛАРДАҒЫ ИННОВАЦИЯЛАР

Жантурина Нургул – PhD, Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университетінің физика кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Ақтөбе, Қазақстан, e-mail: nzhanturina@zhubanov.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9540-6334>;

Бекетова Гулиара – Ақтөбе өңірлік университетінің Физика кафедрасының докторанты, Ақтөбе, Қазақстан, e-mail: diko_2006@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9213-7586>;

Аймаганбетова Зухра – PhD Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университетінің физика кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Ақтөбе, Қазақстан, e-mail: zukhra.aimaganbetova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8765-516X>;

Бижанова Карлыгаш – ф.-м.ғ.к., Ш. Есенов атындағы Каспий технологиялар және инжинириング университетінің Іргелі ғылымдар кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Ақтау, Қазақстан, e-mail: bizhanovakar@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4586-3742>.

Таймуратова Лидия – ф.-м.ғ.к., Ш. Есенов атындағы Каспий технологиялар және инжинириング университетінің Іргелі ғылымдар кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Ақтау, Қазақстан, e-mail: taimuratova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1692-4350>.

Аннотация. Бұл шолуда авторлар дәстүрлі кремний негізіндегі күн батареяларына балама ретінде перовскитті күн батареялары бойынша заманауи зерттеулерді жан-жақты талдайды. Күн батареяларының әртүрлі архитектуралары, соның ішінде негізгі функционалды қабаттардың түрлі комбинациялары, электрондық және кемтіктік тасымалдау материалдары, анод, катод және өткізгіш субстраттар қарастырылады. Перовскитті күн батареяларының тиімділігі мен тұрақтылығын арттырудың инновациялық тәсілдері зерттеледі. Атап айтқанда, электрондық және тесіктік тасымалдау қабаттары (ETL және HTL) үшін жана материалдарды пайдалану, органикалық және бейорганикалық аналогтарды колдану, тандемдік және гетероқұрылымды элементтерді енгізу қарастырылады. Сонымен қатар, әртүрлі перовскитті материалдардан, оның ішінде гибридті құрылымдардан жасалған күн батареяларының өнімділігі мен олардың негізгі

шектеулері саралтады. Бұл элементтердің тұрақтылығы ылғал, ультракүлгін сәуле мен температураның әсерінен айтарлықтай төмендеуі мүмкін. Сондықтан, зерттеулер жабындарды, қоспаларды және инновациялық материалдарды қолдану маңызды екенін көрсетеді. Зерттеу барысында ETL және HTL қабаттарының күн батареяларының тиімділігі мен ұзақ мерзімділігіне тигізетін әсері жанжақты талданады. Перовскитті күн батареяларының негізгі мәселелерін шешу үшін жаңа технологиялар, тұрақтандырылған қоспалар мен қорғаныс қабаттарын қолдану перспективалы бағыттардың бірі болып саналады. Корытындылай келе, жоғары тиімді және тұрақты перовскитті күн батареяларын жаппай өндіру мен коммерцияландыру үшін жаңа құрылымдарды әзірлеу қажеттілігі атап өтіледі. Перовскитті күн батареялары технологияларын ілгерілету жаңартылатын энергия көздерін дамытуда маңызды рөл атқарады, жаппай өндіруге, коммерцияландыруға және болашақтың энергия жүйелеріне интеграциялауға жаңа мүмкіндіктер ашады.

Түйін сөздер: перовскитті күн батареялары, қабаттар, ETL, HTL, MAPbI₃, өткізгіш субстрат, тұрақтылық, Spiro-OMeTAD, ультракүлгін, сініру коэффициенті

**©Н.Н. Жантурина¹, Г.К. Бекетова¹, З.К. Аймаганбетова¹, К.Б. Бижанова²,
Л.У. Таймуратова², 2025.**

¹Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова,
Актобе, Казахстан;

²Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш. Есенова,
Актау, Казахстан.
E-mail: taimuratova@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ПЕРОВСКИТНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ: ИННОВАЦИИ В МАТЕРИАЛАХ И ТЕХНОЛОГИЯХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Жантурина Нургул – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Физика», Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Актюбе, Казахстан, E-mail: nzhanturina@zhubanov.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9540-6334>;

Бекетова Гулинара – докторант образовательной программы «Физика», Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Актюбе, Казахстан, E-mail: diko2006@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9213-7586>;

Аймаганбетова Зухра – PhD, Ассоциированный профессор кафедры «Физика», Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Актюбе, Казахстан, E-mail: zukhra.aimaganbetova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8765-516X>;

Бижанова Карлыгаш – к.ф.-м.н., ассоциированный профессор кафедры «Фундаментальные науки», Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш. Есенова, Актау, Казахстан, E-mail: bizhanovakar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4586-3742>;

Таймуратова Лидия – к.ф.-м.н., ассоциированный профессор кафедры «Фундаментальные науки», Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш. Есенова, Актау, Казахстан, E-mail: taimuratova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1692-4350>.

Аннотация. В данном обзоре рассматриваются современные исследования в области перовскитных солнечных элементов, которые являются перспективной

альтернативой традиционным кремниевым фотоэлементам. Особое внимание уделяется различным архитектурам солнечных элементов, включая комбинации основных слоёв, материалов для транспортировки электронов и дырок (ETL и HTL), таких как органические и неорганические аналоги, а также tandemные и гетероструктурные элементы.

Анализируются различные методики повышения стабильности и эффективности перовскитных солнечных элементов, включая применение инновационных органических и неорганических аналогов транспортных слоёв, а также использование tandemных и гетероструктурных решений. В обзоре оцениваются характеристики и ограничения солнечных элементов, созданных на основе различных типов перовскитов, включая гибридные структуры.

Одним из ключевых вопросов является повышение стабильности данных элементов, поскольку они подвержены деградации под воздействием влаги, ультрафиолетового излучения и тепловых факторов. Сделан вывод о важности применения защитных покрытий, функциональных добавок и новых материалов для увеличения стабильности высокоэффективных солнечных элементов.

Рассматривается значительная роль ETL и HTL в улучшении рабочих характеристик солнечных элементов. Подчёркивается необходимость дальнейших исследований для создания надёжных, энергоэффективных солнечных элементов, обеспечивающих высокую производительность. Продвижение технологий перовскитных солнечных элементов играет важную роль в развитии возобновляемых источников энергии, открывая новые возможности для массового производства, коммерциализации и интеграции в энергосистемы будущего.

Ключевые слова: перовскитные солнечные элементы, слои, ETL, HTL, MAPbI₃, проводящая подложка, стабильность, Spiro-OMeTAD, ультрафиолет, коэффициент поглощения.

Introduction

The global consumption of electrical energy increases daily, necessitating alternative energy sources to address its shortage. A classical renewable source is solar energy, generated through solar cells. Perovskites, named after the Russian scientist L.A. Perovsky, have a specific formula of ABX₃, where X represents oxygen or a halogen, and A and B are cations. The larger cation (A) occupies a cuboctahedral site surrounded by 12 anions (X), while the smaller cation (B) occupies an octahedral site, sharing it with six cations (Park, 2015).

Due to their remarkable optoelectronic properties, perovskites have emerged as potential materials for solar cells. Currently, three generations of solar cells exist: (1) wafer-based, (2) thin-film-based, and (3) organic-structure-based (Suresh Kumar, 2021). The evolution of photovoltaic materials focuses on reducing cost and toxicity. Various materials have been utilized, including multicrystalline silicon (mc-Si cells), monocrystalline silicon (c-Si cells), copper indium gallium selenide (CIGS), cadmium telluride solar cells, quantum dot-based cells, organic photovoltaics, and perovskite solar cells.

Silicon-based solar cells have dominated so far; however, a new class of perovskite solar cells has become a promising alternative, achieving an efficiency of 22.1%. Perovskites possess an ideal bandgap for light absorption (1.3–1.5 eV), a high absorption coefficient (10^4 – 10^5 cm $^{-1}$), energy alignment compatibility with contact materials, excellent charge carrier mobility, and long carrier lifetimes. Furthermore, their ability to be solution-processed at low temperatures significantly reduces production costs. In addition to being cost-effective, perovskite solar cells are highly convenient due to their technological simplicity and ease of roll-to-roll (R2R) processing (Elumalai, et al., 2016).

Organic-inorganic hybrid halide perovskites were first used in photovoltaic cells as sensitizers, replacing dyes in dye-sensitized solar cells (DSSCs). In 2009, they achieved a power conversion efficiency (PCE) of 3.8%. Since then, the efficiency of perovskite solar cells has significantly increased, reaching 22.1% by 2016 and 25.5% by 2020. This progress was accompanied by continual modifications to the materials used in the cell layers.

In 2009, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ was the primary material, and platinum was used as the cathode to complete the electrical circuit. By 2016, scientists replaced the core material with doped perovskite $\text{Cs}_x(\text{MA}_{0.17}\text{FA}_{0.83})_{1-x}(\text{PbI}_{0.83}\text{Br}_{0.17})_3$ and substituted the platinum cathode with gold. To improve efficiency, the precursor solution concentration, which was insufficient at 8% for forming a uniform thin film, was increased to 40%, and the liquid electrolyte was replaced with a solid-state analog.

Efforts to enhance the stability of perovskite solar cells and develop lead-free alternatives have been ongoing. However, lead-free perovskite cells have so far achieved only 11% efficiency (Wu T. et al., 2021).

Perovskite solar cells have reached their highest efficiency to date by integrating key features of innovative architectures, advanced chemical compositions, and optimized deposition processes for perovskite materials, alongside newly developed electron and hole transport layers (Seo, et al., 2016).

For the infrastructure of molecular cells the inverted structures with molecular hybrid at the buried interface are used (Liu, et al., 2024). So the steady-state efficiency of 26.54% was reached. When double-side 2D/3D heterojunctions are placed in inverted perovskite solar cells from both sides the power conversion efficiency of 25.6% was achieved too (Azmi, et al., 2024). Another method is described in (Guixiang, et al., 2023), where solar cell improved with using the ordered dipolar structure of β -poly(1,1-difluoroethylene). Thus the perovskite film is able to be controlled from crystallization and energy alignment.

Despite extensive research into advancing perovskite solar cells, significant challenges remain. To make these cells suitable for practical applications, numerous issues must be addressed, including minimizing charge separation, transport, and collection losses. Next table allows to compare new technologies in the field of perovskite solar cells efficiency (Table 1).

Table 1. Modern technologies in the field of perovskite solar cells

Method	Advantages	Limitations
Silicon nanoantennas	- leads to high light concentration (20.5%).	- Requires integration of nanoantennas into existing manufacturing processes.
Tandem cells with perovskite and silicon	- Achieves over 30% efficiency by optimizing perovskite deposition on silicon using phosphonic acid additives.	- Complex production and stability challenges in combining both materials.
Amidinium protective coating	- Enhancing durability, lifespan compared to traditional coatings.	- Further research needed to confirm long-term stability under real-world conditions.
Integration of gold nanograting and photonic crystal	- Increases solar cell efficiency by 35% due to enhanced optical properties.	- Higher production cost due to the use of gold.
Inverted structures with molecular hybrid at the buried interface (Liu S. et al, 2024)	- Steady-state efficiency of 26.54% by improving the molecular infrastructure of the solar cell.	- Complex fabrication and material selection challenges.
Double-side 2D/3D heterojunctions in inverted perovskite solar cells (Azmi R. et al, 2024)	- Reaches 25.6% power conversion efficiency by optimizing the interface from both sides.	- Stability and large-scale manufacturing challenges.
Ordered dipolar structure of β -poly(1,1-difluoroethylene) (Guixiang L. et al, 2023)	- Enhances crystallization control and energy alignment of the perovskite film, improving efficiency.	- Requires precise control over polymer structuring during fabrication.

In this review, we analyze global research and developments related to the structure, architecture, materials, and stability enhancement of perovskite solar cells.

Materials and methods

The foundational technology for perovskite solar cells is solid-state sensitized solar cells, which are based on dye-sensitized solar cells (DSSCs) developed by Grätzel. The key distinction of perovskite solar cells is that the light-harvesting dye is replaced with a perovskite material. Since perovskites exhibit ambipolar properties, they not only absorb light effectively but also require efficient electron and hole transport. To address this, layers such as the ETL (Electron Transport Layer) and HTL (Hole Transport Layer) are utilized.

A solar cell is composed of the following layers: a conductive substrate (such as Fluorine-doped Tin Oxide (FTO), Indium Tin Oxide (ITO), aluminum, nickel, graphene, etc.), an electron transport and light absorption layer (bl-TiO₂ and mp-TiO₂), a perovskite active layer that generates electrons, a hole transport layer (HTL), and a cathode that completes the electrical circuit (e.g., Pt, Au).

There are various solar cell structures based on the layer sequence, such as n-i-p (a) or p-i-n (b), as well as configurations with or without the HTL (c) or ETL (d) (Figure 1).

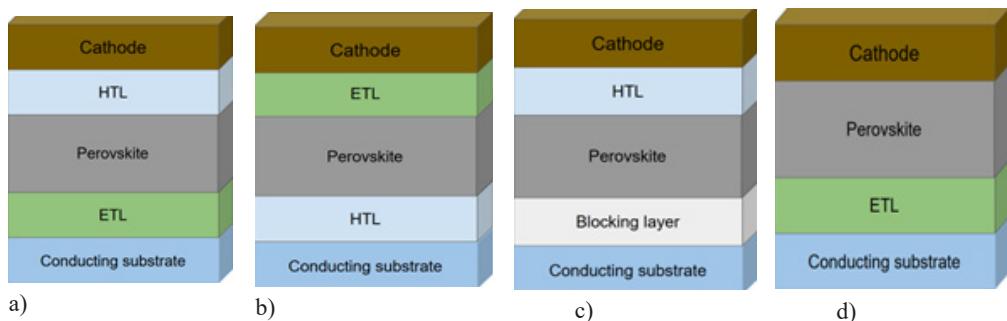


Figure 1. The typical structures of perovskite solar cells

In structures without an HTL, a thin metal layer (cathode) is directly deposited onto the perovskite. Due to the very slow chemical reaction between the perovskite and the metal, the perovskite layer functions as a hole-conducting material.

In structures without an ETL, the perovskite is directly deposited onto the glass substrate, typically FTO or ITO.

The energy structure of the simplest solar cell with both an ETL and HTL is illustrated in the following diagram (Figure 2).

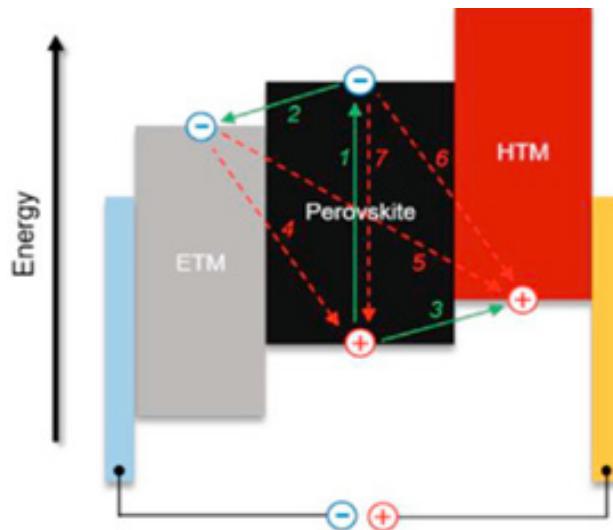


Figure 2. Energy Levels of the Layers in a Simplest Perovskite Solar Cell (Ameen S. et al, 2018)

ETL and HTL materials are selected according to this diagram.

Results and discussion

The base material for perovskite solar cells was the classic lead-containing $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, which was produced using a two-step deposition method by immersing $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ films in a 2-propanol solution of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$. This resulted in an efficiency of 15%. Later, Ima developed a two-step centrifugation procedure to obtain $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ cuboids of controlled size, achieving a PCE of 17.0%.

Traditional lead-containing solar films exhibit high efficiency but are highly toxic. To address this, tin-based perovskite films with the general formula ASnX_3 were developed. This demonstrated good charge mobility and a high absorption coefficient but faced issues with the oxidation of Sn^{2+} to Sn^{4+} .

One study proposed a method for forming uniaxially oriented perovskite layers with millimeter-sized crystals using methylamine gas for crystallization. By controlling the evaporation rate of methylamine from the liquid intermediate phase, it was possible to reduce supersaturation and decrease nucleation density, which promoted the growth of large grains of MAPbI_3 . As a result, perovskite layers with grains approximately 1 mm in size were obtained, leading to a low defect density and a high solar cell efficiency (21.36%) (Park, et al., 2015).

A good alternative to the primary perovskite material $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (MAPbI_3) is $\text{CH}_3\text{NH}^+(\text{NH}_2)\text{PbI}_3$ (FAPbI_3). This perovskite is also attractive due to its thermal stability and stronger p-type characteristics. Researchers managed to maximize light absorption by using the bandgap of FAPbI_3 , which is 1.47 eV. They substituted FA cations with 0.03 molar fraction of Cs, achieving stability in the α -phase of FAPbI_3 and significantly increasing absorption in the ultraviolet range (Elumalai, et al., 2016).

To stabilize the perovskite phase, a mixed form $(\text{FAPbI}_3)_{1-x}(\text{MAPbBr}_3)_x$ is more acceptable.

In addition to MAPbI_3 , MAPbBr_3 is also used as a primary perovskite material. Scientists have managed to modify the bandgap by using a mixed perovskite $(\text{MAPbI}_3)_{1-x}(\text{MAPbBr}_3)_x$, varying it from 1.57 eV to 2.29 eV. Designing the bandgap is a crucial process as it helps prevent significant energy loss. Moreover, this mixed structure proved to be highly resistant to perovskite decomposition into its initial precursors due to moisture exposure.

Recently, lead-free perovskite structures, such as MASnI_3 , have gained the most attention. Unlike MAPbI_3 , they have an ideal bandgap width (1.3 ~ 1.4 eV), low exciton binding energy (29 meV for MASnI_3 and 62 meV for MAPbI_3), and high charge carrier mobility (μ_e (electron mobility) = $2000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ for MASnI_3 and $60 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ for MAPbI_3).

The following table presents the main perovskite materials used in solar cells, their efficiency, and advantages (Table 2).

Table 2. The types of perovskites for use in solar cells (Khatoon, et al, 2020, Sharif, et al, 2023)

Type of perovskites	Formulas	Efficiency %	Drawbacks
Meta-lead perovskites	$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$	25,7	Lead toxicity
Meadorresin perovskite	$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$	23	Decreased stability under moisture and ultraviolet radiation exposure
Tin-based perovskite	$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$	13-15	High oxidizing ability
Calcium-based perovskite	CaTiO_3 , $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$, CaMnO_3	15	Mass production and instability
Potassium-based perovskites	KPbI_3 , KCsHsCH₂I₃ , $\text{K}_4\text{Pb}_3\text{I}_{12}$, CsKPbI_3	20-23	At the research stage

Perovskites with a binary system	CsPbI ₃ , CsPbBr ₃ , MAPbI ₃ , MA ₄ Pb ₃ I ₁₂ , CsSnI ₃ , CsSnBr ₃	23	Instability
Hybrid perovskites with organic additives	CH ₃ NH ₃ PbBr ₃ , C ₆ H ₅ C ₆ H ₄ NH ₃ PbI ₃ , CH ₃ NH ₃ PbCl ₃	24-25	Decreased stability under moisture and ultraviolet radiation exposure

In the pursuit of enhancing stability, researchers have also developed tandem structures that incorporate variations of several types of base materials. Tandem structures can be classified into silicon-perovskite and perovskite-perovskite types. The former is utilized to reduce the reflectivity of the device and stabilize the wide bandgap of perovskite materials.

Heterostructures with two or three layers of perovskites are less efficient compared to silicon-based structures but are advantageous for commercialization. This is because the same surface processing technology is applied, while the perovskites within the cell differ in their bandgap widths, for instance, MAPb₁₃ and MABr₁₃ (Elumalai, et al., 2016).

One of the key components of such cells is the electron transport layer (ETL), which plays a critical role in enhancing photovoltaic performance. This layer ensures efficient electron transfer from the perovskite layer to the electrodes, minimizing charge losses and preventing backflow. The choice of material for the ETL is a crucial step in the development of solar cells, as it affects characteristics such as energy level alignment, device stability, and overall efficiency.

In most cases, TiO₂ has been recognized as the primary ETL material due to its excellent ability to transport electrons from the perovskite layer to the electrodes efficiently. Its energy levels are well-aligned with the perovskite bandgap, and it remains transparent for effective solar light absorption. Moreover, the thickness of the TiO₂ film depends on the HTL material since it is proportional to the hole diffusion length and conductivity.

However, the TiO₂ layer was later identified as less stable under UV exposure, significantly reducing solar cell efficiency. As an alternative, Mg_xZn_{1-x}O (MZO) was proposed, demonstrating higher stability and charge mobility compared to titanium oxide.

Additionally, (Park, et al., 2015) showed in their studies that lithium-doped TiO₂ could serve as a viable conductive material. Lithium doping reduces the likelihood of defect states and increases the transmittance of the layer. As a result, the efficiency improved to 24.23%, which is 1.97% higher than the undoped counterpart.

Another approach to improving efficiency was the addition of a ferroelectric layer (PbTiO₃) between TiO₂ and the perovskite to reduce the number of defects and enhance the charge transfer capacity.

Zn₂SnO₄ (ZSO) is a highly promising alternative for ETL due to its reported high Hall mobility of 10–30 cm²/(V·s), wide bandgap of 3.8 eV, and low refractive index of approximately 2.

Another promising ETL material is (Elumalai, et al., 2016)-Phenyl-C61-butyril acid methyl ester (PCBM).

Recently, tandem solar cells with combinations of multiple layers having different bandgaps for efficient light absorption have gained significant attention in solar cell research. In tandem structures, both the primary layer and ETL or HTL can serve as the tandem component. For instance, in study (Hu, et al., 2020), an efficient electron transport layer was composed of a blocking layer, a mesoporous film, and a fullerene layer (Figure 3, a). The efficiency of such tandem structures can reach up to 30%.

In the work zinc oxide (ZnO) and PCBM were used as tandem components for the electron transport layer (Figure 3, b).

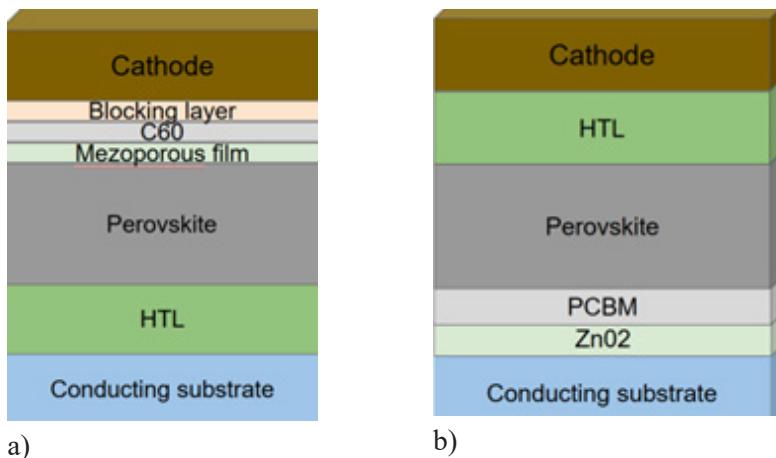


Figure 3. Tandem layers of electron transport

One of the critical layers in the architecture of a solar cell is the hole transport layer (HTL). The HTL plays a pivotal role in enhancing the efficiency, stability, and overall performance of the solar cell by ensuring effective collection and transport of holes while preventing energy losses. Regarding durability, this layer often acts as a moisture adsorbent, protecting the device from degradation.

Initially, liquid electrolytes served as transport materials. Later, Kim et al. developed the first solid-state transport materials with a structure of 2,2',7,7'-tetrakis (N,N-di-p-methoxyphenylamine)-9,9'-spirobifluorene (Spiro-OMeTAD).

The classic HTL materials in perovskite solar cells include Spiro-OMeTAD and its derivatives, such as pp-Spiro-OMeTAD, mp-Spiro-OMeTAD, and op-Spiro-OMeTAD. However, due to its high cost and limited commercial viability, researchers continue to develop more efficient and cost-effective alternatives.

One example is polytriarylamine (PTAA) doped with lithium (Battaglia, et al., 2016). For undoped materials, a derivative of pristine tetrathiafulvalene (TTF-1) achieved an efficiency of 11%, while a graphene-based composite P3HT/graphdiyne reached 14.6% (Hu, et al., 2020).

Inorganic HTL alternatives, such as CuI and CuSCN, have also been identified as promising substitutes for Spiro-OMeTAD.

The use of polymers as HTL materials is justified by their excellent compatibility

with the energy band of perovskite, which facilitates efficient hole extraction. Their soft and flexible nature ensures reliable contact with the base material, minimizing energy losses.

Due to the presence of numerous active sites, polymers exhibit strong intergranular interactions. As a result, polymer-based photovoltaic devices demonstrate superior stability and improved power conversion efficiency (PCE).

In study (Tseng, et al., 2020), Cu₂O was used as the hole transport material and SiO₂ as the electron transport material. Typically, the HTL layer must be sufficiently wide to cover the entire surface of the perovskite before being coated with a copper cathode. A thin HTL layer usually has a thickness of 100–300 nm.

Among polymeric materials suitable for mass production, PEDOT: PSS (poly (3,4-ethylenedioxythiophene): polystyrene sulfonate) has proven to be the most accessible. However, despite its affordability, it is less stable compared to Spiro-OMeTAD.

HTL materials and noble metals are often prohibitively expensive for large-scale applications. To address this, researchers have proposed carbon-based architectures without an HTL layer (Tseng, et al., 2020). In these designs, perovskite films were created using a multi-step spin-coating solution process, with a carbon layer directly deposited after the perovskite layer.

For ETL layers, polymers such as polymethyl methacrylate (PMMA), polyethylene oxide (PEO), polyvinylpyrrolidone (PVP), and polyethyleneimine (PEI) have been studied.

Equally important in the solar cell structure are the anode and cathode. Table 2 provides an overview of the materials used for the anode and cathode in perovskite solar cells.

Table 2. Materials of anode and cathode of perovskite solar cell

Architecture	Anode	Cathode
n-i-p	FTO, ITO	Ag, Au, Al, or ITO
p-i-n	PEDOT:PSS, MoO _x , Au	ITO, Al, Ag

The choice of anode and cathode materials is closely tied to the architecture of the solar cell. For instance, in n-i-p structures, cathode materials may include gold, silver, or aluminum, while conductive substrates typically involve FTO (fluorine-doped tin oxide) or ITO (indium tin oxide). In inverted designs, gold and aluminum can serve as cathode and anode materials, respectively, with ITO as the conductive substrate.

The selection of cathode and anode materials varies due to their specific requirements for energy levels, transparency, and stability. Choosing the appropriate materials is critical for achieving high efficiency and long-term durability in solar cells.

The issues of stability of solar cells.

Despite extensive research into improving solar cell materials, stability issues still require careful attention.

The instability of perovskite solar cells hinders their commercial deployment, as

the materials are prone to degradation due to weak bonds between components. This degradation can lead to damage and the leakage of lead, posing risks to both health and the environment.

To address this, researchers have developed lead-absorbing materials to coat the perovskite layer. Among these materials, cation exchange resin (CER) has demonstrated excellent lead ion absorption capabilities.

Perovskite solar cells are highly susceptible to degradation when exposed to two key atmospheric components: O₂ and H₂O. Changes in the chemical composition of perovskite films can result in a color shift from dark brown to yellow.

In the classical perovskite MAPbI₃, hydrolysis occurs when the material comes into contact with moisture. This process causes MAPbI₃ to decompose into PbI₂ and MAI, with MAI further breaking down into CH₃NH₂(aq) and HI(aq), significantly reducing efficiency.

Wang et al. proposed coating the perovskite with a thin layer of Al₂O₃. Samples with this aluminum oxide layer retained their efficiency, while those without it experienced nearly a 50% efficiency loss.

Another approach to improving stability involves substituting I with Br in MAPbI₃. Due to Br's smaller ionic radius compared to iodine, the lattice stability increases, consistent with Goldschmidt's tolerance factor rule.

Park et al. investigated the hydrophobicity of perovskites using an anti-reflective lotus leaf-inspired hierarchical pyramidal array made from polydimethylsiloxane (PDMS).

An alternative method for enhancing stability involves the use of mesoporous Al₂O₃ and TiO₂. When generated electrons interact with air, superoxides form, accelerating the decomposition of MAPbI₃. TiO₂ mitigates this process by enabling electron injection, thereby slowing degradation.

A research group led by Yang demonstrated high stability in solar cells where the HTL was NiO_x and the ETL consisted of ZnO nanoparticles.

Perovskites not only degrade under air exposure but also under heat. Thermal degradation occurs both through the decomposition of components and the formation of internal defects. Thermogravimetric analysis revealed that MAPbI₃ has poor thermal conductivity, meaning thermal energy can induce defects within the crystal structure, significantly lowering efficiency.

Studies have shown that doped samples, such as MAPbI₃-xBr_x and FAPbI₃, exhibit greater thermal stability compared to classical MAPbI₃ (Park, et al., 2015).

HTLs significantly influence the thermal stability of solar cells, and recently, research has focused on developing solar cells without HTLs. One such HTL material, silolothiophene-linked triphenylamines (Si-MeOTAD), has been found to be more stable than Spiro-OMeTAD and Spiro-MeOTAD.

Researchers have concluded that one of the main ways to enhance the thermal stability of solar cells is through the use of HTL-free designs or by utilizing carbon-based materials for the cathode. These materials conduct heat well and help with efficient thermal dissipation within the device. Graphene is a leading material in this group (Park, et al., 2015).

Another important aspect of solar cell stability is photostability. The ETL material TiO_2 is less stable than Al_2O_3 due to the recombination of electrons from the conduction band of TiO_2 with holes in TiO_2 . In contrast, Al_2O_3 has shown long-term stability, lasting 1,000 hours at 40°C. FAPbI_3 has demonstrated greater photostability than MAPbI_3 .

Additive engineering, or the incorporation of molecules, is another method for improving stability. These additive molecules create additional chemical interactions with volatile components, reducing ion migration and preventing irreversible degradation of perovskite films. For example, adding 5-ammoniumvaleric acid (5-AVAI) helps prevent the loss of methylamine and recrystallization of MAPbI_3 , while adding an organic ionic salt compound $[\text{BMP}]^+[\text{BF}_4]^-$ aids in stabilizing and suppressing degradation phases, thus improving the longevity of solar cells and preventing iodine and lead leakage.

Using heterostructures between the main layers of a solar cell, particularly between perovskite and the ETL, can significantly enhance structural stability, the ETL was treated with a dicalcium salt of ethylenediaminetetraacetic acid (EDTAK), which greatly reduced defect density in the perovskite layer through interaction with Pb^{2+} . It also shifted the minimum of the SnO_2 conduction band from -3.69 eV to -3.95 eV. The perovskite/Spiro-OMeTAD heterostructure surface was treated with methylammonium iodide, preventing degradation caused by gold penetration into the perovskite layer.

Conclusion

Perovskite solar cells have recently emerged as a promising alternative to traditional silicon cells due to their physical and chemical properties. They possess an ideal bandgap, high absorption coefficient, energy alignment with the contacting material, and high charge carrier mobility. For commercialization, perovskite solar cells offer relatively inexpensive base material alternatives. The combination of anions and cations in the perovskite structure enables the achievement of desired properties, facilitating the design and performance prediction of modern solar cells.

Since the introduction of perovskites as potential materials for solar energy conversion, the architecture, layer combinations, and composition of solar cells have undergone numerous changes to enhance efficiency (<25%), stability, and commercial viability. Solar cells have been explored from classic lead-based perovskites to hybrids with organic additives.

The architecture of the layers, particularly the ETL and HTL, is crucial, as their bandgap must align with that of the perovskite, ensuring high charge carrier mobility and ease of processing. Traditionally used titanium oxide as the ETL and Spiro-OMeTAD as the HTL are highly efficient; however, they have shown sensitivity to moisture and ultraviolet radiation. Therefore, global research in electron and hole transport materials for solar cells has focused on increasing stability, considering both organic and inorganic alternatives, doped materials, heterostructures, tandem structures, base material coatings, and other innovations.

All of these studies contribute to significant advancements and innovations in solar energy conversion, driving progress in the efficiency, stability, and cost-effectiveness of perovskite solar cells.

References

- Park N-G. (2015) Perovskite solar cells: an emerging photovoltaic technology / Nam-Gyu Park . Materials Today. – Vol. 18(2). – P. 65-72. DOI: 10.1016/j.mattod.2014.07.007 (in Eng.)
- Suresh Kumar N. (2021) A review on perovskite solar cells (PSCs), materials and applications. N.Suresh Kumar, K. Chandra Babu Naidu. Journal of Materomics. – Vol. 7(5). – P. 940-956. DOI: 10.1016/j.jmat.2021.04.002 (in Eng.)
- Elumalai N.K. (2016) Perovscite Solar Cells: Progress and Advancements / Naveen Kumar Elumalai, Md Arafat Mahmud, Dian Wang and Ashraf Uddin. Energies. – Vol.9 (11). – P.861. DOI: 10.3390/en9110861 (in Eng.)
- Saliba M.(2016) Cesium-containing triplecation perovskite solar cells: Improved stability, reproducibility and high efficiency. M.Saliba, T.Matsui, J-Y.Seo, K.Domanski, J.-P.Corréa-Baena, M.K.Nazeeruddin, S.M. Zakeeruddin, W.Tress, A.Abate, A.Hagfeldt, M.Grätzel. Engineering, Environmental Science. – Vol. 9. – P.1989-1997. DOI:10.1039/C5EE03874J (in Eng.)
- Wu T. (2021) The Main Progress of Perovskite Solar Cells in 2020-2021. T. Wu, Zh. Qin, Y.Wang, Y. Wu, W. Chen, Sh. Zhang, M. Cai, S.Dai, J.Zhang, J. Liu, Zh.Zhou, X.Liu, H. Segawa, H. Tan, Q. Tang, J. Fang, Y. Li, L.Ding, Zh.Ning, Y. Qi, Y. Zhang, L. Han. Nano-Micro Letters. – Vol. 13. – P. 152. DOI: 10.1007/s40820-021-00672-w (in Eng.)
- Seo J. (2016) Rational Strategies for Efficient Perovskite Solar Cells. Jangwon Seo, Jun Hong Noh, Sand Il Seok. Published as part of the Accounts of Chemical Research special issue. – Vol. 49 (3). – P.562-72. DOI: 10.1021/acs.accounts.5b00444. (in Eng.)
- Sanwan Liu. (2024) Buried interface molecular hybrid for inverted perovskite solar cells //Jingbai Li, Wenshan Xiao, Rui Chen, Zhenxing Sun, Yong Zhang, Xia Lei, Shuaifeng Hu, Manuel Kober-Czerny, Jianan Wang, Fumeng Ren, Qisen Zhou, Hasan Raza, You Gao, Yitong Ji, Sibo Li, Huan Li, Longbin Qiu, Wenchao Huang, Yan Zhao, Baomin Xu, Zonghao Liu, Henry J. Snaith, Nam-Gyu Park & Wei Chen. Nature. –Vol.632. –P.536-542 (in Eng.)
- Azmi R. Inverted perovskite solar cells with double-side 2D/3D heterojunctions achieved a power conversion efficiency of 25.6%. D. Utomo, B.Vishal, Sh.Zhumagali, P.Dally, A. Muhammad Risqi, A.Prasetio, E. Ugur, F. Cao, I. Fadli Imran, A. Ali Said, A. Pininti, A.Selvin Subbiah, E.Aydin, Ch.Xiao, S.Seok & S.De Wolf. Nature. –Vol. 628. –P.93-98 (in Eng.)
- Guixiang Li. (2023) Highly efficient p-i-n perovskite solar cells that endure temperature variations. Zhenhuang Su, Laura Canil, Declan Hughes, Mahmoud H. Aldamasy, Janardan Dagar, Sergei Trofimov, Luyao Wang, Weiwei Zuo and Antonio Abate. Solar cells. –Vol. 379. – P.6630. DOI: 10.1126/science.add7331 (in Eng.)
- Green M.A. (2020) Solar cell efficiency tables (version 56) / M.A. Green, E. D. Dunlop, J.Hohl-Ebinger, M.Yoshita, N. Kopidakis, X. Hao. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – Vol. 32(7). – P. 629-638. DOI: 10.1002/pip.3303. (in Eng.)
- Ameen S. (2018) Charge-transporting ma terials for perovskite solar cells. S. Ameen, M.S.Akhtar, H-S. Shin, M.K.Nazeeruddin /Advances in Inorganic Chemistry. – Vol.72. – P.185-246. DOI: 1016/bse.adioch.2018.05.009 (in Eng.)
- Khatoon S. (2023) Perovskite solar cell,s efficiency, stability and scalability: A review. S.Khatoon, S.K.Yadav, V.Chakravorty, J.Singh, R.B.Singh, Md.S.Hasnain, S.M.M.Hasnain. Materials Science for Energy Technologies. – Vol. 6. – P. 437-459. DOI: 10.1016/j.mset.2023.04.007 (in Eng.)
- Sharif R. (2023) A comprehensive review of the current progresses and material advances in perovskite solar cells. R.Sharif, A.Khalid, S.W.Ahmad, A.Rehman, H.G.Qutab, H.H.Akhtar, K.Mahmood, Sh.Afzal, F.Saleem // J.Nanoscale Advances. – Vol. 5(15). – P. 3803-3833. DOI:10.1039/D3NA00319A (in Eng.)
- Hu Q. (2020) Improving efficiency and stability of perovskite solar cells enabled by A near-infrared absorbing moisture barrier / Q. Hu, W. Chen, W. Yang, Y. Li, Y. Zhou, BW. Larson, TP.Russell. Joule. – Vol.4(7) – P.1575-1593. DOI: 10.1016/j.joule.2020.06.007 (in Eng.)
- Tseng C-C. (2020) Cu₂O HTM/SiO₂-ETM assisted for synthesis engineering improving efficiency and stability with heterojunction planar perovskite thin-film solar cells / C-C. Tseng, L-C. Chen, L-B. Chang, G-M. Wu, W-S. Feng, M-J. Jeng, K-L.Lee. Sol En ergy. – Vol. 204. – P.270. DOI: 10.1016/j.solener.2020.04.077 (in Eng.)

U.K. Zhapbasbayev¹, G.I. Ramazanova^{1*}, M.A. Pakhomov², 2025.

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan;

²Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: gaukhar.ri@gmail.com

TURBULENT FLOW OF VISCOPLASTIC FLUID IN A PIPE WITH SUDDEN EXPANSION

Zhapbasbayev Uzak Kairbekovich – doctor of technical sciences, professor, Scientific and Production Laboratory “Modeling in Energy”, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; E-mail: uzak.zh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5973-5149>;

Ramazanova Gaukhar Izbasarovna – candidate of physical and mathematical sciences, leading researcher, Scientific and Production Laboratory “Modeling in Energy”, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; E-mail: gaukhar.ri@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8689-9293>;

Pakhomov Maksim Aleksandrovich – doctor of physical and mathematical sciences, professor, chief researcher, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Novosibirsk, Russia; E-mail: akhomov@ngs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8127-3638>.

Abstract. The article examines the non-isothermal turbulent flow of a yield-stress viscoplastic fluid in a pipe with a sudden expansion. The effective molecular viscosity approach is employed to represent the rheological model of the yield-stress viscoplastic fluid. To perform a thorough calculation of the undeformed region of the viscoplastic fluid, the Papanastasiou regularization method for the effective molecular viscosity formula is applied.

Numerical simulations are conducted to analyze the velocity, temperature, and turbulent kinetic energy distributions. The results indicate significant differences in the flow structure between Newtonian and non-Newtonian fluids. In the case of Newtonian fluids, a recirculation region with negative velocities is observed downstream of the sudden pipe expansion, forming a characteristic end vortex. However, for viscoplastic fluids, this vortex structure is absent due to the yield stress effects, which suppress secondary flow formation.

The heat transfer characteristics along the pipe surface are also investigated. It is found that the distributions of heat flux for turbulent Newtonian and non-Newtonian fluids exhibit qualitative similarities, although quantitative differences arise due to the fluid’s rheological properties. The study provides insight into the complex behavior of viscoplastic fluids under turbulent conditions and can be beneficial for engineering applications involving pipeline systems, heat exchangers, and energy transport processes.

Keywords: non-isothermal turbulent flow, viscoplastic fluid, yield stress, RANS, sudden expansion

Acknowledgments

This work was supported by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant number AP23486543 for 2024-2026)

Ү.Қ. Жапбасбаев¹, Г.І. Рамазанова^{1*}, М.Ф. Пахомов², 2025.

¹ Сәтбаев университеті, Алматы, Қазақстан;

²РФА СБ С.С. Кутателадзе атындағы Жылуфизика институты,
Новосибирск, Ресей.

E-mail: gaukhar.ri@gmail.com

КЕНЕТТЕН КЕҢЕОІ БАР ҚҰБЫРДАҒЫ ТҮТҚЫР-ПЛАСТИКАЛЫҚ СҮЙЫҚТЫҚТАҢ ТУРБУЛЕНТТІК АҒЫНЫ

Жапбасбаев Ұзақ Қайырбекұлы – техника ғылымдарының докторы, профессор, «Энергетикадағы модельдеу» ғылыми-өндірістік зертханасы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: uzak.zh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5973-5149>;

Рамазанова Гаухар Ізбасарқызы – физика-математика ғылымдарының кандидаты, жетекші ғылыми қызметкер, «Энергетикадағы модельдеу» ғылыми-өндірістік зертханасы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: gaukhar.ri@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8689-9293>;

Пахомов Максим Александрович – физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, бас ғылыми қызметкер, С.С. Кутателадзе атындағы Жылуфизика институты, Ресей ғылым академиясының Сібір бөлімшесі, Новосібір, Ресей; E-mail: pakhomov@ngs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8127-3638>.

Аннотация. Мақалада кенеттен кеңеоі бар құбырдағы түтқыр-пластикалық сүйықтықтың изотермиялық емес турбуленттік ағыны қарастырылады. Түтқырлық шегі бар түтқыр-пластикалық сүйықтықтың реологиялық моделін сипаттау үшін эффективті молекулалық түтқырлық әдісі қолданылады. Түтқыр-пластикалық сүйықтықтың деформацияланбайтын аймағын түпкілікті есептеу үшін эффективті молекулалық түтқырлық формуласы үшін Папанастасиудың регуляризация әдісі қолданылады.

Жылдамдық, температура және турбуленттіліктің кинетикалық энергиясының таралуын талдау үшін сандық модельдеу жүргізді. Ньютондық және Ньютондық емес сүйықтықтардың ағын құрылымында айтартықтай айырмашылықтар бар екені анықталды. Ньютондық сүйықтық жағдайында құбырдың кенеттен кеңео аймағынан кейін соңғы құйынды құрайтын теріс жылдамдықты рециркуляция аймағы байқалады. Алайда түтқыр-пластикалық сүйықтықтарда ағымдық шектің әсерінен мұндай құйын құрылымы пайда болмайды, себебі ол екінші реттік ағынның түзілуін тежейді.

Сонымен қатар, құбырдың беті бойынша жылу алмасу сипаттамалары зерттелді.

Турбулентті Ньютондық және Ньютондық емес сұйықтықтар үшін құбырының беті бойынша жылу ағынының таралуы сапалы түрде ұқсастық көрсетті. Зерттеу турбулентті жағдайда тұтқыр-пластикалық сұйықтықтардың күрделі әрекетін сипаттауга мүмкіндік береді және құбыры жүйелері, жылу алмастырыштар мен энергия тасымалдау процестеріне байланысты инженерлік қолданбалар үшін пайдалы болуы мүмкін.

Түйін сөздер: изотермиялық емес турбулентті ағын, тұтқыр-пластикалық сұйықтық, акқыштық шегі, Рейнольдс бойынша орташаланған Навье-Стокс тендеулері, кенеттен көнею.

У.К. Жапбасбаев¹, Г.И. Рамазанова *¹, М.А. Пахомов², 2025.

¹Университет Сатпаева, Алматы, Казахстан;

²Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: gaukhar.ri@gmail.com

ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ С РЕЗКИМ РАСШИРЕНИЕМ

Жапбасбаев Узак Кайрбекович – доктор технических наук, профессор, научно-производственная лаборатория «Моделирование в энергетике», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан, E-mail: uzak.zh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5973-5149>;

Рамазанова Гаухар Избасаровна – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, научно-производственная лаборатория «Моделирование в энергетике», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан, E-mail: gaukhar.ri@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8689-9293>;

Пахомов Максим Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе, Сибирское отделение Российской академии наук, Новосибирск, Россия, E-mail: pakhomov@ngs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8127-3638>.

Аннотация. В статье рассматривается неизотермическое турбулентное течение вязкопластичной жидкости в трубе с резким расширением. Для представления реологической модели вязкопластичной жидкости с пределом текучести используется метод эффективной молекулярной вязкости. Для выполнения сквозного расчёта недеформируемой области вязкопластичной жидкости применяется метод регуляризации Папанастасиу в сочетании с формулой эффективной молекулярной вязкости.

Численные моделирования проведены для анализа распределений скорости, температуры и кинетической энергии турбулентности. Результаты показывают значительные различия в структуре течения ньютоновских и неニュтоновских жидкостей. В случае ньютоновских жидкостей за участком резкого расширения трубы наблюдается зона рециркуляции с отрицательными скоростями, формирующая характерный концевой вихрь. Однако у вязкопластичных жидкостей такая вихревая структура отсутствует из-за влияния предела

текучести, который подавляет формирование вторичного течения. Дополнительно исследованы характеристики теплообмена вдоль поверхности трубы. Установлено, что распределения теплового потока для турбулентных ньютоновских и неニュтоновских жидкостей имеют качественные сходства, однако количественные различия обусловлены реологическими свойствами жидкости.

Исследование даёт представление о сложном поведении вязкопластичных жидкостей в турбулентных условиях и может быть полезным для инженерных приложений, связанных с трубопроводными системами, теплообменниками и процессами транспортировки энергии.

Ключевые слова: неизотермическое турбулентное течение, вязкопластичная жидкость, предел текучести, уравнения Навье-Стокса, осреднённые по Рейнольдсу, резкое расширение.

Introduction

The turbulent flow of non-Newtonian fluids in pipes or planar channels, accompanied by flow separation followed by reattachment, is one of the most common cases of shear flow. The study of such separated flows is of interest both from a fundamental perspective, as it provides new insights into the turbulent structure of flows, and from a practical standpoint, particularly in applications involving the flow around sharp-edged bodies. These flows are among the most important and complex cases of wall-bounded shear flows, characterized by elevated levels of turbulence.

In the flow separation region, significant changes in velocity, pressure, and heat transfer fields are observed, along with an intensification of turbulent wall-boundary transport processes (see monographs (Chang, 1970; Alemasov, et al., 1990; Terekhov, et al., 2021) and review papers (Eaton, et al., 1981; Simpson, 1989; Polyakov, et al., 1996; Ota, 2000; Chen, et al., 2018)). Sudden flow expansion is widely used to enhance transport processes in Newtonian flows and is encountered in many technical devices, such as when connecting pipes of different diameters. Understanding the characteristics of flow and heat transfer under such conditions is crucial from both fundamental and practical perspectives.

It should be noted that despite decades of intensive research and the involvement of numerous scientific groups, a comprehensive theory of momentum and heat transfer for turbulent flows of Newtonian fluids has yet to be developed.

To date, studies on the turbulent flow and heat transfer of viscoplastic fluids in a pipe following a sudden expansion have not been well-documented in the available literature.

The aim of this work is the numerical study of flow structure and heat transfer in a turbulent flow of an incompressible non-Newtonian fluid in a pipe with sudden expansion.

Materials and Methods

Mathematical model

Rheology of a viscoplastic fluid

According to the rheology of viscoplastic fluids, the effective molecular viscosity

can be expressed as follows (Schwedoff, 1981; Bingham, 1922; Wilkinson, 1960; Pakhomov, et al., 2023):

$$\mu_{eff} = \begin{cases} \mu_p + \tau_0 |\dot{\gamma}|^{-1}, & \text{if } |\tau| > \tau_0 \\ \infty, & \text{if } |\tau| \leq \tau_0 \end{cases}, \quad (1)$$

here τ_0 represents the yield stress and μ_p denotes the plastic viscosity. The other expressions in formula (1) are provided in (Pakhomov, et al., 2023).

However, because of mathematical complexities, expression (1) cannot be utilized without regularization. For this purpose, the formula presented in (Papanastasiou, 1987) is employed. In this case, the effective molecular viscosity has a limitation as the shear rate tends to zero $|\dot{\gamma}| \rightarrow 0$:

$$\mu_{eff} = \mu_p + \tau_0 \frac{[1 - exp(-10^3 |\dot{\gamma}|)]}{|\dot{\gamma}|} \quad (2)$$

The effect of carrier fluid temperature has a strong effect on rheological properties (Zhabasbayev, et al., 2021; Pakhomov, et al., 2024) is taken into account by dependence of plastic viscosity $\mu_p(T)$, yield stress $\tau_0(T)$, and Bingham numbers on $Bm = \tau_0 R / (\mu_p U_{m1})$ fluid temperature (waxy crude oil) (Pakhomov, et al., 2023; Pakhomov, et al., 2024) (see Table 1). These dependencies rely on the experimental data (Pakhomov, et al., 2024).

Table 1 – Values of yield shear stress, plastic viscosity and Bingham numbers vs fluid temperature of NNF

$t, ^\circ C$	T, K	τ_0, Pa	$\mu_p, Pa \cdot s$	Bm
0	273	589.6	0.36	822.32
10	283	2.03	0.06	17.01
20	293	7.01E-03	0.01	0.35
25	298	4.12E-04	0.004	0.05
30	303	2.42E-05	0.002	0.007

Governing equations

The equation system for the turbulent non-isothermal flow of viscoplastic NNF fluid is written in (Pakhomov, et al., 2023; Pakhomov, et al., 2024):

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho UU) = -\nabla P + \nabla \cdot (2\mu_{eff} S) + \nabla \cdot (-\rho \langle u/u' \rangle) + \nabla \cdot \left(2\mu'_{eff} S' \right) \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\rho C_p TU) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (-\rho C_p \langle u/t' \rangle) + \tau \cdot S \quad (5)$$

The turbulent Reynolds stress $-\rho \langle u/u' \rangle$ are modeled using $k-\tilde{\epsilon}$ turbulence isotropic model and RSM approach. Turbulent heat flux $\rho C_p \langle u/t' \rangle$ is given in (Pakhomov, et al., 2023). The expression $\nabla \cdot \left(2\mu'_{eff} S' \right)$ in equation (4) is found

according to representation of (Pakhomov, et al., 2023; Pakhomov, et al., 2024). The term $\tau:S$ considers the dissipation of kinetic energy and has the form as in (Pakhomov, et al., 2023). Formula for the averaged shear rate can be written as (Gavrilov, et al., 2016):

$$\langle \dot{\gamma} \rangle^2 = 2\langle S_{ij} \rangle \langle S_{ij} \rangle + (\rho \varepsilon) / \langle \mu \rangle, \text{ where } \langle \mu \rangle = \frac{\tau_0}{\langle \dot{\gamma} \rangle} + k_v \langle \dot{\gamma} \rangle^{n-1}.$$

The elliptical relaxation Reynolds stress model (Fadai-Ghotbi, et al., 2008) partially considers anisotropy of complicated turbulent flows and is computationally more complicated than the isotropic two-equation $k-\varepsilon$ turbulence model:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho U \langle u'/u' \rangle) &= \rho(P_{ij} + \phi - \varepsilon) + \nabla \cdot \left[\rho \frac{C_\mu T_T}{\sigma_k} \langle u'/u' \rangle \nabla (\langle u'/u' \rangle) \right] \\ \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) &= \frac{1}{T_t} (C_{\varepsilon 1} P_2 - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) + \nabla \cdot \left[\rho \frac{C_\mu T_T}{\sigma_\varepsilon} \langle u^- u^- \rangle \nabla \varepsilon \right] + \\ &+ \nabla \cdot (\mu \nabla \varepsilon) + C_{\varepsilon 3} \frac{\mu k}{\varepsilon} \langle u'/u' \rangle \cdot \nabla^2 U \cdot \nabla^2 U \\ \chi - L_T^2 \nabla^2 \chi &= 1/(\varepsilon T_T). \end{aligned} \quad (6)$$

Here, P_{ij} is the intensity of the energy transfer from the average velocity to the pulsating one, T_T is the turbulent time macroscale; ϕ is the redistribution term, ε is the dissipation rate. The constants and functions of (6) for Newtonian turbulent fluid are taken from (Fadai-Ghotbi, et al., 2008). The RSM models do not consider the effect of non-Newtonian fluid on fluid turbulence. The same assumption was used in our previous papers (Pakhomov, et al., 2023; Pakhomov, et al., 2024).

Boundary conditions

The flow schematic is shown in Fig. 1a. The boundary conditions on the wall surface ($r = R_2$), pipe axis ($r = 0$), in the inlet section ($x = 0$), and at the outlet edge ($x = L$) are stated in the paper Waxy crude oil in the inlet cross-section is considered as a NF, then the behavior of a non-Newtonian SB fluid with yield stress appears.

On the inner surface wall ($r = R_2$):

$$U = V = \langle u'/u' \rangle = 0; \quad T = T_w = const; \quad \varepsilon = 2\nu \frac{k}{y^2}; \quad \chi = 0 \quad (7)$$

On the pipe axis ($r = 0$):

$$\frac{\partial U}{\partial r} = V = \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial \langle u'/u' \rangle}{\partial r} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = \frac{\partial \chi}{\partial r} = 0 \quad (8)$$

Constant values of variables are set at the pipe inlet, and soft boundary conditions are set at the outlet.

Numerical realization

All numerical predictions are performed using “in-house” code (Pakhomov, et al., 2023; Pakhomov, et al., 2024a; Pakhomov, et al., 2024b). The set of Eqs. (1–5) with boundary conditions (7–9) is solved numerically using the finite control volume method, QUICK, and SIMPLEC algorithms. The simulations use a non-uniform mesh (in axial and radial directions) with refinement close to the pipe wall and in the entrance zone (see Fig. 1b). The numerical realization is described in detail in (Pakhomov, et al., 2023; Pakhomov, et al., 2024a; Pakhomov, et al., 2024b). The grid convergence test for the local Nusselt numbers $\text{Nu} = -(\partial T / \partial y)_w H / (T_w - T_m)$ along the streamwise coordinate is performed on the grids: 250×100 (“coarse”), 500×150 (“basic”) and 750×250 (“fine”) (see Fig. 2), where $y = R - r$ is a distance normal to a wall, H is step height, and T_m is a mean-mass fluid temperature. The difference between “basic” and “fine” grids is very small (up to 0.1%) and the “basic” grid is used in authors’ simulations.

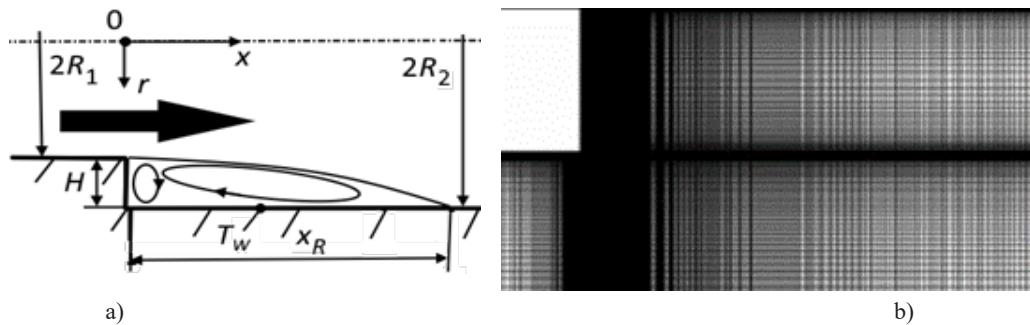


Figure 1. Schematic view of the flow behind pipe with sudden expansion (a) and the computational grid (not in the scale) (b). Arrow is a turbulent flow of a waxy crude oil.

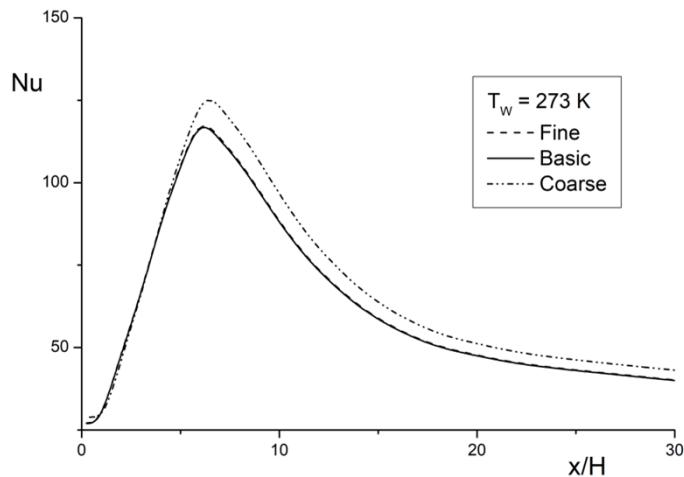


Figure 2. Grid independence test for $T_w = 273$ K. “Fine” grid has 750×250 control volumes (CVs), “basic” has grid 500×150 CVs and “coarse” grid has 250×100 CVs.

Validation and verification for the Newtonian turbulent fluid in a pipe with sudden expansion

For validation and verification, a comparison was conducted with experimental data (Baughn, et al., 1984) on heat transfer in the turbulent flow of a Newtonian fluid (air) downstream of a sudden pipe expansion (see Fig. 3). The first two cross-sections are located within the recirculation zone, the third approximately corresponds to the reattachment point of the flow, and the fourth is situated in the relaxation zone downstream of the reattachment (see Fig. 3a).

In the first cross-section, an increase in the thermal mixing layer is observed behind the sudden pipe expansion. Intense turbulent mixing in the separation zone results in the majority of the temperature difference between the wall and the axis being concentrated in a thin near-wall layer at $r/R \geq 0.95$. Thus, mixing processes in this near-wall layer play a dominant role in the heat transfer between the pipe wall and the turbulent fluid flow.

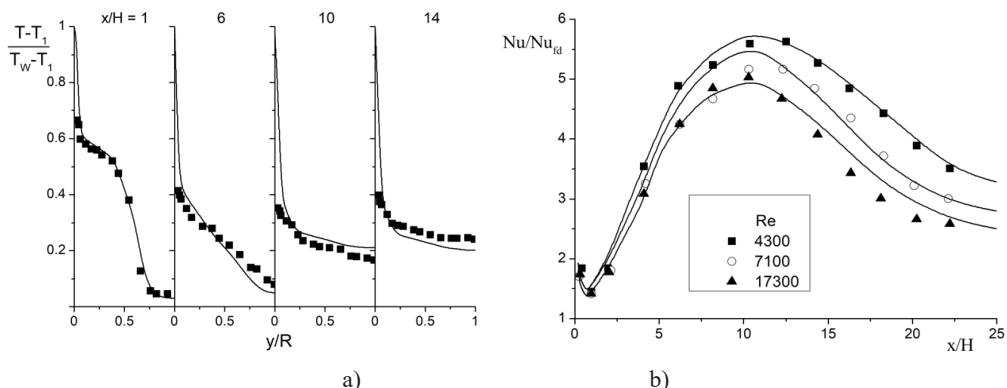


Figure 3. Radial temperature profiles along the pipe length (a) and effect of the Reynolds numbers on heat transfer enhancement ratio Nu/Nu_{fd} in the pipe sudden expansion (b). Points are measurements of Baughn et al., 1984 at $T_w = \text{const}$; solid lines are authors' computations. $Re_2 = U_{m2} 2R_2 / v = 1.73 \times 10^4$.

Figure 3b presents the distributions of local heat transfer downstream of the sudden pipe expansion along the longitudinal coordinate. Here, Nu_{fd} represents the Nusselt number for a fully developed flow in a pipe without sudden expansion. It can be seen that as the Reynolds number (flow velocity) increases, the intensity of heat transfer significantly rises, which is expected.

Notably, the location of the maximum heat transfer approximately coincides with the reattachment point for Newtonian fluids. This finding is consistent with both the experimental measurements (Baughn, et al., 1984) and our calculations. Overall, the analysis of the data presented in Fig. 3 demonstrates good agreement between the measurements (Fadai-Ghotbi, et al., 2008) and the results of our calculations.

Results and Discussion

Numerical results for the non-Newtonian turbulent flow behind pipe sudden expansion and discussion

An non-isothermal viscoplastic non-Newtonian fluid (waxy crude oil) flows along a pipe with sudden expansion. Pipe I.D. Diameter before sudden expansion is $D_1 = 2R_1 = 0.2$ m, pipe diameter behind the sudden expansion is $D_2 = 2R_2 = 0.3$ m, step height is $H = 0.05$ m, $H/(2R_1) = 0.25$, expansion ratio $ER = (R_2/R_1)2 = 2.25$. Pipe length is $L = 20$ m ($x/D = 100$). The temperature profile is uniform at the pipe inlet. Mean axial velocity and mean temperature at the inlet $U_{m1} = 0.25$ m/s, $T_1 = 303$ K respectively. The wall temperature is uniform along the pipe length after sudden expansion and it varies $T_w = \text{const} = 273\text{--}293$ K. Reynolds number based on pipe diameter $Re = U_{m1}2R_1/\nu_{W1} = (0.7\text{--}3)\times 10^4$, Reynolds number based on step height $Re_H = U_{m1}H/\nu_{W1} = (1.7\text{--}7.5)\times 10^3$. The Prandl number of the Newtonian fluid is $Pr = \mu_{W1}C_{P1}/\lambda_{W1} = 42$. The Kolmogorov geometric scale η_K and time scale τ_K were determined using the following formulas of (Baughn, et al., 1984):

$$\eta_K = 2R_1 Re_{c1}^{-3/4}, \tau_K = \eta_K^2/\nu,$$

where $Re_{c1} = 2R_1 \langle u'_{c1} \rangle / \nu$ is the Reynolds number, and $\langle u'_{c1} \rangle$ represents the root-mean-square velocity fluctuations of the gas at the pipe axis before the separation section of the flow.

For the conditions of this study, $\eta_K = 0.002$ m and $\tau_K = 0.82$ s (at $Re = 10^4$).

All predictions are carried out in the region of hydrodynamic and thermal stabilization in a steady-state fluid flow in a pipe with sudden expansion. Waxy crude oil in the inlet cross-section is considered as a Newtonian turbulent fluid. Then, the process of heat transfer through a cold pipe wall starts with fluid movement through a pipe. A fluid temperature decreases by heat transfer with cold surrounding soil through a pipe wall. This leads to a sharp increase in viscosity and the appearance of yield shear stress τ_0 (Zhabasbayev, et al., 2021; Pakhomov, et al., 2024).

Local flow structure and turbulent characteristics

Figure 4 shows the streamlines for Newtonian (a) and non-Newtonian SB (b) fluids downstream of a sudden expansion in a pipe. After the separation section, the streamlines undergo significant changes compared to the flow in the pipe prior to the sudden expansion. Due to flow separation, a recirculating flow zone is formed, and for the Newtonian fluid, a small end vortex is observed immediately downstream of the step. This is consistent with the conclusions for separated flows of Newtonian fluids (Chang, 1970; Alemasov, et al., 1990; Terekhov, et al., 2021). The flow attachment point is located at for the flow and for the non-Newtonian fluid.

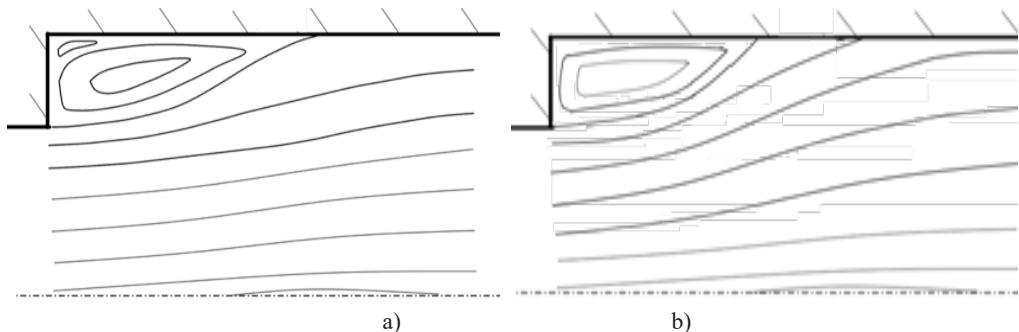


Figure 4. Streamlines of Newtonian ($T_1 = T_w = 303$ K) (a) and non-Newtonian SB (b) ($T_1 = 303$ K, $T_w = 273$ K) fluids behind pipe sudden expansion.

The center of the main recirculating eddy is located around $x/H = 5$ and $y/H = 0.5$. The small corner eddy takes place around $x/H = 1$, and the mean flow velocity in this area is very small. The lengths of recirculation zones are determined from the zero value of mean axial flow velocity ($U = 0$) for the NF and NNF. The direction of rotation in this vortex coincides with the direction of the main flow. As the Newtonian flow cools, the non-Newtonian properties of the fluid begin to manifest (a significant increase in plastic viscosity μ_p and yield stress τ_0), and the flow takes on the characteristics of a turbulent viscoplastic Schwedoff-Bingham fluid. Flow attachment occurs at $=6.2$. Thus, it can be said that the length of the flow separation region is significantly reduced (by approximately 40%). It is noteworthy that the end vortex region disappears for the non-Newtonian SB fluid. Qualitatively, this agrees with the experimental data for turbulent non-Newtonian fluids in the absence of heat exchange (Pereira, et al., 2000); Pereira, et al., 2002). It should be noted that qualitatively, the flow of non-Newtonian Schwedoff-Bingham fluid after the sudden expansion of the pipe is similar to that of Newtonian fluid.

Figures 5 show the profiles of the axially averaged velocity for Newtonian (bold lines) and non-Newtonian Schwedoff-Bingham (dashed curves) fluids downstream of the sudden expansion in the pipe. The first two cross-sections are located in the flow separation region for both fluids. The $x/H = 15$ cross-section is in the recirculation region (for the Newtonian fluid) and in the flow attachment region (for the non-Newtonian fluid). The fourth cross-section is located in the flow attachment zone for the Newtonian fluid. The $x/H = 15$ cross-section corresponds to the flow relaxation zone after the flow attachment point for both fluids.

It should be noted that downstream from the flow separation cross-section, a sharp change in the flow structure is observed. For the velocity profiles of the fluid (see Fig. 5a), a region of negative velocities appears, corresponding to the flow recirculation zone. After the flow attachment point, the flow begins to recover, and dynamic and thermal boundary layers develop. The flow starts to exhibit the characteristics of hydrodynamically stabilized flow in a circular pipe. Complete hydrodynamic stabilization of the Newtonian turbulent flow downstream of the sudden expansion in the pipe occurs at distances $x/H > 40$ (Terekhov et al., 2021). For the non-Newtonian

viscoplastic turbulent fluid flow after the sudden expansion, the presence of a flow separation region is also observed. The intensity of such a flow is lower (approximately by 25%) compared to the corresponding Newtonian flow. The flow velocity in the core of the flow for the SB fluid slightly exceeds the corresponding value for the Newtonian turbulent flow. In the immediate vicinity of the wall, at $r/R > 0.9$, the flow nearly stagnates due to yield stresses and plastic viscosity.

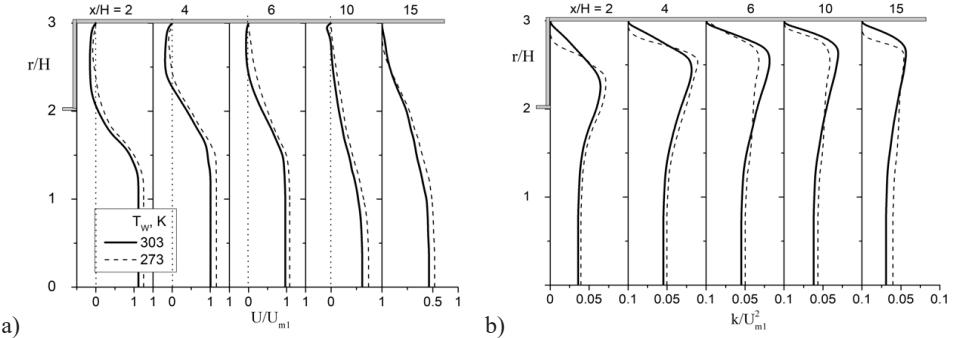


Figure. 5. Radial profiles of dimensionless distributions of mean axial velocity U (a), turbulent kinetic energy k (b).

In Figure 5b, the distributions of kinetic energy of turbulence (KET) across the radius of the pipe downstream of its sudden expansion are shown. Turbulence was determined using the Reynolds stress transport model (Fadai-Ghotbi, et al., 2008), and for axisymmetric NF and NNF, it was calculated using the relation: $2k = \langle u'^2 \rangle + \langle v'^2 \rangle + \langle w'^2 \rangle \approx \langle u'^2 \rangle + 2\langle v'^2 \rangle$. The maximum value of the KET for both types of fluids studied in the work is observed in the shear mixing layer. As the flow progresses downstream, the magnitude of the turbulence energy maximum decreases and shifts toward the pipe wall. The profile of the averaged longitudinal velocity component for both Newtonian and non-Newtonian fluids becomes more gradual. The turbulence level in the recirculation zone for the SB fluid is noticeably lower than for the Newtonian flow due to the manifestation of the non-Newtonian properties of waxy crude oil as it cools (approximately up to 30%). In the immediate vicinity of the wall, at $r/R > 0.9$, where the fluid nearly stagnates (see Fig. 5a), the KET level k approaches zero.

Profiles of the averaged effective dynamic viscosity $\mu_{eff} = \mu_T + \mu + \mu_P$ at a few stations behind the sudden pipe expansion for various wall temperatures are presented in Fig. 6, where μ is the molecular (laminar) viscosity.

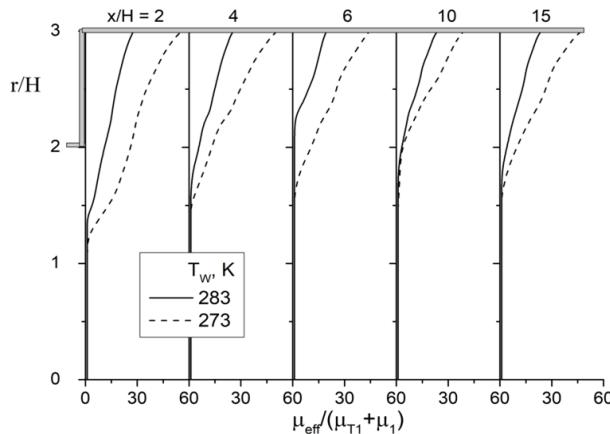


Figure 6. Radial dimensionless profiles of averaged effective dynamic viscosity μ_{eff} .
 $\text{Re} = 10^4$, $\text{Re}_H = 2600$, $\text{Pr} = 42$, $\text{Bm} = 0.007$.

With this form of writing the expression, it is easy to analyze the influence of non-Newtonian properties of the turbulent fluid on viscosity. It can be seen that the greatest manifestation of the viscoplastic behavior of turbulent fluid is revealed at $T_w = 273$ K. The flow shows the properties of a Newtonian fluid and the value of apparent viscosity $\mu_{\text{eff}} / (\mu_T + \mu) \rightarrow 1$ at $T_w = 303$ K. The main zone of manifestation of non-Newtonian behavior of turbulent fluid is limited to the recirculating region at $r/R > 2$. As we showed earlier (Zhabpasbayev, et al., 2021; Pakhomov, et al., 2023) for a turbulent flow of waxy crude oil in a pipe without sudden expansion, the properties of SB fluid appear at $T_w \leq 293$ K. Qualitatively similar behavior of turbulent non-isothermal fluid is obtained for the flow in a pipe with sudden expansion.

Conclusion

The transition of a Newtonian turbulent fluid into a viscoplastic non-Newtonian Schewedoff-Bingham fluid in a pipe with a sudden expansion is numerically studied. The kinetic energy of turbulence of a fluid flow is predicted using the elliptic relaxation Reynolds stress model.

For the velocity profiles of the fluid (see Fig. 5a), a region of negative velocities corresponding to the flow recirculation zone is observed. For the turbulent flow of non-Newtonian viscoplastic fluid after the sudden expansion, the presence of a flow separation region is also identified.

For the Schwedoff-Bingham viscoplastic fluid, it is characteristic that there is no local minimum in heat transfer in the angular part of the step. The turbulence level in the flow recirculation zone for the SB fluid is significantly lower than for the Newtonian flow, which is explained by the manifestation of non-Newtonian properties of waxy crude oil as it cools (approximately up to 30%). Near the wall, at $r/R > 0.9$, where the fluid nearly stagnates, the turbulence level tends to zero.

Литература

- Chang P. (1970) Flow Separation Control. Pergamon, Oxford, U.K. (in Eng.)
- Алемасов В.Е., Глебов Г.А., Козлов А.П. (1990) Термоанемометрические методы исследования отрывных течений. Казань: Казанский филиал АН СССР, 178 с. (in Russ.)
- Terekhov V.I., Bogatko T.V., Dyachenko A.Yu., Smulsky Ya I., Yarygina, N.I. (2021) Heat Transfer in Subsonic Separated Flows, Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-94557-2> (in Eng.)
- Eaton J.K., Johnston J.P. (1981). A review of research in subsonic turbulent flow reattachment. AIAA J. — 19, — 1093–1100. <https://doi.org/10.2514/3.60048> (in Eng.)
- Simpson R.L. (1989). Separation from two-dimensional sharp-edged bluff bodies and reattachment. Ann. Review Fluid Mech. — 21, — 220–233. (in Eng.)
- Поляков, А.Ф., Комаров, П.Л. (1996) Исследование характеристик турбулентности и теплообмена за обратным уступом в щелевом канале. Препр. РАН. Ин-т высоких температур; № 2-396. (in Russ.)
- Ota T. (2000) A survey of heat transfer in separated and reattached flows. Appl. Mech. Rev. — 53, — 219–235. <https://doi.org/10.1115/1.3097351> (in Eng.)
- Chen L., Asai K., Nonomura T., Xi G.N., Liu T.S. (2018) A review of backward-facing step (BFS) flow mechanisms, heat transfer and control. Thermal Sci. Eng. Progr. — 6, — 194–216. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.004> (in Eng.)
- Schwendoff F.N. (1900) La rigidité des fluides, Rapports du Congrès International de Physique. — 1, — 478. (in French)
- Bingham E.C. (1922) Fluidity and Plasticity, McGraw-Hill, New York. (in Eng.)
- Wilkinson W.L. (1960) Non-Newtonian fluids. Fluid Mechanics, Mixing and Heat Transfer, Pergamon Press, London. (in Eng.)
- Pakhomov M.A., Zhababasbayev U.K., Bossinov D.Zh. (2023) Numerical simulation of the transition of a Newtonian to a viscoplastic state in a turbulent flow. Journal of King Saud University – Science, — 35(2), — 102522. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24062> (in Eng.)
- Papanastasiou T.C. (1987) Flows of materials with yield. Journal of Rheology, — 31(5), — 385–404. <https://doi.org/10.1122/1.549926> (in Eng.)
- Zhababasbayev U.K., Ramazanova G.I., Bossinov D.Zh., Kenzhaliyev B.K. (2021) Flow and heat exchange calculation of waxy oil in the industrial pipeline. Case Studies of Thermal Engineering, — 26, — 101007. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101007> (in Eng.)
- Pakhomov M.A., Zhababasbayev U.K. (2024a) Comparative predictions of turbulent non-isothermal flow of a viscoplastic fluid with yield stress. Heliyon, — 10, — e24062. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24062> (in Eng.)
- Gavrilov A.A., Rudyak V.Y. (2016) Reynolds-averaged modeling of turbulent flows of power-law fluids. J. Non-Newton. Fluid Mech. — 227, — 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2015.11.006> (in Eng.)
- Fadai-Ghotbi A., Manceau R., Boree J. (2008) Revisiting URANS computations of the backward-facing step flow using second moment closures. Influence of the numerics. Flow, Turbulence and Combust. — 81(3), — 395–410. <https://doi.org/10.1007/s10494-008-9140-8> (in Eng.)
- Pakhomov M.A., Zhababasbayev U.K. (2024b) RANS predictions of turbulent non-isothermal viscoplastic fluid in pipe with sudden expansion. J. Non-Newton. Fluid Mech. — 334, — 105329. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2024.105329> (in Eng.)
- Baughn J.W., Hoffman M.A., Takahasi R.K., Launder B.E. (1984) Local heat transfer downstream of an abrupt expansion in a circular channel with constant wall heat flux. ASME J. Heat Transfer. — 106, — 789–796. <https://doi.org/10.1115/1.3246753> (in Eng.)
- Pereira A.S., Pinho F.T. (2000) Turbulent characteristics of shear-thinning fluids in recirculating flows. Exp. Fluids. — 28, — 266–278. <https://doi.org/10.1007/s003480050387> (in Eng.)
- Pereira, A.S., Pinho, F.T. (2002) The effect of the expansion ratio on a turbulent non-Newtonian recirculating flow. Exp. Fluids. — 32, — 458–471. <http://dx.doi.org/10.1007/s00348-001-0386-3> (in Eng.)

References

- Chang P. (1970) Flow Separation Control. Pergamon, Oxford, U.K. (in Eng.)
- Alemasov V.E., Glebov G.A., Kozlov A.P. (1990) Termoanemometricheskie metody issledovaniya

otryvnykh techeniy [Thermoanemometric Techniques for Studying Separation Flows]. Kazan: Kazan Branch of the Russian Academy of Sciences, 178 p. (in Russ.)

Terekhov V.I., Bogatko T.V., Dyachenko A.Yu., Smulsky Ya I., Yarygina N.I. (2021) Heat Transfer in Subsonic Separated Flows, Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-94557-2> (in Eng.)

Eaton J.K., Johnston J.P. (1981) A review of research in subsonic turbulent flow reattachment. AIAA J. — 19, — 1093–1100. <https://doi.org/10.2514/3.60048> (in Eng.)

Simpson, R.L. (1989). Separation from two-dimensional sharp-edged bluff bodies and reattachment. Ann. Review Fluid Mech. — 21, — 220–233. (in Eng.)

Polyakov A.F., Komarov P.L. (1996) Issledovanie kharakteristik turbulentnosti i teploobmena za obratnym ustupom v shchelevom kanale [Study of the characteristics of turbulence and heat transfer behind a reverse step in a slot channel]. Preprint Joint Institute of High temperature RAS. — 2-396, — 70 p. (in Russ.).

Ota T. (2000) A survey of heat transfer in separated and reattached flows. Appl. Mech. Rev. — 53, — 219–235. <https://doi.org/10.1115/1.3097351> (in Eng.)

Chen L., Asai K., Nonomura T., Xi G.N., Liu T.S. (2018) A review of backward-facing step (BFS) flow mechanisms, heat transfer and control. Thermal Sci. Eng. Progr. — 6, — 194–216. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.004> (in Eng.)

Schwendoff F.N. (1900) La rigidité des fluides, Rapports du Congrès International de Physique. — 1, — 478. (in French)

Bingham E.C. (1922) Fluidity and Plasticity, McGraw-Hill, New York. (in Eng.)

Wilkinson W.L. (1960) Non-Newtonian fluids. Fluid Mechanics, Mixing and Heat Transfer, Pergamon Press, London. (in Eng.)

Pakhomov M.A., Zhabasbayev U.K., Bossinov D.Zh. (2023) Numerical simulation of the transition of a Newtonian to a viscoplastic state in a turbulent flow. Journal of King Saud University – Science, — 35(2), — 102522. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24062> (in Eng.)

Papanastasiou T.C. (1987) Flows of materials with yield. Journal of Rheology, — 31(5), — 385–404. <https://doi.org/10.1122/1.549926> (in Eng.)

Zhabasbayev U.K., Ramazanova G.I., Bossinov D.Zh., Kenzhaliev B.K. (2021) Flow and heat exchange calculation of waxy oil in the industrial pipeline. Case Studies of Thermal Engineering, — 26, — 101007. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101007> (in Eng.)

Pakhomov M.A., Zhabasbayev U.K. (2024a) Comparative predictions of turbulent non-isothermal flow of a viscoplastic fluid with yield stress. Heliyon, — 10, — e24062. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24062> (in Eng.)

Gavrilov A.A., Rudyak V.Y. (2016) Reynolds-averaged modeling of turbulent flows of power-law fluids. J. Non-Newton. Fluid Mech. — 227, — 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2015.11.006> (in Eng.)

Fadai-Ghotbi A., Manceau R., Boree J. (2008) Revisiting URANS computations of the backward-facing step flow using second moment closures. Influence of the numerics. Flow, Turbulence and Combust. — 81(3), — 395–410. <https://doi.org/10.1007/s10494-008-9140-8> (in Eng.)

Pakhomov M.A., Zhabasbayev U.K. (2024b) RANS predictions of turbulent non-isothermal viscoplastic fluid in pipe with sudden expansion. J. Non-Newton. Fluid Mech. — 334, — 105329. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2024.105329> (in Eng.)

Baughn J.W., Hoffman M.A., Takahasi R.K., Launder B.E. (1984) Local heat transfer downstream of an abrupt expansion in a circular channel with constant wall heat flux. ASME J. Heat Transfer. — 106, — 789–796. <https://doi.org/10.1115/1.3246753> (in Eng.)

Pereira A.S., Pinho F.T. (2000) Turbulent characteristics of shear-thinning fluids in recirculating flows. Exp. Fluids. — 28, — 266–278. <https://doi.org/10.1007/s003480050387> (in Eng.)

Pereira, A.S., Pinho, F.T. (2002) The effect of the expansion ratio on a turbulent non-Newtonian recirculating flow. Exp. Fluids. — 32, — 458–471. <http://dx.doi.org/10.1007/s00348-001-0386-3> (in Eng.)

REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
ISSN 2224-5227
Volume 1. Number 353 (2025), 78–88

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.325>

МРНТИ 29.17.21; 29.05.41

УДК 536; 538.9

***D.M. Zazulin^{1,2}, S.E. Kemelzhanova^{1,3}, N.A. Beissen¹, A.Sh. Turumbekov¹,
M.O. Alimkulova¹, 2025.**

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

²Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan;

³Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan.

*E-mail: denis_zazulin@mail.ru

GEOMETROTHERMODYNAMICS OF A HOLOGRAPHIC SYSTEM WITH ZERO SOUND

Zazulin Denis Mikhailovich – Candidate of physical and mathematical sciences, lecturer at the al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; senior researcher at the Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan, E-mail: denis_zazulin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2115-6226>;

Kemelzhanova Sandugash Esteuovna – Master, senior lecturer at the Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan; senior lecturer at the al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, kemelzhanova.sandugash@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5469-3960>;

Beissen Nurzada Abdibekova – Candidate of physical and mathematical sciences, professor, dean of the faculty of physics and technology, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: nurzada.beissen@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1957-2768>;

Turumbekov Alisher Shakarimovich – Master, PhD doctoral student, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: alisherturumbekov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-3142-6348>;

Alimkulova Madina Orynbekova – Master, PhD doctoral student, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: m.alimkulova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4977-7980>.

Abstract. This paper presents the results of studying the geometric properties of the equilibrium manifold of a strongly interacting thermodynamic system of a new type, which was discovered in the course of research in the field of holographic dualities. The method of holographic dualities describes various quantum field theories and quantum many-particle systems with strong coupling between particles. In this description, there is a relationship between the four-dimensional quantum theory in the strong coupling regime in Minkowski space and the theory of ten-dimensional gravity in anti-De Sitter space. At low energies, the system we studied has a zero-sound mode in its spectrum, despite the behavior of its heat capacity that is uncharacteristic for a Fermi liquid. The work was carried out within the framework of geometrotethermodynamics, which allows obtaining results that are invariant with respect to Legendre transformations, i.e. independent of the choice of thermodynamic potentials. As a thermodynamic potential, we used a chemical potential dependent on temperature and density. For

the system under consideration, the corresponding metric and scalar curvature were calculated in a wide range of thermodynamic parameters, the stability region of this system was determined, and its thermodynamic and metric properties were described. Three-dimensional graphs were obtained for the chemical potential, for the derivative of the chemical potential with respect to density, and for the scalar curvature. The region of thermodynamic stability of the system was determined from the graph for the derivative of the chemical potential with respect to density. The graph for the scalar curvature clearly shows at what values of thermodynamic variables it tends to infinity or is close to zero, which indicates possible phase transitions and possible compensation of interactions by quantum effects, respectively.

Keywords: geometrothermodynamics, Legendre transformations, metric tensor, scalar curvature, holographic dualities, zero sound.

***Д.М. Зазулин^{1,2}, С.Е. Кемелжанова^{1,3}, Н.Ә. Бейсен¹, А.Ш. Турсумбеков¹,
М.О. Алимкулова¹, 2025.**

¹Әл-Фараби Атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан;

²Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан;

³Абай Атындағы Қазақ Ұлттық Педагогикалық Университеті,
Алматы, Қазақстан.

*E-mail: denis_zazulin@mail.ru

НӨЛДІК ДЫБЫСЫ БАР ГОЛОГРАФИЯЛЫҚ ЖҮЙЕНІЦ ГЕОМЕТРОТЕРМОДИНАМИКАСЫ

Зазулин Денис Михайлович – Физика-математика ғылымдарының кандидаты, әл-Фараби Қазақ ұлттық университетінің оқытушысы, Алматы, Қазақстан; Ядролық Физика Институтының аға ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан, E-mail: denis_zazulin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2115-6226>;

Кемелжанова Сандугаш Естеуовна – магистр, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университетінің аға оқытушысы, Алматы, Қазақстан; әл-Фараби Қазақ ұлттық университетінің аға оқытушысы, Алматы, Қазақстан, kemelzhanova.sandugash@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5469-3960>;

Бейсен Нұрзада Эбдібеккызы – Физика-математика ғылымдарының кандидаты, профессор, әл-Фараби Қазақ ұлттық университетінің физика-техника факультетінің деканы, Алматы, Қазақстан, E-mail: nurzada.beissen@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1957-2768>;

Турсумбеков Алишер Шакаримович – Магистр, PhD докторантты, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: alishertursumbekov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-3142-6348>;

Алимкулова Мадина Орынбековна – магистр, PhD докторантты, әл-Фараби Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: m.alimkulova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4977-7980>.

Аннотация. Ұсынылған жұмыста голографиялық дуализм саласындағы зерттеулер барысында ашылған жаңа типті күшті әсерлесетін термодинамикалық жүйенің тепе-тендік алуан түрлілігінің геометриялық қасиеттерін зерттеу нәтижелері берілген. Голографиялық дуалиттер әдісі әр түрлі кванттық өріс

теорияларын және бөлшектер арасындағы күшті байланысы бар кванттық көп бөлшекті жүйелерді сипаттайты. Бұл сипаттамада Минковски кеңістігіндегі күшті байланыс режиміндегі төрт өлшемді кванттық теория мен анти-Де Ситтер кеңістігіндегі он өлшемді ауырлық теориясы арасында байланыс бар. Төмен энергияларда біз зерттеген жүйенің жылу сыйымдылығы Ферми сұйықтығына тән емес екенине қарамастан, оның спектрінде нөлдік дыбыс режимі бар. Жұмыс геометротермодинамика шеңберінде жүргізілді, бұл Леджендре түрлендірулері бойынша инвариантты нәтижелерді алуға мүмкіндік береді, яғни термодинамикалық потенциалдарды тандауга тәуелсіз. Термодинамикалық потенциал ретінде біз температура мен тығыздыққа тәуелді химиялық потенциалды қолданық. Қарастырылып отырған жүйе үшін термодинамикалық параметрлердің кең диапазонында сәйкес метрикалық және скалярлық қисықтық есептеледі, бұл жүйенің тұрақтылық аймагы анықталады, оның термодинамикалық және метрикалық қасиеттері сипатталады. Химиялық потенциал үшін, тығыздыққа қатысты химиялық потенциалдың туындысы үшін және скалярлық қисықтық үшін үш өлшемді графиктер алынды. Тығыздыққа қатысты химиялық потенциалдың туындысына арналған графиктен жүйенің термодинамикалық тұрақтылық аймагы анықталды. Скалярлық қисықтық графиктер термодинамикалық айнымалылардың қандай мәндерінде оның шексіздікке ұмтылатынын немесе нөлге жақын екенин анық көрсетеді, бұл сәйкесінше мүмкін болатын фазалық ауысуларды және өзара әрекеттесулердің кванттық әсерлер арқылы мүмкін өтелуін көрсетеді.

Түйін сөздер: геометротермодинамика, Лежендр түрлендірулері, метрикалық тензор, скалярлық қисықтық, голографиялық дуализм, нөлдік дыбыс.

***Д.М. Зазулин^{1,2}, С.Е. Кемелжанова^{1,3}, Н.А. Бейсен¹, А.Ш. Турсумбеков¹,
М.О. Алимқурова¹, 2025.**

¹Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

² Институт Ядерной Физики, Алматы, Казахстан;

³Казахский Национальный Педагогический Университет им. Абая,
Алматы, Казахстан.

*E-mail: denis_zazulin@mail.ru

ГЕОМЕТРОТЕРМОДИНАМИКА ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С НУЛЕВЫМ ЗВУКОМ

Зазулин Денис Михайлович – кандидат физико-математических наук, преподаватель Казахского национального университета им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан; старший научный сотрудник Института Ядерной Физики, Алматы, Казахстан, E-mail: denis_zazulin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2115-6226>;

Кемелжанова Сандугаш Естеуовна – магистр, старший преподаватель Казахского национального педагогического университета им. Абая, Алматы, Казахстан; старший преподаватель Казахского национального университета им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан, kemelzhanova.sandugash@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5469-3960>;

Бейсен Нурзада Абдибековна – кандидат физико-математических наук, профессор, декан Физико-технического факультета Казахского национального университета им. аль-Фараби, Алматы,

Казахстан, E-mail: nurzada.beissen@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1957-2768>;

Турсумбеков Алишер Шакаримович – магистр, студент PhD Казахского национального университета им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан, E-mail: alishertursumbekov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-3142-6348>;

Алимкулова Мадина Орынбековна – магистр, студент PhD Казахского национального университета им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан, E-mail: m.alimkulova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4977-7980>.

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования геометрических свойств равновесного многообразия сильновзаимодействующей термодинамической системы нового типа, обнаруженной в рамках исследований голографических дуальностей. Метод голографических дуальностей позволяет описывать различные квантовые теории поля и квантовые многочастичные системы с сильным взаимодействием между частицами. В этом подходе существует взаимосвязь между четырёхмерной квантовой теорией в режиме сильного взаимодействия в пространстве Минковского и теорией десятимерной гравитации в пространстве анти-де Ситтера.

Исследуемая система при низких энергиях демонстрирует наличие моды нулевого звука, несмотря на её нетипичное для ферми-жидкости поведение теплоёмкости. Работа выполнена в рамках геометротермодинамики, что позволяет получать результаты, инвариантные относительно преобразований Лежандра, то есть независимые от выбора термодинамических потенциалов. В качестве термодинамического потенциала использован химический потенциал, зависящий от температуры и плотности.

Для рассматриваемой системы рассчитаны соответствующие метрика и скалярная кривизна в широкой области термодинамических параметров, определена область её стабильности, а также описаны термодинамические и метрические свойства. Получены трёхмерные графики химического потенциала, его производной по плотности и скалярной кривизны. Анализ графика производной химического потенциала по плотности позволил определить область термодинамической стабильности системы. График скалярной кривизны демонстрирует, при каких значениях термодинамических переменных она стремится к бесконечности или остаётся близкой к нулю, что указывает на возможные фазовые переходы и компенсацию взаимодействий квантовыми эффектами соответственно.

Ключевые слова: геометротермодинамика, преобразования Лежандра, метрический тензор, скалярная кривизна, голографические дуальности, нулевой звук.

Благодарности

Данная работа поддержана Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № АР23490322 «Исследование термодинамических свойств релятивистских компактных объектов в рамках геометротермодинамики (ГТД)»).

Введение. Одним из применений метода голографических дуальностей (Maldacena, 1998) является описание квантовой теории поля и квантовых термодинамических систем в режиме сильной связи (Mateos, 2007). В первых работах было найдено соответствие между теорией 10 мерной супергравитации в пространстве, представляющем собой прямое произведение 5 мерного пространства Анти Де Ситтера и 5 мерной сферы $AdS_5 \times S_5$ и 4 мерной суперсимметричной конформной квантовой теорией поля в режиме сильной связи в пространстве Минковского (граница AdS_5). Все частицы этой 4 мерной теории находятся в присоединенном представлении компактной калибровочной группы. В работе (Karch, 2002) предложен метод включения в голографическую систему материи в фундаментальном представлении, необходимость которого связана с тем, что фермионная составляющая в квантовой хромодинамике (для описания которой в режиме сильной связи и был, в основном, разработан голографический метод) как раз находится в фундаментальном представлении калибровочной группы $SU(3)$. В работах (Sakai, 2005; Aharony, 2007) голографический метод был обобщен для описания различных фазовых переходов в дуальных квантовых термодинамических сильно взаимодействующих системах и для любой пространственной размерности. В настоящее время голографические модели приводят к предсказаниям, многие из которых хорошо согласуются с экспериментальными данными. Более того с помощью голографического метода предсказываются новые типы квантовых систем. Например, в работе (Karch, 2009) обнаружена система, у которой при низких температурах имеется нулевая звуковая мода как у Ферми жидкости, но у этой системы совершенно иная температурная зависимость теплоемкости. В работе (Karch, 2007), при исследовании голографической теории с ненулевой барионной плотностью при нулевой температуре обнаружен фазовый переход второго рода, когда химический потенциал становится равным массе барионов. В связи с вышеприведенным, задача всестороннего изучения (различными термодинамическими методами) термодинамических свойств новых квантовых систем, предсказанных методом голографических дуальностей, становится актуальной.

В настоящей работе было проведено исследование термодинамических свойств голографической системы с нулевым звуком, описанной в работе (Karch, 2009). В качестве метода исследования использовалась геометротермодинамика, а в качестве вычислительной системы Wolfram Mathematica 12.

Связь между термодинамикой и геометрией рассматривалась ранее в работах (Weinhold, 1976; Ruppeiner, 1979; Amari, 1990). Было показано, что сопоставление термодинамических величин с компонентами метрического тензора может быть проведено на основе различных принципов. В геометродинамике, предложенной Э. Кеведо в работах (Quevedo, 2007) таким принципом является требование инвариантности скалярной кривизны равновесного метрического многообразия относительно соответствующих термодинамических преобразований Лежандра. В этом случае имеется прямая аналогия со специальной теорией относительности и преобразованиями Лоренца. В геометротермодинамике взаимодействия между

частицами в термодинамических системах описывается с помощью кривизны равновесного многообразия. Например, как это было показано в (Quevedo, 2007), идеальный газ, частицы которого не взаимодействуют друг с другом, соответствует многообразию с нулевой кривизной. В случае взаимодействующих систем с нетривиальной структурой фазовых переходов, геометротермодинамика воспроизводит поведение системы вблизи областей, где происходят фазовые переходы. Как было показано на примере газа Ван-дер-Ваальса (Quevedo 2007) в области фазового перехода скалярная кривизна становится бесконечной. В последующих работах различных авторов геометротермодинамика была опробована на многих других ранее изученных термодинамических системах. Так в работах (Quevedo, 2008 1; Quevedo, 2008 2) с помощью геометротермодинамики была исследована термодинамика различных черных дыр. В работе (Zazulin, 2020 1) рассматривалась геометротермодинамика двумерного Бозе газа и системы Березинского - Костерица – Таулесса, а в работе (Zazulin, 2020 2) методы геометротермодинамики были применены для описания термодинамических свойств голограмической системы с конечной барионной плотностью, описанной в работе (Karch, 2007). Во всех перечисленных работах области термодинамических и геометротермодинамических фазовых переходов совпали. Особенность поведения скалярной кривизны удобно использовать для поисков неизвестных фазовых переходов в малоизученных термодинамических системах.

Модель и вычислительные методы. Для изучения голограмической системы с нулевым звуком в рамках геометротермодинамики мы вычисляли метрические тензоры соответствующих равновесных многообразий, детерминанты метрических тензоров и скалярные кривизны. В качестве формулы для вычисления метрик и соответствующих метрических тензоров мы использовали (Quevedo, 2007):

$$dl^2 = E_a \frac{\partial \Phi}{\partial E^a} \delta_{ab} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial E^b \partial E^c} dE^a E^c \quad (1)$$

где l^2 - квадрат термодинамической длины, $\Phi \equiv \Phi(E^a)$ – термодинамический потенциал, который явно зависит от других термодинамических потенциалов - E^a ($a = 1, \dots, n$), n – количество термодинамических потенциалов (в нашем случае $n = 2$) и $\delta_{ab} = \text{diag}(1, 1, \dots, 1)$. Соотношение (1) инвариантно относительно преобразований Лежандра.

Выражение для тензора кривизны имеет обычный вид:

$$R_{abcd} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 g_{ad}}{\partial E^b \partial E^c} + \frac{\partial^2 g_{bc}}{\partial E^a \partial E^d} - \frac{\partial^2 g_{ac}}{\partial E^b \partial E^d} - \frac{\partial^2 g_{bd}}{\partial E^a \partial E^c} \right) + g_{np} (\Gamma_{bc}^n \Gamma_{ad}^p - \Gamma_{bd}^n \Gamma_{ac}^p), \quad (2)$$

Где g^{nm} (g_{nm}) – контравариантный (ковариантный) метрический тензор, $\Gamma_{bc}^n = \frac{1}{2} g^{nm} \left(\frac{\partial g_{mb}}{\partial E^c} + \frac{\partial g_{mc}}{\partial E^b} - \frac{\partial g_{bc}}{\partial E^m} \right)$ – символы Кристоффеля. Далее, скалярная кривизна вычисляется по формуле: $R = g^{ac} g^{bd} R_{abcd}$.

Поскольку в дальнейшем мы будем иметь дело с системой, зависящей только

от двух термодинамических потенциалов, то выражение для скалярной кривизны упрощается до:

$$\hat{R} = \frac{2R_{1212}}{\det(g)}, \quad (3)$$

где $\det(g)$ – детерминант двумерного метрического тензора.

Результаты и обсуждение. Рассмотрим сначала голографическую систему с нулевым звуком в пределе низких температур (точнее случай $Td^{\frac{-1}{p}} \ll 1$, где T – температура, d – барионная плотность, p – размерность пространства). Величины T и d в нашей работе приведены в относительных единицах. При $p = 3$, согласно (Karch, 2009) зависимость энтропии этой системы от температуры и плотности в относительных единицах имеет вид: $S(T, d) = \frac{T^6}{2d}$. Используя формулы (1) и (3) получим метрический тензор:

$$g_{mn}(T, d) = \begin{bmatrix} \frac{180T^{10}}{d^2} & \frac{-15T^{11}}{d^3} \\ \frac{-15T^{11}}{d^3} & \frac{-2T^{12}}{d^4} \end{bmatrix}.$$

Детерминант этого тензора:

$$\det(g) = \frac{-585T^{22}}{d^6},$$

И скалярную кривизну:

$$R = \frac{-985d^2}{1352T^{12}}. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует, что особенность скалярной кривизны (а значит и возможная термодинамическая особенность, связанная с фазовым переходом) возникает только в пределе $\frac{d}{T^6} \rightarrow \infty$. С другой стороны, из (4) следует, что при повышении температуры и при уменьшении барионной плотности эффективное взаимодействие между частицами системы ослабевает.

Далее рассмотрим, согласно (Karch, 2009), точное выражение теперь уже для химического потенциала, определенное через гипергеометрическую функцию Гаусса и гамма-функции Эйлера:

$$\mu(T, d) = \frac{d^{1/6} \Gamma\left[\frac{1}{3}\right] \Gamma\left[\frac{2}{3}\right]}{\sqrt{\pi}} - \pi T_2 F_1 \left[\frac{1}{6}, \frac{1}{2}, \frac{7}{6}, -\frac{\pi^6 T^6}{d^2} \right] \quad (5)$$

Первое слагаемое справа представляет химический потенциал системы при нулевой температуре. На рисунке 1 показан график функции (5) для некоторого диапазона параметров T и d .

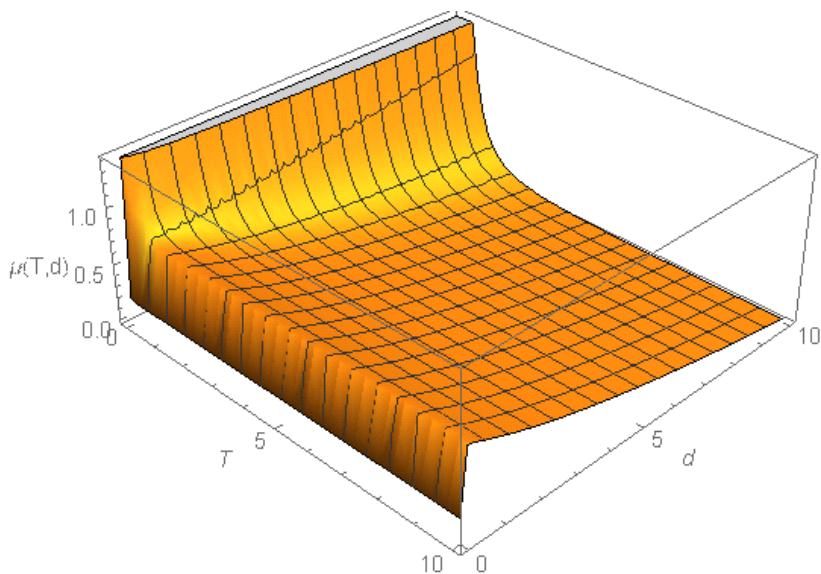


Рисунок 1. Химический потенциал $\mu(T,d)$, определенный формулой (5) в зависимости от температуры и плотности для голограммической жидкости с нулевым звуком (Karch 2009).

На рисунке 2 представлен график $d\mu/dT (T,d)$ с помощью которого определена область термодинамической стабильности (при $d\mu/dT (T,d) > 0$) в некотором диапазоне значений T и d . На рисунке 3 эта область расположена слева от кривой.

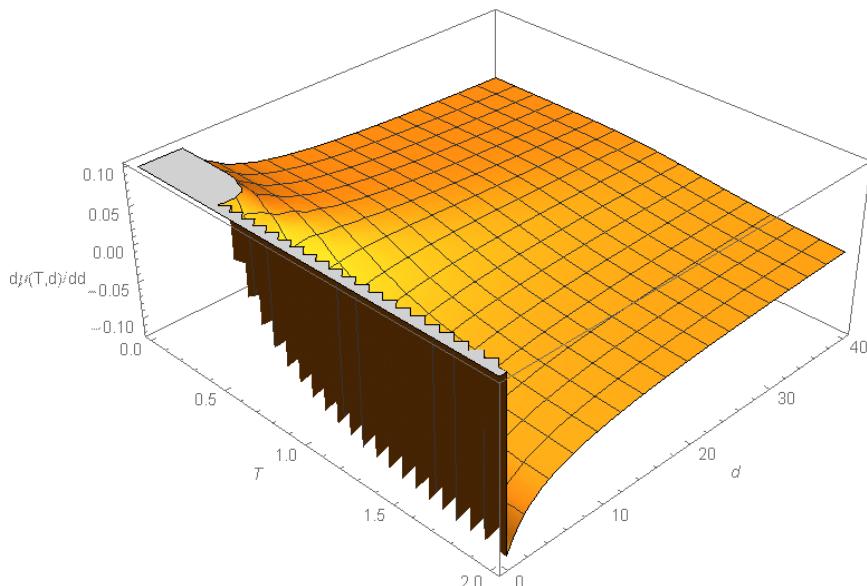


Рисунок 2. Величина $d\mu/dT (T,d)$ в зависимости от температуры и плотности для голограммической системы с нулевым звуком (Karch, 2009).

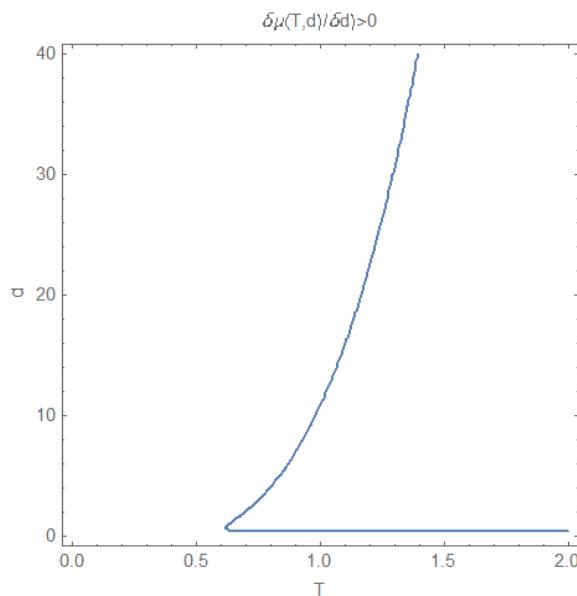


Рисунок 3. Область стабильности. Слева от кривой расположена область термодинамической стабильности системы с нулевым звуком (Karch 2009). Величина $d\mu/dd$ (T,d) в этой области больше 0.

Применяя к выражению (5) последовательно формулы (1), (2) и (3) получим результат для скалярной кривизны, трехмерный график которой приведен на рисунке 4.

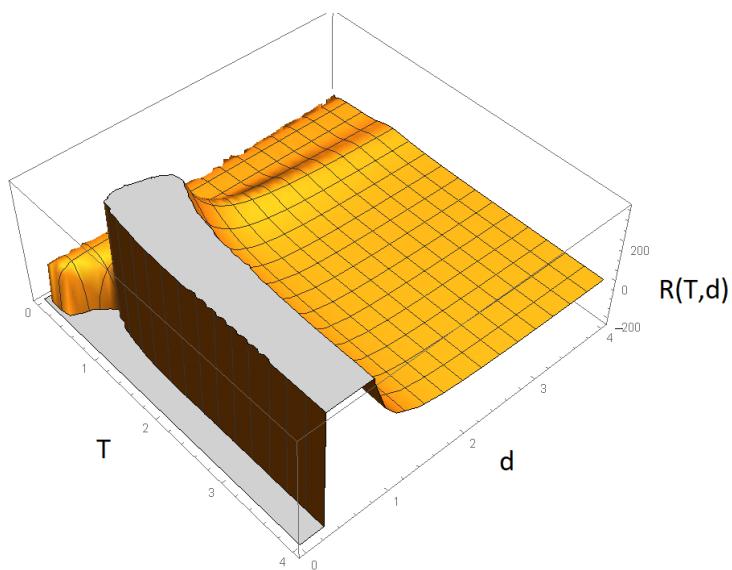


Рисунок 4. Скалярная кривизна $R(T,d)$ в зависимости от температуры и плотности для голограммической жидкости с нулевым звуком (Karch, 2009).

Как видно из рисунка 4 при конечных температурах в диапазоне значений Т от 0.2 до 4 и барионной плотности в районе $d = 1$ в значениях скалярной кривизны наблюдается разрыв. Таким образом, в этой области параметров Т и d в рассматриваемой термодинамической системе возможен фазовый переход. С учетом того, что для термодинамического потенциала – энтропии S , полученной в пределе $Td^{\frac{-1}{p}} \ll 1$ никакого разрыва в величине скалярной кривизны не наблюдается то можно предположить что разрыв в величине скалярной кривизны (и следовательно возможный фазовый переход в исследуемой термодинамической системе) является непертурбативным эффектом. Так же из рисунков 3 и 4 видно, что разрыв в величине скалярной кривизны находится в области термодинамической нестабильности т.е. в области где $d\mu/dd(T,d) < 0$.

Заключение. В настоящей работе в рамках геометротермодинамики рассмотрено равновесное многообразие сильновзаимодействующей квантовой системы с нулевым звуком, предсказанный методом голографических дуальностей. Вычислены соответствующие метрические тензоры и скалярные кривизны.

В качестве термодинамического потенциала для случая $Td^{\frac{-1}{p}} \ll 1$ использовалась энтропия $S(T,d)$, а для общего случая химический потенциал (точное выражение), зависящий от температуры и плотности. В области конечных температур и плотностей для первого случая никаких указаний на фазовые переходы для голографической системы с нулевым звуком обнаружено не было. В то время как при исследовании с помощью точной формулы найдена область возможного фазового перехода.

В работе представлены графики для химического потенциала, для производной от химического потенциала по плотности и для скалярной кривизны. Определена область термодинамической стабильности системы. На графике для скалярной кривизны видны области термодинамических переменных, в которых она стремится к бесконечности или близка к нулю, что указывает на возможные фазовые переходы в системе и на возможную компенсацию взаимодействий квантовыми эффектами соответственно.

В дальнейшем, желательно изучить свойства голографической системы с нулевым звуком в других областях термодинамических параметров и используя стандартные методы теории фазовых переходов с нахождением критических индексов.

Декларация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, имеющих отношение к предмету данной рукописи.

References

- Maldacena J.M. (1998) The large N limit of superconformal field theories and supergravity, *Adv. Theor. Math. Phys.* 2, 231-252. Doi: <https://doi.org/10.4310/ATMP.1998.v2.n2.a1> (in Eng.)
- Witten E. (1998) Anti de Sitter space and holography, *Adv. Theor. Math. Phys.* 2, 253-291. Doi: <https://doi.org/10.4310/ATMP.1998.v2.n2.a2> (in Eng.)

- Witten E. (1998) Anti-de Sitter space, thermal phase transition, and confinement in gauge theories, *Adv. Theor. Math. Phys.* 2, 505–532. Doi: 10.4310/ATMP.1998.v2.n3.a3 (in Eng.)
- Gubser S., Klebanov I. and Polyakov A. (1998) Gauge theory correlators from noncritical string theory, *Phys. Lett. B* 428, 105–114. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(98\)00377-3](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(98)00377-3). (in Eng.)
- Mateos D., Myers R., Thomson R. (2007) Thermodynamics of the brane, *JHEP05*(2007)067, 1 - 61. Doi: <https://doi.org/10.1088/1126-6708/2007/05/067> (in Eng.)
- Erdmenger J., Evans N., Kirsch I., Threlfall E. (2008) Mesons in gauge/gravity duals - a review, *Eur. Phys. J. A* 35, 81 – 133. Doi: 10.1140/epja/i2007-10540-1. (in Eng.)
- Karch Andreas and Katz Emanuel. (2002) Adding flavor to AdS/CFT, *JHEP*, *JHEP06*(2002)043, 1 – 15. Doi: 10.1088/1126-6708/2002/06/043. (in Eng.)
- Sakai T. and Sugimoto S. (2005) Low energy hadron physics in holographic QCD, *Prog. Theor. Phys.* 113, 843–882. Doi: <https://doi.org/10.1143/PTP.113.843>. (in Eng.)
- Aharony O., Sonnenschein J. and Yankielowicz S. (2007) A holographic model of deconfinement and chiral symmetry restoration, *Annals Phys.* 322, 1420 – 1443. Doi: 10.1016/j.aop.2006.11.002. (in Eng.)
- Karch A., Son D.T., and Starinets A.O. (2009) Holographic quantum liquid, *Phys. Rev. Lett.* 102, 051602-1 - 051602-4, Doi: 10.1103/PhysRevLett.102.051602. (in Eng.)
- Karch A., O'Bannon A. (2007) Holographic thermodynamics at finite baryon density: some exact results, *JHEP* 0711:074(2007), 1 – 20. Doi: 10.1088/1126-6708/2007/11/074. (in Eng.)
- Weinhold F. (1976) Thermodynamics and geometry, *Physics Today* 29, 3, 23–30. Doi: 10.1063/1.3023366. (in Eng.)
- Ruppeiner G. (1979) Thermodynamics: A Riemannian geometric model, *Phys. Rev. A* 20, 1608 – 1613. Doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.20.1608>. (in Eng.)
- Amari S. (1990) Differential-geometrical methods in statistics, (Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo Hong Kong) 1 – 294. ISBN-13: 978-0-387-96056-2, Doi: 10.1007/978-1-4612-5056-2. (in Eng.)
- Quevedo H. (2007) Geometrothermodynamics, *J. Math. Phys.* 48, 013506-1 - 013506-14, Doi: <https://doi.org/10.1063/1.2409524> (in Eng.)
- Quevedo H., Sanchez A., Taj S., Vazquez A. (2011) Phase transitions in Geometrothermodynamics, *Gen. Rel. Grav.* 43, 1153–1165. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10714-010-0996-2>. (in Eng.)
- Quevedo H. (2008) 1 Geometrothermodynamics of black holes, *Gen. Rel. Grav.* 40, 5, 971 – 984. Doi: 10.1007/s10714-007-0586-0. (in Eng.)
- Quevedo H., Sanchez A. (2008) 2 Geometrothermodynamics of asymptotically de Sitter black holes, *JHEP* 09 034, 1 - 20. Doi: 10.1088/1126-6708/2008/09/034. (in Eng.)
- Zazulin D.M., Kemelzhanova S.E., Satyshev I., Ormantaev O. (2020) 1 Application of geometrothermodynamics to the two-dimensional systems: ideal Bose-gas and system with strong interaction, *News of the NAS of the RK Al-farabi KazNU ser. phys.-math.* 332, 4, 68 - 76. Doi: <https://doi.org/10.26577/RCPH.2020.v73.i2.03>. (in Eng.)
- Zazulin D.M., Kemelzhanova S.E., Ezau P.D., Satyshev I. (2020) 2 Application of geometrothermodynamics to the system with finite baryon density described by the method of holographic dualities, *Recent Contributions to Physics* 73, 2, 22 - 31. Doi: <https://doi.org/10.26577/RCPH.2020.v73.i2.03>. (in Eng.)

Y. Myrzakulov*, A. Altaibayeva, A. Bulanbayeva, 2025.

LN Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.

E-mail: ymyrzakulov@gmail.com

PHASE TRANSITIONS AND THERMODYNAMIC BEHAVIOR OF AdS BLACK HOLES COUPLED WITH NONLINEAR ELECTRODYNAMICS

Myrzakulov Yerlan – PhD in Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: myrzakulov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0160-0422>;

Altaibayeva Aziza – PhD in Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: aziza.itaibayeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9254-7027>;

Bulanbayeva Arailym – Master's student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: arai_bul@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6541-3902>.

Abstract. We present the exact d -dimensional AdS black hole solution in the presence of nonlinear electrodynamics (NLED) and investigate the thermodynamic properties of this black hole. The thermodynamic quantities change in the presence of NLED, extending our results by considering the cosmological constant (Λ) as a thermodynamic variable ($P = -\Lambda/8\pi$). We obtain the critical values of pressure, temperature, and horizon radius and analyze the behavior of the global parameter $P_c v_c / T_c$. A phase transition between small and large black holes is found, resembling the phase transition of the Van der Waals system. Furthermore, we explore the influence of the deviation parameter k on the horizon structure and thermodynamic stability. Using the derived equation of state, we investigate the critical behavior and identify the characteristic swallowtail structure in Gibbs free energy, confirming the phase transition between small and large black holes. The black hole entropy S_+ is derived from the first law of thermodynamics and exhibits corrections due to NLED, reducing to the ekenstein-Hawking area law when $k = 0$.

The pressure-volume relationship $P = \frac{3(k - r_+^2 - 2\pi r_+^3 T)}{4\pi(2r_+^2 - k)}$ is analyzed to determine the critical points. Additionally, we identify how higher-dimensional effects and nonlinear electrodynamics influence the thermodynamic quantities. These modifications lead to significant differences from classical Schwarzschild-Tangherlini solutions. Our results provide new insights into the thermodynamic properties of AdS black holes coupled to NLED and contribute to a deeper understanding of phase transitions in higher-dimensional gravity theories, especially in the context of regular black holes and their stability. These findings open up further avenues for exploring the intricate relationship between black hole thermodynamics and fundamental forces.

Keywords: *AdS* black holes, nonlinear electrodynamics, thermodynamic phase transitions, critical behavior, higher-dimensional gravity.

Е.М. Мырзакулов*, А.Б. Алтайбаева, А.С. Бұланбаева, 2025.
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия Үлттых Университеті, Астана, Қазақстан.
E-mail: umyrzakulov@gmail.com

СЫЗЫҚТЫ ЕМЕС ЭЛЕКТРОДИНАМИКАМЕН БАЙЛАНЫСҚАН AdS ҚАРА ҚҰРДЫМДАРДЫҢ ФАЗАЛЫҚ АУЫСУЛАРЫ МЕН ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ

Мырзакулов Ерлан Муратбаевич – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҮУ, Астана, Қазақстан, E-mail: umyrzakulov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0160-0422>;

Алтайбаева Азиза Биболовна – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҮУ, Астана, Қазақстан, E-mail: aziza.ltaibayeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9254-7027>;

Бұланбаева Арайлым Саятқызы – Магистрант, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҮУ, Астана, Қазақстан, E-mail: arai_bul@mail.ru , ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6541-3902>.

Аннотация. Бұл жұмыста сызықты емес электродинамиканы ескере отырып, d -өлшемді *AdS* қара құрдымның нақты шешімі ұсынылған және осы қара құрдымның термодинамикалық қасиеттері қарастырылған. Сызықты емес электродинамика термодинамикалық шамалардың өзгеруіне себеп болады, бұл $P = -\Lambda/8\pi$ жағдайында космологиялық тұрақтыны (Λ) термодинамикалық айнымалы ретінде қарастырганда, алынған нәтижелерді жалпылауға мүмкіндік береді. Қысымның, температураның және көкжиек радиусының критикалық мәндері есептеліп, сондай-ақ $P_c v_c/T_c$ глобалды параметрінің өзгерісі талданған. Кіші және үлкен қара құрдымдар арасында Ван-дер-Ваальс жүйесіндегі фазалық ауысуға үқсас фазалық ауысу анықталған. Сонымен қатар, k ауытқу параметрінің көкжиек құрылымына және термодинамикалық тұрақтылыққа әсері зерттелген. Алынған күй теңдеуін қолдана отырып, критикалық мәні зерттеліп, Гиббс бос энергиясына тән «түйін» құрылымы анықталды, бұл кіші және үлкен қара құрдымдар арасындағы фазалық ауысады растайды. Термодинамиканың бірінші заңын пайдаланып алынған қара құрдымның энтропиясына S_+ , сызықты емес электродинамика есебінен тузетулер енгізіледі және $k=0$ жағдайында Бекенштейн-Хокинг ауданы заңына сәйкес келеді. Критикалық нүктелерді анықтау үшін

$$P = \frac{3(k - r_+^2 - 2\pi r_+^3 T)}{4\pi(2r_+^2 - k)}$$

қысым мен көлемге қатынасы тәуелділігі талданған. Сонымен қатар, көпөлшемділіктің және сызықты емес электродинамиканың термодинамикалық параметрлердің сипаттамасына әсері талданған. Бұл модификациялар Шварцшильд-Тангерлинидің классикалық шешімдерінен айтарлықтай айырмашылықтарды көрсетеді. Алынған нәтижелер сызықты емес электродинамикамен байланысты *AdS* қара құрдымдарының термодинамикалық қасиеттері туралы қосымша мәліметтер береді және көпөлшемді кеңістіктердегі гравитация теорияларындағы фазалық ауысуларды, әсіресе тұрақтылық пен

тұрақты кара құрдымдар контекстінде, егжей-тегжейлі зерттеуге ықпал етеді. Алынған нәтижелер кара құрдымдар термодинамикасы мен іргелі әсерлесулер арасындағы құрделі байланыстарды зерттеуге жаңа жодар ашады.

Түйін сөздер: *AdS* кара құрдымдар, сызықты емес электродинамика, термодинамикалық фазалық ауысулар, критикалық күй, көп өлшемді гравитация.

Е.М. Мырзакулов*, А.Б. Алтайбаева, А.С. Буланбаева, 2025.

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан.

E-mail: utmyrzakulov@gmail.com

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ AdS ЧЕРНЫХ ДЫР СВЯЗАННЫХ С НЕЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКОЙ

Мырзакулов Ерлан Муратбаевич – PhD, старший преподаватель, ассоциированный профессор (доцент) кафедры «Общая и теоретическая физика», ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, E-mail: utmyrzakulov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0160-0422>;

Алтайбаева Азиза Биболовна – PhD, и.о. доцента кафедры «Общая и теоретическая физика», ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, E-mail: aziza.ltaibayeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9254-7027>;

Буланбаева Арайлым Саяткызы – магистрант кафедры «Общая и теоретическая физика» ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, E-mail: arai_bul@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6541-3902>.

Аннотация. Представлено точное решение для d -мерной *AdS* черной дыры в присутствии нелинейной электродинамики, а также исследованы термодинамические свойства этой черной дыры. Нелинейная электродинамика приводит к изменениям термодинамических величин, что позволяет обобщить результаты путем введения космологической постоянной (Λ) в качестве термодинамической переменной ($P = -\Lambda/8\pi$). Получены критические значения давления, температуры и радиуса горизонта, а также проанализировано поведение глобального параметра $P_c v_c / T_c$. Обнаружен фазовый переход между малыми и большими черными дырами, напоминающий фазовый переход системы Ван-дер-Ваальса. Кроме того, исследовано влияние параметра отклонения k на структуру горизонта и термодинамическую устойчивость. Используя выведенное уравнение состояния, исследовано критическое поведение и выявлена характерная структура «петли» в свободной энергии Гиббса, что подтверждает фазовый переход между малыми и большими черными дырами. Энтропия черной дыры S_+ выведенная из первого закона термодинамики содержит поправки, обусловленные нелинейной электродинамикой, и сводится к закону площади Бекенштейна-Хокинга при $k=0$.

Было проанализировано соотношение давления и объема $P = \frac{3(k - r_+^2 - 2\pi r_+^3 T)}{4\pi(2r_+^2 - k)}$ для определения критических точек. Также проанализировано влияние многомерности и нелинейной электродинамики на поведение термодинамических параметров. Эти модификации приводят к значительным отличиям от классических

решений Шварцшильда-Тангерlinи. Полученные результаты предоставляют дополнительные сведения о термодинамических свойствах AdS черных дыр, связанных с нелинейной электродинамикой, и способствуют более детальному изучению фазовых переходов в теориях гравитации в многомерных пространствах, особенно в контексте регулярных черных дыр и их стабильности. Полученные результаты открывают новые перспективы для изучения сложной взаимосвязи между термодинамикой черных дыр и фундаментальными взаимодействиями.

Ключевые слова: AdS черные дыры, нелинейная электродинамика, термодинамические фазовые переходы, критическое поведение, многомерная гравитация.

Благодарности. Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP22682760).

Введение. Идея о черных дырах как термодинамических объектах была впервые сформулирована в работах Бекенштейна и Хокинга, которые ввели концепции энтропии и температуры для черных дыр (Bekenstein, 1972; Hawking, 1976). В дальнейшем, было установлено, что черные дыры могут проявлять фазовые переходы при рассмотрении космологической постоянной Λ в качестве термодинамической переменной ($P = -\Lambda/8\pi$). Это явление наблюдается не только для асимптотически AdS черных дыр, но также для асимптотически де Ситтера и плоских черных дыр.

Фазовая структура асимптотически плоских заряженных черных дыр была впервые исследована Бардином (Braden et al., 1990), что стало важным вкладом в изучение термодинамических свойств этих объектов. Вопрос о регулярных черных дырах возник в контексте модели Бардина, которая была основана на идеях Сахарова и Глинера (Sakharov, 1966; Gliner, 1966). Эти черные дыры обладают горизонтом событий, но в отличие от классических решений, они не содержат центральной сингулярности.

Решения такого рода становятся возможными благодаря взаимодействию гравитационного поля с нелинейными полями материи, что приводит к изменениям в структуре уравнений Эйнштейна. В стандартной теории общей относительности черные дыры имеют центральную сингулярность, где гравитационное поле становится бесконечно сильным, и вся масса сжата в одну точку. Однако, введение нелинейных полей материи изменяет пространство-время так, что сингулярность исчезает, а остается только горизонт событий.

Нелинейные поля в уравнениях, описывающих эти материи, смягчают эффекты сильной гравитации в центральной области, что позволяет избежать образования сингулярности. Вместо этого, поле материи действует как «стабилизатор», который сохраняет горизонт событий и предотвращает возникновение бесконечно плотных областей. В таких решениях объекты сохраняют основные физические свойства черных дыр без формирования сингулярности в центре.

Работы Айона-Беато и Гарсии (Ayón-Beato et al., 1999; Ayón-Beato et al., 2000)

продемонстрировали, что такие решения возможны, когда нелинейные эффекты материи, такие как модификации электромагнитных полей, приводят к появлению черных дыр, лишенных сингулярности.

С тех пор было предложено множество регулярных решений для черных дыр, включая обобщения для гравитации Эйнштейна-Гаусса-Бонне (Kumar et al., 2019), 4-мерной гравитации Эйнштейна-Гаусса-Бонне (Singh et al., 2020) и массивной гравитации (Singh et al., 2020). Также были разработаны вращающиеся аналоги таких решений с использованием алгоритма Ньюмана-Яниса (Ghosh et al., 2015), что расширяет возможности для изучения регулярных черных дыр в более сложных моделях гравитации (Ahmed et al., 2022; Upadhyay et al., 2022; Myrzakulov, 2023a; Myrzakulov, 2023b). Эти исследования демонстрируют, как введение различных модификаций теории гравитации, включая дополнительные параметры, может привести к появлению новых типов черных дыр, которые сохраняют свои физические свойства, не имея при этом центральной сингулярности.

В последних исследованиях взаимодействие между нелинейной электродинамикой и решениями черных дыр привлекло значительное внимание из-за своей роли в разрешении сингулярностей и изменении термодинамического поведения. Однако ключевой проблемой остается точное описание критических явлений и термодинамической стабильности в более высоких измерениях. Современные модели часто не дают исчерпывающих объяснений отклонениям, вызванным нелинейными поправками, особенно их влиянию на динамику фазовых переходов.

Нелинейная электродинамика вводит экспоненциальные поправки к метрике, что приводит к отличительным изменениям в энтропии черных дыр, температуре и динамике фазовых переходов. Эти эффекты особенно заметны в пространстве-времени AdS , где космологическая постоянная выполняет функцию давления, что позволяет создать более сложную термодинамическую фазовую структуру. В этом контексте влияние нелинейных эффектов на поведение черных дыр открывает новые горизонты для исследования термодинамики и структуры решений, а также для понимания того, как такие объекты могут вести себя в различных фазовых состояниях.

В данной работе изучаются регулярные асимптотически AdS черные дыры в многомерных пространствах, возникающие из гравитации, связанной с нелинейной электродинамикой. Эти решения переходят в черную дыру Шварцшильда-Тангерlinи в отсутствии нелинейных параметров. Также исследуется термодинамика этих черных дыр, подчеркивая изменения, вызванные нелинейными полями материи. Рассматриваются фазовые переходы черных дыр с космологической постоянной, рассматриваемой как термодинамическая переменная. В данной работе используется сигнатура метрики $(-, +, +, +)$ и единицы $8\pi G = c = 1$.

Материалы и основные методы. В данной работе рассматривается точное решение для d -мерной черной дыры с отрицательной космологической постоянной, связанной с нелинейной электродинамикой, и исследуются ее

термодинамические свойства. Исследование фокусируется на понимании термодинамического поведения черных дыр в многомерных пространствах с учетом влияния космологической постоянной как термодинамической переменной. Анализируются критические явления черной дыры, включая фазовые переходы, путем получения выражений для температуры, энтропии и свободной энергии Гиббса. Методы, использованные в данной работе, включают решение уравнений поля Эйнштейна, связанных с нелинейной электродинамикой в присутствии отрицательной космологической постоянной, с использованием численного подхода для решения нелинейного уравнения для метрической функции $f(r)$, описывающего поведение черной дыры в многомерном пространстве. Кроме того, применяется первый закон термодинамики для определения энтропии и анализа фазовой структуры черной дыры. Критические точки и фазовые переходы исследуются с помощью уравнения состояния и графиков свободной энергии Гиббса.

Решение для многомерной регулярной черной дыры. d -мерное действие Эйнштейна-Гильберта с отрицательной космологической постоянной, связанное с нелинейной электродинамикой (Balart, 2014), записывается как

$$S = \frac{1}{2} \int d^D x \sqrt{-g} [R - 2\Lambda] + \int d^D x \sqrt{-g} L(F), \quad (1)$$

где R – скаляр кривизны, Λ – космологическая постоянная, связанная с длиной AdS через $\Lambda = -(D-1)(D-2)/2l^2$, и $L(F)$ – лагранжиан плотности нелинейного поля материи, который является функцией тензора электромагнитного поля $F_{ab} = \partial_a A_b - \partial_b A_a$, где A_a – электромагнитный потенциал. Уравнение движения получим после вариации действия (1) по метрическому тензору g_{ab} (Upadhyay et al., 2022).

$$R_{ab} - \frac{1}{2} g_{ab} R = T_b^a \equiv \delta_b^a L - 4 \frac{\partial L}{\partial F} F_{ab}^{ab}. \quad (2)$$

Лагранжиан плотности $L(F)$ задается выражением:

$$L(F) = \frac{\beta \exp[-k(2F)^\gamma]}{q^{\frac{D-3}{D-2}}}, \quad \text{где} \quad k = \frac{q^2}{\mu}, \quad (3)$$

где

$$\beta = \frac{(D-2)(D-3)}{2}, \quad \text{и} \quad \frac{D-3}{2D-4}. \quad (4)$$

Вводим следующий анзац для поля Максвелла (Ahmed et al., 2022):

$$\begin{aligned} F_{ab} &= 2\delta_{[a}^{\theta_1}\delta_{b]}^{\theta_2}q(r)\sin\theta_1; & D &= 4, \\ F_{ab} &= 2\delta_{[a}^{\theta_{D-3}}\delta_{b]}^{\theta_{D-2}}\frac{q(r)}{r^{D-4}}\sin\theta_{D-3}\left[\prod_{j=1}^{D-4}\sin^2\theta_j\right]; & D &\geq 5. \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнение (5) подразумевает, что $dF = 0$, в результате чего получаем:

$$2\delta_{[a}^{\theta_{D-3}}\delta_{b]}^{\theta_{D-2}}\frac{q(r)}{r^{D-4}}\sin\theta_{D-3}\left[\prod_{j=1}^{D-4}\sin^2\theta_j\right]d\theta\wedge d\phi\wedge\dots\wedge d\psi_{(D-2)}. \quad (6)$$

Следовательно, тензор напряженности поля $F_{\theta\phi}$, F и $\mathsf{L}(F)$ принимают вид:

$$F_{\theta\phi} = \frac{q(r)}{r^{D-4}}\sin\theta_{D-3}\left[\prod_{j=1}^{D-4}\sin^2\theta_j\right], \quad F = \frac{q^2}{2r^{2(D-2)}} \quad (7)$$

$$\mathsf{L}(F) = \frac{(D-2)(D-3)q^2}{4r^{2(D-2)}}\exp\left[-\frac{k}{r^{D-3}}\right]. \quad (8)$$

Для получения статической сферически симметричной регулярной черной дыры в d -мерном пространстве для уравнения (1) рассматриваем следующую форму метрики:

$$ds^2 = -f(r)dt^2 + \frac{1}{f(r)}dr^2 + r^2d\Omega_{D-2}, \quad (9)$$

где $d\Omega_{D-2}$ – метрика $(D-2)$ -мерной сферы, а T_{ab} – тензор энергии-импульса нелинейного поля. Компонента (r, r) уравнения (2) имеет вид:

$$\frac{D-2}{2r^2}[r^2(f^2)' + (D-3)(f^2 - 1) - (D-1)\Lambda r^2] = \frac{(D-2)(D-3)q^2}{2r^{2(D-2)}}\exp\left[-\frac{k}{r^{D-3}}\right]. \quad (10)$$

Интегрируя это дифференциальное уравнение, получаем решение для черной дыры.

$$f(r) = 1 - \frac{M}{r^{D-3}}e^{k/r^{D-3}} + \frac{r^2}{l^2}, \quad (11)$$

где M – константа интегрирования, которая соответствует массе регулярной черной дыры. Уравнение (11) является точным решением для черной дыры, которая характеризуется массой (Λ), космологической постоянной (Λ) и параметром отклонения (k). При отсутствии параметра отклонения (k) решение сводится к решению AdS черной дыры Шварцшильда-Тангерлини, а для $r \gg k$ решение соответствует d -мерной AdS заряженной черной дыре

$$f(r) = 1 - \frac{M}{r^{D-3}} + \frac{Q^2}{r^{D-2}} + \frac{r^2}{l^2}. \quad (12)$$

Далее будем искать горизонт событий для 5-мерной регулярной черной дыры, который можно получить при $f(r)=0$, подставив $D=5$ в уравнение (11). Это нелинейное уравнение, решение которого невозможно найти в аналитической форме, поэтому строим график $f(r)$ при $D=5$, который представлен на Рис. 1.

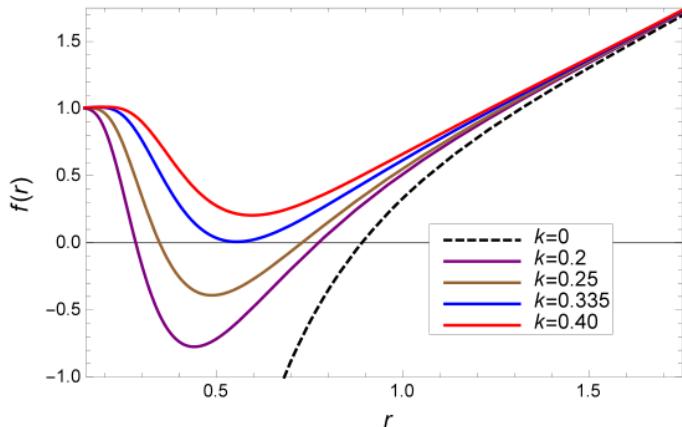


Рисунок - 1. График зависимости метрической функции $f(r)$ от радиуса r для различных значений параметра отклонения k при фиксированном значении массы $M=1$.

На рисунке показано, что черная дыра имеет два горизонта, что отличается от решения Шварцшильда. Это связано с наличием экспоненциального множителя e^{-kr} , который присутствует в уравнении (11) и модифицирует решение черной дыры. Размер горизонта черной дыры уменьшается с увеличением значения параметра отклонения k и совпадает с горизонтом черной дыры Шварцшильда-Тангерлини при $r \approx 1.65$.

Результаты и обсуждение. Термодинамика и фазовые переходы. В этой части работы, будем рассматривать термодинамические величины, связанные с решением для 5-мерной регулярной AdS черной дыры, как функции радиуса горизонта r_+ . Используя уравнение (11) при условии $f(r)=0$, можно определить массу черной дыры как

$$M_+ = r_+^2 e^{k/r_+^2} \left(1 + \frac{r_+^2}{l^2} \right). \quad (13)$$

Как заметно здесь, масса черной дыры совпадает с массой черной дыры Шварцшильда-Тангерлини при отсутствии параметра отклонения k . Температура черной дыры, известная как температура Хокинга, определяется следующим выражением:

$$T_+ = \frac{f'(r)}{4\pi} = \frac{1}{2\pi r_+} \left[1 + \frac{r_+^2}{l^2} - \frac{k}{r_+^2} \left(1 + \frac{r_+^2}{l^2} \right) \right]. \quad (14)$$

Температура 5-мерной регулярной AdS черной дыры модифицируется из-за параметра отклонения k . Температура принимает значение $T_+ = 1/2\pi r_+$ при отсутствии параметра отклонения k . На основе первого закона термодинамики можно вывести выражение для энтропии в следующем виде

$$dM_+ = T_+ dS_+ + P dV. \quad (15)$$

Можно получить следующее выражение для энтропии черной дыры для нашего случая

$$S_+ = \int \frac{1}{T_+} \frac{\partial M_+}{\partial r_+} dr_+ = \frac{4r_+^3}{3\pi} \left[\frac{2k + r_+^2}{r_+^2} e^{k/r_+^2} - \frac{8k\sqrt{\pi k}}{r_+^3} \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{k}}{r_+}\right) \right]. \quad (16)$$

Если положить $k=0$, то получим $S_+ = 4\pi r_+^3/3$, что соответствует энтропии 5-мерной черной дыры Шварцшильда-Тангерлини, причем энтропия удовлетворяет закону площади Бекенштейна-Хокинга.

Первый закон термодинамики включает себе давление и объем, если космологическую постоянную будем рассматривать как давление. Космологическая постоянная соответствует давлению, и оно выражается в следующем виде как:

$$P = -\frac{\Lambda}{8\pi} = \frac{(d-1)(d-2)}{16\pi l^2}, \quad (17)$$

и уравнение состояния $P = P(V, T)$ для 5-мерной регулярной черной дыры имеет соответствующий вид

$$P = \frac{3(k - r_+^2 - 2\pi r_+^3 T)}{4\pi(2r_+^2 - k)}, \quad (18)$$

и критические точки, полученные из условия

$$\frac{\partial P}{\partial r_+} = 0, \quad \frac{\partial^2 P}{\partial r_+^2} = 0. \quad (19)$$

приводят к следующим выражениям

$$r_c = \sqrt{\frac{6k + \sqrt{42}k}{2}}, \quad (20)$$

$$T_c = \frac{8\sqrt{2}}{\pi\sqrt{k}(6 + \sqrt{42})^{3/2}}, \quad (21)$$

$$P_c = \frac{36 - 3\sqrt{42}}{\pi k(288 + 44\sqrt{42})}. \quad (22)$$

Для проверки наличия фазового перехода построим график зависимости свободной энергии Гиббса G_+ от температуры T_+ .

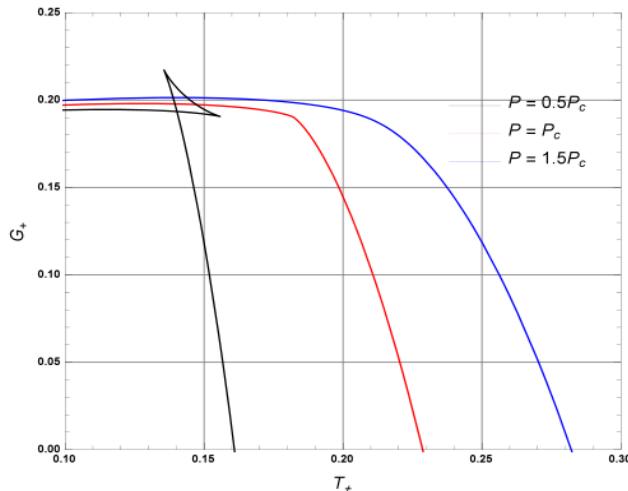


Рисунок - 2. График зависимости свободной энергии Гиббса G_+ от температуры T_+ при различных значениях параметра давления: $P < P_c$, $P = P_c$ и $P > P_c$ при фиксированном значении $k=0.20$, где $P_c = 0.459$, а соответствующая температура $T_c = 0.182$.

Появление характерной «петлевой» формы на диаграммах $G_+ - T_+$ указывает на критические значения, при которых происходит фазовый переход (Рис. 2).

В данном разделе представлены результаты исследования термодинамических свойств AdS черных дыр с многомерностью, взаимодействующих с нелинейной электродинамикой, а также обсуждение значимости полученных результатов в контексте существующей литературы.

Анализ показал, что наличие нелинейной электродинамики существенно изменяет поведение черной дыры. Были определены критические значения давления, температуры и радиуса горизонта, а также наблюдался фазовый переход между малыми и большими черными дырами, что аналогично фазовому переходу системы Ван-дер-Ваальса. Для различных значений параметра отклонения k было получено численное решение для метрики $f(r)$. Установлено, что при увеличении k горизонт черной дыры сокращается, и решение приближается к черной дыре Шварцшильда-Тангельни. Этот результат имеет важное значение для понимания влияния нелинейных полей материи на термодинамику AdS черных дыр с многомерностью.

Кроме того, температура, энтропия и свободная энергия Гиббса были рассчитаны с использованием первого закона термодинамики, включающего давление в качестве термодинамической переменной. Критические точки для фазового перехода черной дыры были определены путем анализа уравнения состояния и построения графика свободной энергии Гиббса. Характерная петля, наблюдалась на диаграмме свободной энергии Гиббса, подтверждает наличие фазового перехода и предоставляет информацию о стабильности черных дыр при различных термодинамических условиях.

Полученные результаты согласуются с предыдущими исследованиями черных дыр, взаимодействующих с нелинейными полями материи, особенно с работами Айона-Беато и Гарсии (Ayón-Beato et al., 2000; Ayón-Beato et al., 2005), которые первыми изучили регулярные решения черных дыр в контексте нелинейной электродинамики. Наши выводы дополнительно подтверждают влияние нелинейной электродинамики на решения для черных дыр, особенно при наличии отрицательной космологической постоянной. Наблюдаемый фазовый переход между малыми и большими черными дырами отражает поведение системы Вандер-Ваальса, что было широко изучено в других контекстах (Bekenstein, 1975). Характерная петля на графике свободной энергии Гиббса является известной особенностью фазовых переходов первого рода и наблюдается в других системах черных дыр, таких как Bardeen- *AdS* черные дыры (Braden, 1990; Bardeen, 1968).

Тем не менее, результаты выявили и важные аспекты, требующие дальнейшего изучения. Во-первых, необходимо более детально исследовать роль параметра отклонения k в модификации термодинамического поведения черных дыр, чтобы выявить его влияние на стабильность и критические явления в многомерных пространствах. Во-вторых, хотя основное внимание в данном исследовании удалено 5-мерным черным дырам, расширение анализа на черные дыры с многомерностью могло бы предоставить дополнительные сведения об универсальности наблюдаемого поведения.

Одним из потенциальных ограничений данного исследования является использование численных методов для решения нелинейных уравнений метрики черной дыры. Хотя этот подход дает ценные результаты, аналитические решения могут быть необходимы для углубленного понимания физических свойств и поведения черных дыр, особенно в рамках более общих моделей нелинейной электродинамики и многомерных пространств-времен.

Заключение. Настоящее исследование предоставляет детальный анализ термодинамических свойств *AdS* черных дыр с многомерностью, взаимодействующих с нелинейной электродинамикой, и вносит вклад в понимание фазовых переходов в таких системах. Установлено, что нелинейная электродинамика оказывает значительное влияние на критические параметры и фазовые переходы черных дыр, что подтверждается характерной петлей на графике свободной энергии Гиббса и аналогией с системой Ван-дер-Ваальса.

Дальнейшие исследования роли параметра отклонения k и других нелинейных полей материи могут привести к новым открытиям, особенно при рассмотрении

черных дыр с более высокой размерностью и различных граничных условий. Аналитические подходы также могут расширить понимание фундаментальных процессов, происходящих в таких системах, и позволяют изучить их термодинамические свойства более детально.

References

- Ahmed F., Singh D.V., Ghosh S.G. (2022) Five-dimensional rotating regular black holes and shadow. General Relativity and Gravitation, 54(2):21. DOI: 10.1007/s10714-022-02906-7 (in Eng.).
- Ayón-Beato E., García A. (1999) Non-singular charged black hole solution for non-linear source. General Relativity and Gravitation, 31(5):629-633. DOI: 10.1023/A:1026640911319 (in Eng.).
- Ayón-Beato E., García A. (2000) The Bardeen model as a nonlinear magnetic monopole. Physics Letters B, 493(1-2):149-152. DOI: 10.1016/S0370-2693(00)01125-4 (in Eng.).
- Ayón-Beato E., García A. (2005) Four-parametric regular black hole solution. General Relativity and Gravitation, 37(4):635-641. DOI: 10.1007/s10714-005-0050-y (in Eng.).
- Balart L., Vagenas E.C. (2014) Regular black holes with a nonlinear electrodynamics source, Physical Review D, 90:124045. DOI: 10.1103/PhysRevD.90.124045 (in Eng.).
- Bardeen J. (1968) Non-singular general-relativistic gravitational collapse, Proceedings of the 5th International Conference on Gravitation and the Theory of Relativity, Tiflis, U.S.S.R. P.174. (in Eng.).
- Bekenstein J.D. (1972) Black holes and the second law. Lettere al Nuovo Cimento, 4(15):737-740. DOI: 10.1007/BF02757029 (in Eng.).
- Bekenstein J.D. (1975) Statistical black-hole thermodynamics. Physical Review D, 12(10):3077-3085. DOI: 10.1103/PhysRevD.12.3077 (in Eng.).
- Braden H.W., Brown J.D., Whiting B.F., York J.W. (1990) Charged black hole in a grand canonical ensemble, Physical Review D, 42:3376-3383. DOI: 10.1103/PhysRevD.42.3376 (in Eng.).
- Ghosh S.G., Maharaj S.D. (2015) Generating the Bardeen metric by the Newman-Janis algorithm. The European Physical Journal C, 75(7):7. DOI: 10.1140/epjc/s10052-014-3222-7 (in Eng.).
- Gliner E.B. (1966) Algebraic properties of the energy-momentum tensor and vacuum-like states of matter. Soviet Physics Journal of Experimental and Theoretical Physics, 22(2):378-382. (in Eng.).
- Hawking S.W. (1976) Black holes and thermodynamics. Physical Review D, 13(2):191-197. DOI: 10.1103/PhysRevD.13.191 (in Eng.).
- Kumar A., Singh D.V., Ghosh S.G. (2019) D-dimensional Bardeen-AdS black holes in Einstein-Gauss-Bonnet theory. The European Physical Journal C, 79(3):275. DOI: 10.1140/epjc/s10052-019-6773-9 (in Eng.).
- Myrzakulov Y.M., Bulanbayeva A.S. (2023) A Regular black hole solutions and their thermodynamics, Reports of NAS RK, (2024), 2(350):84-94 DOI:<https://doi.org/10.32014/2024.2518-1483.280> (in Eng.).
- Myrzakulov Y., Myrzakulov K., Upadhyay S., Singh D.V. (2023) Quasinormal modes and phase structure of regular AdS Einstein-Gauss-Bonnet black holes. International Journal of Geometric Methods in Modern Physics, 20(07):2350121. DOI: 10.1142/S0219887823501219 (in Eng.).
- Paul P., Upadhyay S., Myrzakulov Y., Singh D.V., Myrzakulov K. (2023) More exact thermodynamics of nonlinear charged AdS black holes in 4D critical gravity. Nuclear Physics B, 993:116259. DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2023.116259 (in Eng.).
- Sakharov A.D. (1966) Initial stage of an expanding universe and appearance of a nonuniform distribution of matter. Soviet Physics Journal of Experimental and Theoretical Physics, 22:241-249 (in Eng.).
- Singh B.K., Singh R.P., Singh D.V. (2020) Extended phase space thermodynamics of Bardeen black hole in massive gravity. European Physical Journal Plus, 135(10):862. DOI: 10.1140/epjp/s13360-020-00880-0 (in Eng.).
- Singh D.V., Ghosh S.G., Maharaj S.D. (2020) Clouds of strings in 4D Einstein-Gauss-Bonnet black holes. Physics of the Dark Universe, 30:100730. DOI: 10.1016/j.dark.2020.100730 (in Eng.).
- Upadhyay S., Singh D.V. (2022) Black hole solution and thermal properties in 4D AdS Gauss-Bonnet massive gravity. The European Physical Journal Plus, 137(3):383. DOI: 10.1140/epjp/s13360-022-02569-y (in Eng.).

Sh.A. Myrzakulova, © A.A. Zhadyranova*, 2025.

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

E-mail: a.a.zhadyranova@gmail.com

INVESTIGATION OF F(G) GRAVITY USING NOETHER SYMMETRY

Myrzakulova Shamshyrak – doctoral student of the department of general and theoretical physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: shamyrzakulova@gmail.com Orcid: 0000-0002-0027-0970;

Zhadyranova Aliya – PhD, senior lecturer of the department of general and theoretical physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: a.a.zhadyranova@gmail.com. Orcid: 0000-0003-1153-3438.

Abstract. This article examines Noether symmetries in the FRW model of the universe in a modified Gauss-Bonnet model with a fermionic field. The gravitational effect for a fermionic field is studied. The Euler-Lagrange equation is used to describe a dynamical system. The expressions for the energy density, pressure, and equation of state parameter are considered in the most general form. Further, the expressions for the energy density, pressure, and equation of state parameter are simplified for the isotropic and homogeneous FRW cosmology. Using the method of separation of variables, symmetry generators and conserved quantities are determined. The accelerated expansion of the Universe through the scale factor has been studied, as well as a numerical analysis of cosmographic parameters such as the Hubble parameter, deceleration, click and jerk. Special attention is paid to the study of energy conditions, including weak and strong energy conditions, which are studied within the framework of various phases of the evolution of the universe. The reconstruction of a scalar field is investigated and its behavior is analyzed in the context of the gravity model f(G). The graphs show the dynamic behavior of pressure, energy density, and cosmographic parameters, confirming the transition from positive to negative values, which is associated with the accelerated expansion of the universe. The analysis demonstrates the agreement of the results with astrophysical observations, including data from Planck, cosmic microwave background radiation, and baryon acoustic oscillations. The results obtained emphasize the importance of Noether symmetries in creating models of extended gravity. They also show that the use of fermionic fields makes it possible to study the dynamics of the accelerated expansion of the universe in more detail. The proposed approach is considered as a universal tool for solving equations of motion, analyzing kinematics, and describing the accelerated expansion of the universe.

Keywords: Gauss-Bonnet invariant, dark energy, Noether symmetry, fermionic field, separation of variables, cosmographic parameters.

Ш.А. Мырзакулова, © А.А. Жадыранова*, 2025.

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан.

E-mail: a.a.zhadyanova@gmail.com

НЕТЕР СИММЕТРИЯСЫН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, F(G) ГРАВИТАЦИЯСЫН ЗЕРТТЕУ

Мырзакулова Шамшырак Аисатбаевна – Жалпы және теориялық физика кафедрасының докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, E-mail: shamyrzakulova@gmail.com, Orcid: 0000-0002-0027-0970;

Жадыранова Алия Амирбековна – PhD, Жалпы және теориялық физика кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, E-mail: a.a.zhadyanova@gmail.com. Orcid: 0000-0003-1153-3438.

Аннотация. Бұл мақалада фермиондық өрісі бар Гаусс-Бонне модельіндегі әлемнің Фридман-Робертсон-Уокер модельіндегі Нетердің симметриялары зерттеледі. Фермион өрісі үшін гравитациялық әрекет зерттелуде. Динамикалық жүйені сипаттау үшін Эйлер-Лагранж тендеуі қолданылады. Энергия тығыздығы, қысым және күй тендеуінің параметрі үшін өрнектер ең жалпы түрде қарастырылады. Әрі қарай, энергия тығыздығына, қысымға және күй тендеуінің параметріне арналған өрнектер Фридман-Робертсон-Уокердің изотропты және біртекті космологиясы үшін женелдетілген. Айнымалыларды бөлу әдісін қолдана отырып, симметрия генераторлары мен сақталған шамалар анықталады. Масштабты фактор арқылы ғаламның жеделдетілген кеңеоі зерттелді, сонымен қатар Хаббл, баяулау, шертпе және серпіліс параметрі сияқты космографиялық параметрлерге сандық талдау жасалды. Ғаламның эволюциясының әртүрлі фазаларында зерттелетін әлсіз және күшті энергия жағдайларын қоса алғанда, энергия шарттарын зерттеуге ерекше назар аударылады.

Скалярлық өрісті қайта күру зерттелді және оның f(G) гравитациясының моделі контекстіндегі әрекеті талданды. Графиктер қысымның, энергия тығыздығының және космографиялық параметрлердің динамикалық әрекетін көрсетеді, бұл он мәндерден теріс мәндерге ауысады растайды, бұл ғаламның жеделдетілген кеңеоімен байланысты. Жүргізілген талдау нәтижелердің астрофизикалық бақылаулармен, соның ішінде Planck деректерімен, реликті сәулеленуімен және бариондық акустикалық тербелістерімен сәйкестігін көрсетеді.

Нәтижелер Нетер симметрияларының кеңейтілген гравитациялық модельдерде маңызды екенін көрсетеді. Олар сондай-ақ фермиондық өрістерді пайдалану ғаламның жеделдетілген кеңео динамикасын егжей-тегжейлі зерттеуге мүмкіндік беретінін көрсетеді. Ұсынылған тәсіл қозғалыс тендеулерін шешудің, кинематиканы талдаудың және Ғаламның үdetілген кеңеоін сипаттаудың әмбебап құралы ретінде қарастырылады.

Түйін сөздер: Гаусс-Бонне инвариантты, күнгірт энергия, Нетер симметриясы, фермион өрісі, айнымалыларды бөлу, космографиялық параметрлер.

«Осы зерттеуді Казақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландаудырады грант № AP19674478 Мультиөрістік космологиялық моделдердегі галам эволюциясының динамикасына минималды және минималды емес байланыстың әсері»

Ш.А. Мырзакулова, ©А.А. Жадыранова*, 2025.

Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,

Астана, Казахстан.

E-mail: a.a.zhadyranova@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ F(G) ГРАВИТАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИММЕТРИИ НЁТЕР

Мырзакулова Шамишырак Ансатбаевна – докторант 3 курса кафедры общей и теоретической физики, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, E-mail: shamyrzakulova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0027-0970;

Жадыранова Алия Амирбековна – PhD, старший преподаватель кафедры общей и теоретической физики, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан. E-mail: a.a.zhadyranova@gmail.com. ORCID: 0000-0003-1153-3438.

Аннотация. В данной статье исследуются симметрии Нётер в модели Фридмана-Робертсона-Уокера Вселенной в модифицированной модели Гаусса-Бонне с фермионным полем. Изучается гравитационное действие для фермионного поля. Для описания динамической системы используется уравнение Эйлера-Лагранжа. Рассматриваются выражения для плотности энергии, давления и параметра уравнения состояния в наиболее общем виде. Далее выражения для плотности энергии, давления и параметра уравнения состояния упрощаются для изотропной и однородной космологии Фридмана-Робертсона-Уокера. С использованием метода разделения переменных определяются генераторы симметрий и сохраняемые величины. Исследовано ускоренное расширение Вселенной через масштабный фактор, а также выполнен численный анализ космографических параметров, таких как параметр Хаббла, замедления, щелчка и рывка. Особое внимание уделяется изучению энергетических условий, включая слабое и сильное энергетические условия, которые исследуются в рамках различных фаз эволюции Вселенной.

Исследована реконструкция скалярного поля, и проанализировано его поведение в контексте модели f(G) гравитации. Графики показывают динамическое поведение давления, плотности энергии и космографических параметров, подтверждающее переход от положительных значений к отрицательным, что ассоциируется с ускоренным расширением Вселенной. Проведённый анализ демонстрирует согласие результатов с астрофизическими наблюдениями, включая данные Planck, реликтового излучения и барионных акустических осцилляций.

Полученные результаты подчёркивают значимость симметрий Нёттер в создании моделей расширенной гравитации. Они также показывают, что использование фермионных полей позволяет исследовать динамику ускоренного расширения Вселенной более детально. Предложенный подход рассматривается как универсальный инструмент для решения уравнений движения, анализа кинематики и описания ускоренного расширения Вселенной.

Ключевые слова: Инвариант Гаусса-Бонне, темная энергия, симметрия Нёттер, фермионное поле, разделение переменных, космографические параметры.

Kіріспе. Космологиялық бақылаулар, мысалы, жоғары қызыл ығысу супержаналар, Ia типті супержаналар, реликті сәулемену, бариондық акустикалық тербелістер және Планктың ынтымақтастық деректері ғаламның үдемелі кеңеюін көрсетеді. Бұл құбылыстың себебі кейбір экзотикалық құнғіт энергияның болуымен қабылданады. Теріс қысым күшті энергия жағдайларының бұзылуын, сондай-ақ жалпы салыстырмалылықтың теориясын көрсетеді. Тиісінше, ЖСТ тендеулеріндегі модификацияларды геометриялық бөлікке немесе материалға енгізуге болады деп болжанады (Barvinsky, 2015).

Материалдық бөлігін динамикалық параметрлерді құнғіт энергия параметрлерімен ауыстыру арқылы өзгертуге болады, нәтижесінде құнғіт энергия модельдері пайда болады. Геометриялық бөлікті өзгерту геометриялық кеңейтілген гравитациялық модельдер деп аталатын қосымша мүшелерді қосу арқылы жүзеге асырылуы мүмкін. Симметрия динамикалық жүйелер үшін нақты шешімдерді табуда маңызды рөл атқарады. Атап айтқанда, лагранжиандык дифференциалдық тендеулермен байланысты нетер симметриясы сакталатын шамаларды табуга пайдалы тәсіл болып табылады (Capozziello, 2014). Сонымен қатар, бұл әдіс лагранжиандык болатын белгісіз функцияларды анықтау үшін де өте пайдалы. Бұғынгі таңда бұл тәсіл скалярлық-тензорлық ауырлық теориялары, телепараллельділігі бар құнғіт энергия модельдері, фермиондық өріс модельдері, F(R) және F(T) теориялары сияқты космологиялық модельдерде кеңінен зерттелген (Sharif, 2014).

Әдебиетте айтылған космологиялық зерттеулерге арналған нетер симметриясының екі түрі бар. Біріншісі-нетер симметриясының тәсілі, онда берілген Лагранжианның туындысы нөлге тең болады (Abbas, 2015). Екіншісі-калибрленген нетер симметриясы тәсілі, бұл бірінші тәсілді жалпылау, өйткені нетер симметриясының тендеуі калибрлеу мүшесін қамтиды. Нетер симметриясы тендеуіндегі калибрлеу мүшесін есепке алу нетер симметриясының жалпы анықтамасын береді. Бұл калибрленген Нетер симметриясы тәсілі деп аталады (Tsamparlis, 2010). Осылайша, қосымша симметрия генераторларын күтүге болады.

Ғаламның үдетілген кеңеюін түсіндірудің тағы бір тәсілі әсердің геометриялық бөлігін өзгерту арқылы жүзеге асырылады, нәтижесінде f(R) гравитациясы, Гаусс-Бонне гравитациясы, модификацияланған Гаусс-Бонне гравитациясы және басқа да өзгерілген теориялар пайда болады (Khan, 2022). Модификациялық Гаусс-Бонне

гравитациясы теориясы Г-дан Эйнштейн-Гильберттің әсеріне еркін функцияны қосу арқылы алғынады (Bahamonde, 2016). Бұл модификацияның мотивациясы төмен энергиялық тиімді шкала арқылы ішектер теориясынан келеді. Бұл теория Құн жүйесінің сыйнақтары, термодинамика, энергетикалық жағдайлар және басқа да құбылыстар тұрғысынан ақырғы уақытша ерекшеліктердің төрт түрінен аулақ, Әлемнің ғарыштық кеңеюі контекстінде талданды (Bamba, 2012). Бұл теория Құн жүйесінің, термодинамиканың, энергетикалық жағдайлардың және басқа құбылыстардың сыйнақтары тұрғысынан ақырғы уақыт сингулярлығының төрт түрінен аулақ бола отырып, ғаламның ғарыштық кеңеюі аясында талданды (Bajardi, 2020).

Фермион өрісін пайдаланатын модель солардың бірі болып табылады. Жиырма жылдан астам уақыт бойы фермион өрісі гравитациялық өріс болған кездегі ерекше мінез-құлқына байланысты космологияда кеңінен қолданылды (Elizalde, 2018). Бірқатар зерттеулер сзықты емес фермион өрісі тұрақты шешімдерді генерациялай алатындығын және сонымен қатар оның кейінгі кезеңдерінде Ғаламның үдемелі кеңеюін түсіндіре алатынын көрсетті. Дегенмен, бұл жұмыстардың көпшілігі фермион мен гравитациялық өрістердің минималды өзара әрекеттесуін қарастырды. Айта кету керек, құнгірт энергия үлгілерімен қатар көптеген авторлар Эйнштейн тендеулерінің модификацияларын өздері ұсынған. Олардың ішінде скаляр-тензорлық гравитациялық теориясын, минималды емес әрекеттесу теориясын, $F(R)$ теориясын, $F(R,T)$ теориясын бөліп көрсетуге болады, мұндағы T – энергия-импульстік тензордың ізі, $F(T)$ теориясы, мұнда T - бўралу, $F(G)$ теориясы және т.б. (Sharif, 2016).

Материалдар мен әдістер

Жұмыста Нетер симметрия және айнымалыларды бөлу әдістері қолданылды (Shamir, 2020).

Фермион өрісінің гравитациялық әсері мына формуламен анықталады (Bertini, 2022): $S = \int d^4x \sqrt{-g} \left(\frac{R}{2k^2} + Gf(u) + Y - V(u) \right)$ 12

$u = \psi\bar{\psi}$, $\psi = (\psi_0, \psi_1, \psi_2, \psi_3)^T$, — фермиондық функция, $\bar{\psi} = \psi^+ \gamma^0$ түйіндес функциясы. Гаусса-Бонне инвариантты: $G=24 \frac{\dot{a}^2 \ddot{a}}{a^3}$

Кинетикалық бөлігі келесі түрде жазылады:

$$Y=0.5i(\bar{\psi}\gamma^0\dot{\psi} - \bar{\psi}\gamma^0\dot{\psi}) \quad 34$$

Лагранжиан мына түрде жазылады (Aslam, 2013):

$$L = -3\dot{a}^2 a - 8\dot{a}^3 f_u \dot{u} + 0.5ia^3(\bar{\psi}\gamma^0\dot{\psi} - \bar{\psi}\gamma^0\dot{\psi}) - a^3V(u) \quad 56$$

Белгілі болғандай, динамикалық жүйе үшін Эйлер-Лагранж тендеуі келесі түрде анықталады:

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) = 0 \quad 78$$

$q_i = a, G, \psi, \bar{\psi}$ Лагранжианды Эйлер-Лагранж тендеуіне қойып, мынаны аламыз:

$3H^2 + 2\dot{H} = -p$	910
$3H^2 = \rho$	1112
$f(G) - f_G G + 0.5i(\bar{\psi}\gamma^0\dot{\psi} - \dot{\bar{\psi}}\gamma^0\psi) - V(u) + 8H^2f_{GGG}\dot{G}^2 + 8H^2f_{GG}\ddot{G} + 16H(\dot{H} + H^2)f_{GG}\dot{G} = p$	
$f_G G - 24f_{GG}\dot{G}H^3 - f(G) + V(u) = \rho$	1516
$\bar{\psi} - i\gamma^0V_u\bar{\psi} + \frac{3}{2}H\bar{\psi} = 0$	1718
$\dot{\psi} + iV_u\psi\gamma^0 + \frac{3}{2}H\psi = 0$	1920
$\omega = -1 + \frac{0.5i(\bar{\psi}\gamma^0\dot{\psi} - \dot{\bar{\psi}}\gamma^0\psi) + 8H^2f_{GGG}\dot{G}^2 + 8H^2f_{GG}\ddot{G} + 16H\dot{H}f_{GG}\dot{G} - 8f_{GG}\dot{G}H^3}{f_G G - f(G) + V(u) - 24f_{GG}\dot{G}H^3}$	2122

Нетер симметрия тәсілінің негізгі идеясы Лагранжианың Ли туындысы нөлге тең болатын симметрия генераторларының X класын табу болып табылады, яғни (Capozziello, 2012):

$$L_X = 0. \quad 2324$$

Жұмыстың мақсаты фермион өрісінің құрамдас бөліктері түрфысынан біздің модель үшін нетер симметрияларының қытимал жиынтығын $\psi = (\psi_0, \psi_1, \psi_2, \psi_3)^T$ және оның түйіндес $\psi = (\psi_0^\dagger, \psi_1^\dagger, -\psi_2^\dagger, -\psi_3^\dagger)$ өрісін іздеу. (12) тендеумен берілген Ноетер симметриясының болуы келесі түрдегі X векторлық өрістің болуын білдіреді: $3 \left(\gamma_j \frac{\partial}{\partial \psi_j} + \dot{\gamma}_j \frac{\partial}{\partial \dot{\psi}_j} + \eta_j \frac{\partial}{\partial \psi_j^\dagger} + \dot{\eta}_j \frac{\partial}{\partial \dot{\psi}_j^\dagger} \right), \quad 2526$

α, β, γ_i және η_i генераторлары $a, G, \psi_i, \psi_i^\dagger$ тәуелді, және олардың туындылары сәйкес тендеулерден анықталады

$$3 \left(\frac{\partial \eta_j}{\partial \psi_i} \dot{\psi}_i + \frac{\partial \eta_j}{\partial \psi_i^\dagger} \dot{\psi}_i^\dagger \right). \quad 2728$$

Мәндерді қоя отырып:

$$\alpha + 2 \frac{\partial \alpha}{\partial a} a = 0, \quad 2930$$

$$3\alpha\psi + \gamma a - a \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \bar{\psi}} \bar{\psi} - \frac{\partial \eta}{\partial \bar{\psi}} \psi \right) = 0, \quad 3132$$

$$3\alpha\bar{\psi} + \eta a + a \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \psi} \bar{\psi} - \frac{\partial \eta}{\partial \psi} \psi \right) = 0, \quad 3334$$

$$3 \frac{\partial \alpha}{\partial a} f_{GG} + \frac{\partial \beta}{\partial G} f_{GG} + \beta f_{GGG} = 0, \quad 3536$$

$$3\alpha a^2(f - f_G G - V) - a^3(\beta f_{GG} + \gamma V_u \bar{\psi} + \eta V_u \psi) = 0, \quad 3738$$

$\frac{\partial \gamma}{\partial a} \psi - \frac{\partial \beta}{\partial a} \bar{\psi} = 0,$	3940
$\frac{\partial \gamma}{\partial G} \bar{\psi} - \frac{\partial \eta}{\partial G} \psi = 0,$	4142
$-8 \frac{\partial \beta}{\partial \psi} f_{GG} = 0, \quad -8 \frac{\partial \beta}{\partial \bar{\psi}} f_{GG} = 0,$	4344
$-24 \frac{\partial \alpha}{\partial \psi} f_{GG} = 0, \quad -24 \frac{\partial \alpha}{\partial \bar{\psi}} f_{GG} = 0,$	4546
$-24 \frac{\partial \alpha}{\partial G} f_{GG} = 0,$	4748
$-8 \frac{\partial \beta}{\partial a} f_{GG} = 0,$	4950

$\alpha, \beta, \gamma, \eta, a(t), f(G), V(\Psi)$ белгісіз шамалар . (15)–(25) тендеулер жүйесін айнымалыларды бөлу арқылы шешеміз.

Айнымалыларды бөлу

(15)–(25) тендеулер жүйесін шеше отырып, мынаны аламыз:

$$\alpha = \alpha_0 a^{-\frac{1}{2}}, \quad 5152$$

$$\beta = -\left(\frac{3}{2} \frac{\alpha}{a} + \varepsilon \beta_0\right) \psi, \quad 5354$$

$$\gamma = -\left(\frac{3}{2} \frac{\alpha}{a} - \varepsilon \beta_0\right) \bar{\psi}, \quad 5556$$

(26)–(28) тендеулерін (19) тендеуге қоя отырып, $f(G)$ және $V(\Psi)$ шамаларын табамыз

$$f(u) = -\frac{2c_1}{\sqrt{u}} + c_2, \quad 5758$$

$$V(\Psi) = V_0 u. \quad 5960$$

Сәйкес сақталған мән келесідей көрсетіледі:

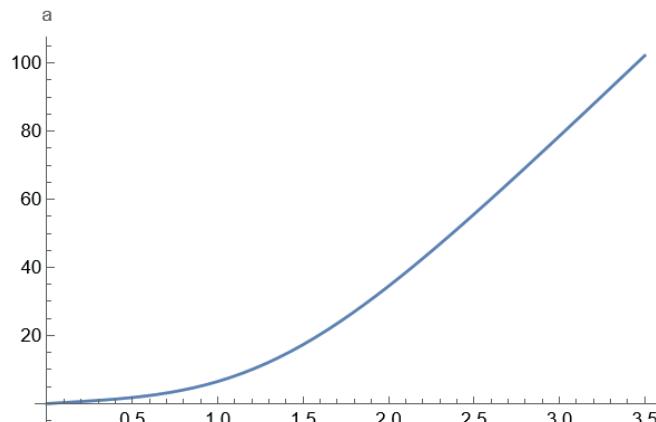
$$0 = \alpha \frac{\partial L}{\partial a} + \beta \frac{\partial L}{\partial G} + \gamma \frac{\partial L}{\partial \bar{\psi}} = \alpha_0 a^{-\frac{9}{2}} f_u c_0 + 24 \{ \dot{a}^3 \alpha_0 a^{-\frac{9}{2}} c_0 - \varepsilon \beta_0 i \gamma^0 c_0 \} = \text{const}; \quad 6162$$

$$-6 \dot{a} \alpha_0 a^{\frac{1}{2}} - 72 \{ \dot{a}$$

$$\bar{Q} = -6 \dot{a} \alpha_0 a^{\frac{1}{2}} - 72 \{ \dot{a}^2 \alpha_0 a^{-\frac{9}{2}} f_u c_0 + 24 \{ \dot{a}^3 \alpha_0 a^{-\frac{9}{2}} c_0 + \varepsilon \beta_0 i \gamma^0 c_0 \} = \text{const} \quad 6364$$

Нәтижелер

Қолданылған әдістер нәтижесінде қысым, энергия тығыздығы және космографиялық параметрлердің графиктері салынды.



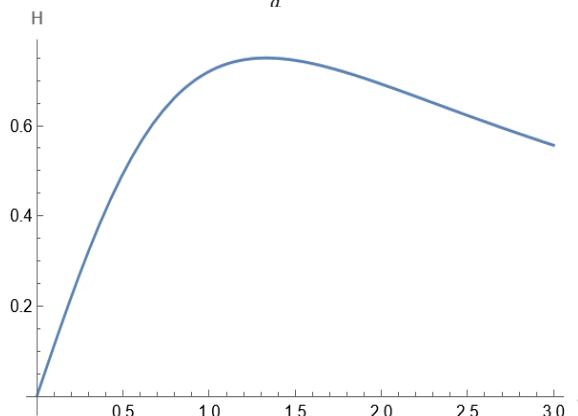
Сурет 1- Уақытқа тәуелді масштабты фактор.

Бұл теңдеуді келесі параметр мәндерін көрсете отырып, масштаб коэффициенті үшін сандық түрде шешеміз: $c=1, c_0=1, a_0=10^{-9}, a_1=10^{-5}, b_0=1, b_1=10^{-15}, \lambda=10^{-3}, k_1=10^{-15}$ бастапқы шарттар $a(0)=0.8, \dot{a}(0)=0.001, \ddot{a}(0)=0.9$. Масштабты факторының графикалық әрекеті сурет 1 көрсетілген, мұнда уақыт бойынша оң есу байқалады. Бұл Галамның үдемелі кеңеюін көрсетеді.

Біз әртүрлі космографиялық әдістерді және модель таңдау әдісін қысқаша таныстырамыз. Космография - кең ауқымды біртектілік пен изотропия болжамы бойынша Тейлор кеңеюі арқылы кинематикалық параметрлердің ақылды комбинациясы. Бұл шенберде Галамның эволюциясын кейбір космографиялық параметрлермен сипаттауга болады, мысалы, Хаббл параметрі H, баяулау параметрі q, серпіліс параметрі j, шертпе параметрі және лерк параметрі l. Олардың анықтамалары келесідей берілген:

Хаббл параметрі:

$$H = \frac{\dot{a}}{a} \quad 6566$$



Сурет 2- Уақытқа тәуелді Хаббл параметрі.

Сурет 2 Хаббл параметрінің уақытқа тәуелділігі көрсетілген. Мұнда біз уақыттың бастапқы сәтінде ($t \rightarrow 0$) Хаббл параметрінің өсітінін көреміз, бұл үдемелі кеңеу кезеңіне сәйкес келеді. Н максималды мәні кеңеу жылдамдығының шынын көрсетеді.

Баяулау параметрі:

$$q = -\frac{\dot{H}}{H^2} - 1; \quad 6768$$

Серпіліс параметрі:

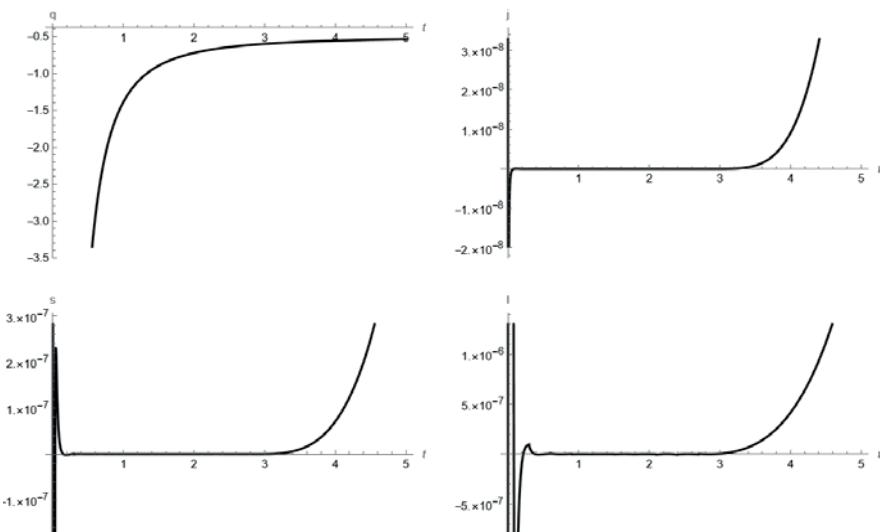
$$j = \frac{\ddot{H}}{H^3} - (3q + 2); \quad 6970$$

Шертпе параметрі:

$$s = \frac{\dddot{H}}{H^4} + 4j + 3q(q + 4) + 6; \quad 7172$$

Лерк параметрі:

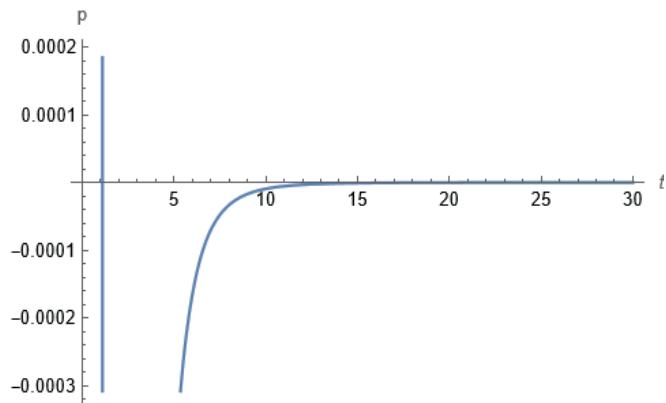
$$l = \frac{\ddot{H}}{H^5} + 5s - 10(q + 2)j - 30(q + 2)q - 24; \quad 7374$$



Сурет 3- Уақытқа тәуелді космографиялық параметрлер.

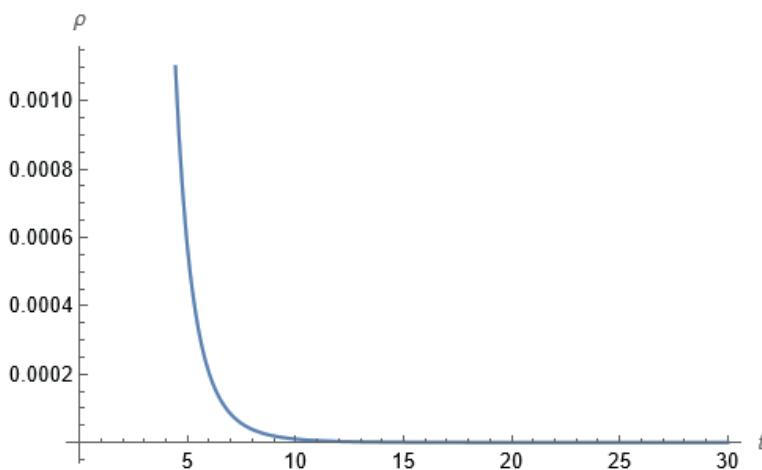
Сурет 3 Фаламның кеңеюінің кинематикалық қасиеттерін сипаттайтын т уақыт ішінде әртүрлі космографиялық параметрлердің эволюциясын көрсететін төрт график жиынтығы. Баяулау параметрі $q(t)$ Фаламның кеңеюінің үдеуін немесе баяулаудың сипаттайтын. Бастапқы кезеңдерінде ($t \approx 0$) q теріс мәнге ие, ол үдемелі кеңеюді көрсетеді. Уақыт өте келе, q жоғары мәнге ұмтылады, бірақ теріс болып қалады, бұл жалғасатын үдемелі кеңеюді көрсетеді. Серпіліс параметрі үдемелі кеңеюдің өзгеруін сипаттайтын. $j(t)$ төменгі теріс мәннен басталады, содан кейін оң мәндерге жақындаиды. Оның әрекеті басқа параметрлермен салыстырыланда аз болып қалады. Шертпе параметрі $j(t)$ серпіліс параметрінің туындысын сипаттайтын. График ерте кезеңдегі ауытқуларды көрсетеді ($t < 1$), содан кейін бірқалыпты өседі. Лерк параметрінің графикі бастапқы фазадағы күрт ауытқуларды көрсетеді ($t \approx 1$), содан кейін лерк тұрақтанады және соңғы кезеңде жоғарылай бастайды ($t > 3$). Параметрлердегі көрінетін өзгерістер ұлғаюдың әртүрлі фазаларымен байланысты.

булды мүмкін: бастапқы баяулаудан кеш үдетуге дейін. Параметрлердің әрекеті $f(G)$ гравитация сияқты кеңейтілген гравитация үлгілеріне немесе күнгірт энергия әсерін қамтитын үлгілерге сәйкес келеді.



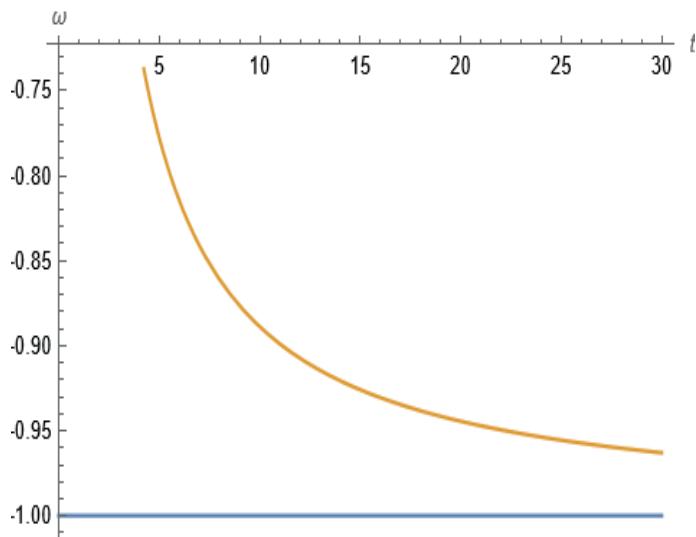
Сурет 4- Уақытқа тәуелді күнгірт энергия қысымы

Сурет 4 қысым теріс мәндерде тұрақтанады. Теріс қысым Ғаламның үдемелі кеңеюіне байланысты, бұл күнгірт энергияның үстемдігімен байланысты фазаларға тән. Қысымның он мәндерден теріс мәндерге ауысуы Ғаламның кеңеу динамикасының баяу кеңеюден үдемелі кеңеюге өзгеруін растайды.



Сурет 5- Уақытқа тәуелді күнгірт энергия тығыздығы

Сурет 5 уақыт өте келе энергия тығыздығының төмендеуінің жалпы тенденциясын көрсетеді, бұл Ғаламның кеңеюін, атап айтқанда $f(G)$ гравитация контекстінде ескерілетін үлгілерге сәйкес келеді. Бұл әрекет фазалық ауысуларды және әртүрлі компоненттердің Ғаламның эволюциясына әсерін зерттеу үшін маңызды.



Сурет 6- Уақытқа тәуелді күй теңдеуі параметрі.

Сурет 6 $\omega(t) = -1$ орташа мәні, ол коэффициенттің максималды мәні. $\omega(t)$ – энергиясы шамалардың кең диапазонында таралатын зат массасының динамикалық теңдеуі, сондыктан заттың энергетикалық тығыздығы соншалықты жоғары, ол жеткілікті түрде таралмайды.

Космологиялық шешімдер контекстінде модельдің физикалық қолданылуын зерттеу үшін әртүрлі энергетикалық шарттарды қарастыру маңызды. Бұл шарттарға мыналар жатады:

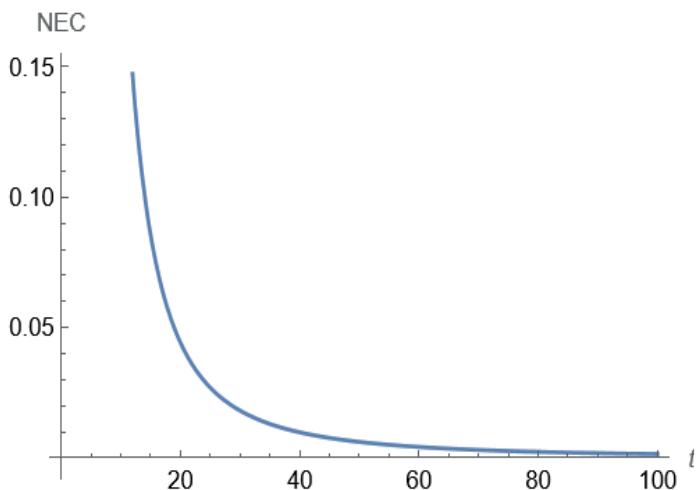
$$\text{NEC: } \rho + p \geq 0, \quad 7576$$

$$\text{WEC: } \rho + p \geq 0, \rho \geq 0, \quad 7778$$

$$\text{SEC: } \rho + p \geq 0, \rho + 3p \geq 0, \quad 7980$$

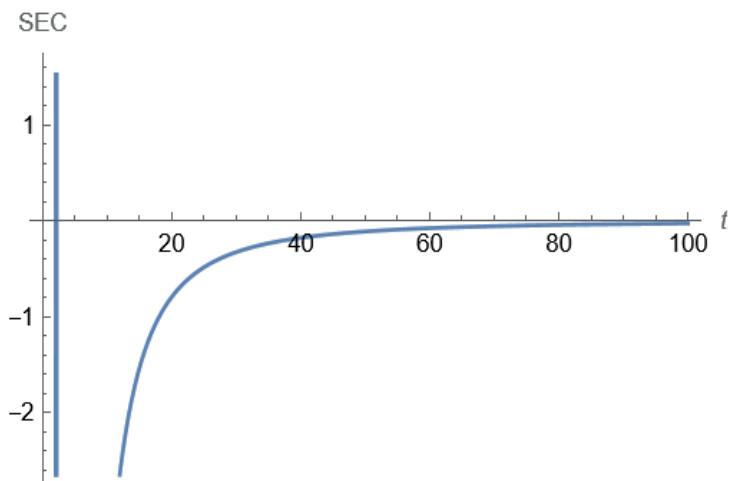
$$\text{DEC: } \rho \geq 0, -\rho \leq p \leq \rho. \quad 8182$$

Бұл жағдайлардың графикалық әрекеті . 7–9 суретте көрсетілген. Шарттардың әрқайсысы таңдалған модель үшін сандық шешімдер шеңберінде тексеріледі.



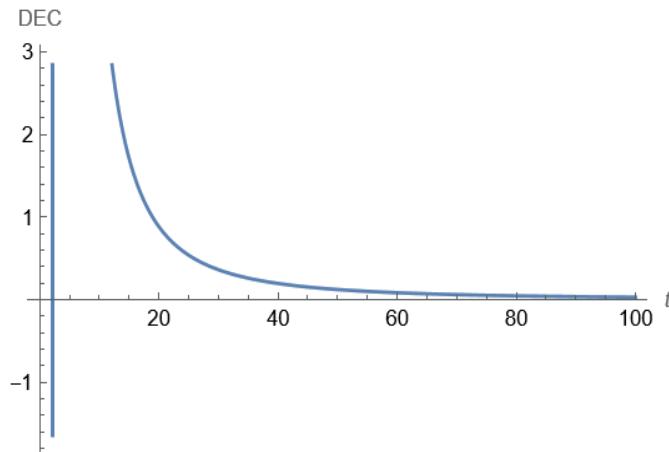
Сурет 7- Уақытқа тәуелді NEC шарты.

Сурет 7 зерттелетін үлгідегі NEC бұкіл кезең ішінде орындалуын растайды. Бұл модельдің физикалық тұрақтылығы үшін маңызды, ейткені NEC бұзылуы тұрақсыздыққа немесе ерекшеліктердің пайда болуына әкелуі мүмкін. Бұл әрекет кейіннен күнгірт энергияға аударытын стандартты материя үстемдік ететін космологиялық модельдерге, сондай-ақ $f(G)$ гравитация сияқты модификацияланған гравитация теорияларына сәйкес келеді.



Сурет 8- Уақытқа тәуелді SEC шарты.

Сурет 8 SEC толығымен бұзылған ($\rho+3p<0$) және теріс мәндерде тұрақтанады. Бұл күнгірт энергия негізгі рөл атқаратын Ғаламның үдемелі кеңею дәүіріне тән



Сурет 9- в Уақытқа тәуелді DEC шарты.

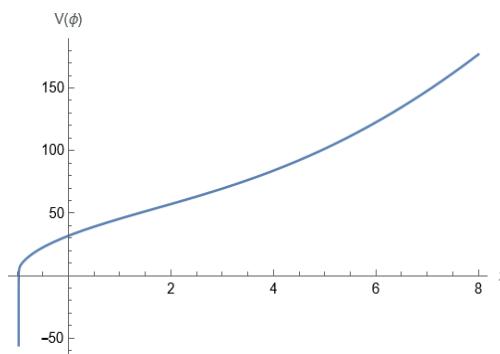
Кейінгі уақытта DEC ($\rho < |p|$) бұзылуы теріс қысым құрамдас бөлігінің басымдылығын көрсетеді, бұл Ғаламның үдемелі кеңею түсіндіретін модельдерге тән (мысалы, $f(G)$ гравитация контекстінде). Бұл мінез-құлық Ғаламның материя басым фазасынан кеңею динамикасы күнгірт энергиямен немесе оған тең құрамдас бөлікпен анықталатын фазага ауысуын раставиды.

Талқылау

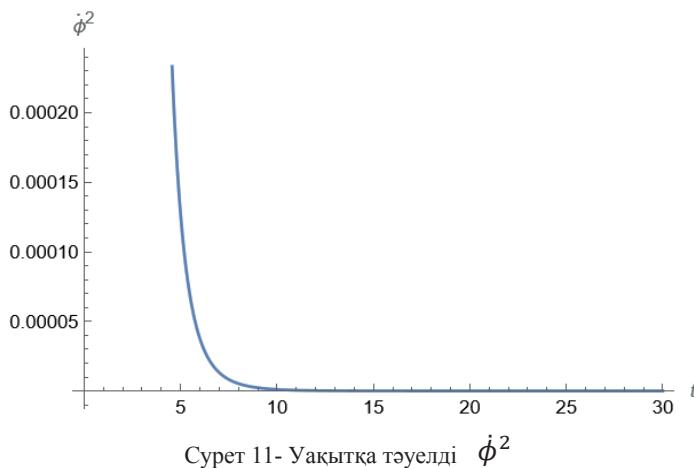
Скалярық өрісті қайта құру кеңейтілген гравитация модельдерінің физикалық қасиеттерін зерттеу үшін маңызды қадам болып табылады. Бұл жұмыста қолайлы параметрлерді таңдау және алынған шешімдерді таңдау арқылы қозғалыс тендеулерінен қайта құру жүзеге асырылады. Шамалар $\dot{\phi}^2$ мен потенциалдар $V(\phi)$ (эволюциясының графиктері тиісінше 10 және 11 суретте берілген).

$$p = \frac{\dot{\phi}^2}{2} - V(\phi), \quad 8384$$

$$\rho = \frac{\dot{\phi}^2}{2} + V(\phi). \quad 8586$$



Сурет 10- Уақытқа тәуелді $V(\phi)$.



Сурет 10 скалярлық потенциал жоғары мәннен жоғарылайды және уақыт өте келе бірте-бірте азаяды, бірақ оң профильде қалады. Сурет 11 скалярлық өрістің уақыт туындысының квадраты уақыт функциясы ретінде салынған. Уақыт кеңейген сайын скаляр өрістің уақыт туындысының квадраты азаяды. Скалярлық өрістің әрекеті модельге байланысты және Хаббл жылдамдығының әрекетінен көбірек ақпаратты алуға болады.

Қорытынды

Бұл жұмыста Ғаламның үдетілген кеңею құбылысын сипаттау үшін Нетер симметрия тәсілін қолдана отырып, өзгертілген Гаусс-Бонне $f(G)$ гравитациядағы қозғалыс теңдеулерінің шешімдері зерттелді. Фридман-Робертсон-Уокер моделі өзгертілген Гаусс-Бонне фермиондық өріс моделінде қолданылды. Динамикалық жүйе Эйлер-Лагранж теңдеуін қолдану арқылы сипатталған. Фермион өрісі үшін гравитациялық әсер қарастырылды. Энергия тығыздығы, қысым және күй теңдеуінің параметрі табылды. Айнымалыларды бөлу әдісін қолдана отырып, симметрия генераторлары табылды. Космографиялық параметрлер, күй теңдеуі, энергетикалық жағдайлар, бұзылуар теориясы және скаляр өрісінің қалпына келтірілуі зерттелді. Космографиялық параметрлерге сандық талдау жасалды: Хаббл параметрі, баяулау, шертпе және серпіліс. Ғалам эволюциясының әртурлі фазаларындағы энергетикалық жағдайлар зерттелді. Алынған мәндер астрофизикалық бақылау деректерімен жаксы үйлеседі. Скалярлық өрісті қалпына келтіру алынды және оның әрекеті $f(G)$ гравитациясында көрсетілген. Қысым, энергия тығыздығы және космографиялық параметрлердің графиктері салынған. Оң мәндерден теріс мәндерге ауысу Ғаламның үдемелі кеңеюін дәлелдейді. Нетер симметрияларының $f(G)$ гравитациясының модельдерін зерттеудегі маңыздылығы дәлелденді. Ғаламның үдетілген кеңею динамикасын зерттеу үшін фермиондық өрістерді зерттеу маңызды рол атқарытыны көрсетілген. Ұсынылған тәсілді болашақта ғаламның үдетілген кеңею динамикасын сипаттау үшін қарастыруға болады.

References

- Abbas G., Momeni D., Aamir Ali M., Myrzakulov R. & Qaisar S. (2015). Anisotropic compact stars in $f(G)$ gravity. *Astrophysics and Space Science*, 357, 1-11. DOI: 10.1007/s10509-015-2311-4 (in Eng.)
- Aslam A., Jamil M., Momeni D., & Myrzakulov R. (2013). Noether gauge symmetry of modified teleparallel gravity minimally coupled with a canonical scalar field. *Canadian Journal of Physics*, 91(1), 93-97. DOI: 10.1139/cjp-2012-0381 (in Eng.)
- Bahamonde S., & Böhmer C.G. (2016). Modified teleparallel theories of gravity: Gauss–Bonnet and trace extensions. *The European Physical Journal C*, 76, 1-12. DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4491-0 (in Eng.)
- Bajardi F., Dialektopoulos K.F., & Capozziello S. (2020). Higher dimensional static and spherically symmetric solutions in extended Gauss–Bonnet gravity. *Symmetry*, 12(3), 372. DOI: 10.3390/sym12030372 (in Eng.)
- Bamba K., Capozziello S., Nojiri S.I., & Odintsov S.D. (2012). Dark energy cosmology: the equivalent description via different theoretical models and cosmography tests. *Astrophysics and Space Science*, 342, 155-228. DOI: 10.1007/s10509-012-1181-8 (in Eng.)
- Barvinsky A. O. (2015). Aspects of nonlocality in quantum field theory, quantum gravity and cosmology. *Modern Physics Letters A*, 30(03n04), 1540003. 10.1142/S0217732315400039 (in Eng.)
- Bertini N.R., Bilić N., & Rodrigues D.C. (2022). Primordial perturbations and inflation in a holography inspired Gauss–Bonnet cosmology. *Physical Review D*, 105(2), 023509. DOI: 10.1103/PhysRevD.105.023509 (in Eng.)
- Capozziello S., De Laurentis M., & Odintsov S. D. (2012). Hamiltonian dynamics and Noether symmetries in extended gravity cosmology. *The European Physical Journal C*, 72, 1-21. DOI: 10.1140/epjc/s10052-012-2193-3 (in Eng.)
- Capozziello S., De Laurentis M., & Odintsov S.D. (2014). Noether symmetry approach in Gauss–Bonnet cosmology. *Modern Physics Letters A*, 29(30), 1450164. DOI: 10.1142/S0217732314501648 (in Eng.)
- Elizalde E., Odintsov S. D., Pozdeeva E.O., & Vernov S.Y. (2018). De Sitter and power-law solutions in non-local Gauss–Bonnet gravity. *International Journal of Geometric Methods in Modern Physics*, 15(11), 1850188. DOI: 10.1142/S0219887818501888 (in Eng.)
- Khan H.A., & Yogesh. (2022). Study of Goldstone inflation in the domain of Einstein-Gauss–Bonnet gravity. *Physical Review D*, 105(6), 063526. DOI: 10.1103/PhysRevD.105.063526 (in Eng.)
- Shamir M.F., & Naz T. (2020). Stellar structures in $f(G)$ gravity admitting Noether symmetries. *Physics Letters B*, 806, 135519. DOI: 10.1088/1475-7516/2020/03/033 (in Eng.)
- Sharif M., & Ismat Fatima H. (2016). Noether symmetries in $f(G)$ gravity. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 122, 104-112. DOI: 10.1134/S1063776116010119 (in Eng.)
- Sharif M., & Fatima H.I. (2014). Energy conditions for Bianchi type I universe in $f(G)$ gravity. *Astrophysics and Space Science*, 353, 259-265. DOI: 10.1007/s10509-014-1982-2 (in Eng.)
- Tsamparlis M., & Paliathanasis A. (2010). Lie and Noether symmetries of geodesic equations and collineations. *General Relativity and Gravitation*, 42, 2957-2980. DOI: 10.1007/s10714-010-1036-5 (in Eng.)

УДК 532.536
ГРНТИ 29.17.19

© D.A. Tolekov*, D.M. Zharylgapova, A.M. Mukhambetzhhan,
A.A. Almagambetova, U.A. Abitaeva, 2025.

Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan.

E-mail: doszhan_ta_93@mail.ru

ELECTRON-HOLE TRAPPING CENTERS IN ULTRA-VIOLET IRRADIATED $\text{Li}_2\text{SO}_4\text{-Mn}$ CRYSTALS

Tolekov Doszan Altaiuly – Master of Science, Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan, E-mail: doszhan_ta_93@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6528-3879>;

Zharylgapova Dina Muratovna – Ph.D., Associate Professor, Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan, E-mail: djm.06@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7962-9239>;

Mukhambetzhhan Aisulu Mukhambetzhhanovna – Ph.D., Associate Professor. Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan, E-mail: aisulu@korkyt.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0799-6229>;

Almagambetova Aigul Aldazharovna – Ph.D., Candidate of Pedagogical Sciences, Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan, E-mail almagambetova@korkyt.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8790-8948>;

Abitaeva Ulbosyn Abdykapparovna – Doctoral student. Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan, E-mail: ulbosyn_abitaeva@mail.ru, <https://orcid.org/000-0002-1398-9992>.

Abstract. In this work, the nature of electron-hole trapping centers in ultraviolet-irradiated ferroelectric $\text{Li}_2\text{SO}_4\text{-Mn}$ crystals is investigated. With the rapid development of solid-state laser technology pumped by laser diodes, sources of high-power coherent infrared radiation with a wavelength of about 1 μm have become compact and reliable. In recent years, lasers have actively begun to master the ultraviolet and vacuum ultraviolet spectral ranges, reducing the pulse duration down to a few femtoseconds. In this regard, there is a constant, unrelenting demand for cheap, powerful sources of coherent radiation operating in ferroelectric crystals irradiated with ultraviolet and far infrared ranges for a wide variety of applications. Using spectroscopic methods, the possibility of forming several types of impurity trapping centers in crystals with Mn^{2+} ion impurities is demonstrated. It is found that under the action of UV irradiation, electron and hole centers are captured in damaged areas of the crystal lattice near impurities, which leads to an increase in luminescence. Emission bands at wavelengths associated with the recombination of electrons and localized holes of SO_4^{2-} are experimentally recorded. The studies also confirmed the formation of trapping centers during thermoluminescence and optically stimulated luminescence caused by gamma and X-ray irradiation. The results showed that the addition of Mn^{2+} ions enhances the intrinsic luminescence of

crystals and changes their spectral characteristics. The experiments were conducted at different temperatures and irradiation conditions, which allowed a more in-depth study of the recombination processes in these materials. In conclusion, it is noted that the anisotropy of $\text{Li}_2\text{SO}_4\text{-Mn}$ crystals has a significant effect on the behavior of impurity capture centers and luminescence spectra.

Keywords: electron-hole trapping centers, luminescence spectroscopy, impurity, thermoluminescence, recombination luminescence, defect centers in crystals.

© Д.А. Төлеков*, Д.М. Жарылғапова, А.М. Мұхамбетжанова,
А.А. Алмагамбетова, Ұ.Ә. Әбітаева, 2025.

Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, Қазақстан.

E-mail: doszhan_ta_93@mail.ru

УЛЬТРА-КҮЛГІНМЕН СӘУЛЕЛЕНГЕН $\text{Li}_2\text{SO}_4\text{-Mn}$ -дегі ЭЛЕКТРОНДЫ- КЕМТІКТІ ҚАРМАУ ОРТАЛЫҚТАРЫ

Төлеков Досжан Алтайұлы – ғылым магистрі, оқытушы, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, Қазақстан, E-mail: doszhan_ta_93@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6528-3879>;

Жарылғапова Дина Мұратовна – п.ғ.к., қауымдастырылған профессор м.а., Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, Қазақстан, E-mail: djm.06@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7962-9239>;

Мұхамбетжанова Айсулу Мұхамбетжанқызы – ф.-м.ғ.к., қауымдастырылған профессор м.а., Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, Қазақстан, E-mail: aisulu@korkyt.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0799-6229>;

Алмагамбетова Айгүл Алдажарқызы – педагогика ғылымдарының кандидаты, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, Қазақстан, E-mail: almagambetova@korkyt.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8790-8948>;

Әбітаева Үлбосын Әбдіғаппарқызы – докторант, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, Қазақстан, E-mail: ulbosyn_abitaeva@mail.ru, <https://orcid.org/000-0002-1398-9992>.

Аннотация. Бұл жұмыста ультракүлгін сәулеленумен сәулеленетін ферроэлектрлік $\text{Li}_2\text{SO}_4\text{-Mn}$ кристалдарындағы электронды тесіктерді ұстая орталықтарының табиғаты зерттелген. Лазерлік диодтармен айдалатын қатты денелі лазерлік технологияның қарқынды дамуымен толқын ұзындығы шамамен 1 мкм болатын жоғары қуатты когерентті инфрақызыл сәулелену көздері жинақы және сенімді болды. Соңғы жылдары лазерлер ультракүлгін және вакуумдық ультракүлгін спектрлік диапазондарды белсенді түрде менгере бастады, импульс ұзақтығын бірнеше фемтосекундқа дейін қыскартты. Осыған байланысты ультракүлгін сәулемен сәулеленетін ферроэлектрлік кристалдарда жұмыс істейтін арзан, қуатты когерентті сәулелену көздеріне тұрақты, тынымсыз сұраныс бар. Спектроскопиялық әдістерді қолдану арқылы Mn^{2+} ионды қоспалары бар кристалдарда қоспаларды ұстая орталықтарының бірнеше түрін құру мүмкіндігі көрсетілді. Ультракүлгін сәулеленудің әсерінен кристалдық тордың зақымдалған участкерінде қоспалардың жанында электрондар мен тесіктердің орталықтары

ұсталатыны анықталды, бұл люминесценцияның жоғарылауына әкеледі. Электрондардың рекомбинациясымен және локализацияланған SO_4^- тесіктерімен байланысты толқын ұзындықтарында эмиссия жолақтары эксперименталды түрде анықталды. Зерттеулер сонымен катар термолюминесценция және гамма және рентгендік сәулеленуден туындаған оптикалық ынталандырылған люминесценция кезінде ұстаса орталықтарының пайда болуын растиады. Нәтижелер Mn^{2+} иондарын қосу кристалдардың ішкі люминесценциясын күштейтетінін және олардың спектрлік сипаттамаларын өзгертетінін көрсетті. Тәжірибелер әртүрлі температурада және сәулелену жағдайында жүргізді, бұл осы материалдардағы рекомбинация процестерін тереңірек зерттеуге мүмкіндік берді. Қорытындылай келе, $\text{Li}_2\text{SO}_4\text{-Mn}$ кристалдарының анизотропиясы қоспаларды ұстаса орталықтары мен люминесценция спектрлерінің әрекетіне айтарлықтай әсер ететіні атап өтілді.

Түйін сөздер: электронды-кемтік қармау орталықтары, люминесценция спектроскопиясы, қоспа, термолюминесценция, рекомбинациялық люминесценция, кристалдардағы ақау орталықтары.

©Д.А. Толеков*, Д.М. Жарылгапова, А.М. Мухамбетжанова,
А.А. Алмагамбетова, У.А. Абитаева, 2025.

Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан.

E-mail: doszhan_ta_93@mail.ru

ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ ЦЕНТРЫ ЗАХВАТА В ОБЛУЧЕННОМ УЛЬТРА-ФИОЛЕТОМ КРИСТАЛАХ $\text{Li}_2\text{SO}_4\text{-Mn}$

Толеков Досжан Алтайұлы – магистр наук, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан, E-mail: doszhan_ta_93@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6528-3879>;

Жарылгапова Дина Муратовна – к.п.н., и.о. ассоциированного профессора, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан, E-mail: djm.06@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7962-9239>;

Мухамбетжанова Айсулу Мухамбетжанкызы – к.ф.-м.н., и.о. ассоциированного профессора, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан, E-mail: aisulu@korkyt.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0799-6229>;

Алмагамбетова Айгул Алдажаровна – к.п.н., Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан, E-mail: almagambetova@korkyt.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8790-8948>;

Абитаева Улбосын Абдигаппаркызы – докторант, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан, E-mail: ulbosyn_abitaeva@mail.ru, <https://orcid.org/000-0002-1398-9992>.

Аннотация. В данной работе исследована природа электронно-дырочных центров захвата в сегнетоэлектрических кристаллах $\text{Li}_2\text{SO}_4\text{-Mn}$, облучённых ультрафиолетом. По мере быстрого развития технологии твердотельных лазеров с накачкой лазерными диодами, источники мощного когерентного инфракрасного излучения с длиной волны около 1 мкм стали компактными и надежными. В последние годы лазеры активно начинают осваивать ультрафиолетовый и вакуумный ультрафиолетовый диапазоны спектра при сокращении длительности импульсов вплоть до единиц фемтосекунд. В связи с этим имеет место постоянный

неослабевающий спрос на дешевые мощные источники когерентного излучения, работающие в егнетоэлектрических кристаллах, облучённых ультрафиолетом и дальних диапазонах инфракрасного спектра, для самых разнообразных применений. Используя спектроскопические методы, была продемонстрирована возможность формирования нескольких типов примесных центров захвата в кристаллах с примесями ионов Mn^{2+} . Обнаружено, что под действием УФ-облучения электронные и дырочные центры захватываются в нарушенных участках кристаллической решётки вблизи примесей, что приводит к усилению люминесценции. Экспериментально зафиксированы полосы излучения на длинах волн, связанных с рекомбинацией электронов и локализованных дырок SO_4^{2-} . Исследования также подтвердили формирование центров захвата при термolumинесценции и оптически стимулированной люминесценции, вызванных гамма- и рентгеновским облучением. Результаты показали, что добавление ионов Mn^{2+} усиливает собственную люминесценцию кристаллов и изменяет их спектральные характеристики. Эксперименты проводились при различных температурах и условиях облучения, что позволило более глубоко изучить процессы рекомбинации в этих материалах. В заключении отмечается, что анизотропия кристаллов $Li_2SO_4\text{-Mn}$ оказывает значительное влияние на поведение примесных центров захвата и спектры люминесценции.

Ключевые слова: электронно-дырочные центры захвата, спектроскопия люминесценции, примесь, термolumинесценция, рекомбинационная люминесценция, дефектные центры в кристаллах.

Введение. Кристаллы активированные примесями имеют анизотропические оптические свойства и являются сегнетоэлектриками с несколькими фазовыми переходами. Исследованиями авторов (Нурахметов, 2001) показана, что в облученном кристалле , при возбуждении в фундаментальной спектральной области $>5,5$ эВ появляются полосы излучения при 3,65-3,75 эВ связанные рекомбинацией электронов с локализованным дырками . Введение примесей , являющихся акцептором для электрона в сульфатах, усиливает интенсивность собственной люминесценции. Экспериментальный результат доказывает, что излучения при 3,65-3,75 эВ связана с рекомбинацией электронов не локализованной дыркой.

В сульфатах щелочных и щелочноземельных металлов, активированных ионами были исследованы термolumинесценция оптически стимулированной люминесценции и фосфоросценция означающие образование примесных электронно-дырочных центров захвата в облученных рентгеновскими, гамма и ультрафиолетовыми лучами (Suchinder, 2015).

Считаются, что во многих случаях в сульфатах собственные электронные возбуждение передает энергию примесным излучателем. Природы собственного излучения и формирования электронно-дырочных центров захвата в кристалле полностью не изучена. В наших предыдущих работах (Salikhodzha et. al, 2019; Nurakhmetov et. al, 2019) для кристалла и были показаны, что собственные

излучения возникают при рекомбинации электронов из зоны проводимости с неэквивалентно расположеными локализованными дырками . На основе измерения энергии создания или возбуждение собственного излучения при 3,7-3,8 эВ для этих кристаллов оцененные ширины запрещенной зоны составляло около 5 эВ.

В работе авторов (Shaila, 2017) в облученном обнаружены пики термостимулированной люминесценции при 485 К, 504 К, 526 К по величине светосуммы превышающей светосумму TSL в коммерческом TLD дозиметрах . В облученном обнаружены пики ТСЛ при 420 К, 498 К и 608 К. В облученном γ – лучами с наведенными дефектами методом фото стимуляции обнаружен пик ТСЛ при 383 К (Mostafa, 2011; Ashirbayev, 2023).

В следующих работах (Blasse, 1994; Waynant, 2000; Waynant, 1999; Lee, 1997; Ohno, 2001; Freedman, 1978) авторы объясняет основные принципы люминесцентных материалов и указывают, что люминесценция в сульфатах щелочных металлов усиливается при добавлении примесей, таких как Mn^{2+} , что напрямую связано с результатами, полученными в исследовании $Li_2SO_4\text{-Mn}$.

Термолюминесценция твёрдых тел стал классикой и широко используется для объяснения процессов захвата и рекомбинации в кристаллах сульфатов также обсуждаются кинетические аспекты рекомбинации электронов и дырок в примесных центрах захвата, что актуально для изучения люминесценции в кристаллах Li_2SO_4 . В работах (Kauppinen, 1985; Khomenko, 2002; McKeever, 1985; Mulligan, 1976), изучали дозиметрию с помощью термолюминесцентных материалов, таких как сульфаты, что помогает лучше понять механизмы люминесценции и формирования центров захвата при облучении.

Объекты и методы исследования. Кристаллы выращены из насыщенного водного раствора методом медленного испарения при температуре 40°C. Из кристалла вырезались пластинки толщиной 3-5 мм и диаметром 10-15 мм. Нами исследованы образцы кристалла и порошков с чистотой 99,99%. Спектр возбуждения корректируется на спектральное распределение интенсивности возбуждающего излучения. Для измерения спектров излучения в спектральной области 1,5÷6,2 эВ использовался спектрофлуориметр Solar CM 2203.

Эта установка дает возможность проведения экспериментальных исследований по измерению спектров фотoluminesценции, спектров возбуждения и спектров поглощения, твердотельных образцов и растворов при 80-300 К температуре. Спектральный диапазон в режиме спектрометра от 200 до 820 нм, а в режиме спектрофотометра 200-1100 нм.

Результаты эксперимента и их обсуждения. На рисунке 1 представлен спектр излучения кристалла при возбуждении фотонами с энергией 6,2 эВ при 300 К. Из рисунка 1 (кривая 1) видно, что появляются полосы излучения при 2,1 эВ, 2,3 эВ, 2,4 эВ, 3,0 эВ, 3,2 эВ и 3,7 эВ и. Аналогичные излучения возникают при возбуждении фотона с энергией 5,9 эВ (кривая 2) и 5,6 эВ (кривая 3) при 300 К.

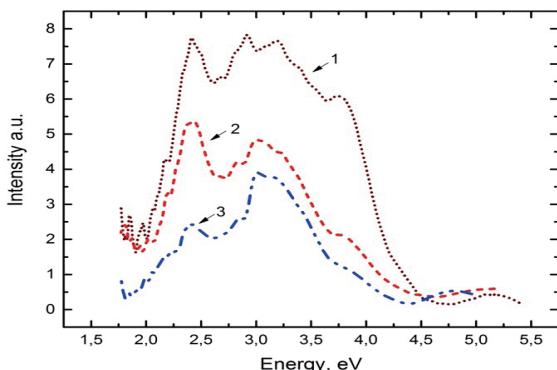


Рисунок 1. Спектр излучения кристалла при возбуждении фотонами с энергией 6,2 эВ (кривая 1), 5,9 эВ (кривая 2) и 5,6 эВ (кривая 3) при 300 К

На рисунке 2 представлен спектр возбуждения основной полосы излучения при 2,1 эВ, 2,3 эВ, 2,4 эВ и 3,0 эВ связанные примесями . Из рисунка видно, что полоса излучения 2,4 эВ возбуждаются при энергиях фотона 2,7 эВ, 3,6 эВ, 4,1 эВ и 5,0 эВ. При возбуждении кристаллов в фундаментальной области при 5,0 эВ и выше 6 эВ создаются электронно-дырочные пары, которые в ходе релаксации захватываются дефектами решетки и формируют электронно-дырочные центры захвата. Полоса возбуждение при 3,6 эВ авторы (Shaila, 2017: 37) связывают внутрицентровыми переходами в ионе . Остальная полоса возбуждение при 2,7 эВ связана примесными и собственными электронно-дырочными центрами захвата локализованного возле примеся .

Можно предположить, что аналогичные рекомбинационные излучения на примесных центрах захвата , формируются в кристалле . Возможно рекомбинационное излучение при 2,93 эВ соответствует распаду примесного центра захвата, а полоса 3,1 эВ соответствует распаду собственного центра захвата . Полоса возбуждения при 2,4 эВ как в кристалле соответствует центрам захвата в нарушенных местах анизотропного кристалла .

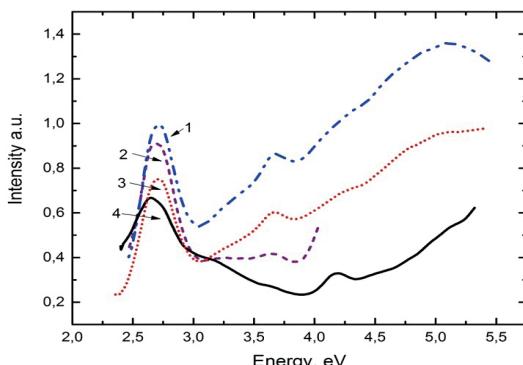


Рисунок 2. Спектр возбуждения для полосы излучения 2,1 эВ (кривая 1), 2,3 эВ (кривая 2), 2,4 эВ (кривая 3) и 3,0 эВ кристалла при 300 К

На рисунке 3 представлен спектр излучения кристалла с наведенными электронно-дырочными центрами захвата при возбуждении в полосе распада примесных центров захвата при 2,7 эВ, 3,0 эВ. Появление излучения 2,1 эВ при возбуждении фотонами с энергией 2,7-3,0 эВ должна быть связана внутрицентровым возбуждением иона .

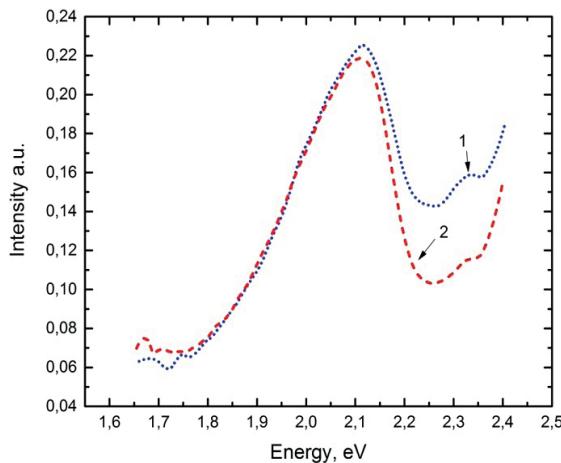


Рисунок 3. Спектр излучения кристалла с наведенными электронно-дырочным центром и центров захвата при возбуждении фотонами с энергией 2,7 эВ (кривая 1), 3,0 эВ (кривая 2)

Таким образом, при рекомбинационном распаде полос излучений 2,7 эВ, 3,0 эВ энергия передается примесям и мы наблюдаем излучения возле дефектов решетки. Разные энергетические расстояния в примесных электронно-дырочных центрах захвата должна быть связана разными кристаллографическими направлениями дырочных групп анизотропном кристалле

Заключение. В ходе данного исследования была проведена детальная характеристика электронно-дырочных центров захвата в ферроэлектрических кристаллах $\text{Li}_2\text{SO}_4\text{-Mn}$, облученных ультрафиолетовым излучением. Экспериментально установлено, что при воздействии УФ-излучения вблизи примесных ионов Mn^{2+} формируются устойчивые дефектные центры, что сопровождается усилением люминесценции. Анализ спектральных характеристик продемонстрировал наличие эмиссионных полос, связанных с рекомбинацией электронов и локализованных дырок SO_4^{4-} , а также подтвердил влияние анизотропии кристаллической решетки на процессы захвата и релаксации носителей заряда. Включение Mn^{2+} в состав кристаллов не только увеличивает интенсивность их собственной люминесценции, но и изменяет спектральные характеристики, что открывает возможности для целенаправленной модификации их оптических свойств. Результаты данного исследования подтверждают перспективность использования $\text{Li}_2\text{SO}_4\text{-Mn}$ в качестве чувствительных материалов для регистрации ионизирующего излучения и дальнейшего изучения процессов рекомбинации в сложных кристаллических системах. Дальнейшие исследования будут направлены

на уточнение механизмов формирования центров захвата, а также на изучение влияния различных внешних факторов, таких как температура, интенсивность излучения и концентрация примесей, на люминесцентные свойства этих материалов.

Литература

Nurakhmetov T.H. (2001) Электронные возбуждения и радиационные дефекты в гранецентрированных ЩГК и сульфатах щелочных и щелочноземельных металло. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – Алматы.–287 с.

Sharma S.K., Thomas J., Pandian M.S., Rao P.S., Gartia R.K., & Singhvi A.K. (2015). Exploring stable thermoluminescence signal in natural Barite (BaSO_4) for retrospective dosimetry. *Applied Radiation and Isotopes*, 105, P.198-203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.08.035>

Bahl S., Kumar V., Bihari R.R., & Kumar P. (2017) Investigations of OSL properties of CaSO_4 : Mn phosphor exposed to gamma and beta radiations. *Journal of Luminescence*, 181, P.36-43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2016.09.004>

Zahedifar M., Mehrabi M., & Harooni S. (2011). Synthesis of CaSO_4 : Mn nanosheets with high thermoluminescence sensitivity. *Applied radiation and isotopes*, 69(7), P.1002-1006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.01.036>

Ashirbayev N.K., & Sherniyazova E.K. (2023) Methodological recommendations for conducting laboratory work in physics on the online platform “Daryn”. Bilim land. Topical issues of teaching mathematics, physics and information science, 4(4), P.50-57. DOI: <https://doi.org/10.52081/mpimet.2023.v04.i4.027>

Blasse G., Grabmaier B.C., Blasse G., & Grabmaier B.C. (1994) A general introduction to luminescent materials. Springer Berlin Heidelberg. P. 1-9.

Waynant R.W. (2000) Electro-optics handbook. McGraw-Hill.

Heller M., Robinson J. (1999) Spectroscopic Analysis of Luminescent Centers in Solid State Physics. Academic Press.

Lee K. (1997) Luminescence Mechanisms in Solid-State Materials. Materials Science Reports.

Ohno T., Kamiyama S. (2001) Electron-Hole Capture in Defect States of Doped Crystals. *Physica Status Solidi (b)*.

Freedman H.S., Novikov A. (1978) Photoluminescence in Transition Metal Doped Sulfates. *Radiation Effects and Defects in Solids*.

Kauppinen J. (1985) Optically Stimulated Luminescence in Sulfate Crystals. *Journal of Physics D: Applied Physics*. Khomenko M., Dzhagan V. (2002) Optical and Electron Properties of Sulfate-Based Materials. *Radiation Measurements*.

McKeever S.W.S., Townsend P.D. (1985) Thermoluminescence of Solids. Cambridge University Press.

Mulligan J.C. (1976) Kinetics of Electron-Hole Recombination in Sulfates. *Physical Review*.

Perera D., Bradley D.A. (1994) Radiation Dosimetry Using Thermoluminescence Techniques. *Radiation Protection Dosimetry*.

Salikhodzha Z.M., Nurakhmetov T.N., Akilbekov A.T., Zhunusbekov A.M., Kainarbay A.Z., Sadykova B.M., ... & Zhanglysov K.B. (2019) Recombination luminescence in CaSO_4 . *Radiation Measurements*, 125, P.19-24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2019.04.010>

Nurakhmetov T.N., Salikhodzha Z.M., Bakhtizin R.Z., Zhunusbekov A.M., Kainarbay A.Z., Daurenbekov D.H., ... & Yussupbekova, B.N. (2019) The creation spectra of intrinsic emission of a LiKSO_4 crystal irradiated by ultraviolet photons. *Optik*, 185, P.156-160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jleo.2019.03.082>

References

Nurakhmetov T.N. (2001) Elektronnye vozbuždeniya i radiacionnye defekty v granečentrirovannyh SHCHGK i sul'fatax shchelochnyh i shchelochnozemel'nyh metallov [Electronic excitations and radiation defects in face-centered alkali hydroxide and sulfates of alkali alkaline earth metals]. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – Almaty. – 287 p. (in Russian)

Sharma S.K., Thomas J., Pandian M.S., Rao P.S., Gartia R.K., & Singhvi A.K. (2015). Exploring stable thermoluminescence signal in natural Barite (BaSO_4) for retrospective dosimetry. *Applied Radiation and Isotopes*, 105, P.198-203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.08.035> (in English)

Bahl S., Kumar V., Bihari R.R., & Kumar P. (2017) Investigations of OSL properties of CaSO_4 : Mn phosphor exposed to gamma and beta radiations. *Journal of Luminescence*, 181, P.36-43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2016.09.004> (in English)

Zahedifar M., Mehrabi M., & Harooni S. (2011). Synthesis of CaSO_4 : Mn nanosheets with high thermoluminescence sensitivity. *Applied radiation and isotopes*, 69(7), P.1002-1006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.01.036> (in English)

Ashirbayev N.K., & Sherniyazova E.K. (2023) Methodological recommendations for conducting laboratory work in physics on the online platform "Daryn". Bilim land. Topical issues of teaching mathematics, physics and information science, 4(4), P.50-57. DOI: <https://doi.org/10.52081/mpimet.2023.v04.i4.027> (in English)

Blasse G., Grabmaier B.C., Blasse G., & Grabmaier B.C. (1994) A general introduction to luminescent materials. Springer Berlin Heidelberg. P. 1-9. (in English)

Waynant R.W. (2000) Electro-optics handbook. McGraw-Hill. (in English)

Heller M., Robinson J. (1999) Spectroscopic Analysis of Luminescent Centers in Solid State Physics. Academic Press. (in English)

Lee K. (1997) Luminescence Mechanisms in Solid-State Materials. Materials Science Reports. (in English)

Ohno T., Kamiyama S. (2001) Electron-Hole Capture in Defect States of Doped Crystals. *Physica Status Solidi (b)*. (in English)

Freedman H.S., Novikov A. (1978) Photoluminescence in Transition Metal Doped Sulfates. *Radiation Effects and Defects in Solids*. (in English)

Kauppinen J. (1985) Optically Stimulated Luminescence in Sulfate Crystals. *Journal of Physics D: Applied Physics*. (in English)Khomenko M., Dzhagan V. (2002) Optical and Electron Properties of Sulfate-Based Materials. *Radiation Measurements*. (in English)

McKeever S.W.S., Townsend P.D. (1985) Thermoluminescence of Solids. Cambridge University Press. (in English)

Mulligan J.C. (1976) Kinetics of Electron-Hole Recombination in Sulfates. *Physical Review*. (in English)

Perera D., Bradley D.A. (1994) Radiation Dosimetry Using Thermoluminescence Techniques. *Radiation Protection Dosimetry*. (in English)

Salikhodzha Z.M., Nurakhmetov T.N., Akilbekov A.T., Zhunusbekov A.M., Kainarbay A.Z., Sadykova B.M., ... & Zhangylysov K.B. (2019) Recombination luminescence in CaSO_4 . *Radiation Measurements*, 125, P.19-24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2019.04.010> (in English)

Nurakhmetov T.N., Salikhodzha Z.M., Bakhtizin R.Z., Zhunusbekov A.M., Kainarbay A.Z., Daurenbekov D.H., ... & Yussupbekova, B.N. (2019) The creation spectra of intrinsic emission of a LiKSO_4 crystal irradiated by ultraviolet photons. *Optik*, 185, P.156-160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.03.082> (in English)

REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
ISSN 2224-5227

Volume 1. Number 353 (2025), 125–137

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.329>

МРНТИ 29.31.17

УДК 537.534:535.31

S.U. Sharipov*, I.F. Spivak-Lavrov, 2025.

K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan.

E-mail: sharipov_samat@mail.ru

ELECTROSTATIC CHARACTERISTICS OF THE EDGE FIELD BETWEEN THE DEFLECTOR PLATES AND THE GROUNDED SCREEN

Sharipov Samat Urimbasarovich – senior lecturer, K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan, E-mail: sharipov_samat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4350-2361>;

Spivak-Lavrov Igor Feliksovich – doctor of physical and mathematical sciences, professor, K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan, E-mail: spivakif@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2683-2425>.

Abstract. This review article describes the edge field of deflector plates with grounded screens was considered using methods of the theory of functions of complex variables. Based on this, it became possible to obtain an analytical expression of the scalar potential for a detailed analysis of the influence of edge fields. It was found that grounded screens localize the edge electric field on the deflector plates, which, in turn, reduces the influence of uncontrolled electric fields. The length of the grounded screens will be equal to the distance between the plates d , or in a real system their distance can also be $3d$ or $2d$. In addition, accurate expressions of the potential, taking into account the influence of the edge fields on each other, made it possible to study the nature of the edge field of very short deflector plates with grounded screens. The paper also considered the formula of the electric charge and the surface charge density of deflector plates. Taking into account the edge effects, an expression was found for the capacity of the deflector plates. It corresponds to the capacitance formula of a plane capacitor. Based on the obtained analytical expressions, a graphical representation of the edge field is constructed. The drawing of the edge field of deflector plates with a grounded shield shows that the field at a distance from the boundaries of the screens $x \geq 0,5 d$ is a homogeneous field.

Key words: grounded screens, deflector plates, electric field, scalar potential, boundary value problem, surface charge density, lines of force.

С.У. Шарипов*, И.Ф. Спивак-Лавров, 2025.

Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өнірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан.
E-mail: sharipov_samat@mail.ru

ДЕФЛЕКТОРЛЫҚ ПЛАСТИНАЛАР МЕН ЖЕРГЕ ТҮЙЫҚТАЛҒАН ЭКРАН АРАСЫНДАҒЫ ШЕТТІК ӨРІСТІҢ ЭЛЕКТРОСТАТИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ

Шарипов Самат Уримбасарович – ага оқытушы, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өнірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан, E-mail: sharipov_samat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4350-2361>;

Спивак-Лавров Игорь Феликсович – физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өнірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан, E-mail: spivakif@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2683-2425>.

Аннотация. Бұл шолу мақаласында комплекс айнымалы функциялар теориясының әдістерін қолдана отырып, жерге түйықталған экрандары бар дефлекторлық пластинадардың шеттік өрісі қарастырылды. Осының негізінде шеттік өрістердің әсерін егжей-тегжейлі талдау үшін скалярлық потенциалдың аналитикалық өрнегін алу мүмкін болды. Жерге түйықталған экрандар дефлекторлық пластинадарда шеттік электр өрісін локализациялайтыны және бұл өз кезегінде басқарылмайтын электр өрістерінің әсерін азайтатындығы анықталды. Жерге түйықталған экрандардың ұзындығы пластинадардың d ара қашықтығындай болады немесе нақты жүйеде олардың қашықтығы $3d$ немесе $2d$ болуы да мүмкін. Сонымен қатар, шеттік өрістердің бір-біріне әсерін ескеретін потенциалдың нақты өрнектері жерге түйықталған экрандары бар өте қысқа дефлекторлық пластинадардың шеттік өрісінің табигатын зерттеуге мүмкіндік берді. Жұмыста сондай-ақ дефлекторлық пластинадардағы электр заряды мен зарядтың беттік тығыздығының формуласы қарастырылды. Шеттік әсерлерді ескере отырып, дефлекторлық пластинадардың сыйымдылығына арналған өрнек табылды. Ол жазық конденсатордың сыйымдылығының формуласына сәйкес келеді. Алынған аналитикалық өрнектер бойынша шеттік өрістің графикалық суреті түрғызылды. Жерге түйықталған экраны бар дефлекторлық пластинадардың шеттік өрісінің суретінен экрандар шекарасынан $x \geq 0,5 d$ қашықтықта өрісті біртекті өріс деуге болады.

Түйін сөздер: жерге түйықталған экрандар, дефлекторлық пластинадар, электр өрісі, скалярлық потенциал, шекаралық есеп, зарядтың беттік тығыздығы, күш сыйықтары.

С.У. Шарипов*, И.Ф. Спивак-Лавров, 2025.

Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, Актобе, Казахстан.
E-mail: sharipov_samat@mail.ru

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРАЕВОГО ПОЛЯ МЕЖДУ ДЕФЛЕКТОРНЫМИ ПЛАСТИНАМИ И ЗАЗЕМЛЕННЫМ ЭКРАНОМ

Спивак-Лавров Игорь Феликсович – доктор физико-математических наук, профессор, Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, Актобе, Казахстан, E-mail: spivakif@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2683-2425>.

Аннотация. В данной обзорной статье рассматривалось краевое поле дефлекторных пластин с заземленными экранами с использованием методов теории функций комплексных переменных. На основании этого стало возможным получить аналитическое выражение скалярного потенциала для детального анализа влияния краевых полей. Было обнаружено, что заземленные экраны локализуют краевое электрическое поле на дефлекторных пластинах, что, в свою очередь, снижает влияние неуправляемых электрических полей. Длина заземленных экранов будет равна расстоянию между пластины d , или в реальной системе их расстояние также может быть $3d$ или $2d$. Кроме того, точные выражения потенциала, учитывающие влияние краевых полей друг на друга, позволили изучить природу краевого поля очень коротких дефлекторных пластин с заземленными экранами. В работе также рассматривалась формула электрического заряда и поверхностной плотности заряда дефлекторных пластин. С учетом краевых эффектов нашлось выражение для емкости дефлекторных пластин. Он соответствует формуле емкости плоского конденсатора. По полученным аналитическим выражениям строится графическое изображение краевого поля. На рисунке краевого поля дефлекторных пластин с заземленным экраном видно, что поле на расстоянии от границ экранов $x \geq 0,5 d$ является однородным полем.

Ключевые слова: заземленные экраны, дефлекторные пластины, электрическое поле, скалярный потенциал, граничная задача, поверхностная плотность заряда, силовые линии

Кіріспе. Эр түрлі корпускулалық – оптикалық жүйелер (КОЖ) зарядталған бөлшектер шоқтарын басқару, кескіндерді алу, сондай-ақ масса, энергия және қозғалыс бағыттары бойынша осы ағындарды талдау үшін қолданылады. Мұндай жүйелерді жобалау және есептеу кезінде зарядталған бөлшектер оптикасы мен физикалық электроникада шешілетін әртүрлі мәселелер туындаиды. Мұндай есептерді шешу орындалатын есептеулердің дәлдігіне жоғары талаптар қояды. Осылайша, есептеуіш техниканың үлкен мүмкіндіктерін пайдалануға негізделген

КОЖ-дің аспаптық сипаттамаларын есептеу әдістерін жасау электрондық оптика мен ғылыми аспап жасаудың өзекті міндегі болып табылады.

Атап айтқанда, жақсартылған аналитикалық сипаттамалары бар құрылғыларды жобалауға және есептеуге мүмкіндік беретін жаңа математикалық әдістерге және есептеуіш техниканың мүмкіндіктерін арттыруға негізделген, статикалық және ұшу уақыты масс-спектрометрлерінің иондық-оптикалық жүйелерін есептеудің жаңа әдістерін өзірлеу назар аударуды қажет етеді. Жазық және цилиндрлік конденсаторлардың шеттік өрістерінің мәселесі мысалы, электротехника, электроника, микроэлектроника, телекоммуникация және т.б. көптеген салаларда өзекті болып табылады. Бұл конденсаторлардың осы салаларда кеңінен қолданылуына және олардың шеттік өрістерін, соның ішінде олардың электрлік сипаттамаларына әсерін түсіну қажет. Корпускулалық оптика саласында жазық және цилиндрлік конденсатордың шеттік өрістерін есептеу ерекше маңызға ие. Корпускулалық оптиканың негізгі маңызды электромагниттік өрістердің көмегімен зарядталған бөлшектердің шоктарын басқаруға арналған әртүрлі құрылғыларды жасау болып табылады. Жазық және цилиндрлік конденсаторлар энергия бойынша зарядталған бөлшектер шоктарын тасымалдауға, фокустауға және бөлуге байланысты әртүрлі мәселелерді шешу үшін электр өрістерін пайдаланатын қарапайым құрылғылар.

Мұндай құрылғыларды сәтті жобалау және есептеу үшін конденсаторлардың шеттік өрістерінің әсерін дәл анықтау қажет. Алайда, бұл жазық және цилиндрлік конденсаторлардың шеттік өрістерін есептеу әдістерін жасамайынша мүмкін емес. Сонымен қатар, жобаланған құрылғылардың жұмысын оңтайландыру үшін осы шеттік өрістерді локализациялау маңызды.

Дефлекторлық пластинадар - ауытқуши электр өрісін тудыратын екі параллель өткізгіш пластинадан тұрады. Зарядталған бөлшектер шоктарына әсері бойынша олар жазық конденсатордың өрісіне ұқсас және электрондың сәулелік литографияда (Ogasawara, et al., 1998; Mulder, et al., 1998; Auzelyte, et al., 2004), сондай-ақ әртүрлі электрондың сәулелік құрылғыларда электрондық шоктарды басқару үшін қолданылады. Соңғы уақытта олар UEM сканерлеуші электрондық микроскопияның маңызды элементі болып табылады (Weppelman, et al., 2018; Verhoeven, et al., 2018; Meuret, et al., 2019), мұнда олар ұлғіні сканерлеу кезінде саңылау арқылы электрондық сәулелерді ауытқыту үшін қолданылады. Осы қолданыстардың барлығында электрондық шоктың кеңістіктік және уақыттық ажыратымдылығы электрондың сәулені басқаруда өте маңызды рөл атқарады. Дефлекторлық пластинадардың шеттік өрісін зарядталған бөлшектер шоғының ауытқуына әсерін ескермей, сканерлеуші шоктың ажыратымдылығын арттыруға қол жеткізу мүмкін емес.

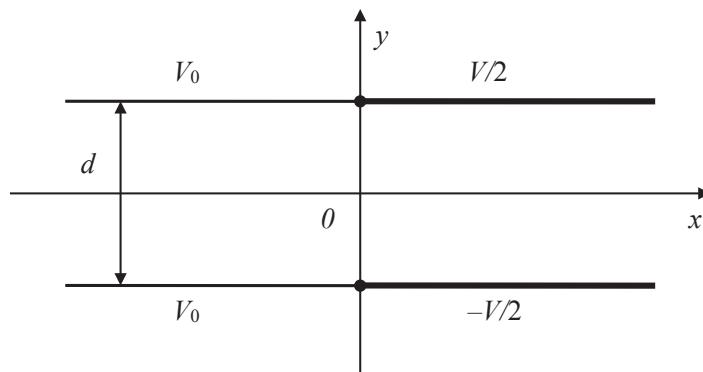
Шеттік өрістің әсері электрондардың көлденең және бойлық бағыттағы жылдамдығының өзгеруіне алып келеді, нәтижесінде олардың нақты траекториясы идеалдан ауытқыды, бұл КОЖ-лердің кеңістіктік - уақыттық ажыратымдылығын бұзады. Сонымен қатар, дефлекторлық пластинадардың кіре берісіндегі электр өрісі әдетте уақытқа байланысты, сондықтан дефлектордан ауытқығаннан

кейін электрондық сәуленің динамикалық қасиеттерін есептеу қажет. Алғаш рет электромагниттік секторлардағы шеттік өрістердің әсері жұмыстарда зерттелді, алайда бұл жұмыстарда алынған нәтижелерді параллель дефлекторлық пластиналарға қолдану қыынға согады. Өйткені дефлекторлық пластиналардағы электрондардың қисықтық траекториясы электромагниттік секторларға қарағанда түрақты шама емес. Сонымен қатар, дефлекторлық пластиналарда жоғарыда айтылғандай, электр өрістері уақыт өте келе өзгереді, бұл өз кезегінде қосымша зерттеулерді қажет етеді.

Ашық ұштары бар жазық және цилиндрлік конденсатордың шеттік өрісі үшін жуықталған аналитикалық формулалар комплекс айнымалы функциялар теориясының (КАФТ) әдістерін қолдану арқылы (Doskeyev, et al., 2011; Baisanov, et al., 2012) алынған еді. Сонымен қатар, шеттік өрістер бойынша шолу жұмыстарында жазық және цилиндрлік конденсаторлардың шеттік өрістерінің 3D графиктері де берілген. Сондай-ақ, (Spivak-Lavrov, et al., 2016, Souto, et al., 2018) жұмыстарда тәуелсіз айнымалылар ретінде электр потенциалы мен қүш функциясы қолданылатын қозғалыс тендеулерін интегралдаудың стандартты емес әдісі ұсынылған. Осы әдіс арқылы энергия анализаторлардың жаңа схемалары есептелген. Электрондық шоқтарға шеттік өрістердің әсерін жуықтап есептеу (Lixin, et al., 2019) жұмыстарда орындалды, бірақ бұл зерттеулерді толық деп санауға болмайды. Кірісі мен шығысина параллель жерге тұйықталған экрандары бар дефлекторлық пластиналар (Спивак-Лавров, et al., 2019; Spivak-Lavrov, et al., 2022; Шарипов, et al., 2023) жұмыстарда қарастырылған.

Материалдар және негізгі әдістер

Жерге тұйықталған экраны бар жазық конденсатордың екі өлшемді дефлекторлық өрісін қарастырайық. Мұндай конденсатордың схемалық кескіні 1.1-суретте көрсетілген. Мұнда экранардың потенциалы $V_0 = 0$, ал полюстердің потенциалы $\pm V/2$, конденсатор пластиналары арасындағы қашықтық d . Суретте x және y декарттық координаттары да көрсетілген, ал электродтар z осі бойымен шексіз созылған деп есептеледі.



1.1-сурет - Экраны бар жазық конденсатордың схемалық кескіні

Жолақты жоғарғы жарты жазықтықта көрсете отырып, мұндай жүйенің потенциалын келесі түрде жазамыз:

$$\varphi(u, v) = \frac{V}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{u}{v} - \frac{V}{2\pi} \left(\operatorname{arctg} \frac{1+u}{v} - \operatorname{arctg} \frac{1-u}{v} \right), \quad (1.1)$$

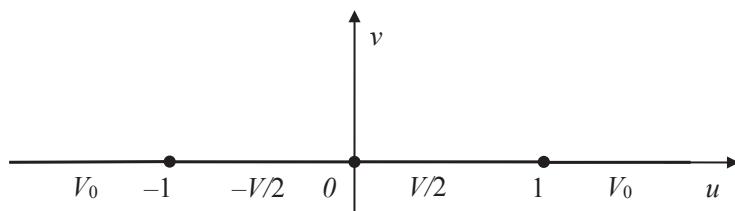
Мұндағы

$$\begin{aligned} u &\equiv u(x, y) = \exp \left(-\frac{\pi}{d} x \right) \sin \left(\frac{\pi}{d} y \right) \\ v &\equiv v(x, y) = \exp \left(-\frac{\pi}{d} x \right) \cos \left(\frac{\pi}{d} y \right). \end{aligned} \quad (1.2)$$

Комплексті түрде бұл түрлендіру $w = u + iv$ жоғарғы жарты жазықтықтағы $z = x + iy$ комплекс жазықтықтағы жолақты көрсетеді және келесі түрде жазылуы мүмкін:

$$w = i \exp \left(-\frac{\pi z}{d} \right), \quad (1.3)$$

w - жазықтықтағы шекаралық есеп 1.2-суретте көрсетілген.



1.2-сурет - w - жазықтықтағы шекаралық есеп

(1.2) мәнін (1.3) орнына қойып, арктангенстер қосындысының формуласын қолданып, потенциал үшін келесі өрнекті аламыз:

$$\varphi(x, y) = \frac{V}{d} y - \frac{V}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{\exp \left(-\frac{2\pi x}{d} \right) \sin \left(\frac{2\pi y}{d} \right)}{1 + \exp \left(-\frac{2\pi x}{d} \right) \cos \left(\frac{2\pi y}{d} \right)}. \quad (1.4)$$

Енді (1.4) дифференциалдау арқылы электр өрісі кернеулігінің құраушыларын табамыз:

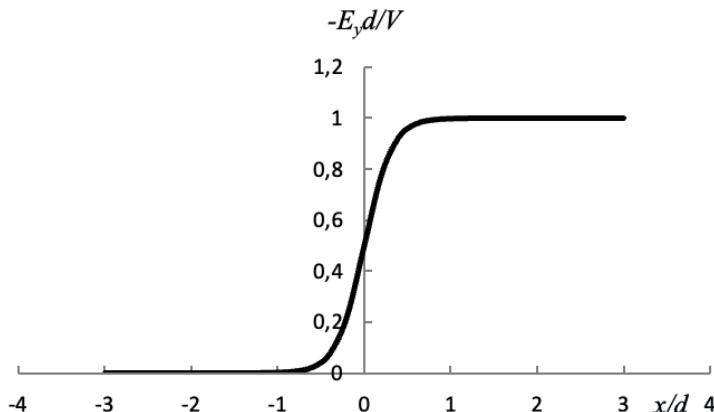
$$E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} = -\frac{V}{d} \frac{\exp \left(-\frac{2\pi x}{d} \right) \sin \left(\frac{2\pi y}{d} \right)}{1 + 2 \exp \left(-\frac{2\pi x}{d} \right) \cos \left(\frac{2\pi y}{d} \right) + \exp \left(-\frac{4\pi x}{d} \right)}, \quad (1.5)$$

$$E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{V}{d} \left[1 - \frac{\exp \left(-\frac{4\pi x}{d} \right) + \exp \left(-\frac{2\pi x}{d} \right) \cos \left(\frac{2\pi y}{d} \right)}{1 + 2 \exp \left(-\frac{2\pi x}{d} \right) \cos \left(\frac{2\pi y}{d} \right) + \exp \left(-\frac{4\pi x}{d} \right)} \right], \quad (1.6)$$

$y = 0$ кезіндегі ортаңғы жазықтықта:

$$E_y(x, 0) = -\frac{V}{d} \left[\frac{\exp\left(\frac{2\pi x}{d}\right)}{1 + \exp\left(\frac{2\pi x}{d}\right)} \right]. \quad (1.7)$$

(1.7) формуламен сипатталған ортаңғы жазықтықтағы шеттік өрістің өзгеру графигі 1.3 -суретте көрсетілген.



1.3 – сурет - Конденсатордың ортаңғы жазықтығындағы шеттік өрістің таралуы

Аймақ шекарасында $y = \frac{d}{2}$ кезінде (1.6) өрнегінен келесі өрнекті аламыз:

$$E_y(x, \frac{d}{2}) = \frac{V}{d} \left[\frac{\exp\left(\frac{2\pi x}{d}\right)}{1 - \exp\left(\frac{2\pi x}{d}\right)} \right], \quad (1.8)$$

Жоғарғы оң зарядталған пластинадағы зарядтың таралуының беттік тығыздығының формуласын табамыз:

$$\sigma(x) = \frac{V\epsilon_0}{d} \left[\frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{2\pi x}{d}\right)} \right]. \quad (1.9)$$

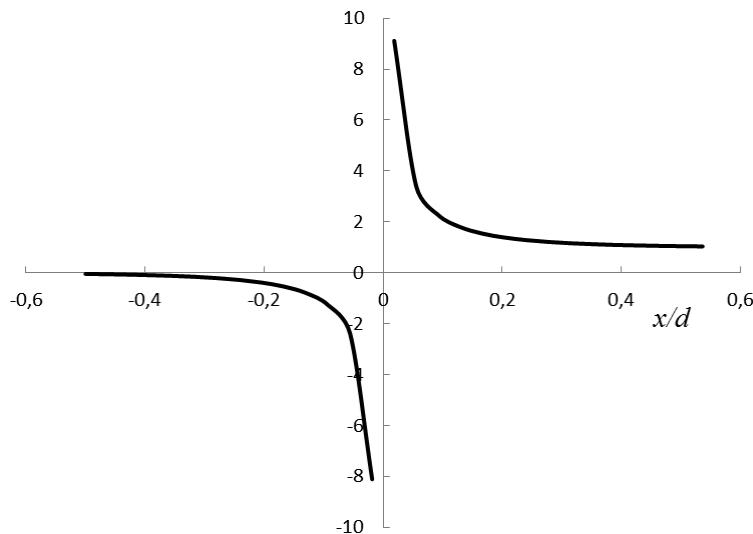
Нәтижелер және талқылау

Жоғарғы дефлекторлық пластинаның шетіне жақын $\sigma(x)$ өзгеру графигі

1.4-суретте көрсетілген, мұндағы σ шамасы $\frac{\varepsilon_0 V}{d}$ бірлігімен өлшенеді. Графикten көріп түрғандай шекарадан $|x| \geq 0.5 d$ ауытқыған кезде $\sigma(x)$ мәндері іс жүзінде өзгермейтінің және x -тің теріс мәні үшін нөлге, ал оң мәні үшін бірге ұмтылатынын көруге болады. (1.9) формуласынан $x=0$ кезде $\sigma(x)$ ерекше мәнге ие екенін көруге болады, бұл физикалық түрғыдан алғанда экрандар мен дефлекторлық пластиналар арасындағы шексіз тар саңылауларға байланысты. Алайда, бұл ерекше мән интегралданады. Шынында да, жоғарғы пластиналың q_1 электр заряды келесі өрнекпен анықталады:

$$q_1 = a \int_{-\infty}^{x_1} \sigma(x) dx = \frac{V\varepsilon_0}{d} a \int_{-\infty}^{x_1} \frac{\exp\left(\frac{2\pi x}{d}\right)}{\exp\left(\frac{2\pi x}{d}\right) - 1} dx = \frac{V\varepsilon_0}{2\pi} a \ln \left| \exp\left(\frac{2\pi x_1}{d}\right) - 1 \right|, \quad (1.10)$$

σ (салыс.бір.)



1.4-сурет $-\frac{\varepsilon_0 V}{d}$ өлшем бірлігіндегі зарядтың $\sigma(x)$ беттік тығыздығының таралуы

мұндағы a - z осінің бағыты бойынша алынған пластиналардың ұзындығы. Егер $\beta = \exp\left(-\frac{2\pi x_1}{d}\right) \ll 1$ енгізсек, онда β бойынша екінші ретті мүшеге дейінгі дәлдікпен ала аламыз:

$$q_1 \approx \frac{\varepsilon_0 S_1}{d} V \left(1 - \beta - \frac{\beta^2}{2} \right), \quad (1.11)$$

мұндағы $S_1 = ax_1$ - дефлекторлық пластиналардың кіріс бөлігінің ауданы.

Егер дефлекторлық пластиналардың ұзындығы $l \leq 2d$ болса, онда $x_1 = \frac{l}{2} = x_2$ деп алуға болады, мұндағы x_2 - дефлекторлық пластиналардың шығыс бөлігінің ұзындығы. Пластиналардың осы бөлігіндегі электр заряды да (1.11) тән болады:

$$q_2 = q_1 \cong \frac{\varepsilon_0 S_2}{d} V \left(1 - \beta - \frac{\beta^2}{2} \right). \quad (1.12)$$

Пластиналардың ауданы $S = S_1 + S_2 = 2S_1$ болғандықтан, пластиналардың жалпы заряды мынаған тән:

$$q = q_1 + q_2 \cong \frac{\varepsilon_0 S}{d} V \left(1 - \beta - \frac{\beta^2}{2} \right). \quad (1.13)$$

Осыдан $l \leq 2d$ қыска дефлекторлық пластиналардың сыйымдылығы үшін келесі өрнекті аламыз:

$$C \cong \frac{\varepsilon_0 S}{d} \left(1 - \beta - \frac{\beta^2}{2} \right), \quad (1.14)$$

мұндағы

$$\beta = \exp \left(-\frac{\pi l}{d} \right). \quad (1.15)$$

$l > 2d$ болған жағдайда дефлекторлық пластиналарды үш бөлікке: ұзындығы d болатын кіріс және шығысқа, сонымен қатар ($l - 2d$) орташа ұзындыққа бөлуге болады. Содан кейін сыйымдылық үшін өрнек жазамыз:

$$C \cong \frac{\varepsilon_0 S}{l} \left(\frac{l}{d} - 2\beta - \beta^2 \right), \quad (1.16)$$

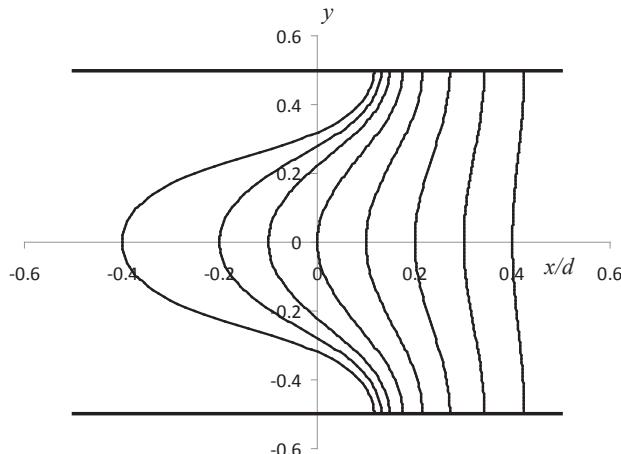
Егер $\beta = \exp(-2\pi)$ және оданда аз ретті шамаларды елемейтін болсак, жазық конденсатор сыйымдылығының формуласын аламыз.

Күш сзықтары үшін дифференциалдық теңдеуді сандық интегралдау арқылы

$$\frac{dx}{dy} = \frac{E_x}{E_y} = \frac{\sin \left(\frac{2\pi y}{d} \right)}{\exp \left(\frac{2\pi x}{d} \right) + \cos \left(\frac{2\pi y}{d} \right)}. \quad (1.17)$$

1.5-суретте көрсетілген шеттік өрістің графикалық суретін аламыз. Суреттен экрандар шекарасынан $x \geq 0,5 d$ қашықтықта өрісті біртекті өріс деуге болады. Электрон x осынан бойымен дефлектордың шеттік өрісіне v_0 жылдамдығымен ұшып кірсін. (1.7) формуланы ескере отырып, электронның қозғалыс тендеуін жазамыз:

$$m \frac{dv_y}{dt} = -e E_y(x, 0) = \frac{eV}{d} \left[\frac{\exp\left(\frac{2\pi x}{d}\right)}{1 + \exp\left(\frac{2\pi x}{d}\right)} \right], \quad (1.18)$$



1.5-сурет - Жерге тұйықталған экраны бар дефлекторлық пластиналардың шеттік өрісінің суреті

мұндағы e және m – электронның заряды мен массасы. Туындыны уақытқа байланысты түрлендіру арқылы:

$$\frac{dv_y}{dt} = \frac{dv_y}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dv_y}{dx} v_0. \quad (1.19)$$

(1.19) тендеуді келесі түрде қайта жазуға болады:

$$\frac{dv_y}{dx} = \frac{eV}{mdv_0} \left[\frac{\exp\left(\frac{2\pi x}{d}\right)}{1 + \exp\left(\frac{2\pi x}{d}\right)} \right]. \quad (1.20)$$

(1.20) тендеуді x бойынша $-\infty$ -тен x_1 -ге дейінгі интегралдасақ, мынаны табамыз:

$$v_y = \frac{eV}{2\pi m v_0} \ln \left[1 + \exp\left(\frac{2\pi x_1}{d}\right) \right] \cong \frac{eVx_1}{mdv_0} \left(1 + \beta - \frac{\beta^2}{2} \right). \quad (1.21)$$

Сонымен, дефлектордың біртекті өрісіне енгенге дейін электрон көлденен жылдамдыққа ие болады. Егер $x_1 = d$ деп алсақ, онда көлденен жылдамдық

$$v_y \equiv \frac{eV}{mv_0} \left(1 + \beta - \frac{\beta^2}{2} \right), \quad \beta = \exp(-2\pi). \quad (1.22)$$

Сонымен, жерге тұйықталған экрандар электр өрісін локализациялайтыны және басқарылмайтын шашырау өрістерін азайтатындығы анықталды. Алайда жұмыста алынған нәтижелер пластиналардың соңындағы шеткі өрістердің бір-біріне әсерін есепке алмайды және тек жеткілікті ұзартылған дефлекторлық пластиналар үшін жарамды, олар үшін бұл әсерді елемеуге болады.

Қорытынды. Жұмыста жерге тұйықталған экрандары бар дефлекторлық пластиналардың шеттік өрісі қарастырылды. КАФТ әдістерінің көмегімен потенциал үшін аналитикалық өрнек алынды, бұл жерге тұйықталған экрандары бар дефлекторлық пластиналардың шеттік өрісінің сипатын зерттеуге мүмкіндік берді. Жерге тұйықталған экрандарды пайдалану дефлекторлық пластиналардың шетінде сипаттамалық өлшемдері пластиналар арасындағы d қашықтыққа тең болатын аймақта шеттік электр өрісінің локализациялануына әкелетіні көрсетілген.

Сонымен қатар, ортағы жазықтықта $\exp\left(\frac{2\pi s}{d}\right)$ көбейткішпен сипатталатын өрістің экспоненциалды азаюы байқалады, мұндағы S – дефлекторлық пластиналардың шекарасынан экрандарға дейінгі қашықтық. Шеттік өрісті локализациялау бақыланбайтын шашырау өрістерінің әсерін де азайтады. Нақты жүйеде Жерге тұйықталған экрандардың ұзындығы $3d$ шамасымен шектелуі мүмкін, ал кейбір жағдайларда $2d$ шамасымен де шектелуі мүмкін. Дефлекторлық пластиналардағы зарядтардың таралуы да қарастырылды. Шеттік әсерлерді ескере отырып, дефлекторлық пластиналардың сыйымдылығына арналған өрнектер табылды. Жұмыста алынған нәтижелерді магниттік экрандары бар магниттердің шеттік өрісін сипаттау үшін де пайдалануға болады.

Жұмыс КР ФЖБМ FK ЖТН AP23486969 «Откізгіш дөңгелек цилиндр негізінде антирезонансстық мультипольдік жүйелерді әзірлеу және модельдеу» ғылыми жобасының грантық қаржыландыруымен орындалды.

Әдебиеттер

Ogasawara M., Sunaoshii H., Yoshikawa R. (1998). Development of a fast beamblanking system. Part of the SPIE Conference on Photomask and X-Ray Mask Technolociy V, Kawasaki. Japan, pp. 79-85.

Mulder E., Kruit P. (1998). Spot movement due to signal transients in multiple deflector blankers in electron beam lithography machines. Microelectron. Eng., 41, pp. 159-162.

Auzelyte V., Elfman M., Kristiansson P., Malmqvist K., Wallman L., Nilsson C., Pallon J., Shariff A., Wegdén M. (2004). The beam blanking system for microlithography at Lund Nuclear Microprobe. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 219 pp. 485-489.

Weppelman I.G.C., Moerland R.J., Hoogenboom J.P., Kruit P. (2018). Concept and design of a beam blanker with integrated photoconductive switch for ultrafast electron microscopy. Ultramicroscopy, 184, pp. 8-17

W. Verhoeven, V.R. Jfm, E.R. Kieft, M. Pha, O.J. Luiten. (2018). High quality ultrafast transmission electron microscopy using resonant microwave cavities. Ultramicroscopy, 188, pp. 85-89.

Meuret S., Sola Garcia M., Coenen T., Kieft E., Zeijlemaker H., Latzel M., Christiansen S., Woo S.Y., Ra Y.H., Mi Z., Polman A. (2019). Complementary cathodoluminescence lifetime imaging configurations in a scanning electron microscope. *Ultramicroscopy*, 197, pp. 28-38.

Doskeyev G.A., Edenova O.A., Spivak-Lavrov I.F. (2011). Influence of the fringe field on moving of the charged particles in flat and cylindrical capacitors. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, 645, pp. 163-167.

Баранов О.А., Доскеев Г.А., Единова А.О., Спивак-Лавров И.Ф. (2012). Исследование влияния краевых полей на движение заряженных частиц в плоском и цилиндрическом конденсаторах. *Прикладная физика*. – №2, Москва, – С. 67-72.

Spivak-Lavrov I.F. (2016). Analytical Methods for The Calculation and Simulation of New Schemes of Static and Time-of-Flight Mass Spectrometers . *Advances in Imaging and Electron Physics*. – Burlington: Academic Press. – V. 193. – pp. 45-128.

Souto C.L., Carll C.G., Wang J. (2018). Fringe field effects on electrostatic deflection of electrons by a pair of charged plates. *J. Electrostat.*, 94, pp. 73-79.

Спивак-Лавров И.Ф., Жеткергенов Д.Б., Шарипов С.У. (2019). Краевое поле дефлекторных пластин с заземленными экранами. *Вестник АРГУ*. – № 4 (58), Актобе, – С. 27-36.

Spivak-Lavrov I.F., Sharipov S.U. (2022). Edge Fields of Flat Capacitor with Two Earthed Screens. *AIP Conference Proceedings* 2467, 060039-1–060039-7; 010001; doi.org/10.1063/12.0010068.

Lixin Zhang, Quanlin Donga. (2019). Analytical analysis and simulation on fringe field effect of deflector plates applied in ultrafast electron microscopy. *Micron*, Volume 126, 102751 https://doi.org/10.1016/j.micron.2019.102751

Baisanov O.A. , Doskeyev G.A. , Doskeyev T.G. , Spivak-Lavrov I.F. (2011). The differential equations defining deflection of particles of ion beam from axial trajectory in electric and magnetic fields. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 645, Issue 1, 21, Pages 159-162. https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.01.155

Шарипов С.У., Спивак-Лавров И.Ф. (2023). Краевое поле дефлекторных пластин с заземленными экранами. XI съезд ВМСО X Всероссийская конференция с международным участием. «Масс-спектрометрия и ее прикладные проблемы», Москва.

References

Ogasawara M., Sunaoshii H., Yoshikawa R. (1998). Development of a fast beamblanking system. Part of the SPIE Conference on Photomask and X-Ray Mask Technolociy V, Kawasaki. Japan, pp. 79-85. (in English)

Mulder E., Kruit P. (1998). Spot movement due to signal transients in multiple deflector blankers in electron beam lithography machine. *Microelectron. Eng.*, 41, pp. 159-162. (in English)

Auzelyte V., Elfman M., Kristiansson P., Malmqvist K., Wallman L., Nilsson C., Pallon J., Shariff A., Wegdén M. (2004). The beam blanking system for microlithography at Lund Nuclear Microprobe. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, 219 pp. 485-489. (in English)

Weppelman I.G.C., Moerland R.J., Hoogenboom J.P., Kruit P. (2018). Concept and design of a beam blanker with integrated photoconductive switch for ultrafast electron microscopy. *Ultramicroscopy*, 184, pp. 8-17. (in English)

W. Verhoeven, V.R. Jfm, E.R. Kieft, M. Pha, O.J. Luiten. (2018). High quality ultrafast transmission electron microscopy using resonant microwave cavities. *Ultramicroscopy*, 188, pp. 85-89. (in English)

Meuret S., Sola Garcia M., Coenen T., Kieft E., Zeijlemaker H., Latzel M., Christiansen S., Woo S.Y., Ra Y.H., Mi Z., Polman A. (2019). Complementary cathodoluminescence lifetime imaging configurations in a scanning electron microscope. *Ultramicroscopy*, 197, pp. 28-38. (in English)

Doskeyev G.A., Edenova O.A., Spivak-Lavrov I.F. (2011). Influence of the fringe field on moving of the charged particles in flat and cylindrical capacitors. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, 645, pp. 163-167. (in English)

Baranov O.A., Doskeev G.A., Edinova A.O., Spivak-Lavrov I.F. (2012). Issledovanie vliyaniya kraevyh polej na dvizhenie zaryazhennyh chastic v ploskom i cilindricheskom kondensatorah. [Investigation of the

effect of edge fields on the motion of charged particles in flat and cylindrical capacitors]. Prikladnaya fizika. – №2, Moskva, – S. 67-72. (in Russian)

Spivak-Lavrov I.F. (2016). Analytical Methods for The Calculation and Simulation of New Schemes of Static and Time-of-Flight Mass Spectrometers. Advances in Imaging and Electron Physics. – Burlington: Academic Press. – V. 193. – pp. 45-128. (in English)

Souto C.L., Carll C.G., Wang J. (2018). Fringe field effects on electrostatic deflection of electrons by a pair of charged plates. *J. Electrostat.*, 94, pp. 73-79. (in English)

Spivak-Lavrov I.F., Zhetkergenov D.B., Sharipov S.U. (2019). Kraevoe pole deflektornyh plastin s zazemlennymi ekranami. [Edge field of deflector plates with grounded shields]. *Vestnik ARGU*. – № 4 (58), Aktobe, S. 27-36. (in Russian)

Spivak-Lavrov I.F., Sharipov S.U. (2022). Edge Fields of Flat Capasitor with Two Earthed Screens. AIP Conference Proceedings 2467, 060039-1–060039-7; 010001; doi.org/10.1063/12.0010068. (in English)

Lixin Zhang, Quanlin Donga. (2019). Analytical analysis and simulation on fringe field effect of deflector plates applied in ultrafast electron microscopy. *Micron*, Volume 126, 102751 <https://doi.org/10.1016/j.micron.2019.102751> (in English)

Baisanov O.A. , Doskeyev G.A. , Doskeyev T.G. , Spivak-Lavrov I.F. (2011). The differential equations defining deflection of particles of ion beam from axial trajectory in electric and magnetic fields. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 645, Issue 1, 21, Pages 159-162. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.01.155> (in English)

Sharipov C.U., Spivak-Lavrov I.F. (2023). Kraevoe pole deflektornyh plastin s zazemlennymi ekranami. [Edge field of deflector plates with grounded shields]. XI s"ezd VMSO X Vserossijskaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem. «Mass-spektrometriya i ee prikladnye problemy», Moskva (in Russian)

REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
ISSN 2224-5227
Volume 1. Number 353 (2025), 138–146

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.330>

УДК: 523.62-726; 523.62-65; 523.62
МРНТИ: 41.21.25; 89.15.35; 89.51.33

L.I. Shestakova, A.V. Serebryanskiy, Spassyuk Ruslan*, Ch.T. Omarov, 2025.

«Fesenkov Astrophysical Institute» LLP, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: spassyuk@fai.kz

SEARCH FOR COMETARY-METEORITIC DUST IN THE INNER REGION OF THE SOLAR SYSTEM: THERMAL EMISSION IN THE DUST CORONA

Shestakova Lyubov I. – Fesenkov Astrophysical Institute, Ph.D. in Physics and Mathematics, head of the Laboratory of Physics of Stars and Nebulae, shest1952@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2223-5332>;

Serebryanskiy Alexander V. – Fesenkov Astrophysical Institute, Ph.D. in Physics and Mathematics, Head of the Department of Observational Astronomy, aserebryanskiy@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4313-7416>;

Spassyuk Ruslan – Fesenkov Astrophysical Institute, bachelor in Nuclear physics, Engineer of the Laboratory of Physics of Stars and Nebulae, spassyuk@fai.kz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7780-2533>;

Omarov Chingis T. – Fesenkov Astrophysical Institute, Professor, PhD in Physics and Mathematics, director of FAI, chingis.omarov@fai.kz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1672-894X>.

Abstract. The inner region of the Zodiaca Cloud (ZC), located within Earth's orbit, remains one of the least explored areas of the Solar System (SS). The challenge of studying this region using astronomical observations lies in the proximity of a bright source—the Sun—and the difficulties in protecting sensitive instruments from its influence. Most experiments aimed at detecting the thermal emission of dust in the outer F-corona of the Sun have been conducted during total solar eclipses. In the list of infrared (IR) observations of the corona presented by (Mann,et al.,2004) , thermal emission was detected in 14 out of 30 cases, while 16 cases yielded negative results. The observed thermal emission in the near-IR wavelength range of 1 to 3.5 μm is concentrated in the dust sublimation region of the Zodiaca Cloud (ZC) at distances of 3 to 10 R_\odot . In addition to zodiacal dust, primarily originating from the asteroid belt, cometary dust also infiltrates the near-Sun region. Comets that approach the Sun, known as “sungrazing” comets, deposit significant amounts of scattered dust in close proximity to the Sun. Furthermore, beyond the dust sublimation zone in the inner SS, substantial scattered dust and dust clumps form due to the ongoing and progressive process of thermal disintegration and fragmentation of comets. However, due to the complexity of these experiments, regular searches for thermal emission at greater distances from the Sun have not been conducted. We propose conducting space-based observations of the

inner SS region using a small telescope or a camera equipped with a filter to search for clouds of heated dust in the near-IR range.

Keywords: F-corona, dust, Zodiacal Cloud, comets, thermal emission

Л.И. Шестакова, А.В. Серебрянский, Р.Р. Спасюк*, Ч.Т. Омаров, 2025.

«В.Г. Фесенков атындағы Астрофизикалық институт» ЖШС, Алматы, Казахстан.

E-mail: spassyuk@fai.kz

КҮН ЖҮЙЕСІНІҢ ШКІ АЙМАҒЫНДАҒЫ КОМЕТАЛЫҚ-МЕТЕОРЛЫҚ ШАНДЫ ІЗДЕУ: ШАНДЫ КОРОНАДАҒЫ ЖЫЛУ ЭМИССИЯСЫ

Шестакова Л.И. – Фесенков атындағы Астрофизикалық институт, Физика-математика ғылымдарының PhD докторы, Жұлдыздар мен тұмандықтар физикасы зертханасының менгерушісі, Email:shest1952@mail.ru, ORCID:0000-0002-2223-5332;

Серебрянский Александр В. – Фесенков атындағы Астрофизикалық институт, Физика-математика ғылымдарының PhD докторы, Бақылау астрономиясы бөлімінің менгерушісі, Email: aserebryanskiy@gmail.com, ORCID:0000-0002-4313-7416;

Спасюк Руслан – Фесенков атындағы Астрофизикалық институт, Ядролық физика бакалавры, Жұлдыздар мен тұмандықтар физикасы зертханасының инженері, Email:spassyuk@fai.kz, ORCID:0000-0002-7780-2533;

Омаров Чингис Т. – Фесенков атындағы Астрофизикалық институт, профессор, Физика-математика ғылымдарының PhD докторы, ФАИ директоры, Email: chingis.omarov@fai.kz, ORCID: 0000-0002-1672-894X.

Аннотация. Жер орбитасының ішінде орналасқан Зодиакалық бұлттың (ЗБ) ішкі бөлігі Күн жүйесінің (КЖ) ен аз зерттелген аймақтарының бірі болып табылады. Бұл аймақты астрономиялық бақылаулар арқылы зерттеудің қыындығы жарық көзінің – Күннің жақындығымен және жарыққа сезімтал аппаратураны оның әсерінен қорғау қыындықтарымен байланысты. Негізінен Күннің сыртқы F-коронасындағы шаңын жылу эмиссиясын іздеуге арналған эксперименттер толық Күн тұтылуы кезінде жүргізілді. (Mann, et al.,2004) енбегінде ұсынылған коронаның инфрақызыл (ИК) бақылауарының тізімінде 30 жағдайдағы 14-інде жылу эмиссиясы табылған, ал 16 жағдай теріс нәтиже берген. 1-ден 3,5 мкм-ге дейінгі жақын ИК толқын ұзындықтарында анықталған жылу эмиссиясы Зодиакалық бұлт (ЗБ) шаңының сублимация аймағында, 3-тен 10 R \odot аралығындағы қашықтықта шоғырланған. Астероидтар белдеуі болып саналатын зодиакалық шаңдан басқа, Күнге жақын аймаққа кометалық шаң да енеді. Күнге жақындағы кометалар, яғни «sungrazing» кометалар, Күннің маңында көп мөлшерде шашыраған шаң қалдырады. Сондай-ақ, ішкі КЖ-да сублимация аймағынан тыс жерде кометалардың термиялық бұзылуы және фрагментациясы нәтижесінде көп мөлшерде шашыраған шаң мен шанды шоғырлар түзіледі. Алайда, осындай эксперименттердің күрделілігіне байланысты, Күннен алыс қашықтықтардағы жылу эмиссиясын тұрақты түрде іздеу жүргізілмеді. Біз Күн жүйесінің ішкі аймағын жақын ИК диапазонда қыздырылған шаң бұлттарын іздеу үшін шағын телескоп немесе сұзгісі бар камераны пайдаланып, атмосферадан тыс бақылаулар жүргізуі ұсынамыз.

Түйін сөздер: F-корона, шаң, Зодиакалық бұлт, кометалар, жылу эмиссиясы

Л.И. Шестакова, А.В. Серебрянский, Р.Р. Спассюк*, Ч.Т. Омаров, 2025.
ТОО «Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова», Алматы, Казахстан.
E-mail: spassyuk@fai.kz

ПОИСК ПЫЛИ КОМЕТНО-МЕТЕОРНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ВО ВНУТРЕННЕЙ ОБЛАСТИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ: ТЕПЛОВАЯ ЭМИССИЯ В ПЫЛЕВОЙ КОРОНЕ

Шестакова Любовь И. – Астрофизический институт им. Фесенкова, доктор физико-математических наук (PhD), заведующая лабораторией физики звезд и туманностей, E-mail: shest1952@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2223-5332;

Серебрянский Александр В. – Астрофизический институт им. Фесенкова, доктор физико-математических наук (PhD), заведующий отделом наблюдательной астрономии, E-mail: aserebryanskiy@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4313-7416;

Спассюк Руслан – Астрофизический институт им. Фесенкова, бакалавр по ядерной физике, инженер лаборатории физики звезд и туманностей, E-mail: spassyuk@fai.kz, ORCID: 0000-0002-7780-2533;

Омаров Чингис Т. – Астрофизический институт им. Фесенкова, профессор, доктор физико-математических наук (PhD), директор ФАИ, E-mail: chingis.omarov@fai.kz, ORCID: 0000-0002-1672-894X.

Аннотация. Внутренняя часть Зодиакального облака (ЗО), находящаяся внутри орбиты Земли – одна из самых малоизученных областей Солнечной системы (СС). Проблема исследований этой области с использованием астрономических наблюдений связана с близостью яркого источника - Солнца и с трудностями защиты светочувствительной аппаратуры от его воздействия. В основном эксперименты, связанные с поиском тепловой эмиссии пыли во внешней F-короне Солнца, проводились во время полных солнечных затмений. В списке инфракрасных (ИК) наблюдений короны, представленном в работе (Mann, et al., 2004), в 14 из 30 случаев тепловая эмиссия обнаружена, а в 16 случаях результат был отрицательным. Обнаруженная тепловая эмиссия в ближнем ИК диапазоне длин волн от 1 до 3.5 мкм сосредоточена в области сублимации пыли Зодиакального Облака (ЗО) на расстояниях от 3 до 10 R_☉. Кроме зодиакальной пыли, источником которой считается пояс астероидов, в околосолнечную область проникает и кометная пыль. Кометы, сближающиеся с Солнцем, так называемые «sungrazing» кометы, оставляют много рассеянной пыли непосредственно вблизи Солнца. Также, во внутренней СС за пределами области сублимации образуется много рассеянной пыли и пылевых сгустков вследствие активного прогрессирующего процесса теплового разрушения и фрагментации комет. Тем не менее, в связи со сложностью подобных экспериментов, регулярных поисков тепловой эмиссии на более далёких расстояниях от Солнца не проводилось. Мы предлагаем провести внеатмосферные наблюдения внутренней области СС с помощью небольшого телескопа, либо камеры с фильтром для поиска облаков нагретой пыли в ближнем ИК диапазоне.

Ключевые слова: F-корона, пыль, Зодиакальное облако, кометы, термоэмиссия.

Введение. История исследований термоэмиссии короны. Впервые на область сублимации пыли около Солнца обратили внимание после сообщений (Peterson, 1967) об обнаружении во время полного солнечного затмения 12 ноября 1966 года локальных максимумов термоэмиссии пыли. Пыль была обнаружена на гелиоцентрическом расстоянии 4.0 R вблизи плоскости эклиптики, как к востоку, так и к западу от Солнца на длинах волн $\lambda = 2.2$ и 3.5 мкм. Затем, (MacQween, 1968) доложил о наблюдении во время того же солнечного затмения двух максимумов термоэмиссии также на расстоянии 4.0 R от Солнца и почти на порядок более слабого избытка термоэмиссии на расстоянии 3.5 R на длине волны $\lambda = 2.2$ мкм. Кроме этого, (MacQween, 1968) доложил о наблюдении 9 января 1967 года ещё трёх избыток термоэмиссии на $\lambda = 2.2$ мкм на расстояниях 4.0, 8.7, и 9.2 R с помощью коронографа, поднятого в стратосферу.

Во время солнечного затмения 30 июня 1973 года были выполнены наблюдения пылевой короны в области длин волн $\lambda = \{8-13\}$ мкм с борта сверхзвукового самолёта “Concorde 001” (Lena, et al., 1974). Сканирование области вблизи плоскости эклиптики удалось провести на расстояниях от 3 до 19 R к востоку от Солнца. Во время полёта самолёта вдоль полосы затмения было сделано несколько сканов разной длины, начиная с 3 R. После усреднения сканов были выделены 2 максимума термоэмиссии, расположенных на расстояниях 4 R и 6.5 R. Был получен суммарный спектр области от 8 до 13 мкм на расстоянии 3 R. На этом спектре выделены некоторые особенности: максимум на $\lambda = 9.5$ мкм и рост на $\lambda \geq 11$ мкм, которые авторы относят к силикатам, а на $\lambda = 10.8$ мкм предположительно к графитам. Максимумы на $\lambda = \{8.6, 11.3, 11.8\}$ и 12.4 мкм авторы не комментируют. Из последних мы можем выделить два максимума - на $\lambda = 8.6$ и 11.3 мкм, которые совпадают с длинами волн ПАУ (РАН) молекул (Kwok, 2022), поиск которых тоже может стать отдельной задачей. В работе (Kwok, 2022) представлен обзор, в котором рассмотрены полосы ИК эмиссии, названные автором как неидентифицированные инфракрасные эмиссии (НИЭ). Среди них перечислены сильные полосы на длинах волн 3.3, 6.2, 7.7, 8.6 и 11.3 мкм и слабые на 12.1, 12.4, 12.7, 13.3, 15.8, 16.4, 17.4, 17.8 и 18.9 мкм, которые наблюдались в протопланетных туманностях (Kwok, et al., 1999). Сильные полосы относят к эмиссии ПАУ (РАН) молекул. Одна из НИЭ полос на 12.4 мкм также обнаружена в наблюдениях (Lena, et al., 1974).

Материалы и методы. Mizutani, et al., (1984, 1985) провели наблюдения распределения яркости солнечной короны в ближнем инфракрасном диапазоне с помощью фотометра, установленного на воздушном шаре во время полного солнечного затмения 11 июня 1983 года в Индонезии. Авторами был обнаружен пик на $\lambda = 1.65$ мкм на расстоянии 3.8 R с одной стороны от Солнца. На других длинах волн, как меньше, так и больше указанной длины волны, избытка тепловой эмиссии не обнаружено. Локальный избыток излучения на 1.65 мкм также наводит на мысль о возможном присутствии ПАУ (РАН) молекул, поскольку эта длина волны составляет половину от 3.3 мкм, которая часто встречается вблизи многих объектов, включая планетарные туманности (Kwok, 2022).

Mizutani, et al., (1984) провели летом 1978 года наземные наблюдения в ближнем инфракрасном диапазоне на длинах волн 2.2 мкм и 3.5 мкм в попытке измерить тепловое излучение пыли. В этом эксперименте не удалось обнаружить тепловое излучение, хотя ошибки измерений были значительно ниже, чем в предыдущих успешных наблюдениях.

Также были и другие сообщения (Maihara, et al., 1985; Mampaso, et al., 1983), где докладывается, что до расстояний 10 R тепловой эмиссии не обнаружено. Наблюдения теплового излучения пыли в F-короне во время затмения 11 июля 1991 года, проведённые (Lamy, et al., 1992) с хорошей чувствительностью определённо дали отрицательные результаты. Полоса затмения 1991 года проходила через высокогорную обсерваторию Мауна-Кеа, что является еще одним преимуществом для измерения короны на больших угловых расстояниях от Солнца. Авторами представлены результаты эксперимента, проведенного на Мауна-Кеа, используя в качестве детектора матрицу HgCdTe, чувствительной к длинам волн от 1 до 2.5 мкм, с использованием широкополосных фильтров J, H и K. Хотя условия на небе не были идеальными, поверхность яркость в H- и K-диапазонах ясно показала неоднородную структуру K-короны и эллиптическое уплощение F-короны, но никаких признаков околосолнечной локальной пылевой составляющей на расстоянии до 15 R не обнаружено. Список ИК наблюдений короны представлен в работе (Mann, et al., 2004). В этом списке в 14 случаях из 30 термоэмиссия обнаружена, а в 16 случаях результат был отрицательным.

Общий вывод, который можно сделать из краткого обзора истории наблюдений теплового излучения в F-короне состоит в том, что присутствие пыли в короне не отличается стабильностью, постоянных структур в виде пылевых колец может не быть. Более вероятно обнаружение фрагментарного присутствия в виде облаков пыли, образовавшихся после распада более крупных тел типа «sungrazing» комет или метеорных потоков, как продуктов распада астероидно-кометных тел и их фрагментов.

Оценки яркости короны в ближнем ИК диапазоне. Оптические данные, представленные в работе (Kimura and Mann, 1998), дают оценку яркости неба во время солнечного затмения в единицах яркости солнечного диска на уровне $\approx 10^{-9}$ В. Наши наблюдения яркости неба во время полного солнечного затмения 29.03.2006 на расстоянии 4 R вблизи $\lambda 0.52$ мкм (Шестакова, Демченко, 2010) показали величину около 5×10^{-9} В (Таблица 1).

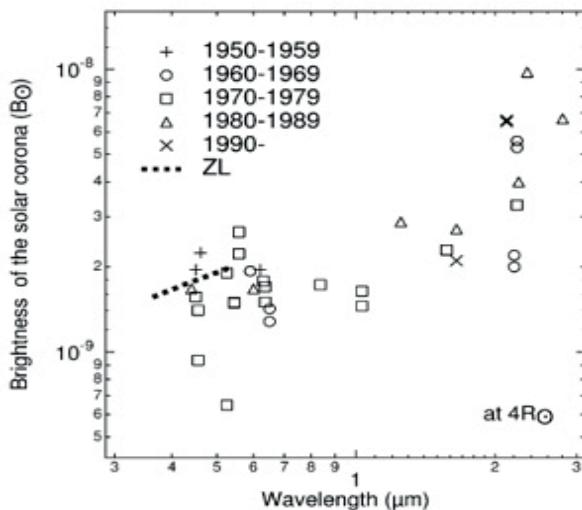


Рисунок 1. Интенсивность солнечной короны на расстоянии $4 R_{\odot}$ в единицах интенсивности солнца в диапазоне от видимой до ИК области спектра

Сводные данные о яркости короны на расстоянии $4R_{\odot}$, представленные в работе (Kimura and Mann, 1998) показаны на рисунке 1. Измерения яркости короны, полученные в разные периоды в интервале длин волн от 0.3 до 2 мкм показали величину в интервале $(1-5) \times 10^{-9}$ В, что совпадает с ранее сделанными измерениями и нашими данными на $\lambda 0.52$ мкм (Таблица 1). На рисунке 1 можно отметить увеличение яркости до 10^{-8} В с ростом длины волны.

Таблица 1. Яркость неба во время солнечного затмения 29.03.2006, $\lambda 0.52$ мкм

Elongation	$4.0R_{\odot}$ (E)	$4.4R_{\odot}$ (W)	$10R_{\odot}$ (E)	$10R_{\odot}$ (W)
Eclipse	4.92×10^{-9} В	4.70×10^{-9} В	2.85×10^{-9} В	2.86×10^{-9} В

Результаты наблюдения пылевой короны во время солнечного затмения 30 июня 1973 года, полученные в области длин волн 8–13 мкм с борта сверхзвукового самолёта (Lena, et al., 1974), показали среднюю яркость $B_{\text{корона}} = (3.7 - 5) \mu\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{стэр}^{-1} \cdot \mu\text{м}^{-1}$ на интервале расстояний от 3 до 8 R_{\odot} . Согласно данным (Makarova, et al., 1991) яркость солнечного диска на $\lambda 10$ мкм составляет величину $B = 3.6 \times 10^3$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{мкм} \text{ср})$, что почти на 3 порядка меньше яркости на $\lambda 2.0$ мкм, равной $B = 1.6 \times 10^6$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{мкм} \text{ср})$. После перевода единиц данных (Lena, et al., 1974) в этот же формат яркость короны на $\lambda=10$ мкм будет равна: $B_{\text{кор}} = (3.7 - 5) \times 10^{-2} \text{ вт}/(\text{м}^2 \text{мкм} \text{ср})$, что составляет величину порядка 10^{-5} В. Полученная величина на 4 порядка превосходит величину соотношения яркостей для оптического диапазона, которая близка к 10^{-9} В, что вызывает немалое удивление. Объяснить такое различие рассеянием солнечного света невозможно. Это может быть результатом избыточной термоэмиссией пыли. Эмиссия РАН молекул также могла внести свой вклад. До настоящего времени вопрос остаётся нерешенным. Из опыта ИК исследований короны можно сделать вывод, что небольшое смещение полосы пропускания в

сторону увеличения длины волны может повысить вероятность обнаружения термоэмиссии на некотором удалении от солнечного диска. Было бы интересно в таких наблюдениях использовать фильтр с максимумом пропускания на $\lambda_{\max} = 3.3$ мкм, чтобы увеличить шансы обнаружения как термоэмиссии пылевых облаков, так и скоплений РАН молекул, в том числе и на значительных расстояниях от Солнца прядка $50 R_{\odot}$.

В работе (Kimura and Mann, 1998) показана зависимость яркости ЗС от элонгации для видимого диапазона спектра, где минимальная яркость ЗС на большом удалении от Солнца близка к яркости ночного неба и равна примерно 10^{-13} В . Яркость Солнца в видимом диапазоне спектра составляет около $B \approx 3 \times 10^7$ дж/(сек $\text{м}^2 \text{мкм ср}$) по данным (Makarova, et al., 1991). С учётом этих данных мы получим оценку яркости ЗС также на большом удалении от Солнца $B_{Z0} \approx 10^{-13} \text{ В} = 3 \times 10^{-6}$ дж/(сек $\text{м}^2 \text{мкм ср}$).

В работе (Ootsubo, et al., 1998) даны результаты наблюдений ЗО в среднем ИК в интервале 3-12 мкм на элонгациях от 95° и далее в зависимости от эклиптической широты. Поверхностная яркость на нулевой широте в интервале длин волн 5.7-10.7 мкм возрастила от 10^{-6} до 10^{-5} вт/($\text{м}^2 \text{стер}$). Авторы считают, что спектр зодиакального излучения может быть довольно хорошо воспроизведен излучением «серого тела» при температуре 280 К с избытком около 10 мкм, который может быть отнесен к силикатной полосе излучения. Поверхностная яркость в ИК диапазоне по данным (Ootsubo, 1998) оказалась близка к оценкам, представленным (Kimura and Mann, 1998) для оптического диапазона. Таким образом, тестирование оборудования планируемого для космических и проверки чувствительности приёмника с целью пригодности для выполнения данной задачи можно проводить по ночному небу. Поскольку наша цель – исследование более внутренних областей ЗО, то ожидаемые максимумы термоэмиссии будут смещены по длине волн в коротковолновую область, поэтому мы должны использовать фильтр с максимумом пропускания при $\lambda_{\max} = 3.3$ мкм.

Обсуждение. Необходимое оборудование: для решения поставленной задачи необходим телескоп с апертурой 30-40 см с фильтром, настроенным на ближний ИК диапазон. Возможные области пропускания фильтра $\lambda_0 = 2.2 \pm 0.3$ мкм и $\lambda_0 = 3.3 \pm 0.3$ мкм. Длина волны 3.3 мкм предпочтительнее, поскольку она соответствует спектральной полосе РАН молекул, которые также могут присутствовать в указанной околосолнечной области. Эта длина волны соответствует температуре излучения «абсолютно черного тела» около 870К, которая соответствует расстоянию $22 R_{\odot}$. При выборе фильтра, настроенного на $\lambda_{\max} = 2.2$ мкм, условиям этого максимума пропускания фильтра соответствует расстояние около $10 R_{\odot}$, где температура «абсолютно черного тела» близка к 1300К.

В качестве альтернативы может быть выбран более простой вариант прибора – небольшая камера с фильтром с широким полем зрения $10^\circ - 20^\circ$ без питающей оптики. Поле зрения 10° соответствует $40 R_{\odot}$. Перед объективом камеры светосилой от 1:1 до 1:1.5 с апертурой 4-6 см закрепляется ИФ полностью перекрывающий световой пучок. В фокусе объектива устанавливается ПЗС-

матрица, чувствительная в области длин волн $\lambda = 2\text{--}4 \text{ мкм}$. Сложность таких наблюдений состоит в аккуратном наведении на околосолнечную область с нескольких позиционных направлений вокруг Солнца. Наиболее интересное расстояние от центра солнечного диска $4 - 24 R_{\odot}$, то есть от 1° до 6° . Эта область совпадает с областью сублимации пыли разного химического состава.

Наблюдения можно ограничить двумя областями: к западу и к востоку от Солнца вблизи плоскости эклиптики. При невозможности осуществить близкое к Солнцу наведение, можно ограничиться наблюдением более далёких областей вблизи плоскости эклиптики и в направлении её полюсов для выявления сгустков пыли или РАН молекул.

Заключительные замечания. Исследование внутренней области Солнечной Системы в ИК диапазоне с целью поиска объектов, обладающих тепловой эмиссией, позволит изучить природу этих объектов и источники их появления. Астрономические наблюдения этой области крайне немногочисленны, большинство из них осуществлялись только во время редких событий - полных солнечных затмений. Многочисленные миссии, проводимые из космоса, в основном, ориентированы на область далёкую от направления на Солнце и направлены на исследования различных галактических и внегалактических объектов. При этом ближайшие районы космоса остаются недостаточно исследованными, несмотря на то, что здесь происходит множество активных процессов, связанных с разрушением малых тел кометно-астероидного типа и зодиакальной пыли. Эти объекты оказывают непосредственное влияние на среду обитания человечества, в том числе и в смысле метеоритной опасности. Солнце активно взаимодействует с внешней средой, малыми телами планетной системы, о чём свидетельствуют результаты работы миссии SOHO, показавшие, что на Солнце падает около 200 комет в год. Очевидно, что во время движения к Солнцу они выделяют значительное количество пыли и газа, являются источниками метеороидов. Планируемая в Казахстане космическая миссия может прояснить некоторые интересные моменты, связанные с этими явлениями.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR24992759).

Литература

- H. Kimura and I. Mann. (1998) Brightness of the solar F-corona. *Earth Planets Space*, 50, – P. 493–499.
- Kwok Sun (2022) The mystery of unidentified infrared emission bands. *Astrophysics and Space Science*. 367:16 <https://doi.org/10.1007/s10509-022-04045-6>.
- Kwok S., Volk K., Hrivnak B.J. (1999) Chemical evolution of carbonaceous materials in the last stages of stellar evolution. *Astron. Astrophys.* – 350, – L35.
- Lamy Ph., Kuhn J.R., Lin H., Koutchmy S., Smartt R.N. (1992) No evidence of a circumsolar dust ring from infrared Observations of the 1991 solar eclipse. *Science*, v.253, 1377-1380 DOI: 10.1126/science.257.5075.1377.
- Lena P., Viala Y., Hall D., Soufflot A. (1974) The thermal emission of the dust corona, during the eclipse of June 30, 1973. *Astron and Astrophys.* 37, – P. 81-86.
- MacQueen R.M. Infrared observation of the outer solar corona. *Astroph. J.* 1968. V.154. – P. 1059-1076.

Maihara T., K. Mizutani, N. Hiromoto, H. Takami, and H. Hasegawa. (1985) A balloon observation of the thermal radiation from the circumsolar dust cloud in the 1983 total eclipse, in Properties and Interactions of Interplanetary Dust, Astrophysics and Space Science Library, Vol. 119, edited by R. H. Giese and P. Lamy, – P. 55–58, Reidel, Dordrecht.

Makarova E.A., Kharitonov A.V. and Kazachevskaya T.V. (1991) Solar radiation flux, Nauka, Moscow.

C. Sánchez-Magro, M.J. Selby, A.D. MacGregor. (1983) Infrared observations of the thermal emission from the corona, Rev. Mexicana Astron. Astrof., 8, 3–6, RMxAA...8...3M.

Mann I. et al. (2004) Dust near the Sun. Space Science Reviews, – V.110: 269–305

Mizutani K., Maihara T., Hiromoto N., Takami H. (1984) Near-infrared observation of the circumsolar dust emission during the 1983 solar eclipse, NATURE 312: 134. – Natur.312..134M.

Ootsubo T. (1998) Earth, Planets and Space. – volume 50, – P. 507–511

Peterson A.W. (1967) Ap. J. 148, – L37.

Шестакова Л.И., Демченко Б.И. (2010) Яркость неба во время солнечных затмений 29.03.2006 и 01.08.2008. Известия НАН РК. Серия физ-мат. – № 4. С.87-92

References

- H. Kimura and I. Mann. (1998) Brightness of the solar F-corona. Earth Planets Space, 50, –P. 493–499. (in Eng.).
- Kwok Sun (2022) The mystery of unidentified infrared emission bands. Astrophysics and Space Science. 367:16 <https://doi.org/10.1007/s10509-022-04045-6> (in Eng.).
- Kwok S., Volk K., Hrivnak B.J. (1999) Chemical evolution of carbonaceous materials in the last stages of stellar evolution. Astron. Astrophys. – 350, – L35. (in Eng.).
- Lamy Ph., Kuhn J.R., Lin H., Koutchmy S., Smartt R.N. (1992) No evidence of a circumsolar dust ring from infrared Observations of the 1991 solar eclipse. Science, v.253, 1377-1380 DOI: 10.1126/science.257.5075.1377. (in Eng.).
- Lena P., Viala Y, Hall D., Soufflot A. (1974) The thermal emission of the dust corona, during the eclipse of June 30, 1973. Astron and Astrophys. 37, - P. 81-86 (in Eng.).
- MacQueen R.M. Infrared observation of the outer solar corona. Astroph. J. 1968. V.154. – P. 1059-1076. (in Eng.).
- Maihara T., K. Mizutani, N. Hiromoto, H. Takami, and H. Hasegawa. (1985) A balloon observation of the thermal radiation from the circumsolar dust cloud in the 1983 total eclipse, in Properties and Interactions of Interplanetary Dust, Astrophysics and Space Science Library, Vol. 119, edited by R. H. Giese and P. Lamy, – P. 55–58, Reidel, Dordrecht. (in Eng.).
- Makarova E.A., Kharitonov A.V. and Kazachevskaya T.V. (1991) Solar radiation flux, Nauka, Moscow.
- C. Sánchez-Magro, M.J. Selby, A.D. MacGregor. (1983) Infrared observations of the thermal emission from the corona, Rev. Mexicana Astron. Astrof., 8, 3–6, RMxAA...8...3M. (in Eng.).
- Mann I. et al. (2004) Dust near the Sun. Space Science Reviews, – V.110: 269–305 (in Eng.).
- Mizutani K., Maihara T., Hiromoto N., Takami H. (1984) Near-infrared observation of the circumsolar dust emission during the 1983 solar eclipse, NATURE 312: 134. – Natur.312..134M. (in Eng.).
- Ootsubo T. (1998) Earth, Planets and Space. – volume 50, – P. 507–511 (in Eng.).
- Peterson A.W. (1967) Ap. J. 148, – L37. (in Eng.).
- Shestakova L.I., Demchenko B.I. (2010) Yarkost' neba vo vremya solnechnykh zatmeniy [Brightness of the sky during solar eclipses]. – 29.03.2006 i 01.08.2008. Izvestiya NAN RK. Seriya fiz-mat. – №4. С.87-92 (in Russian).

CHEMISTRY

REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
ISSN 2224-5227
Volume 1. Number 353 (2025), 147–159

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.331>

IRSTI 31.15.33

UDC 544.522.1

**R.S. Abzhalov, Sh.T. Koshkarbayeva, A.K. Dikanbayeva, M.S. Satayev,
B.S. Serikbayeva*, 2025.**

M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan.

E-mail: sbagdash@bk.ru

STUDY OF THE OBTAINING OF SILVER NANOPARTICLES ON THE POLYMER SURFACE USING PHOTOCHEMICAL ACTIVATION

Abzhalov Ramshad Sadykovich – PhD, Senior Lecturer, M. Auezov South Kazakhstan university, Shymkent, Kazakhstan, E.mail: ars.es_84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2070-0843>;

Koshkarbayeva Shaizada Tortayevna – Candidate of technical sciences, Docent, M. Auezov South Kazakhstan university, Shymkent, Kazakhstan, E-mail: shayzada-1968@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8753-3245>;

Dikanbayeva Aizhan Kosybaeva – PhD, Mukhtar Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan, E-mail: dikanbaeva86@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9859-5545>;

Satayev Malik Svambaevich – Doctor of Technical Sciences, Professor M. Auezov South Kazakhstan university, Shymkent, Kazakhstan, E-mail: malik_1943@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3456-7083>;

Serikbayeva Bagdagul Saduexasovna – PhD, Senior Lecturer M. Auezov South Kazakhstan university, Shymkent, Kazakhstan, E-mail: sbagdash@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0001-4408-7967>.

Abstract. The article is devoted to the study of the actual problem of obtaining nanoparticles of antimicrobial drugs and materials. The paper discusses the future of the method of synthesis of silver nanoparticles of various sizes, shapes and compositions. Nanobacteric properties and experimental application of nanotubes in polymer production are shown. It is known that the antibacterial properties of silver nanoparticles depend on its competent structure and morphology. Silver nanoparticles have been thoroughly investigated due to their unique characteristics, including optical, protective, antibacterial and electrical properties. In the era of the antibiotic crisis, with the growth of antimicrobial resistance and a reduction in the number of newly developed drugs, silver nanoparticles are potential candidates due to their significant antimicrobial activity, limited development of resistance and extensive synergistic effect in combination with other drugs. The effect of silver nanoparticles depends on the delivery system, the combination of compounds and their own properties, such as shape and size, which are largely influenced by the synthesis process. Recovery using chemicals or light, irradiation with gamma rays, laser, electron beams or microwave, as well as biological synthesis or a combination of these methods are notable examples

of methods for the synthesis of silver nanoparticles. In this paper, updated methods for the synthesis of silver nanoparticles are considered, as well as their advantages and disadvantages. The factors influencing the synthesis process are discussed further.

Keywords: nanomaterials, photochemical activation, silver nanoparticles, protective properties, polymer materials.

**Р.С. Абжалов, Ш.Т. Кошкарбаева, А.К. Диканбаева, М.С. Сатаев,
Б.С. Серикбаева*, 2025.**

М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан.
E-mail: sbagdash@bk.ru

ФОТОХИМИЯЛЫҚ АКТИВТЕНДІРУ АРҚЫЛЫ ПОЛИМЕР БЕТИНЕН KYMIC НАНОБӨЛШЕКТЕРДІ АЛУДЫ ЗЕРТТЕУ

Абжалов Рамшад Садыкович – Ph.D, аға оқытушы, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, E-mail: ars.es_84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2070-0843>;

Кошкарбаева Шайзада Тортаевна – техника ғылымдарының кандидаты, доцент, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, E-mail: shayzada-1968@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8753-3245>;

Диканбаева Айжан Косыбаевна – PhD доктор, Мұхтар Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, E-mail: dikanbaeva86@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4982-1566>;

Сатаев Малик Свамбаевич – техника ғылымдарының докторы, профессор, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, E-mail: malik_1943@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3456-7083>;

Серикбаева Багдагуль Садуехасовна – Ph.D, аға оқытушы, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, E-mail: sbagdash@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0001-4408-7967>.

Аннотация. Мақала микробқа қарсы препараттар мен материалдардың нанобөлшектерін алудың өзекті мәселесін зерттеуге арналған. Мақалада әртүрлі өлшемдегі, пішіндегі және құрамдағы күміс нанобөлшектерін синтездеу әдісінің болашағы талқыланады. Полимер өндірісінде нанотұтікшелердің нанобактериялық қасиеттері мен тәжірибелі қолданылуы көрсетілген. Күміс нанобөлшектерінің бактерияға қарсы қасиеттері оның сауатты құрылымы мен морфологиясына байланысты екені белгілі. Күміс нанобөлшектері оптикалық, қорғаныш, бактерияға қарсы және электрлік қасиеттерін қоса алғанда, бірегей сипаттамаларына байланысты мүқият зерттелді. Антибиотикалық дағдарыс дәуірінде микробқа қарсы тәзімділіктің жогарылауымен және жаңадан жасалған препараттар санының азаюымен күміс нанобөлшектері микробқа қарсы белсенділігінің, тәзімділіктің шектеулі дамуының және басқа препараттармен бірге көң синергетикалық әсерінің арқасында әлеуетті үміткерлер болып табылады. Күміс нанобөлшектерінің әсері жеткізу жүйесіне, қосылыстардың комбинациясына және синтез процесі айтартылған әсер ететін пішіні мен өлшемі сияқты өзіндік қасиеттеріне байланысты. Химиялық заттарды немесе жарықты қолдану арқылы тотықсыздандыру, гамма-сәулелермен, лазермен, электронды сәулелермен немесе микротолқынды пешпен сәулелену, сондай-ақ биологиялық синтез немесе осы

әдістердің комбинациясы күміс нанобөлшектерін синтездеу әдістерінің көрнекті мысалдары болып табылады. Бұл жұмыста күміс нанобөлшектерін синтездеудің жаңартылған әдістері, сондай-ақ олардың артықшылықтары мен кемшіліктері қарастырылған. Синтез процесіне әсер ететін факторлар әрі қарай талқыланады.

Түйін сөздер: наноматериалдар, фотохимиялық активация, күміс нанобөлшектері, қорғаныш қасиеттері, полимерлік материалдар.

**Р.С. Абжалов, Ш.Т. Кошкарбаева, А.К. Диканбаева, М.С. Сатаев,
Б.С. Серикбаева*, 2025.**

Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан.

E-mail: sbagdash@bk.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРА С ПОМОЩЬЮ ФОТОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ

Абжалов Рамшад Садыкович – Ph.D, старший преподаватель Южно-Казахстанского университета им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан, E-mail: ars.es_84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2070-0843>;

Кошкарбаева Шайзада Тортаяева – кандидат технических наук, доцент Южно-Казахстанского университета им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан, E-mail: shayzada-1968@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8753-3245>;

Диканбаева Айжан Косыбаевна – PhD, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан, E-mail: dikanbaeva86@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9859-5545>;

Сатаев Малик Свамбаевич – доктор технических наук, профессор Южно-Казахстанского университета им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан, E-mail: malik_1943@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3456-7083>;

Серикбаева Багдагуль Садуехасовна – PhD, старший преподаватель Южно-Казахстанского университета им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан, E-mail: sbagdash@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0001-4408-7967>.

Аннотация. Статья посвящена исследованию актуальной проблемы получения наночастиц антимикробных препаратов и материалов. В статье рассматривается и обсуждается будущее метода синтеза наночастиц серебра различных размеров, форм и составов. Показаны нанобактериальные свойства и экспериментальное применение нанотрубок в производстве полимеров. Известно, что антибактериальные свойства наночастиц серебра зависят от их правильной структуры и морфологии. Наночастицы серебра были тщательно исследованы благодаря их уникальным характеристикам, включая оптические, защитные, антибактериальные и электрические свойства. В эпоху антибиотического кризиса, с ростом устойчивости к противомикробным препаратам и сокращением числа новых разрабатываемых лекарственных средств, наночастицы серебра являются потенциальными кандидатами благодаря их значительной антимикробной активности, ограниченному развитию устойчивости и обширному синергетическому эффекту в сочетании с другими лекарственными препаратами.

Действие наночастиц серебра зависит от системы доставки, комбинации соединений и их собственных свойств, таких как форма и размер, на которые в значительной степени влияет процесс синтеза. Восстановление с использованием химических веществ или света, облучение гамма-лучами, лазером, электронными пучками или микроволновой печью, а также биологический синтез или комбинация этих методов являются примечательными примерами методов синтеза наночастиц серебра. В данной работе рассматриваются обновленные методы синтеза наночастиц серебра, а также их преимущества и недостатки. Факторы, влияющие на процесс синтеза, обсуждаются далее.

Ключевые слова: наноматериалы, фотохимическая активация, наночастицы серебра, защитные свойства, полимерные материалы.

Introduction. In recent years, nanoscience and the production of nanoscale materials and products has been one of the main directions of the development of modern science and technology. This direction in the field of materials science and technology is actively developing, capturing more and more new areas of science and industrial production (Pul, 2005). Modern advances in nanotechnology open up new opportunities for the development of fundamentally new technological processes for the production of nanoscale antimicrobials and materials. An important feature of metallic nanomaterials, which plays a key role in their use in medicine, cosmetics, food and light industry, is their low toxicity.

The increased interest in nanotechnology among researchers in recent years is not surprising, since this field has advanced to an unprecedented level. In general, nanotechnology is a multifaceted field that can be applied to electronics (Natsuki, 2015) sensors, optics (Doan, et al., 2019), mechanics, catalysis, chemistry, cosmetics, pharmaceuticals, medicines and biomedical sciences, food technology and the environment (Doan, et al., 2023). Differences in chemical composition, morphology, size, or controlled dispersion contribute to changes in the characteristics of nanoparticles (NP). This change may be the result of the synthesis process, which is also influenced by many factors. Today, the production of nanoparticles requires that the resulting particles are nanoscale, and their synthesis is simple, inexpensive (Lu, et al., 2019), environmentally friendly (Rajapaksha, et al., 2023) and adapted to specific applications (Vu, et al., 2021).

The bactericidal properties of metallic silver and its compounds have been known since time immemorial. In small concentrations, it is safe for human cells, but harmful to most bacteria and viruses, therefore it has become widely used for disinfection of water and food in everyday life and in the fight against infections in the treatment of people. To date, the unique antimicrobial (Erlykh, 2008) and antiviral properties of silver (Krutikov, et al., 2008) compounds have been comprehensively studied (Kiseleva, et al., 2011). The bactericidal properties of metallic silver are associated with its slow oxidation and release of Ag⁺ ions into the environment, therefore, the use of nanosilver

preparations as a special class of biocidal agents seems promising. Nanoparticles have high antibacterial efficiency due to their developed surface, which ensures maximum contact with the environment.

The number of publications, growing every year, devoted to the study of antiviral and antibacterial activity of silver nanoparticles, proves the presence of increased researchers are interested in this problem from both fundamental and applied points of view. There is no longer any doubt that silver NPS have high activity against all biological objects, starting from viral particles and ending with the human body. At the same time, there are practically no works aimed at quantifying the biological effect of silver NPS on humans and animals. Unfortunately, it is also indisputable that under certain conditions many LPS (including silver, although perhaps to a lesser extent) are able to have an extremely negative impact on living systems and even cause severe and irreversible changes in the body. In recent years, a new field of medicine has begun to emerge – nanotoxicology, whose efforts are aimed at developing integrated approaches to the study of the biological and toxicological activity of NPS, depending on their composition, size, shape and functional cover of the surface.

The literature presents a number of methods for obtaining metal nanoparticles in non-metallic materials, which can be used to obtain silver nanoparticles in polymeric materials. The methods known from the literature for obtaining metal nanoparticles in polymeric materials are conventionally divided into physical and chemical.

Among the physical methods for obtaining silver nanoparticles, the method of magnetron sputtering metal particles (including silver) in a vacuum chamber and then applying them to the surface of the material is known (Patent RF, 2003). This method is based on the use of an abnormal combustion discharge in an inert gas, in which the positively charged ions formed in the discharge bombard the surface of the cathode in the erosion zone, releasing metal particles from it, which then deposit in the form of a thin layer on the surface of the material to be processed. Here, the high kinetic energy of the particles emerging from the cathode surface provides a good level of adhesion of the obtained nanoparticles to the base.

The physical group also includes the method of obtaining medical dressings, that is, a method in which silver nanoparticles are physically dispersed between fabric fibers as a result of a chemical reaction. To obtain antibacterial fibrous material, silver reduction from an aqueous solution of silver nitrate is used. Then, first (Lansdown, 2002) reducing or reducing agents are attached to the fibrous material, and then silver is applied to their surface (Vishnyakov, et al., 2008). The process consists of processing fibrous materials to carry out the process.

Chemical methods are also common in the production of silver nanoparticles in polymers. Here, chemical reducing agents (most often dimethylborane (Lansdown, 2002), sulfuric acid hydrazine (Heggers, 2005), sodium hypophosphite, salts of glucose, citric or tartaric acid are used to produce silver nanoparticles. Chemical methods include photochemical processes that occur under the influence of electromagnetic waves of

light. Light radiation is the largest source of renewable and clean energy, it is non-toxic and does not pollute the environment, and does not leave residues in chemical processes. Both sunlight and artificial light can be used in photochemical processes. Silver, which has a relatively high reduction potential (+0.799 V), can be reduced by photons of light. This can be used to produce silver nanoparticles.

In the article, it is proposed to use physico-chemical processes occurring in thin layers of electrolyte solutions under the influence of sunlight to obtain surface particles of silver. For the photochemical recovery of silver, it is necessary to create a photosensitive layer of semiconductor silver halide on the surface of the polymer. Using a suspension of silver halides for this purpose or directly obtaining them as a result of exchange reactions on the surface of the polymer ensures proper adhesion of particles to the surface of the polymer.

Materials and basic methods. Plates made of low-pressure polyethylene (grade PND 273-83 «PolymerInvest» Russia) and polypropylene grade RR H030 were used for the study. Light-colored polymer samples were selected to provide visual monitoring of the course of chemical and photochemical processes.

Preliminary preparation of the plates: The surface was treated with P-2000 sandpaper, roughened in a solution of $K_2Cr_2O_7$ - 6.5%, H_2SO_4 - 93.5% for 5-10 minutes at room temperature, and degreased with a solution of Na_3PO_4 - 20g/l, Na_2CO_3 - 20g/l.

Photochemical studies were carried out in a scientific laboratory room. Solar radiation were used as a source of electromagnetic waves. The radiation flux density was determined by the SM 206-SOLAR solar radiation meter and was 800-1100 W/m². In order to form a sorption layer on the polymer surface, the polymer sample was moistened by immersing it in appropriate salt solutions for several minutes. In this case, the following water-soluble salts were used for photochemical reactions: $CuCl_2$, $AgNO_3$ (chemical purity 99.9% SIBPROEKT Russia).

The structure and composition of the films were studied using an ISM-6490-LV scanning electron microscope.

The phase composition of conductive films formed during photochemical processes was determined using an EDX-7000 instrument, Shimadzu Corporation, Japan.

Results and Discussion. As a result of preliminary preparation (mechanical and etching), a rough layer is formed on the surface of polymers containing hydroxyl and carbonyl groups belonging to aldehydes, ketones and acids, as well as double bonds.

For activation, the samples are immersed in 100 g/l of $CuCl_2$ solution. The obtained samples were kept for 40 minutes at a solar radiation intensity of 1200–1400 W/m² in an area with unobstructed access to sunlight. Figure 1 shows the dynamics of the effect of sunlight flux on the reduction of copper chloride. From the dynamics of change, there is an increase in the reduction process from 10 to 40 minutes or reaches a climax. Then the density of the sunlight flux required for the reduction of copper chloride on the polymer surface is 1200–1400 W/m².

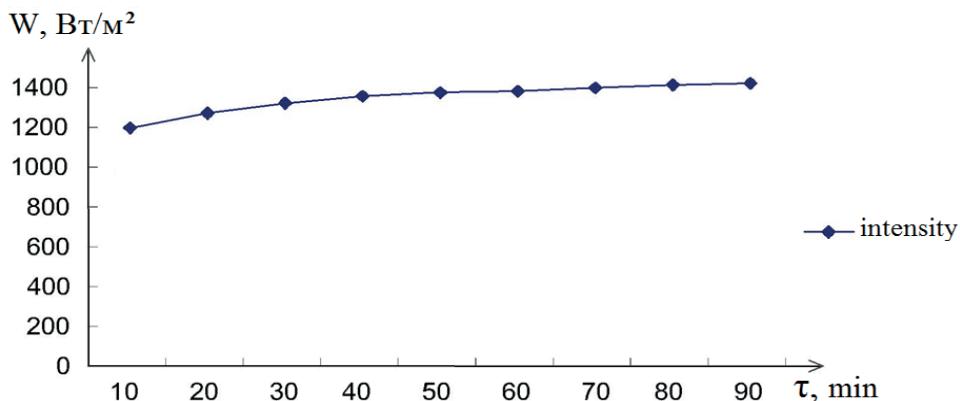
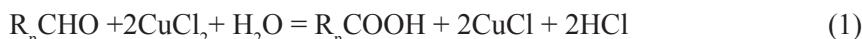


Figure 1 - Dynamics of changes in the flux of sunlight during the reduction of copper chloride.

The samples, as blackened as possible, are washed in distilled water and dried. A monovalent copper chloride with semiconductor properties is formed on the surface of the sample. After the formation of the semiconductor layer, under the influence of photons of sunlight, the photons release additional energy, and the excited electrons acquire the necessary oxidizing ability to restore monovalent copper. When copper dichloride is introduced into the sorption layer, its interaction with the aldehyde group of the polymer R_nCHO becomes possible by reaction



At the same time, a black film was formed on the surface of the sample, characteristic of finely dispersed metal particles obtained by chemical reduction. After washing the sample, active centers consisting of copper monochloride remain on the surface. This indicates that the transformation of $CuCl_2 \rightarrow CuCl$ occurs as a result of these processes. Since the aldehyde group of the polymer R_nCHO is a solid-phase associated part of the polymer, the resulting $CuCl$ forms a strong bond with the polymer surface. Monovalent copper chloride has semiconductor properties and promotes further photochemical reduction of silver.



Upon activation of the surfaces of polymer materials, the reducing ability of which is absent (polyethylene) or very low, the samples after wetting in $CuCl_2$ solution and drying in the sun were additionally treated with a 40% solution of ascorbic acid.

As a result of all these processes, the surface layer of the polymer will contain copper monochloride well bonded to the base. Subsequent impregnation of polymers with a solution of $AgNO_3$, 20 g/L leads to an exchange reaction involving copper chloride and

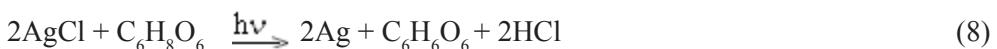
the formation of a photosensitive layer of silver chloride, on which a reduction reaction takes place under the influence of a photon of sunlight.



and under the action of the vacancy, the oxidation reaction



hence the total reaction will have the form



After washing, almost only a layer of elemental silver particles remains on the polymer surface, which will be a catalyst for the subsequent chemical deposition of metals.

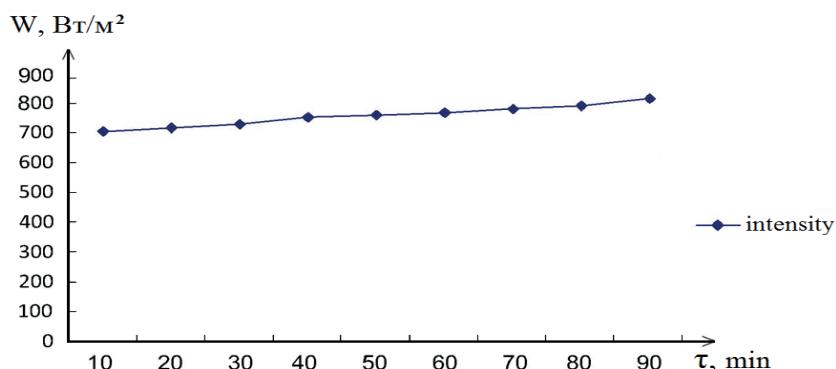


Figure 2 - Dynamics of changes in the flux of sunlight during the reduction of silver nitrate.

In Figure 2, a curve was constructed describing the effect of sunlight on the photochemical reduction of the polymer surface with silver nitrate. The dynamics of the change shows an increase in the reduction process from 10 to 40 minutes or a peak. Accordingly, the solar radiation flux density required for the reduction of silver nitrate on the polymer surface is 700–800 W/m². Silver nanoparticles formed on the polymer surface can be seen in SEM images (Fig. 3).

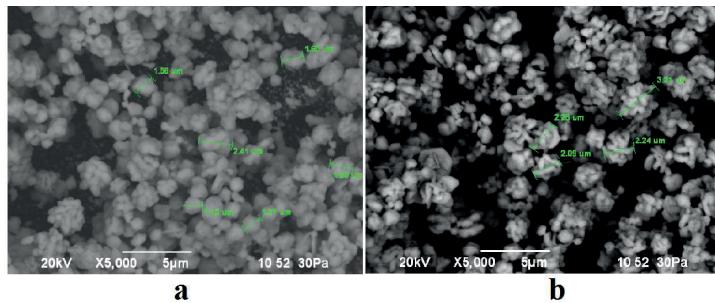


Figure 3 - SEM image of a silver film on polymer materials: a – polyethylene, b – polypropylene

To study the physico-chemical processes, polymer samples were moistened with a solution of CuCl_2 - 100 g/L. The amount of solution retained by a 2×5 cm sample was 0.06 ml. The copper content in this layer of the solution is about 25×10^{-3} g. The experiments were carried out at a solar radiation flux density of 1200-1400 W/m² and an air temperature of 25°C.

The last impregnation of the polymer with a solution of silver nitrate leads to the course of the exchange reaction involving chloride of copper and the formation of a photosensitive layer chloride of silver on which, under the action of a solar photon.

In this case, the silver particles are evenly distributed over the surface of the polymer. Some inhomogeneity in particle size seems to be due to the difference in the energy characteristics of the polymer surface. The film has an adhesion to the surface of the polymer and is well resistant to numerous creases and washings. So, after washing 5 times in a solution containing a synthetic detergent powder, the silver content did not decrease.

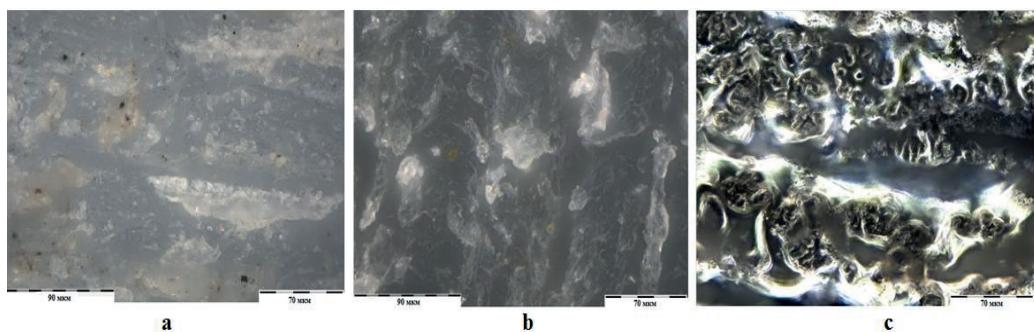


Figure 4 - Processes in the formation of silver-containing films on the surface of polymers: a – surface of the plate before activation; b - the surface of the plate after activation; c - the surface of the plate containing silver, which has electronic conductivity

Experiments made it possible to establish that silver films with electrical conductivity are formed only when the content of silver nitrate in the sorption layer on the polymer surface is 20 g/L and exposed to sunlight. By increasing the share of the second processes, it is possible to achieve the production of films with sufficient electrical conductivity.

The resistance of the surface film at a distance of 1 cm was $0,07 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$ (Abzhalov, et al., 2022).

The formation of a thin silver film is also confirmed by the data of X-ray phase analysis of the sample surface shown in Figure 5, where, in addition to the peaks of the elements that make up the initial polymer, peaks of metallic silver appear.

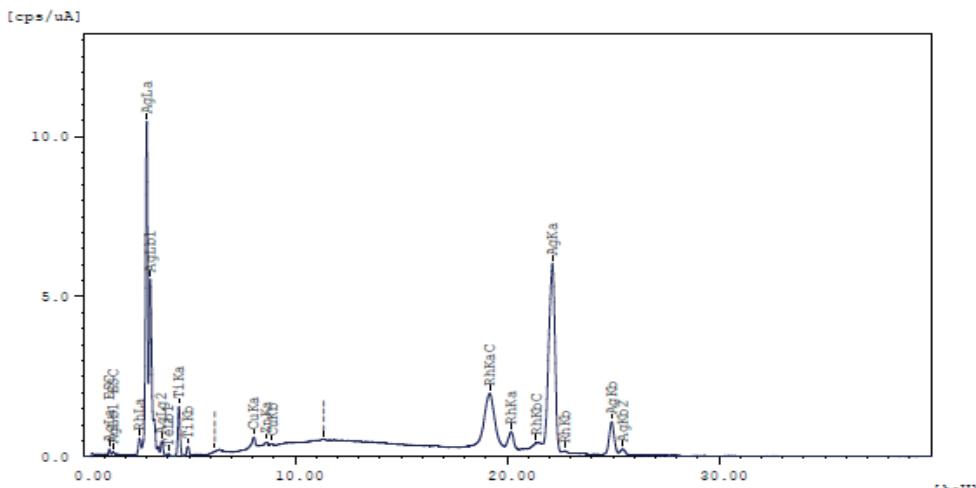


Figure 5 X-ray phase analysis of the sample surface.

The methods of mathematical processing are considered in order to determine the reliability of the results of experimental work carried out in laboratory conditions. The equation for recording the degree of blackening of samples based on a linear mathematical function is shown:

$$z = 17,7314 + 0,4802x + 0,2011y \quad (9)$$

Table 1 - dependence of the degree of blackening of a sample treated with copper (II) chloride on changes in temperature and time

Temperature, °C	Time, min	Degree of blackening, %	Temperature, °C	Time, min	Degree of blackening, %
25	40	54,3	35	40	61,5
25	50	58,1	35	50	62,3
25	60	61,0	35	60	65,2
30	40	60,1	40	40	64,4
30	50	59,2	40	50	66,5
30	60	63,1	40	60	68,3

The data in Table 1 show that as the temperature increases and the time in the process increases, the degree of blackening of samples treated with copper (II) chloride increases. A mathematically processed version of the degree of blackening of samples treated with copper (II) chloride according to these data is shown in Figure 6.

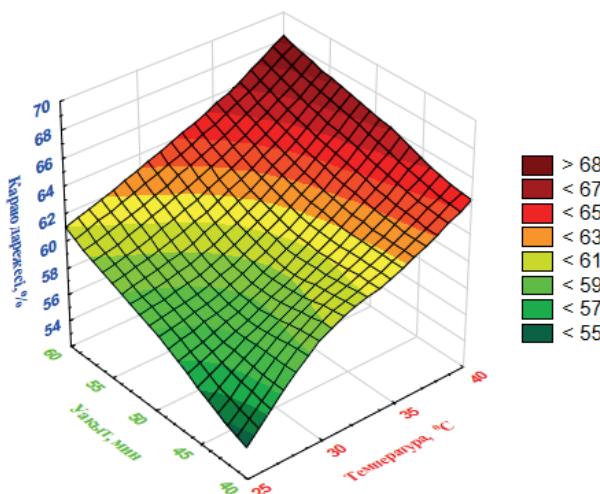


Figure 6 - Dependence of the degree of blackening of the sample treated with copper (II) chloride on temperature and time changes

According to the data in Figure 6, an increase in the degree of blackening under the influence of temperature and time during the blackening process of samples treated with copper (II) chloride is characterized by a change in the quadratic appearance of the plane from green to saturated red.

Conclusion. Studies have shown that this is the result of photochemical and chemically active processes occurring in the sorption layer on the surface of the polymer under the influence of sunlight, copper and silver films were obtained. So, as a result of the interaction of the polymer with copper (II) chloride, monovalent copper chloride is initially formed. This copper compound is a semiconductor and subsequently undergoes a photochemical reaction with ascorbic acid under the influence of photons of sunlight, which further acts as a catalyst for chemical silvering. That is, the use of thin sorption films of a silver nitrate solution as a reaction medium allows the process to be carried out under the influence of electromagnetic waves of light rays. This, firstly, facilitates the formation of crystallization centers due to the reduction of silver ions by photons. Secondly, such radiation activates ascorbic acid molecules, which facilitates the reduction of silver ions in the space between the crystallization centers. In this case, the necessary conditions are created for obtaining silver nanoparticles. Such modified polymeric materials can be used to impart antibacterial and antiviral properties to household and medical materials, as well as to protect against electromagnetic radiation.

Funding: This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, grant number AP25793971.

Литература

Abzhalov R., Sataev M., Koshkharbayeva Sh., Sagitova G., Smailov B., Azimov A., Serikbaeva B., Kolesnikova O., Fediuk R., Amran M. (2022) Studies of the Application of Electrically Conductive Composite Copper Films to Cotton Fabrics. Journal of Composites Science., 6, 349. <https://doi.org/10.3390/jcs6110349>.

Doan L., Lu Y., Karatela M., Phan V., Jeffryes C., Benson T., Wujcik E.K. (2019) Surface Modifications of Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles with Polylactic Acid-Polyethylene Glycol Diblock Copolymer and Graphene Oxide for a Protein Delivery Vehicle. Eng. Sci., 7, 10–16. <http://dx.doi.org/10.30919/es8d510>.

Doan L., Nguyen L.T., Nguyen N.T. (2023) Modifying super paramagnetic iron oxides nanoparticles for doxorubicin delivery carriers - A review. J. Nanoparticle Res., 25, 73. <http://dx.doi.org/10.1007/s11051-023-05716-3>.

Эрлых Г. (2008) Нанотехнологии как национальная идея. Химия и жизнь. – 3, – С. 32-38.

Heggers J., Goodheart R. E., Washington J., McCoy L., Carino E., Dang T., Edgar P., Maness C., Chinkes D. (2005) Therapeutic efficacy of three silver dressings in an infected animal model. J Burn Care Rehabil, 26, 53–56. <https://doi.org/10.1097/01.bcr.0000150298.57472.26>.

Крутяков Ю.А., Кудринский А.А., Оленин А.Ю., Лисичкин Г.В. (2008) Синтез и свойства наночастиц серебра: достижение и перспективы. Успехи химии. – 77 (3), 242-269. <https://doi.org/10.1070/rcc2008v077n03abeh003751>

Киселева А.Ю., Шушина И.А., Козлова О.В., Телегин Ф.Ю. (2011) Бактерицидные текстильные материалы на основе биологически активных препаратов и наносеребра. Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – Т. 12. № 2. – С. 110-112.

Lu Y., Doan L., Bafana A., Yu G., Jeffryes C., Benson T., Wei S., Wujcik E.K. Song K., Liu C., Guo J.Z., Eds. (2019) Chapter 6–Multifunctional Nanocomposite Sensors for Environmental Monitoring. In Polymer-Based Multifunctional Nanocomposites and Their Applications; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. – P. 157–174.

Lansdown A.B. (2002) Silver I. Its antibacterial properties and mechanism of action. J Wound Care; 11, 125–130. <https://doi.org/10.12968/jowc.2002.11.4.26389>.

Natsuki J. (2015) A Review of Silver Nanoparticles: Synthesis Methods, Properties and Applications. Int. J. Mater. Sci. Appl., 4, 325. <https://doi.org/10.11648/j.ijmsa.20150405.17>.

Пул Ч.П. мл., Оуэнс Ф.Дж. (2005). Нанотехнологии 5-е изд. испр., доп. Техносфера, – 334 с.

Rajapaksha P., Orrell-Trigg R., Shah D., Cheeseman S., Vu K.B., Ngo S.T., Murdoch B.J., Choudhury N.R., Yin H., Cozzolino D., et al. (2023) Broad spectrum antibacterial zinc oxide-reduced graphene oxide nanocomposite for water depollution. Mater. Today Chem., 27, 101242. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2022.101242>.

Тулеушев А.Ж., Лисицын В.Н., Тулеушев Ю.Ж., Володин В.Н., Ким С.Н. (2003) Способ формирования покрытия из драгоценных металлов и их сплавов. Патент РФ № 2214476 –С.23. – С14/16.

Vu K.B., Phung T.K., Tran T.T., Mugemana C., Giang H.N., Nhi T.L.P. (2021) Polystyrene nanoparticles prepared by nanoprecipitation - A recyclable template for fabricating hollow silica. J. Ind. Eng. Chem., 97, – P. 307–315. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.02.010>.

Вишняков А.В., Манаева Т.В., Чащин В.А., Хотимский Д.В. (2008) Способ получения антибактериального текстильного волокнистого материала. Патент РФ № 2337716 A61L 15/81

Патент РФ. № 2337716 A61L 15/81.

References

Abzhalov R., Sataev M., Koshkarbayeva Sh., Sagitova G., Smailov B., Azimov A., Serikbaeva B., Kolesnikova O., Fediuk R., Amran M. (2022) Studies of the Application of Electrically Conductive Composite Copper Films to Cotton Fabrics. Journal of Composites Science., 6, 349. <https://doi.org/10.3390/jcs6110349> (in English).

Doan L.; Lu Y.; Karatela M.; Phan V.; Jeffryes C.; Benson T.; Wujcik E.K. (2019) Surface Modifications of Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles with Polylactic Acid-Polyethylene Glycol Diblock Copolymer and Graphene Oxide for a Protein Delivery Vehicle. Eng. Sci., 7, 10–16. <http://dx.doi.org/10.30919/es8d510> (in English).

Doan L.; Nguyen L.T.; Nguyen N.T. (2023) Modifying super paramagnetic iron oxides nanoparticles for doxorubicin delivery carriers - A review. J. Nanoparticle Res., 25, 73. <http://dx.doi.org/10.1007/s11051-023-05716-3> (in English).

Jerlyh G. (2008) Nanotehnologii kak nacional'naja ideja [Nanotechnology as a national idea]. Himija i zhizn., 3, – P. 32–38. (in Russian).

Heggers J., Goodheart R.E., Washington J., McCoy L., Carino E., Dang T., Edgar P., Maness C., Chinkes D. (2005) Therapeutic efficacy of three silver dressings in an infected animal model. *J Burn Care Rehabil.*, 26, 53–56. <https://doi.org/10.1097/01.bcr.0000150298.57472.26> (in English).

Krutjakov Ju.A., Kudrinskij A.A., Olenin A.Ju., Lisichkin G.V. (2008) Sintez i svoistva nanochastic serebra: dostizhenie i perspektivy [Synthesis and properties of silver nanoparticles: achievements and prospects]. *Uspehi himiiju*, – 77, – P. 242–270. (in Russian).

Kiseleva A.Ju., Shushina I.A., Kozlova O.V., Telegin F.Ju. (2011) Baktericidnye tekstil'nye materialy na osnove biologicheski aktivnykh preparatov i nanoserebra [Bactericidal textile materials based on biologically active preparations and nanosilver]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Tehnologija legkoj promyshlennosti*, – 12, 2, –P. 110-112. (in Russian).

Lu Y., Doan L., Bafana A., Yu G., Jeffryes C., Benson T., Wei S., Wujcik E.K. Song K., Liu C., Guo J.Z., Eds. (2019) Chapter 6—Multifunctional Nanocomposite Sensors for Environmental Monitoring. In *Polymer-Based Multifunctional Nanocomposites and Their Applications*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. – P. 157–174. (in English).

Lansdown A.B. (2002) Silver I. Its antibacterial properties and mechanism of action. *J Wound Care*; 11, 125–130. <https://doi.org/10.12968/jowc.2002.11.4.26389>. (in English).

Natsuki J. (2015) A Review of Silver Nanoparticles: Synthesis Methods, Properties and Applications. *Int. J. Mater. Sci. Appl.*, 4, 325. <https://doi.org/10.11648/j.ijmsa.20150405.17>. (in English).

Pul Ch.P. ml., Oujens F.Dzh. (2005) Nanotehnologii 5-e izd. ispr., dop [Nanotechnology 5th ed. corrected, supplemented]. Tehnosfera, 334 c. (in Russian).

Rajapaksha P., Orrell-Trigg R., Shah D., Cheeseman S., Vu K.B., Ngo S.T., Murdoch B.J., Choudhury N.R., Yin H., Cozzolino D., et al. (2023) Broad spectrum antibacterial zinc oxide-reduced graphene oxide nanocomposite for water depollution. *Mater. Today Chem.*, 27, 101242. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2022.101242> . (in English). Tuleushev A.Zh., Liscyn V.N., Tuleushev Ju.Zh., Volodin V.N., Kim S.N. (2003) Sposob formirovaniya pokrytiya iz dragocennyh metallov i ih splavov [Method of forming a coating from precious metals and their alloys]. Patent RF № 2214476 C23C14/16. (in Russian).

Vu K.B., Phung T.K., Tran T.T., Mugemana C., Giang H.N., Nhi T.L.P. (2021) Polystyrene nanoparticles prepared by nanoprecipitation - A recyclable template for fabricating hollow silica. *J. Ind. Eng. Chem.*, 97, – P. 307–315. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.02.010> . (in English).

Vishnjakov A.V., Manaeva T.V., Chashhin V.A., Hotimskij D.V. (2008) Sposob poluchenija antibakterial'nogo tekstil'nogo voloknistogo materiala [Method for producing antibacterial textile fiber material]. (in Russian).

Patent RF № 2337716 A61L 15/81. (in Russian).

REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
ISSN 2224-5227

Volume 1. Number 353 (2025), 160–172

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.332>

FTAXP (МРНТИ) 61.29.39

ӨОЖ (УДК) 661.846:66.082

© K.T. Arynov¹, A.P. Auyeshov², Ch.Z. Yeskibayeva^{2*}, A.K. Dikanbayeva²,
A.M. Ibrayeva², 2025.

¹Institute of Innovative Research and Technology, Almaty, Kazakhstan;

²South Kazakhstan University named after M. Auezov, Shymkent, Kazakhstan.

E - mail: dikanbaeva86@mail.ru

X-RAY PHASE AND THERMOANALYTICAL STUDY OF NEMALITE FROM THE ZHITIKARINSKOE DEPOSIT (KAZAKHSTAN)

Arynov Kazhymuhan Toktiyarovich – Senior researcher at the Institute of Innovative Research and Technology, Almaty, Kazakhstan, E-mail: i_technology@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1440-8248>;

Auyeshov Abdrazak Pernebaevich – South Kazakhstan University named after M. Auezov, Head of the SRL “Applied Chemistry”, Shymkent, Kazakhstan, E-mail: centersapa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3504-9117>;

Yeskibayeva Chaizada Zulpuharovna – South Kazakhstan University named after M. Auezov, chief specialist of the SRL “Applied Chemistry”, Shymkent, Kazakhstan, E-mail: yeskibayeva@internet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8049-8851>;

Dikanbayeva Aizhan Kosybaevna – South Kazakhstan University named after M. Auezov, employee of the SRL “Applied Chemistry” Shymkent, Kazakhstan, E-mail: dikanbaeva86@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4982-1566>;

Ibrayeva Aitkul Makhatovna – South Kazakhstan University named after M. Auezov, chief specialist of the SRL “Applied Chemistry”, Shymkent, Kazakhstan, E-mail: aytkul.ibraeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0981-0117>.

Abstract. X-ray and thermal analysis studies of nemalite-serpentinite mineral of Zhitikarinskoye deposit (Kostanay region, Kazakhstan), which is mined as a by-product during development of chrysotile ore, were conducted in order to determine its area of application and utilization.

It is shown that the natural nemalite-serpentinite mineral of this deposit contains black, grey and white inclusions, which differ in the content of brucite (nemalite) and chrysotile (serpentinite) components of the rock.

X-ray phase and thermal analysis studies have shown that chrysotile (serpentinite) predominates in darker inclusions, the lighter the rock, the more brucite it contains. The average nemalite-serpentinite rock of the Zhitikarinskoye deposit contains, in wt. %: 40-43 - brucite (nemalite), 40-43 - serpentinite and 10-19 - iron (II) hydroxide.

It is noted that the thermoanalytical method, with the provision of standard operating procedures, can be used to carry out express control and preliminary assessment of

nemalite-containing deposits with respect to the content of the main constituent minerals in them.

Keywords: nemalite, serpentinite, brucite, nemalite-containing chrysotile asbestos, thermal analysis.

К. Арынов¹, А. Ауешов², Ч. Ескибаева^{2*}, А. Диканбаева², А. Ибраева², 2025.

²Инновациялық зерттеулер және технология институты, Алматы, Қазақстан;

¹М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан.

E - mail: dikanbaeva86@mail.ru

ЖІТІҚАРА КЕНОРНЫНЫҢ НЕМАЛИТҚҰРАМДАС ХРИЗОТИЛ-АСБЕСТІН РЕНТГЕНОФАЗАЛЫҚ ЖӘНЕ ТЕРМОАНАЛИТИКАЛЫҚ ЗЕРТТЕУ

Арынов Кажымукан Токтиярович – Инновациялық зерттеулер және технология институтының бас ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан, E-mail: i_technology@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1440-8248>;

Ауешов Абдразах Пернебаевич – М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, «Қолданбалы химия» F33 менгерушісі, Шымкент, Қазақстан, E-mail: centersapa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3504-9117>;

Ескибаева Чайзада Зулпухаровна – М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, «Қолданбалы химия» F33 бас маманы, Шымкент, Қазақстан, E-mail: yeskibayeva@internet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8049-8885>;

Диканбаева Айжан Косыбаевна – М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, «Қолданбалы химия» F33 қызметкері, Шымкент, Қазақстан, E-mail: dikanbaeva86@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4982-1566>;

Ибраева Айтқул Махатовна – М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, «Қолданбалы химия» F33 бас маманы, Шымкент, Қазақстан, E-mail: aytkul.ibraeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0981-0117>.

Аннотация. Жітіқара кенорнында (Қазақстан, Қостанай облысы) өндірілетін хризотилді шикізат кенін өндіру барысында жолай, қосымша ретінде тау жынысынан бөлініп алынатын немалит-серпентинит минералының қолдану және кәдеге жарату мақсатында оларға рентгенографикалық және термоаналитикалық зерттеулері жүргізілді.

Зерттеуде, аталған кенорнының тау жынысынан бөлініп алынған немалитқұрамдас хризотил-асбест құрамы қара, сұр және ақ түстес қатты минералдардан тұратыны және олар негізінен бруситтік (немалит) және серпентиниттік (хризотилдік) құрамдас бөліктерінің арақатынасы бойынша бір-бірінен ерекшелінетін анықталған. Немалитқұрамдас хризотил-асбест құрамы ренгенографалық, SEM-талдау және термиялық талдау әдістерімен зерттеліп, орташа сұрыпталған немалитқұрамдас хризотил-асбесттің, сонымен қатар олардың құрамында кездесетін қара, сұр және ақ бөліктерінің минералдық құрамдары анықталды. Рентгендік дифракция және термоаналитикалық зерттеулер тау жыныстарында қара түсті минералдар көп болса, онда серпентиниттік (хризотилдік) компонент басым болатындығы, сұр және ақ құрамдас минералдарда

бруситтік (немалит) құрамдас компонентінің көп болатындығы көрсетілді. Зерттеу нәтижелері орташа сұрыпталған немалитқұрамдас хризотил-асбестті тау жынысы массалық %-бен: 40-43 – брусит (немалит), 40-43 – серпентинит және 10-19 – темір (II) гидроксидінен тұратындығы анықталды.

Жұмыста, зерттеуде қолданылған термоаналитикалық әдісті, практикада кенорындарына талдау жүргізгенде қолданылатын шекара аясында және қалыпты стандартты жағдайларда жүргізілетін талаптар сақталғанда, немалитқұрамдас кен орындарына алдын-ала бағалау мен экспрессивті бақылау жұмыстарын жүргізуде қолдануға болатындығы атап көрсетілді.

Тұйін сөздер: немалит, серпентинит, брусит, немалитқұрамдас хризотил-асбест, термоаналитикалық талдау.

© К.Т. Арынов¹, А.П. Ауешов², Ч.З. Ескибаева^{2*}, А.К. Диканбаева²,
А.М. Ибраева², 2025.

¹Институт инновационных исследований и технологий, Алматы, Казахстан;

²Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан.

E - mail: dikanbaeva86@mail.ru

РЕНТГЕНОФАЗОВОЕ И ТЕРМОАНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕМАЛИТА ЖИТИКАРИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (КАЗАХСТАН)

Арынов Кажымукан Токтиярович – старший научный сотрудник института инновационных исследований и технологий, Алматы, Казахстан, E-mail: i_technology@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1440-8248>;

Ауешов Абдразах Пернебаевич – Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, заведующий НИЛ «Прикладная химия», Шымкент, Казахстан, E-mail: centersapa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3504-9117>;

Ескибаева Чайзада Зулпухаровна – Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, главный специалист НИЛ «Прикладная химия», Шымкент, Казахстан, E-mail: yeskibayeva@internet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8049-8851>;

Диканбаева Айжан Косыбаевна – Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, сотрудник НИЛ «Прикладная химия», Шымкент, Казахстан, E-mail: dikanbaeva86@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9859-5545>;

Ибраева Айткул Махатовна – Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, главный специалист НИЛ «Прикладная химия», Шымкент, Казахстан, E-mail: aytkul.ibraeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0981-0117>.

Аннотация. Проведены рентгенографические и термоаналитические исследования немалит-серпентинитового минерала Житикаринского месторождения (Костанайская область, Казахстан), попутно добываемого при разработке хризотиловой руды, с целью определения его области применения и способов утилизации.

Показано, что природный немалит-серпентинит данного месторождения содержит черные, серые и белые включения, различающиеся по содержанию бруситовых (немалит) и хризотиловых (серпентинит) компонентов горной породы. На основе рентгенофазового и термоаналитического исследований установлено,

что в более темных включениях преобладает хризотил (серпентинит), а по мере осветления породы увеличивается содержание брусита. Усредненная немалит-серпентинитовая горная порода Житикаринского месторождения содержит (в мас.%): 40-43 – брусит (немалит), 40-43 – серпентинит и 10-19 – гидроксид железа (II).

Отмечено, что термоаналитический метод при соблюдении стандартных операционных процедур может быть использован для экспрессного контроля и предварительной оценки немалитсодержащих месторождений по содержанию в них основных минералов.

Ключевые слова: немалит, серпентинит, брусит, немалитсодержащий хризотил-асбест, термоаналитический анализ.

Kіріспе. Немалит немесе немалитқұрамдас хризотил-асбест (НХА) – Жітікара кен орындағы хризотил-асбест кенін өндірудің қосарланған жанама өнімі болып табылады (Джафаров, и др., 2020). Құрамындағы хризотилдің болуына байланысты бұл өнім қазіргі уақытта пайдаланымайды және қоршаган ортаға экологиялық қауіпті материал ретінде арнайы белгіленген жерлерде сақталады (Раздел охраны окружающей среды к проекту, 2021). Сонымен қатар, Қазақстанда немалитқұрамдас табиғи шикізаттың ірі кен орындары бар, мысалы, бір ғана Жезқазган-Ұлытау аймағында 8 кен орны ашылған, ең ірісі - Ешкіөлмес кен орны (Бейсеев, 1971). Мұнда немалит-хризотил шикізатының есептелген қоры - 20 млн тоннаны шамалайды. Осы өңірдегі барлық кен орындарының болжамды ресурстары шамамен 90-120 млн тонна (Beiseev, et al., 2005). Корлары бойынша бұл кен орындары өнеркәсіптік санаттарға жатпайды, яғни әлі игерілмеген. Жүргізілген маркетингтік зерттеулер әртүрлі салаларда оларға деген қажеттілік 300 мың тоннаға жуық екенін көрсетеді.

Немалитқұрамдас хризотил-асбесттің ерекшеліктерінің бастысы ол оның құрамындағы магний мен кремнийдің көптігі болып табылады. Сондықтан да олар ауылшаруашылығында магний мен кремнийдің және басқа да микроэлементтермен қатар тағамдық элементтердің көзі ретінде қолдану мүмкіндігі бар. Мысалы, оларды қышқылдық топырақтардың РН-ын жоғарылатуда, оның құрамындағы бруситтің маңызы ұлken (Błońska, et al., 2016; Błońska, et al., 2017; Ranawat, et al., 2009).

Әзірge, немалитқұрамдас хризотил-асбестті, іс жүзінде әртүрлі инженерлік құрылымдарда - өрттен қорғауға, машина жасау және құрылys өнеркәсібінің көптеген салаларында қолдануға болатын ыстыққа және отқа төзімді жабындар мен материалдарды өндіруде пайдалану мүмкіндігі бар екені анықталған (Серебренников, и др., 2023). Мұндай жабындар мен материалдарға өнеркәсіптердің қажеттілігі жүздеген мың тоннамен өлшенеді. Бұл минералдың ыстыққа және отқа төзімді қасиеттері негізінен әртүрлі формаларда кездесетін магнийқұрамдас (бруситтік, серпентиниттік) компоненттердің термиялық қасиеттермен, сондай-ақ олардың құрамындағы мөлшерлік қатынасымен анықталады. Сондықтан оның қолдану аясын анықтау үшін НХА-тің термиялық қасиеттерін егжей-тегжейлі

зерттеудің маңызы зор. Немалиттегі магний мөлшері нақты кен орны мен геологиялық формацияның ерекшеліктеріне байланысты өзгеруі мүмкін. Магний бойынша құрамы туралы нақты ақпарат алу үшін олардың НХА (әртүрлі кен орындарында) құрамында болу формалары және олардың арақатынасы, оларды қолданудың нақты аймағын анықтау үшін, яғни белгілі бір кен орнының НХА құрамы мен термиялық қасиеттері туралы ғылыми деректер қажет.

Минералды өнімдер сапасының болжамдық критерийлері ретінде фазалық өзгерістерді тіркеу, физикалық-химиялық, құрылымдық және технологиялық сипаттамаларды салыстырмалы бағалау қажет болады. Осы бағытта, әртүрлі шикізаттың сапасын болжау және экспресс-бақылау мәселелерін шешуде рентгендік фазалық талдаумен бірге үйлестірілген термоаналитикалық зерттеулер жемісті қолданылады (Метод.рекомендации НСОММИ №10, 1987). Рентгенофазалық анықталған қоспалардың бастапқы құрамдас бөліктерінің термиялық массалық жоғалту мәндерін сипаттамалық мәндер ретінде пайдалана отырып, теориялық турде әрбір зерттелетін қоспа үшін массалық жоғалтудан күтілетін мәндерін есептеуге және белгісіз құрамды қоспадағы компоненттердің қатынасын есептеуге болады (Шляпкина, 2005)

НХА-ның термиялық қасиеті оны өндөу және кәдеге жарату кезінде де маңызды, өйткені ол қоршаған ортаға және денсаулыққа қауіпті хризотилдік компоненттердің тигізетін әсерін азайту үшін ыдыратуға немесе түрлендіріп, одан әрі өндөуге болатын жағдайларды анықтайды.

Жұмыстың мақсаты – Жітіқара кен орнындағы (Қостанай облысы, Қазақстан) хризотил кенин өндіру барысында ілеспе тау жыныстары (НХА) қайтаөндөу мүмкіндіктерін немесе қолдану аясын анықтау үшін бастапқы химиялық-минерологиялық құрамы мен термиялық өзгерістерін зерттеу болып табылады. Зерттеу нәтижелері оны қолдану немесе кәдеге жарату саласын анықтауда пайдаланылуы мүмкін.

Материалдар және зерттеу әдістері. *Материалдар.* Жітіқара кен орнында хризотил кенин өндірудің ілеспе енімі болып табылатын, «Қостанай минералдары» АҚ-ы ұсынған немалитқұрамдас хризотил асбестінің үлгілері.

Немалитқұрамдас хризотил-асбестің үлгілерінің сипаттамалары. Құрамында тас-қырышықты немалит құрамдас хризотил асбестінің (НХА) үлгілері, түстерін - қара және сұр, ақ түрлерінде сипаттауға болады. Сырты қара НХА - тас тәрізді, қырышық тастар сияқты, кейбір тастар жылтыр, сұр және ақ НХА - ұзын жіпше тәріздес, көлденең қимасы 0,5-3,0 см және ұзындығы 2-7 см бір бағыттағы қабатталған талшықтар тәрізді ағаш жонқалар сияқты.

Ұзындығы бойынша жіпшелердің беріктігі көлденең құмаға қарағанда (қолмен үзілуі мүмкін) әлдекайда күшті. Өлшемдері ($l=5-10$ см, $d=2,5$ см, $h=1-2$ см), НХА түсті бөліктері магниттік әсерге ұшырайды, қара НХА (қашықтықта) - күштірек, сұр НХА (беттескен) - орташа, ақ НХА – магнит өрістеріне әсер бермейді. Зерттеуде сұрыпталған НХА-тің 4 түрі: сұрыпталған орташа құрамдағы, сұр, ақ және қара түстеріндегі үлгілері қолданылды.

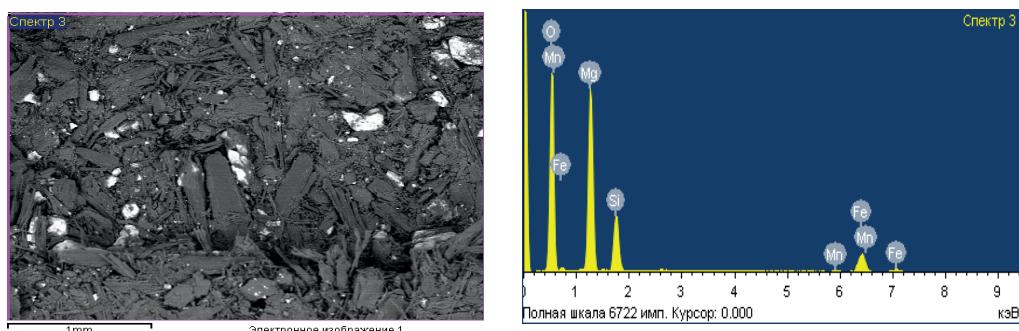
Әдістер. Үлгілердің термиялық талдауы Q-DERIVATOGRAPH (System: F.

Paulik, J. Paulik, L. Erdey) құралының көмегімен жүргізілді. Пешті қыздырмас бұрын кеңістіктің ауасы сорылып алып (~92% алынған көлем деңгейі), содан кейін 5 минут бойы инертті газбен (азот) үрленді, жылыту 10°C/мин жылдамдықпен жүргізілді. Q-DERIVATOGRAPH көмегімен алынған нәтижелер NETZSCH Protues бағдарламалық құралы арқылы өндедлі.

Улгілердің рентгендік дифракциялық зерттеулері D8Advance (Bruker) дифрактометрінде, Cu-Kα, тұтік кернеуі 40 кВ, ток 40 мА жағдайларында жүргізілді. Алынған дифракция зандылықтарын өндеду және жазықаралық қашықтықтарды есептеу EVA бағдарламалық құралын қолдану арқылы жүзеге асырылды. Улгіні интерпретациялау және фазалық анықтау PDF-2 (JCD) ұнтақ дифрактометриялық деректер базасын пайдалану арқылы, іздеу және сәйкестендіру Search/match бағдарламасы арқылы жүзеге асырылды.

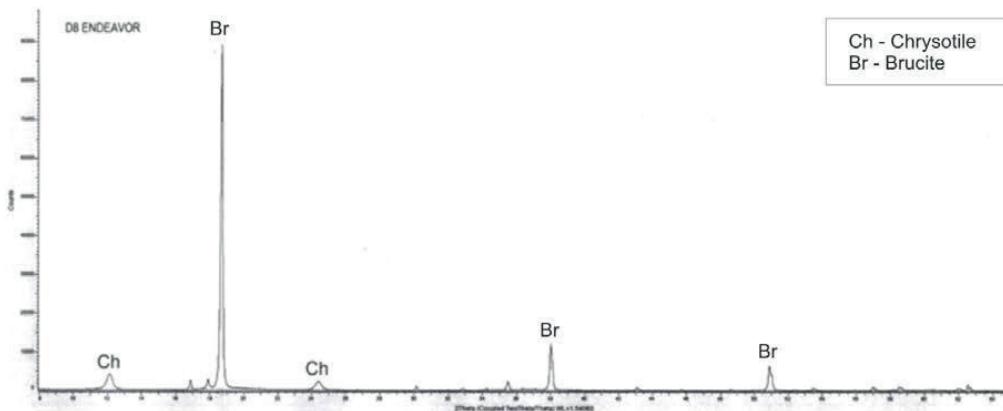
Улгілердің химиялық талдаулары және (SEM талдауы) JSM-6490LV, JEOL (Жапония) құрылғысында, INCA Energy 350 энергия-дисперсиялық микроанализатор жүйелерімен толықтырылған кондырығыда жүргізіліп анықталды.

Нәтижелер мен талқылау. 1-суретте бастапқы сұрыпталған НХА-нің орташа құрамының SEM талдауы көрсетілген, НХА құрамы біртекті емес және негізінен Mg, Si, Fe, оттегі элементтерінен тұрады.



Сурет 1 – Бастапқы сұрыпталған (НХА) орташа құрамының SEM- талдауы

Сондықтан, НХА сұрыпталған орташа құрамына рентгендік фазалық талдау жүргізілді. Алынған дифрактограмма бойынша (2-сурет) НХА құрамында брусит (немалит), хризотил (серпентинит), феррит-магнезит $[Mg_{0,3}Fe_{0,7}(Mg_{0,73}Fe_{1,27})O_4]$ бар. Рентгендік фазалық жартылай сандық талдаудың салыстырмалы қателігі 20% болғандықтан, НХА-тегі минералдық компоненттерінің дәлірек мөлшерлік құрамын алу үшін элементтік талдау жүргізілді.



Сурет 2 – Бастапқы НХА-тің орташа құрамындағы дифрактограммасы.

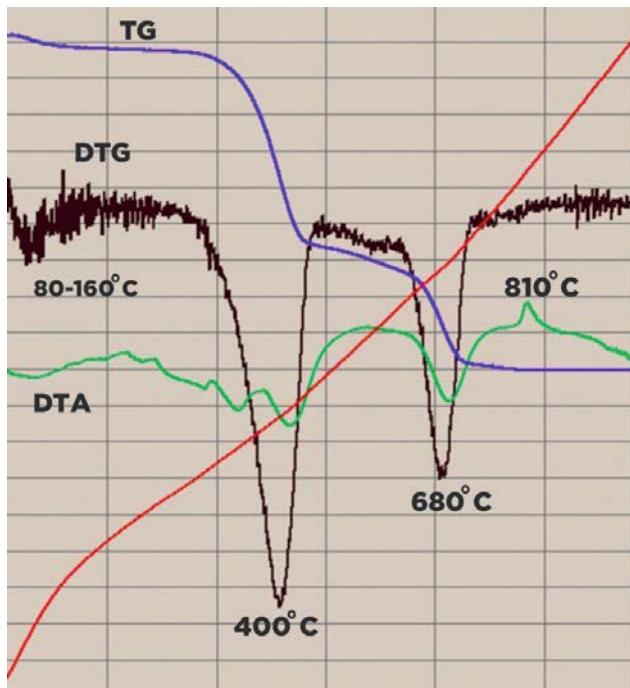
НХА құрамындағы хризотилдің $[Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8]$ (серпентинит) массалық мөлшері химиялық талдаумен анықталған кремний мөлшеріне негізделген есептеулермен анықталды, себебі НХА құрамында рентгенофазалық талдаумен анықталған басқа фазалардың құрамында кремний жоқ. Ал $Fe(OH)_2$ бастапқы НХА құрамында аморфты күйде болғандықтан оның шағылу сипаттамалық шындары (рефлекстері) (2-сурет) шықпайды, олар тек НХА-ті 450°C дейін қыздырғандаған дифрактограммада белгіленіп шығатын болғандықтан, оның мөлшері химиялық жолмен анықталған темір (Fe^{2+}) мөлшерімен анықталды. Брусит (немалит) мөлшері [100% – (серпентинит, % + $Fe(OH)_2$, %)] айырмашылығынан есептелді. НХА-тің сұрыпталған орташа минералологиялық құрамы 5 түрлі үлгінің орташа құрамының химиялық талдау нәтижелерінен алынды. Алынған нәтижелер 1-кестеде берілген.

Кесте 1 – НХА-тің сұрыпталған үлгісінің химиялық және минералологиялық құрамы

№	Химиялық құрамы, мас. %				Минералологиялық құрамы, мас. %		
	O	Mg	Si	Fe	Серпентинит $Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$	Темір гидроксиді $Fe(OH)_2$	Брусит $Mg(OH)_2$
1	48,95	30,4	9,63	10,7	9,6	17,2	35,5
2	46,46	31,6	6,26	15,0	30,8	24,1	45,0
3	49,93	29,5	10,03	7,4	49,4	11,8	39,0
4	49,85	30	9,48	8,6	46,7	13,8	40,0
5	45,0	29	5,33	17,7	26,3	28,5	45,0
орт. %	48,5	30,2	8,15	12,3	40,0	19,0	41,0

НХА-тің минералологиялық құрамын есептеу мен зерттеу SEM-талдаумен анықталған, орта есеппен, мас.%: O – 48,5; Mg – 30,2; Fe – 12,3; Mn – 0,33 нәтижелер бойынша жүргізілді. Осы әдіспен табылған НХА-тің орташа минералологиялық құрамы: 41,0% – бруситтен (немалит), 40,0% – хризотил (серпентинит) және 19,0% - темірдің (II) гидроксиді (аморфты күйде) болды.

HXA-ті термоаналитикалық зерттеу. Термоаналитикалық зерттеу 20-900°C температура аралығында жүргізілді. НХА-тің орташа құрамы, сондай-ақ НХА-тің құрамындағы тау жыныстарын сұрыптау арқылы сыртқы келбетімен таңдалған сұр, ақ және қара түзілімдердің үлгілері зерттелді. Орташа алынған НХА-тің дериватограммасына сәйкес (3-сурет), DTA қисықтарында 80-160°C температуралар аралығында көптеген шиыршығы бар шағын ұзартылған шындармен ерекшеленеді.



Сурет 3 – Сұрыпталған орташа немалитқұрамдас хризотил-асбесттің дериватограммасы

80°C-160°C аралығындағы эндотермиялық шыңның басталуы НХА-тің адсорбциялық суының жоғалуымен байланысты. Содан кейінгі кезеңде, темір (II) гидроксидінің ыдырауының эндотермиялық әсері байқалады. Темір (II) гидроксидінің термиялық ыдырауы екі кезеңде жүреді. Бірінші кезеңде, 30-70°C температуралар аралығында темір гидроксиді адсорбциялық суды жоғалтады, екінші кезеңде, 150-200°C температурада FeO және H₂O түзіп ыдырайды. 400°C температурада НХА эндотермиялық әсерден ішкі құрылымының өзгеруінен, брусситтің (немалиттің) дегидратациясы, ал 680°C-де серпентиниттің (құрылымы бұзылуып) эндотермиялық сузыдануы жүреді.

810°C-дегі эндотермиялық әсер, жалпы формуласы Mg₆Si₄O₁₀(OH)₈ серпентинит тобына жататын минералдың немесе хризотилдің кристаллдық торының бұзылуынан кейінгі форстериттің кристалдануымен байланысты.

НХА құрамында табылған минералды компоненттердің арақатынасын

анықтау үшін, НХА құрамдастарының түсіне сәйкес сұрыпталған орташа НХА, қара, сұр және ақ үлгілеріне (4-сурет) термоаналитикалық зерттеулер жүргізілді. Олардың дериватограммалары және олардан өлшенген тәменгі шындардың ауданы бойынша есептеліп табылған, үлгілердің жалпы массасының жоғалтуы 5-7 суреттерде және 2-кестеде көтірілген.



а)



б)



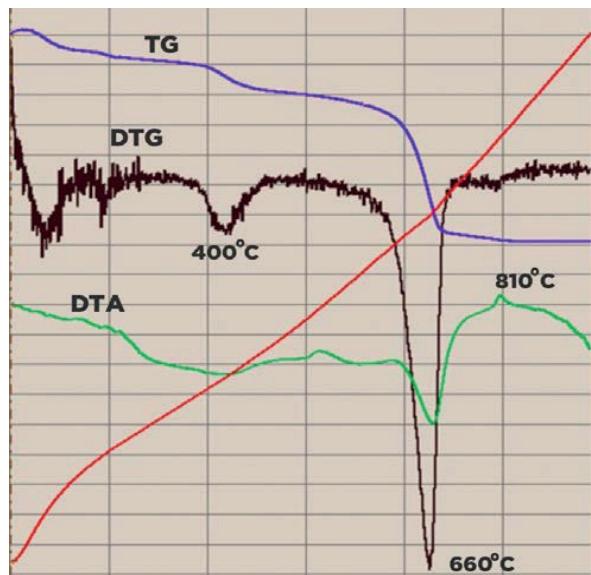
в)



г)

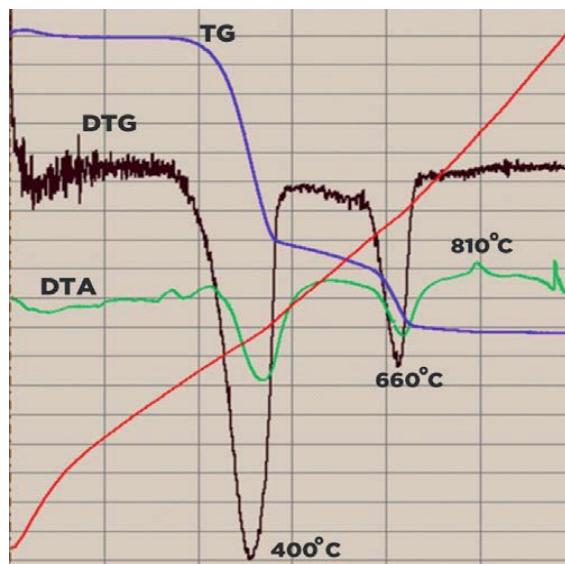
Сурет 4 – Жітікара кенорнының немалитқұрамdas хризотил-асбесті: а – сұрыпталған орташа НХА; б – сұрыпталған қара НХА; в – сұрыпталған сұр НХА; г – сұрыпталған ақ НХА

Қара түсті (НХА) (сурет-4, б) компонент, өзінің термиялық қасиеті бойынша (сурет-5) және тәменгі шындары ауданының мәні (2-кесте) бойынша таза (серпентинит) хризотил-асбестіне өте ұқсас. Хризотилдің көрсеткіштерімен салыстырылған үш үлгінің дериватограммасы бойынша, қара түсті НХА 90-100°C аймағында жоғалған адсорбциялық судың массалық шығыны 5,82-6,0%, 370-430°C аймағында брусситтің дегидратациясына байланысты массалық жоғалтуы салыстырмалы түрде аз – 12%, ал 660-680°C, серпентиниттің дегидратациясына байланысты массалық жоғалтуы жоғары – 79,38% құрайды.



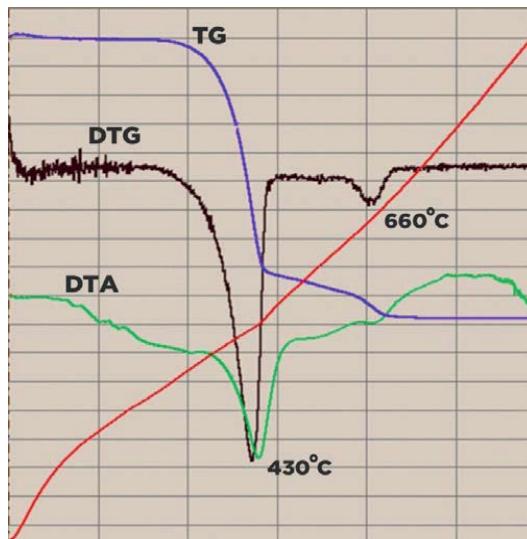
Сурет 5 – Қара түсті НХА-тің дериватограммасы

Сұр түсте (сурет-6), адсорбциялық судың кебуіне қатысты массалық жоғалтуы төмен - 3-4%, 370-430°C аймағында брусситтің массалық жоғалтуы салыстырмалы түрде жоғары - 76%, хризотилмен (серпентинитпен) салыстырғанда 4,8 еседен жоғары, 660-680°C кезінде массалық жоғалту - 21% құрайды. Термиялық ыдырау сипаты бойынша сұр түсті НХА, брусситтік компоненттерден төменгі шындар ауданы бойынша табылған жалпы массалық жоғалту (22,6%) мәндері түрғысынан басымдырақ.



Сурет 6 – Сұр түсті НХА-тің дериватограммасы

Ал, ақ түстө (сурет-7), адсорбциялық судың жоғалуы төмен – 3%, 370-430°C аймағында бруситтік массасың жоғалуы салыстырмалы түрде көп жоғары - 90%, керінше, 660-680°C аралығында серпентинит массасың жоғалуы төмен – 7,0%. Термиялық ыдыраудың сипаттары бойынша ақ HXA төменгі шындар ауданы мәндері бойынша бруситке жақын.



Сурет 7 – Ақ түсті HXA-тің дериватограммасы

Қарастырылып отырған температуралық диапазондарда HXA-ті құрайтын дериватограммалардың сызбаларынан, үлгілердің түріне (түсіне) байланысты олардың төменгі шың аудандары және олардың арақатынастары өзгешеліктерін аңғаруга болады. Қара, сұр, ақ түсті HXA-тің құрамында болатын түзілімдердің және сұрыпталған орташа құрамдағы HXA-тің салыстыру үшін берілген таза серпентинит (хризотилдің), олардың дериватограммаларындағы үш температуралық аймақтарындағы төменгі шың аудандарының өзгеруінің жалпы салмақтың жоғалуы (TGA) бойынша салыстырмалы талдауы 2-кестеде берілген.

Кесте 2 – Сұрыпталған орташа құрамдағы HXA пен оның құрамындағы түрлі-түсті түзілімдерінің (компоненттері) дериватограммаларындағы төменгі шындар аудандарының мәндері мен олардағы жалпы салмақтың жоғалуының пайыздық мөлшері.

№	Атауы	Төменгі шындар ауданы, см ² (TGA бойынша)			Жалпы салмақтың жоғалуы, %
		80-220°C	370-430°C	660-670°C	
1	Хризотил таза (серпентинит)	9,0	16,0	75,0	15,0
2	Сұрыпталған орташа құрамдағы HXA	7,54	63,7	28,81	20,0
3	Қара түсті HXA	5,82-6,0	12,10	79,38	15,4
4	Сұр түсті HXA	3,0	76,0	21,0	22,6
5	Ақ түсті HXA	3,0	90,0	7,0	28,0

Сұрыпталған орташа құрамдағы НХА-те адсорбциялық су (~7,5%), таза серпентинит(хризотил)пенқаратұсті НХА-тікогалған судың мәндері салыстырмалы түрде жақын деуге болады (~9-15% - 80-220°C). Бірақ, брусит компонентінің (370-430°C) жалпы салмақ жоғалтудағы мәні хризотилден төрт есе жоғары, 60-63,7% құрайды. Орташа құрамдағы НХА-те бруситтік (370-430°C) және хризотилдік (660-670°C) компоненттерінің жалпы массалық жоғалуға (дегидратация нәтижесінде) қосатын үлес мәндерін салыстыру, олардың шамамен 2,2:1 қатынасында екенін көрсетеді. НХА кенінің орташа құрамының дериватограммасын талдау ондағы магнийдің басым бөлігі брусит түрінде болатынын және осыған байланысты одан НХА құрамындағы жалпы судың 63,7% бөлінетінін көрсетеді. Яғни, НХА-тің құрамындағы магнийдің басым бөлігі брусит – $Mg(OH)_2$ түрінде болады, бұл НХА-тің орташа құрамында анықталған оның химиялық және минералологиялық құрамдарының (кесте - 1) нәтижелерімен расталады.

НХА-ті зерттеу нәтижелері Жітіқара кенорнының және оның құрамында жиі кездесетін түзілімдердің (түсі бойынша) компоненттерінің (қара, сұр және ак) термиялық (TGA) қисықтарына талдау және 2-кестеден термиялық өндөу кезінде зерттелген үлгілердің жалпы массалық жоғалуы, НХА негұрлым ашық болса, ондағы магний, бруситтік түрдегі $Mg(OH)_2$ соғұрлым жоғары, серпентиниттік (хризотил) құрылымдағы магнийдің мөлшері аз болатындығын көрсетеді.

Қорытынды. SEM және рентгенографикалық талдаулардың нәтижелері бойынша Жітіқара кен орнының хризотил-асбест кенінен бөлініп алынатын НХА-тің орташа құрамы: 40-43% брусит (немалит), 40-43% серпентинит және 10-19% темір (II) гидроксидінен тұрады.

НХА-тің термоаналитикалық талдауының нәтижелері, бұл әдіспен әртүрлі қолдану мақсатына сәйкес немалит кендерін таңдаганда, НХА құрамындағы негізгі компоненттерінің (брусит пен серпентинит) қатынасын анықтауға болатындығын көрсетілді. Құнгірт түсті НХА-тен тұратын жыныстарда (кендерде) серпентиниттер басым, ал ашық түсті жыныстарда брусит басымырақ.

Термоаналитикалық әдісті, рентгендік фазалық талдаумен үйлестіре отырып, белгілі бір НХА кен орнының сапалық және сандық құрамын бағамдауға, ары қарай НХА-тің қолдану саласын анықтау үшін қолдануға болатындығы анықталды.

Бұл зерттеу ҚР ҒЖБМ ФК БНҚ (BR21882242) қаржылық қолдауымен жүзеге асырылды.

Әдебиеттер

Джафаров Н.Н., Отлыгина В.А. (2020). Вредные примеси в волокне хризотил-асбеста. Горно-геологический журнал. – 2020. – №.4. – С. 4-8.

Раздел охраны окружающей среды к проекту «План горных работ Житикаринского месторождения хризотил-асбеста глубиной 390 м на 2021-2024 гг. АО «Костанайские минералы», г. Костанай, 2021. – 196 с.

Бейсеев О.Б. (1971). Экспериментальные химико-минералогическое изучение хризотил-асбеста Ешиколмесского месторождения с целью очистки и облагораживания. Экспериментальное исследование минералобразования. – Наука, 1971. – С. 116-123.

Beiseev O.B., Beiseev A.O., Shakirova G.S. (2005). New unconventional types of natural mineral fillers in Kazakhstan and the prospects for their use in creating multi-purpose composite materials. Scientific-

Practical Journal "Science and Innovations" NAS of Ukraine. – 2005. – Vol.1. – No.1. – Pp. 116-123. <https://doi.org/10.15407/scin1.01.116>

Błońska E., Januszek K., Małek S., Wanic T. (2016). Effects of serpentinite fertilizer on the chemical properties and enzyme activity of young spruce soils. International Agrophysics. – 2016. – №30(4). – P. 401-414.

Błońska E., Pająk M., Małek S., Januszek K. (2017). Effects of Serpentinite Fertilization with N, Pand K Fertilizers on Soil Properties and Needle Chemistry. Communications in Soil Science and Plant Analysis. – 2017. – Vol.48. – №6. – P. 692-704.

Ranawat P., Kumar K.M., Sharma N.K. (2009). A process for making slow-releasephosphate fertilizer from low-grade rock phosphate and siliceous tailings by fusion with serpentinite. Research Communications Current Science. – Vol.96. – №6. – 25 March 2009. – P.843-848.

Серебренников А.И., Ковалев Н.В., Орлов А.А., Аверина Г.Ф., Кошев В.А. (2023). Исследование стойкости хлормагнезиальных композитов к насыщенным сульфатам средам. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Строительство и архитектура» - 2023. Т.23, №1. С.28-36. . <https://doi.org/10.14529/build230104>

Определение разновидностей хризотил-асбеста методами термического анализа. Метод. рекомендации НСОММИ №10. – М.: ВИМС, 1987. – 35 с.

Шляпкина Е.Н. Способ определения долевого соотношения компонентов в полиминеральных глинистых смесях. Е.Н. Шляпкина и др. Заявка №2005105472, приоритет 28.02.05.

References

Zhafarov N.N., Otlygina V.A. (2020) Vrednye primesi v volokne hrizotil-asbesta [Harmful impurities in chrysotile asbestos fiber]. Gorno-geologicheskij zhurnal. – №4. – S. 4-8. (in Russian)

Razdel ohrany okruzhayushchej sredy k proektu «Plan gornyh rabot Zhitikarinskogo mestorozhdeniya hrizotil-asbesta glubinoj 390 m na 2021-2024 g.g. (2021) [Environmental Protection section for the project "Mining plan for the 390 m-deep Zhitikarinsky chrysotile asbestos deposit for 2021-2024]. AO «Kostanajskie mineraly» g. Kostanaj, – 196 s. (in Russian)

Beiseev O.B. (1971) Eksperimental'nye himiko-mineralogicheskoe izuchenie hrizotil-asbesta Eshkiolmesskogo mestorozhdeniyas cel'yu ochistki i oblagorazhivaniya. [Experimental chemical and mineralogical study of chrysotile asbestos from the Eshkiolmessky deposit for the purpose of purification and refinement. Experimental study of mineral formation]. Eksperimental'noe issledovanie mineralobrazovaniya. – Nauka, – S. 116-123. (in Russian)

Beiseev O.B., Beiseev A.O., Shakirova G.S. New unconventional types of natural mineral fillers in Kazakhstan and the prospects for their use in creating multi-purpose composite materials. Scientific-Practical Journal "Science and Innovations" NAS of Ukraine. – 2005. – Vol.1. – No.1. – Pp. 116-123. <https://doi.org/10.15407/scin1.01.116> (in English)

Błońska E., Januszek K., Małek S., Wanic T. Effects of serpentinite fertilizer on the chemical properties and enzyme activity of young spruce soils. International Agrophysics. – 2016. – №30(4). – P. 401-414. DOI: 10.1515/intag-2016-0015 (in English)

Błońska E., Pająk M., Małek S., Januszek K. Effects of Serpentinite Fertilization with N, P, and K Fertilizers on Soil Properties and Needle Chemistry. Communications in Soil Science and Plant Analysis. – 2017. – Vol.48. – №6. – P. 692-704. DOI:10.1080/00103624.2017.1298785 (in English)

Ranawat P., Kumar K.M., Sharma N.K. A process for making slow-releasephosphate fertilizer from low-grade rock phosphate and siliceous tailings by fusion with serpentinite. Research Communications Current Science. – Vol.96. – №6. – 25 March 2009. – P.843-848. (in English)

Serebrennikov A.I., Kovalev N.V., Orlov A.A., Averina G.F., Koshelev V.A. (2023) Issledovanie stojksti hlormagnezial'nyh kompozitov k nasyschennym sul'fatam sredam [Investigation of the resistance of chloromagnesium composites to sulfate-saturated media]. Vestnik YUzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo i arhitektura»T.23, №1. S.28-36. <https://doi.org/10.14529/build230104> (in Russian).

Opredelenie raznovidnostej hrizotil-asbesta metodami termicheskogo analiza (1987) [Determination of chrysotile asbestos varieties by thermal analysis methods]. Metod. rekomendacii NSOMMI №10. – M.: VIMS – 35 s. (in Russian)

Shlyapkina E.N. (2005) Sposob opredeleniya dolevogo sootnosheniya komponentov v polimineral'nyh glinistykh smesyah [A method for determining the proportion of components in polymineral clay mixtures]. E.N. Shlyapkina i dr.; Zayavka №2005105472, prioritet 28.02.05. (in Russian)

**G.Zh. Baisalova^{1*}, A.S. Zhumadil², B.B. Torsykbayeva², D.T. Sadyrbekov³,
K.T. Umerdzhanova⁴, 2025.**

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan;

²Astana Medical University, Astana, Kazakhstan;

³E.A. Buketov Karaganda University, Karaganda, Kazakhstan;

⁴Lyceum School №173, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: galya_72@mail.ru

CHEMICAL COMPOSITION OF FRUITS OF ELEAAGNUS ANGUSTIFOLIA

Baisalova Galiya – Professor of L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, galya_72@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1338-0308>;

Zhumadil Amina – Master's student of Astana Medical University, Astana, Kazakhstan, amina_zhumadil@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-8280-9461>;

Torsykbayeva Bigamila – Associate professor of Astana Medical University, Astana, Kazakhstan, maha-1505@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-6999-3900>;

Sadyrbekov Daniyar – Researcher at the E.A. Buketov Karaganda University, Karaganda, Kazakhstan, acidbear@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3047-9142>;

Umerdzhanova Kamshat – Chemistry teacher of Lyceum school №173, Almaty, Kazakhstan, umerjanovak@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-8840-8535>.

Abstract. In folk medicine *Elaeagnus angustifolia* is used to relieve asthma, diarrhea, fever, flatulence, jaundice, nausea, tetanus, urinary tract diseases, and vomiting. From the literature it is known that essential oil was isolated from flowers and its chemical composition was studied. Aqueous extracts of the fruit have an analgesic effect, and the antifungal and antibacterial activity of extracts from the aerial part of the plant has been studied. The purpose of this work is the qualitative and quantitative analysis of lipophilic compounds of the fruits of this plant using gas chromatography-mass spectrometry. Vitamins, carbohydrates, fatty acids, esters and sterols belonging to various groups of secondary plant metabolites were found. Among the secondary metabolites, DL--tocopherol (39.6325%), stigmasterol (17.1564%) and octacosane (9.8456%) predominate. Esters were found in small quantities - isobutylpropyl ester of phthalic acid (0.9129%), ethyl ester of heptadecanoic acid (0.9430%) and ethyl ester of hexadecanoic acid (0.8965%). All detected compounds in the extract have a certain biological activity. For example, tocopherol contained in the extract is a useful food component for mammals and humans. It is known that a lack of this vitamin leads to body fatigue and muscle dystrophy. And stigmasterol exhibits strong pharmacological effects, such

as anticancer, antiosteoarthritis, anti-inflammatory, antifungal, antiparasitic, antifungal, antibacterial, as well as immunomodulatory, antioxidant and neuroprotective properties. The data obtained from the research can serve as a basis for assessing the potential for pharmaceutical and medicinal use of the fruits of *Elaeagnus angustifolia*.

Keywords: *Elaeagnus angustifolia*, extract, extractant, mass-spectrum, gas chromatography-mass spectrometry.

**Г.Ж. Байсалова^{1*}, Ә.С. Жұмаділ², Б.Б. Торсықбаева², Д.Т. Садырбеков³,
К.Т. Умерджанова⁴, 2025.**

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан;

²Астана медицина университеті, Астана, Қазақстан;

³Е.А. Букетов атындағы Қарағанды университеті, Қарағанды, Қазақстан;

⁴№173 мектеп-лицей, Алматы, Қазақстан.

E-mail: galya_72@mail.ru

ELAEAGNUS ANGUSTIFOLIA ЖЕМІСТЕРІНІҢ ХИМИЯЛЫҚ КОМПОНЕНТТЕРИ

Байсалова Галия – Л.Н. Гумилева атындағы ЕҮУ профессоры, Астана, Қазақстан, galya_72@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1338-0308>;

Жұмаділ Әмина – Астана Медицина университеті магистранты, Астана, Қазақстан, amina_zhumadil@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-8280-9461>;

Торсықбаева Бигамила – Астана Медицина университетінің доценті, Астана, Қазақстан, maha-1505@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-6999-3900>;

Садырбеков Данияр – Е.А. Букетов атындағы Қарағанды университеті жетекші ғылыми қызметкер, Қарағанды, Қазақстан, acidbear@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3047-9142>;

Умерджанова Камшат – №173 мектеп-лицейінің химия пәні мұғалімі, Алматы, Қазақстан, umerjanovak@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-8840-8535>.

Аннотация. Дәстүрлі медицинада тар жапырақты жиде (*Elaeagnus angustifolia*) демікпе, диарея, қызба, метеоризм, сарыауру, жүрек айнуы, сіреспе, зэр шығару жолдарының аурулары мен құсады басу үшін қолданылады. Әдеби шолудан гүлдерінен эфир майы алынып, оның химиялық құрамы зерттелгені айтылады. Жемістерінен алынған сулы сыйындылар анальгетикалық әсерге ие, өсімдіктің жер үсті белгінен алынған сыйындылар зең мен бактерияға қарсы белсенділік көрсететіні зерттелген. Жұмыстың мақсаты газ хроматография-масс-спектрометрия әдісінің көмегімен аталмыш өсімдіктің жемісінің липофильді қосылыстарына талдау жүргізу болып табылады. Өсімдіктің екіншілік метаболиттерінің түрлі тобтарына жататын дәрумендер, көмірсутектер, май қышқылдары, күрделі эфирлер мен стеролдар табылды. Сыйынды құрамының жоғары мөлшерде DL--токоферол (39,6325%), стигмастерол (17,1564%) және октакозан (9,8456%) кездесken. Аз мөлшерде мына күрделі эфирлер – фтал қышқылының изобутилпропил эфирі (0,9129%), гептадекан қышқылының этил эфирі (0,9430%), гексадекан қышқылының этил эфирі (0,8965%) кездесken. Сыйынды құрамындағы барлық қосылыстар белгілі бір биологиялық белсенділікке

ие. Мысалы сығынды құрамындағы токоферол сүтқоректілер мен адам үшін тағамның пайдалы компоненті болып табылады. Бұл дәруменнің жетіспеуі дененің шаршауы, бұлшықет дистрофиясына әкелетіндігі белгілі. Ал стигмастерол ісікке, остеоартритке, қабынуға, сусамыр, паразитке, санырауқұлаққа, бактерияға қарсы, сонымен қатар иммуномодуляциялық, антиоксиданттық және нейропротекторлық қасиеттер сияқты күшті фармакологиялық әсерлерді қөрсетеді.

Зерттеулер нәтижесінде алынған мәліметтер *Elaeagnus angustifolia* жемісінің фармацевтикалық және медициналық қолданылу әлеуетін бағалауға негіз бола алады.

Түйін сөздер: *Elaeagnus angustifolia*, сығынды, экстрагент, масс-спектр, газ хроматография-масс-спектрометрия.

**Г.Ж. Байсалова^{1*}, А.С.Жумадил², Б.Б. Торсықбаева², Д.Т. Садырбеков³,
К.Т. Умерджанова⁴, 2025.**

¹ Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
Астана, Казахстан;

²Медицинский университет Астана, Астана, Казахстан;

³Карагандинский университет имени Е. А. Букетова, Караганда, Казахстан;

⁴Школа-лицей №173, Алматы, Казахстан.

E-mail: galya_72@mail.ru

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПЛОДОВ ELAEAGNUS ANGUSTIFOLIA

Байсалова Галия – профессор ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, galya_72@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1338-0308>;

Жумадил Амина – магистрант медицинского университета Астана, Астана, Казахстан, amina_zhumadil@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-8280-9461>;

Торсықбаева Бигамила – доцент медицинского университета Астана, Астана, Казахстан, maha-1505@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-6999-3900>;

Садырбеков Данияр – научный сотрудник Карагандинского университета имени Е. А. Букетова, Караганда, Казахстан, acidbear@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3047-9142>;

Умерджанова Камшат – учитель химии школы-лицея №173, Алматы, Казахстан, umerjanovak@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-8840-8535>.

Аннотация. В народной медицине лох узколистный (*Elaeagnus angustifolia*) применяют для лечения астмы, диареи, лихорадки, метеоризма, желтухи, тошноты, столбняка, заболеваний мочевыводящих путей и рвоты. Согласно литературным данным, из цветков было выделено эфирное масло и изучен его химический состав. Водные экстракты плодов обладают обезболивающим действием, а также изучены их противогрибковая и антибактериальная активности.

Целью данной работы является качественный и количественный анализ липофильных соединений плодов этого растения методом газовой хроматографии-масс-спектрометрии.

Обнаружены витамины, углеводы, жирные кислоты, сложные эфиры и стеролы, относящиеся к различным группам вторичных метаболитов растений. Среди

вторичных метаболитов преобладают DL- α -токоферол (39,6325%), стигмастерол (17,1564%) и октакозан (9,8456%). В небольших количествах выявлены сложные эфиры: изобутилпропиловый эфир фталевой кислоты (0,9129%), этиловый эфир гептадекановой кислоты (0,9430%) и этиловый эфир гексадекановой кислоты (0,8965%).

Все обнаруженные соединения экстракта обладают определённой биологической активностью. Например, токоферол, содержащийся в экстракте, является полезным пищевым компонентом для мlekопитающих и человека. Известно, что недостаток этого витамина приводит к утомляемости организма и дистрофии мышц.

Стигмастерол проявляет сильные фармакологические эффекты, такие как противораковое, противоостеоартритное, противовоспалительное, противогрибковое, противопаразитарное, антибактериальное, а также иммуномодулирующее, антиоксидантное и нейропротекторное действие.

Данные, полученные в результате исследований, могут стать основой для оценки потенциала фармацевтического и медицинского использования плодов лоха узколистного.

Ключевые слова: *Elaeagnus angustifolia*, экстракт, экстрагент, масс-спектр, газовая хроматография-масс-спектрометрия.

Кіріспе. Өсімдік құрамында біріншілік метаболиттерден (көмірсулар, аминқышқылдары, май қышқылдары, хлорофиллдер, цитохромдар, нуклеотидтер) бөлек, негізгі зат алмасуға түспейтін екіншілік метаболиттер бар екендігі белгілі. Екіншілік метаболиттер ішінде ең көп таралған тобтары: изопреноидтар, фенолды қосылыстар мен алкалоидтар. Жердегі флораның 10-15%, яғни 20-30 мың өсімдік құрамындағы екіншілік метаболиттер зерттелген. Олардың көбісі конститутивті, жартылай индуцибелді немесе индуцибелді қорғаныс қосылыстарының қызметін атқарады. Аталмыш метаболиттердің сан түрлі болуы, олардың орындайтын функцияларының көптүрлілігін қамтамасыз етеді. Олар өсімдікте экологиялық функциялар атқарады. Олар өсімдіктерді әртүрлі зиянкестер мен патогендерден қорғайды, өсімдіктің көбею үдерісіне қатысады, экожүйедегі өсімдіктердің бір-бірімен және басқа да ағзалармен әсерлесуін қамтамасыз етеді.

Ертеректен екіншілік зат алмасу өнімдері медицина, ветеринария, фармакология және басқа да салаларда кеңінен қолданылып келеді. Бұған себеп екіншілік метаболиттердің түрлі белсенделіктерге ие болу. Атап айтқанда фенолды қосылыстар биологиялық белсенделіктің кең спекртін көрсетеді – антиоксиданттық, қабынуға, ісікке қарсы, капилляр нығайтатын және гепатопротекторлық белсенделікке ие (Nishino, et al, 2005). Қазіргі таңда фармакология өнеркәсібінің басым міндеттерінің бірі жаңа өсімдік текті препараттарды енгізу арқылы дәрілік заттардың ассортиментін кеңейту болып табылады. Бірқатар аурулардың алдын алу және емдеу үшін қолданылатын өсімдік текті дәрілер синтетикалық аналогтардан тиімділігі жағынан кем түспейтіндігі белгілі.

Фармацевтика саласы үшін перспективті өсімдіктердің бірі – тар жапырақты

жиде (*Elaeagnus angustifolia*). Бұл өсімдік Elaeagnaceae тұқымдастының өкілі, Батыс және Орталық Азияда, Ресейдің оңтүстігі мен Қазақстаннан бастап Түркия және Иранға дейін таралған ағаш. Дәстүрлі медицинада тар жапырақты жиде демікпе, диарея, қызба, метеоризм, сарыауру, жүрек айнуы, сіреспе, зәр шығару жолдарының аурулары мен құсады басу үшін қолданылады (Asadiar, et al, 2012). *E. angustifolia* жемістерінен алынған сулы сығындылар айтартықтай анальгетикалық әсер көрсету қабілеті бар (Karimi, et al, 2010). Тағы бір еңбекте осы өсімдік мүшелерінен алынған сығындылар зең мен бактерияға қарсы белсенділік көрсететіні зерттелген (Khan, et al, 2016).

Гүлдерінде эфир майы бар, оның құрамынан этилциннамат (60,00%), гексагидрофарнезил ацетон (9,99%), пальмитин қышқылы (5,20%), фитол (3,29%) анықталған. Жапырақтарының эфир майынан этилциннамат (37,27%), фитол (12,08%), Z-3-гексенилбензоат (7,65%) табылған (Torbati, et al, 2016). Сонымен қатар ациклі flavonol гликозидтері - элеагнозидтер A-G де анықталған (Bendaikha, et al, 2014).

Материалдар мен зерттеу әдістері. Гександы сығынды мацерация көмегімен алынды. Сығындыны құрғату роторлы буландырығышта жүзеге асырылды. Құрғак сығындының шығымы 1,88% құрады.

Сығындының химиялық компоненттері масс-селективным детекторлы (Agilent 5975C) газ хроматографта (Agilent 7890A) жүзеге асырылды. Газ хроматография-масс-спектрометрия талдауы келесі жағдайларда іске асты: бағана типі – Rtx-100DHA; бағана ұзындығы – 30 м; бағана диаметрі – 0,25 мм; бағана адсорбентінің қалындығы – 0,5 үм; буландырығыш температурасы – 250⁰C, бағана температурасы – 60-300 °C; бағана қыздыру жылдамдығы – 8 °C/мин; иондар көзінің температурасы - 230°C; квадрупольді конденсатор температурасы - 150°C; газ-тасымалдағыш – гелий; бағанадағы қысым – 2 psі; сынама көлемі – 1 мкл; масс-спектрлерді тіркеу режимі - сканерлеу арқылы қол жеткізілді.

Нәтижелерді өндөу автоматты түрде GS-MSD Data Analysis бағдарламасы көмегімен іске асырылды (Baisalova, et al, 2014) .

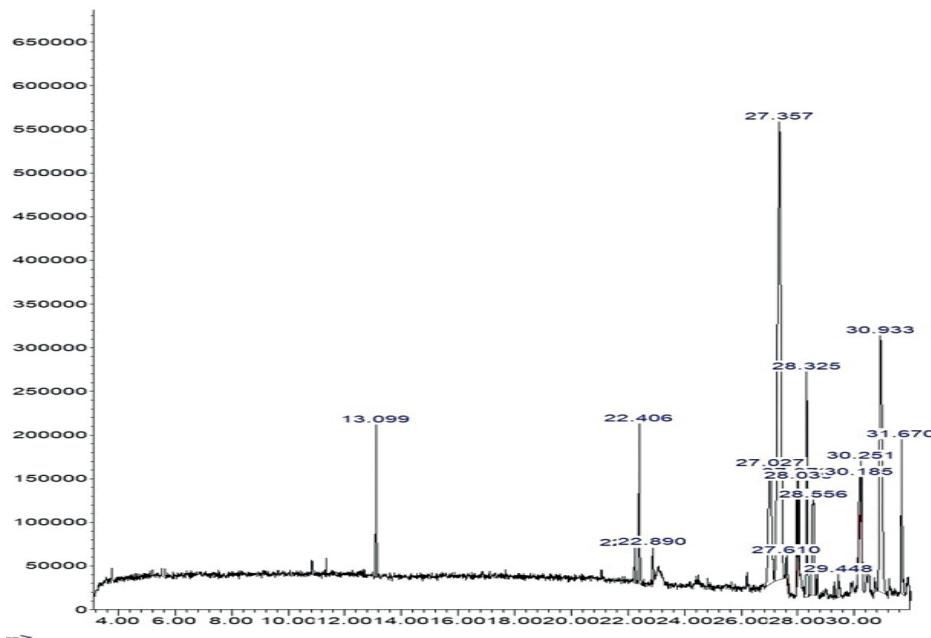
Нәтижелер және оларды талқылау.

Elaeagnus angustifolia құрамынан 15 органикалық қосылыс табылған (кесте 1). Ең көп мөлшерде DL--токоферол (39,6325%), стигмастерол (17,1564%), октакозан (9,8456%) кездескен. Пайыздық мөлшері 1%-дан кем қосылыстар қатарында фтал қышқылының изобутилпропил эфири (0,9129%), гептадекан қышқылының этил эфири (0,9430%), гексадекан қышқылының этил эфири (0,8965%) анықталды.

Пайыздық үлестері 1-8% құрайтын қосылыстар: тридекан (3,1134%); н-гексадекан қышқылы (3,6095%), 9,12-этилгексадекадиенат (2,0830%); (Z,Z,Z)-9,12,15-октадекатриен-1-ол (1,8263%); беген спирті (5,8470%); гексадецилоксиран (6,2130%); кампестерол (1,8505%); н-тетракозанол-1 (1,4135%) және сквален (4, 6569%).

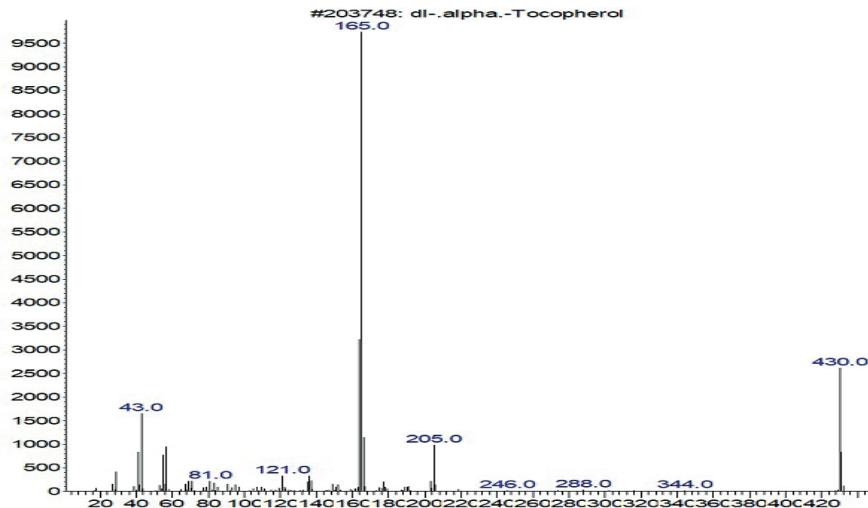
Кесте 1 - *Elaeagnus angustifolia* жемісінің химиялық құрамы

№	Ұстая уақыты, мин	Қосылыстар	Пайыздық мөлшері, %
1	13,0986	Тридекан	3,1134
2	22,2413	Фтал қышқылының изобутилпропил эфири	0,9129
3	22,4063	н-Гексадекан қышқылы	3,6095
4	22,8904	Гептадекан қышқылының этил эфири	0,9430
5	27,0271	Октакозан	9,8456
6	27,3572	DL- α -Токоферол	39,6325
7	27,9733	9,12-этил гексадекадиенат	2,0830
8	28,0393	(Z,Z,Z)-9,12,15-октадекатриен-1-ол	1,8263
9	28,3254	Беген спирті	5,8470
10	28,5564	Гексадецилоксиран	6,2130
11	29,4476	Гексадекан қышқылының этил эфири	0,8965
12	30,1847	Кампестерол	1,8505
13	30,2507	н-Тетракозанол-1	1,4135
14	30,9328	Стигмастерол	17,1564
15	31,6700	Сквален	4,6569

Сурет 1 - *Elaeagnus angustifolia* жемісі сывындысының хроматограммасы

Сурет 1-де тар жапырақты жиденің гексан сывындысының химиялық құрамын талдау нәтижелерін көрсетеді. Хроматограммадағы шындар экстракттың жеке компоненттерін, олардың ұсталыну уақытын (минутпен) және шындардың биіктігімен көрсетілген салыстырмалы мөлшерін көрсетеді. Атап айтқанда ұсталыну уақыты 27,357 минутта DL- α -токоферолдың мөлшері - 39,6325% (сурет 2) құрайды.

Abundance



Сурет 2 - DL-альфа токоферолдың масс спектрі

DL--токоферол, сонымен қатар Е витамині ретінде белгілі, көптеген биологиялық қасиеттеріне байланысты косметика мен тағам өнеркәсібінде кеңінен қолданылады. DL-альфа-токоферол өзінің күшті антиоксиданттық қасиеттерімен танымал. Ол бос радикалдарды бейтараптандыруға және жасушаларды тотығу стрессінен қорғауға көмектеседі, бұл сау жасуша мембранның сақтау және жасушалық зақымданулардың әртүрлі формаларын болдырмау үшін өте маңызды. Е дәрумені жасушалық сигнал жолдардың белсенділігін модуляциялауға және қабынуды азайтуға көмектеседі. Е дәрумені холестерин алмасуына ықпал етеді және атеросклеротикалық түйіндактың тұрақтылығын сақтайды, бұл жүрек-тамыр ауруларының алдын алу үшін маңызды (Kumar, et al, 2023). Сонымен қатар α-токоферолдың ісікке қарсы белсенділік көрсететіні дәлелденген. Мысалы, α-токоферолдың ORL-48 ауыз қуысының ісік жасушаларына қарсы әсерлерін анықтайдын зерттеулер жүргізілді (Zulkapli, et al., 2017).

Е дәрумені тағамдық құндылығын арттыру және витамин тапшылығын болдырмау үшін тағамға қосылады. DL-α-токоферол майлардың (сары май, маргарин, пісірме және қуырылған майлар, балық майы), майлар тағамдардың (құрамында кілегейі бар дайын десерттер, құрғақ сорпалар, какао, диеталық және мұздатылған тағамдар) тұрақтылығын арттыру үшін антиоксидант ретінде қолданылады .

Сонымен қатар, *Elaeagnus angustifolia* жемісінде стигмастерол айтарлықтай мөлшерде кездеседі, оның шыны 17,1564% құрайды (сурет 3). Стигмастерол - тетракиклі тритерпендер класынажататын қанықпаған фитостерол. Бұл химиялық қосылыс ісікке, остеоартритке, қабынуға, диабетке, паразитке, санырауқұлакқа, бактерияға қарсы белсенділіктері мен иммуномодуляциялық, антиоксиданттық және нейропротекторлық қасиеттер сияқты күшті фармакологиялық әсерлерді

көрсетеді. Стигмастерол қандағы қант деңгейін бақылауды және метаболизмді жақсартады (Bakrim, et al, 2022).

Газ хроматография-масс спектрометрия әдісі сыйынды құрамында қаныққан көмірсутектер – алкандардың көп мөлшерде екендігін дәлелдей отыр. Октакозан антимикробтық, антиоксиданттық және қабынуға қарсы әсерлерге ие (Saragih, at al, 2019). Октакозан меланома ісігіне қарсы белсенделікке ие. Обырды емдеуде, әсіресе эпидермальді және баяу инвазивті меланома түрлерінде, мысалы, акральды лентигинозды меланома кезінде, ісікті хирургиялық алып тастауды қолдайтын көмекші құрал ретінде қолданылуы мүмкін (Carlos, at al, 2014).

Беген спирті, немесе докозанол, 22-көміртекті қаныққан алифатты майлыш спирт болып табылады. Бұл қосылыс косметика өнеркәсібінде эмульгатор, жұмсартқыш және қоюлатқыш ретінде кеңінен қолданылады. Сонымен қатар, докозанолдың антимикробтық қасиеттері ғылыми тұрғыда дәлелденген (Ranganathan, et al, 2014).

Зерттеулер көрсеткендегі, беген спирті *Klebsiella pneumoniae* және *Staphylococcus aureus* бактерияларына антибактериалды әсер көрсетті (Kumari, et al, 2020).

АҚШ-тың азық-тұлік және дәрі-дәрмектер сапасын бақылау басқармасы (FDA) докозанолды вируска қарсы фармацевтикалық препарат ретінде макұлдаған. Зерттеулер көрсеткендегі, бұл қосылыс липидті қабықшасы бар вирустардың (мысалы, HSV-1 және HSV-2) кең спектріне қарсы тиімді әсер етеді. Репликацияның бастапқы кезеңдерінде докозанол вирус пен иесінің жасушалық мембранасының бірігу процесін тежейді, осылайша вирус инфекциясының дамуын болдырмайды (Aoki, et al., 2015).

Сквален - холестерин биосинтезі процесінің аралық бөлігі болып табылатын тритерпен. Сквален - беткі полиқанықпаған тері липидтерінің негізгі компоненті. Ол теріні жұмсартатын, ылғалданыратын және ісікке қарсы белсенделікке ие. Сквален теріге тез сіңіп, терінің серпімділігін қалпына келтіреді (Huang, et al, 2009).

н-Гексадекан қышқылы – қаныққан май қышқылы, пальмитин қышқылы деп те аталады. Ол ағза үшін маңызды энергия көзі болып табылады. Пальмитин қышқылы холестерин алмасуына қатысады және оның қандағы деңгейіне әсер етеді. Тамақ өнеркәсібінде пальмитин қышқылы әртүрлі майлар мен майлардың құрамдас қолданылады. Пальмитин қышқылы косметикада теріге эмолент ретінде қолданылады (Siswadi, et al, 2020).

Гексадекан қышқылының этил эфири - этил пальмитат ретінде белгілі, қаныққан май қышқылының эфири болып табылады және кең спектрлі биологиялық белсенделік көрсетеді. Бұл қосылыс антиоксиданттық, гипохолестеринемиялық, нематоцидтік, пестицидтік қасиеттерге ие (Pawar, et al., 2023).

(Z,Z,Z)-9,12,15-октадекатриен-1-ол — бұл үш қос байланысы және бірінші көміртектің атомында гидроксильді топ бар спирт. Спирттердің бұл өкілі антирадикалды және ісікке қарсы қасиеттерге ие (Zhou, et al, 2019).

Кампестерол—бұл фитостерол, құрылымы жағынан холестеринге ұқсас табиғи қосылыс. Кампестерол гиполипидемиялық әсерімен, яғни холестерин деңгейін төмендету қабілетімен, сондай-ақ антиканцерогендік қасиеттерімен танымал. Оның ісікке қарсы әсері антиангидрогендік қасиеттерімен ішінара түсіндірледі, бұл

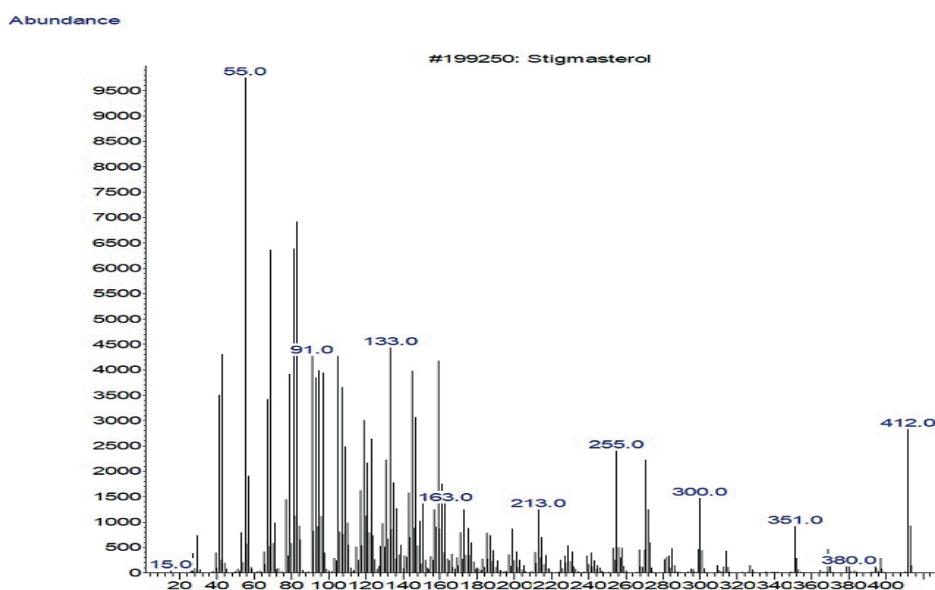
қасиет ісіктердің өсуі мен метастаздануы үшін қажетті жаңа қан тамырларының түзілуін тежейді (O'Callaghan, et al., 2013).

Кампестеролдың антимикробтық белсенделілігі әртүрлі микроорганизмдерге қарсы әсерімен ерекшеленеді. Бұл оның терпеноидтар тобының өкілі болуымен байланысты болуы мүмкін. Терпеноидтардың зенге, амебаға, вируска және бактерияға қарсы қасиеттері бар. Сонымен қатар, антиаллергендік әсерге ие және иммундық жүйені нығайтуға ықпал етеді.

Кампестеролдың жоғары антиоксиданттық әлеуеті оның құрылымындағы гидроксил функционалдық топтарының болуымен түсіндіріледі. Бұл топтар гидроксил радикалдары, супероксид аниондары және липидті асқынтотықтарды бейтараптандыруға қабілетті. Мұндай антиоксиданттық белсенделілік жасушаларды оксидативті стресстен қорғауда маңызды рөл атқарады және кампестеролдың микроорганизмдер мен басқа патогендерге қарсы әрекет ету механизміндегі негізгі фактор болуы мүмкін (Aliyu, et al., 2013).

н-Тетракозанол-1— бұл ұзын тізбекті майлы спирт болып табылатын органикалық қосылыс. Ол қабынуға қарсы әсер көрсетеді, сондай-ақ еркін радикалдарды бейтараптандыру қабілетіне ие (Kumari, et al., 2020).

Тридекан — бұл алкандардың өкілі. Зерттеулер көрсеткендегі, аталмыш қосылыс *Bacillus subtilis*, *Enterococcus faecalis*, *S. aureus*, *Staphylococcus epidermidis*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* және *Klebsiella pneumoniae* сияқты бактерияларға, сондай-ақ *Candida albicans*, *Saccharomyces cerevisiae* және *Aspergillus niger* сияқты саңырауқұлақтарға қарсы антимикробтық белсенделілік көрсетеді. Тридекан аз уытты болып саналады, бірақ көптеген көмірсутектер сияқты, ол тери немесе кілегей қабықшаларын тітіркендіруі мүмкін (Faridha, et al, 2016).



Сурет 3 – Стигмастеролдың масс спектрі

Қорытынды

Алғаш рет *Elaeagnus angustifolia* өсімдігінің жемістеріндегі липофильді қосылыстарға жүргізілген газ хроматография-масс-спектрометрия талдаулары нәтижесінде гександы сығынды құрамынан 15 органикалық қосылыс анықталды. Олар көмірсутектер, май қышқылдары, құрделі эфирлер және стеролдар сияқты органикалық қосылыстардың түрлі кластарына жататын химиялық қосылыстар. Әсірепе, DL- α -токоферол (39,6325%), стигмастерол (17,1564%) және октақозан (9,8456%) қосылыстары жоғары мөлшерде анықталды.

Зерттеу нәтижесінде анықталған қосылыстардың барлығы дерлік белгілі бір белсенділіктерге ие. Олар ісікке, остеоартритке, қабынуға, диабетке, паразитке, зенге, бактерияға карсы, антиоксиданттық, иммуномодуляциялық және нейропротекторлық сияқты маңызды фармакологиялық қасиеттердің кең ауқымын қамтиды. Бұл мәліметтер *Elaeagnus angustifolia* өсімдігінің фармацевтикалық және медициналық қолданылу әлеуетін арттыруға негіз бола алады.

References

- Aliyu A.B., Ibrahim M.A., Musa A.M., Musa A .O., Kiplimo J.J., Oyewale A.O. (2013). Free radical scavenging and total antioxidant capacity of root extracts of Anchomanes diffiformis Engl.(Araceae), Acta Pol. Pharm. 70 (1), – P. 115–121.(in Eng.).
- Aoki F.Y. (2015). Antivirals against Herpes Viruses. Principles and Practice of Infectious Diseases, 8(1), - P.546-562. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-4801-3.00045-X> (in Eng.).
- Asadiar L.S., Rahmani F, Siami A. (2012). Assessment of genetic variation in Russian olive (*Elaeagnus angustifolia*) based on morphological traits and random amplified polymorphic DNA (RAPD) genetic markers. J. Med. Plant Res., 6(9), – P.1652– 1661. <https://doi.org/10.5897/JMPR11.1451> (in Eng.).
- Baisalova G. Zh., Pankrushina N.A., Domrachev D.V., Salnikova O.I., & Erkassov R.Sh. (2014). Volatile Constituents of Halimodendron halodendron Voss. Growing in Kazakhstan. J Essent Oil Bear Pl, 17(5), – P.886-890. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2014.935074> (in Eng.).
- Bakrim S., Benkhaira N., Bourais I., Benali T., Lee L., El Omari N, Sheikh R.A., Goh K.W., Ming L.C., Bouyahya A. (2022). Health Benefits and Pharmacological Properties of Stigmasterol. Antioxidants, 11(10), 1912p. <https://doi.org/10.3390/antiox1101912> (in Eng.).
- Bendaikha S., Gadaut M., Harakat D., Magid A. (2014). Acylated flavonol glycosides from the flower of *Elaeagnus angustifolia* L. – Phytochemistry, 103, –P. 129-136. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2014.03.025> (in Eng.).
- Carlos R., Alisson L., Felipe V., Aline N., Camyla F., Natália G., Mariana H., Ricardo A., Jorge A., Denise C., Luciana P., Elaine G., João H.G., Luiz R., Regildo M. (2014). Pyrostegia venusta heptane extract containing saturated aliphatic hydrocarbons induces apoptosis on B16F10-Nex2 melanoma cells and displays antitumor activity in vivo. Pharmacogn. Mag., 10, –P.363–376. doi: 10.4103/0973-1296.133284 (in Eng.).
- Faridha B.I., Mohankumar R., Jeevan M. (2016). GC–MS Analysis of Bio-active Molecules Derived from Paracoccus pantotrophus FMR19 and the Antimicrobial Activity Against Bacterial Pathogens and MDROs. Indian J. Microbiol., 56, –P.426–432. <https://doi.org/10.1007/s12088-016-0609-1> (in Eng.).
- Huang Z.R., Lin Y.K., Fang J.Y. (2009). Biological and Pharmacological Activities of Squalene and Related Compounds: Potential Uses in Cosmetic Dermatology. Molecules, 14, –P. 540-554. <https://doi.org/10.3390/molecules14010540> (in Eng.).
- Karimi G., Hosseinzadeh H., Rassoulzadeh M., Razavi B., Taghiabadi E. (2010). Antinociceptive effect of *Elaeagnus angustifolia* fruits on sciatic nerve ligated mice. Iran. J. Basic Med. Sci.,13(3): 97–101. <https://doi.org/10.22038/ijbms.2010.5094> (in Eng.).
- Khan S.U., Khan A.U., Shah A.U., Shah S.M., Hussain S., Ayaz M., Ayaz S. (2016). Heavy metals content, phytochemical composition, antimicrobial and insecticidal evaluation of *Elaeagnus angustifolia*. Toxicol. Ind. Health, 32(1), –P. 154-161. <https://doi.org/10.1177/0748233713498459> (in Eng.).

- Kumar M., Deshmukh P., Kumar M., Bhatt A., Sinha A.H., Chawla P. (2023). Vitamin E Supplementation and Cardiovascular Health: A Comprehensive Review. *Cureus*, 15(11), 48142. <https://doi.org/10.7759/cureus.48142> (in Eng.).
- Kumari N., Menghani E. (2020). Evaluation of antibacterial activity and identification of bioactive metabolites by GCMS technique from Rhizospheric Actinomycetes. *Indian J. Nat. Prod. Resour.*, 11(4), –P. 287-294. <http://op.niscpr.res.in/index.php/IJNPR/article/view/31754/0> (in Eng.).
- Kumari R., Ratish C.M., Ruchika Sh., Yadav J.P. (2020). Fractionation of Antimicrobial Compounds from *Acacia nilotica* Twig Extract Against Oral Pathogens. *Biointerface Res. Appl. Chem.*, 10(6), – P. 7097 – 7105. <http://dx.doi.org/10.33263/BRIAC106.70977105> (in Eng.).
- Nishino H., Murakoshi M., Mou X.Y., Wada S., Masuda M., Ohsaka Y., Satomi Y., Jinno K. (2005). Cancer prevention by phytochemicals. *Oncology*, 69, 38. <https://doi.org/10.1159/000086631> (in Eng.).
- O'Callaghan Y., Kenny O., O'Connell N.M., Maguire A.R., McCarthy F.O. (2013). Synthesis and assessment of the relative toxicity of the oxidised derivatives of campesterol and dihydrobrassicasterol in U937 and HepG2 cells. *Biochimie*, 95(3), –P. 496-503. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2012.04.019> (in Eng.).
- Pawar M.K., Dwivedi J.A., Dwivedi U.K. (2023). Structural Elucidation of Chemical Compounds of Pharmacological Significance from *Convolvulus Pluricaulis* by Gas Chromatography: Mass Spectroscopy (Gc-Ms) Analysis. *Int. J. Curr. Adv. Res.*, 12(7), –P.2221–2226. <https://doi.org/10.24327/ijcar.2023.2226.1485> (in Eng.).
- Ranganathan D. (2014). Phytochemical analysis of *Carallumanilagiriana* using GC-MS. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 3, –P.155-159.
- Saragih G.S., Siswad, S. (2019). Antioxidant Activity of Plant Parts Extracts from *Sterculia quadrifida* R. Br. *Asian J. Pharm. Clin. Res*, 12(7), –P:234-237. <https://doi.org/10.22159/ajpcr.2019.v12i7.33261> (in Eng.).
- Siswadi S., Saragih G.S. (2021). Phytochemical analysis of bioactive compounds in ethanolic extract of *Sterculia quadrifida* R.Br.. *AIP Conf. Proc.*, 2353 (1): 030098. <https://doi.org/10.1063/5.0053057> (in Eng.).
- Torbati M., Asnaashari S., Heshmati A.F. (2016). Essential Oil from Flowers and Leaves of *Elaeagnus Angustifolia* (Elaeagnaceae): Composition, Radical Scavenging and General Toxicity Activities - *Adv. Pharm. Bull.*, 6(2), 163-169. <http://dx.doi.org/10.15171/apb.2016.023> (in Eng.).
- Zhou J.X., Braun M.S., Wetterauer P., Wetterauer B., Wink M. (2019). Antioxidant, Cytotoxic, and Antimicrobial Activities of *Glycyrrhiza glabra* L., *Paeonia lactiflora* Pall., and *Eriobotrya japonica* (Thunb.) Lindl. Extracts. *Medicines*, 6, 43. <https://doi.org/10.3390/medicines6020043> (in Eng.).
- Zulkapli R., Razak A.F., Zain R.B. (2017). Vitamin E (α -Tocopherol) Exhibits Antitumour Activity on Oral Squamous Carcinoma Cells ORL-48. *Integr. Cancer Ther.*, 16(3), 414-425. <https://doi.org/10.1177/1534735416675950> (in Eng.).

МРНТИ 65.35.33

УДК: 662:666.763

©N.N. Zhanikulov^{1*}, D.K. Zhurgarayeva^{1*}, G. Mukhtarhanova², A.S. Bailen¹,
A.K. Sviderskiy³, 2025.

¹Academician E.A. Buketov Karaganda University, Karaganda, Kazakhstan;

²LLP «SRC INNTECH (Innovate Technologies)», Karaganda, Kazakhstan;

³Zhezkazgan University named after O.A. Baikonurov, Zhezkazgan, Kazakhstan.

E-mail: nurgali.zhanikulov@mail.ru

INVESTIGATION OF THE SUITABILITY OF HEAP LEACHING WASTE FROM THE PROCESSING OF GOLD-BEARING ORE AS A RAW MATERIAL FOR PORTLAND CEMENT

Zhanikulov Nurgali Nodiruly – PhD, associate professor of the Departments «Inorganic and technical chemistry», E.A. Buketov Karaganda University, Karaganda, Kazakhstan, E-mail:nurgali.zhanikulov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0750-9753>;

Zhurgarayeva Dinara Kalmuratovna – master's student of the Department «Inorganic and technical chemistry», E.A. Buketov Karaganda University, Karaganda, Kazakhstan, E-mail: zhurg.di@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5064-117X>;

Mukhtarhanova Gulsana – master of technical sciences, Director of the SRC INNTECH (Innovate Technologies) LLP, Karaganda, Kazakhstan, E-mail:nic_innitech@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7969-058X>;

Bailen Aida Sayatkyzy – master, teacher of the Department «Inorganic and technical chemistry», E.A. Buketov Karaganda University , Karaganda, Kazakhstan, E-mail: aida_bailen@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9024-0065>;

Sviderskiy Alexander Konstantinovich – Doctor of chemical sciences, professor, Vice-Rector for Science and Strategic Development of Zhezkazgan University named after O.A. Baikonurov, Zhezkazgan, Kazakhstan, E-mail: katsostud@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7277-5882>.

Abstract. The scientific article presents the results of studying heap leaching waste from gold-bearing ore processing using physicochemical methods. The studies were conducted using modern optics - emission spectrometer, X-ray fluorescence spectrometer, X-ray diffractometer, differential thermal derivatograph and scanning electron microscope. The chemical composition of heap leaching waste according to the results of measurements by atomic emission spectrometry, %: SiO₂ - 73,15; Al₂O₃ - 13,18; Fe₂O₃ - 5,55; CaO - 1,19; MgO - 1,52; SO₃ - 0,15; Na₂O - 1,51; K₂O - 2,58; CuO - 0,19; PbO - 0,04; ZnO - 0,04; MnO - 0,3; NiO - 0,003; CoO - 0,003; As₂O₃ - 0,013; SnO - 0,071; SeO - 0,094; MoO - 0,416. X-ray diffraction analysis revealed diffraction maxima of quartz, periclase, illite and langite mineral in the composition. As a result of differential thermal analysis, heap leaching and heat treatment of waste

at a high temperature of 1000-1050 °C allowed to remove toxic substances (cyanides) contained in them, stabilize the composition of the waste and make them safer. As a result of scanning electron microscopic analysis, the following phases were determined in the residual composition: quartz with a size of 0.1-0.6 mm, and the clay mineral illite with a size of 0.1-0.2 mm. As a result, the potential possibility of using heap leaching waste from the processing of gold-bearing ores to produce Portland cement was proven.

Keywords: waste, heap leaching waste, recycling, raw mix, portland cement.

**©Н.Н. Жаникулов^{2*}, Д.К. Жургараева^{1*}, Г. Мұхтарханова², А.С. Байлен¹,
А.К. Свидерский³, 2025.**

¹ Академик Е.А. Бекетов атындағы Қарағанды университеті,
Қарағанды, Қазақстан;

²ЖШС «НИЦ INNTECH (Innovate Technologies)», Қарағанды, Қазақстан;

³О.А. Байқоныров атындағы Жезқазған университеті, Жезқазған, Қазақстан.

E-mail: nurgali.zhanikulov@mail.ru

ПОРТЛАНДЦЕМЕНТ АЛУ ҮШІН АЛТЫН КЕҢІН ӨНДЕУДЕН АЛЫНГАН ҮЙІНДІ ШАЙМАЛАУ ҚАЛДЫҚТАРДЫ ШИКІЗАТ РЕТИНДЕ ЖАРАМДЫЛЫҒЫН ЗЕРТТЕУ

Жаникулов Нұргали Нодырұлы – PhD, Академик Е.А. Бекетов атындағы Қарағанды университеттінің «Бейорганикалық және техникалық химия» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Қарағанды, Қазақстан, E-mail:nurgali.zhanikulov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0750-9753>;

Жургараева Динара Калмуратовна – магистрант, Академик Е.А. Бекетов атындағы Қарағанды университеті, Қарағанды, Қазақстан, E-mail:zhurg.di@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5064-117X>;

Мұхтарханова Гүлсана – техника ғылымдарының магистрі, ЖШС «НИЦ INNTECH (Innovate Technologies)» директоры, Қарағанды, Қазақстан, E-mail:nic_inntech@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7969-058X>;

Байлен Аида Саятқызы – магистр, Академик Е.А. Бекетов атындағы Қарағанды университеттінің «Бейорганикалық және техникалық химия» кафедрасының оқытушысы, Қарағанды, Қазақстан, E-mail:aida_bailen@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9024-0065>.

Александр Свидерский Константинович – химия ғылымдарының докторы, профессор, О.А. Байқоныров атындағы Жезқазған университеттінің ғылым және стратегиялық даму жөніндегі проректоры, Жезқазған, Қазақстан, E-mail: katsostud@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7277-5882>.

Аннотация. Ғылыми мақалада алтыны бар кендерді өндеуден алынған үйінді шаймалау қалдықтарды физика-химиялық әдістермен зерттеудегі нәтижелер көрсетілген. Зерттеулер заманауи оптика-эмиссиялық спектрометрде, рентген-флуоресцентті спектрометрде, рентгендік дифрактометрде, дифференциалды-термиялық дериваторграфта және растрлы электронды микроскоптың көмегімен орындалды. Атомдық-эмиссиялық спектрометрия әдісімен өлшеу нәтижесінде үйінді шаймалау қалдығының құрамы, %: SiO_2 - 73,15; Al_2O_3 - 13,18; Fe_2O_3 - 5,55; CaO - 1,19; MgO - 1,52; SO_3 - 0,15; Na_2O - 1,51; K_2O - 2,58; CuO - 0,19; PbO - 0,04; ZnO - 0,04; MnO - 0,3; NiO - 0,003; CoO - 0,003; As_2O_3 - 0,013; SnO - 0,071; SeO - 0,094; MoO - 0,416 болды. Рентгендік құрылымдық талдауда қалдық

құрамынан кварц, периклаз, иллит және лангит минералдарының дифракциялық максимумдары анықталды. Дифференциалды термиялық талдау нәтижесінде үйінді шаймалау қалдықтарды жоғары 1000-1050 °C температурада термиялық өндеу олардың құрамындағы улы заттарды (цианидтерді) жоюға, қалдық құрамын түрақтандыруға және оларды қауіпсіз етуге мүмкіндік берді. Растворлы электронды микроскопиялық талдау нәтижесінде қалдық құрамындағы фазалар кварц 0,1-0,6 мм, сазды минерал иллит 0,1-0,2 мм өлшемде анықталды. Нәтижесінде портландцемент алу үшін құрамында алтыны бар кендерді өндеуден алынған үйінді шаймалау қалдықтарды пайдаланудың әлеуеттік мүмкіндігі бар екендігі дәлелденді.

Түйін сөздер: қалдықтар, үйінді шаймалау қалдықтары, кәдеге жарату, шикізат қоспасы, портландцемент.

©Н.Н. Жаникулов^{2*}, Д.К. Жургараева^{1*}, Г. Мухтарханова², А.С. Байлен¹,
А.К. Свидерский³, 2025.

¹Карагандинский университет имени академика Е.А. Букетова,
Караганда, Казахстан;

²ТОО «НИЦ INNTECH (Innovate Technologies)», Караганда, Казахстан;

³Жезказганский университет имени О.А. Байконурова, Жезказган, Казахстан.
E-mail:nurgali.zhanikulov@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИГОДНОСТИ ОТХОДОВ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД В КАЧЕСТВЕ СЫРЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА

Жаникулов Нургали Нодырұлы – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Неорганической и технической химии» Карагандинского университета имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан, E-mail: nurgali.zhanikulov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0750-9753>;

Жургараева Динара Калмуратовна – магистрант, Карагандинский университет имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан, E-mail: zhurg.di@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5064-117X>;

Мухтарханова Гульсана – магистр технических наук, директор ТОО «НИЦ INNTECH (Innovate Technologies)», Караганда, Казахстан, E-mail: nic_inntech@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7969-058X>;

Байлен Аида Саятқызы – магистр, преподаватель кафедры «Неорганической и технической химии» Карагандинского университета имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан, E-mail: aida_bailen@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9024-0065>;

Александр Свидерский Константинович – доктор химических наук, профессор, проректор по науке и стратегическому развитию Жезказганского университета имени О.А. Байконурова, Жезказган, Казахстан, E-mail: katsostud@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7277-5882>.

Аннотация. В научной статье представлены результаты исследования отходов кучного выщелачивания от переработки золотосодержащих руд физико-химическими методами. Исследования проводились с использованием современной оптики - эмиссионного спектрометра, рентгенофлуоресцентного спектрометра, рентгеновского дифрактометра, дифференциального термодериватографа и

сканирующего электронного микроскопа. Химический состав отходов кучного выщелачивания по результатам измерений методом атомно-эмиссионной спектрометрии, %: SiO_2 - 73,15; Al_2O_3 - 13,18; Fe_2O_3 - 5,55; CaO - 1,19; MgO - 1,52; SO_3 - 0,15; Na_2O - 1,51; K_2O - 2,58; CuO - 0,19; PbO - 0,04; ZnO - 0,04; MnO - 0,3; NiO - 0,003; CoO - 0,003; As_2O_3 - 0,013; SnO - 0,071; SeO - 0,094; MoO - 0,416. Рентгеноструктурный анализ выявил в составе дифракционные максимумы кварца, периклаза, иллита и минерала лангита. В результате дифференциального-термического анализа кучное выщелачивание и термическая обработка отходов при высокой температуре 1000-1050 °C позволили удалить содержащиеся в них токсичные вещества (цианиды), стабилизировать состав отходов и сделать их более безопасными. В результате сканирующего электронного микроскопического анализа фазы в остаточном составе определены: кварц размером 0,1-0,6 мм, а глинистый минерал иллит размером 0,1-0,2 мм. В результате доказана потенциальная возможность использования отходов кучного выщелачивания от переработки золотосодержащих руд для получения портландцемента.

Ключевые слова: отходы, отходы кучного выщелачивания, утилизация, сырьевая смесь, портландцемент.

Кіріспе. Элемде және отандық ғалымдардың тәжірибесінде қалдықтарды қедеге жаратудың, оларды қайта өндөудің ең үнемді және экологиялық қауіпсіз тәсілдерінің бірі – цемент өндірісінде қолдану болып табылады (Chatterjee, 2018). Цемент өндірісінде қалдықтарды балама отын түрі ретінде, шикізат материалы ретінде және белсенді минералды қоспа ретінде де қолдануға болады (Таймасов, 2015). Цемент өндірүү технологиясының ерекшелігі айналмалы пеште материалдарды жоғары 1450-1600° температураға дейін қыздырады, жоғары температура кезінде қалдықтардың құрамындағы ауыр токсинді метал бөлшектері мен органикалық заттар цемент клинкерінің құрамына, яғни силикатты балқымада химиялық-минерологиялық байланысқа түсіп жентектеледі. Клинкер түзілу процесінде силикатты балқыма құрамында минералдану процесі әсерінен толық залалсызданып, экологиялық қауіпсіз болуын қамтамасыз етеді. Аталған ерекшеліктерінде арқасында қалдықтарды пайдалану цемент өндірісіндегі ең жақсы технология болып саналады (Потапова, 2016).

Елімізде қалдықтарды тиімді пайдалану, оларды жою және экологиялық қауіпсіздікті алдын алу жұмыстары бойынша 2013 жылы Қазақстан Республикасының «жасыл экономикаға» көшу жөніндегі қабылданған тұжырымдамасы (Қазақстан, 2013) тиімді жүзеге асырылуда. Аталған тұжырымдама аясында елімізде бірқатар өндірістік орындардың «Ең үздік қолжетімді техникалары бойынша» анықтамалық құжаттары бекітілді (Қазақстан, 2023). Бұл анықтамалық құжат өндіріс орындардың жұмысын онтайландыру, қалдықтарды шығару көлемін азайту, тиісті қалдықтарды қедеге жарату, оларды залалсыздандыру және атмосфераға бөлінетін туттінді газдардың көлеміне квота бөлу, заманауи құрал-жабдықтармен жаңғыру тәсілдерінде қалдықтардың пайдалануын көрсетті (Нег, 2022).

Қазіргі таңда елімізде 50 млрд тоннадан астам техногенді қалдық түрлері

жинақталған, олардың басым бөлігі, шамамен 32 млрд тоннадан астамы тау-кен өндірісі, тұсті металлургия және химиялық өндірістерден жинақталған қалдықтар, 13,5 млрд тонна қатты тұрмыстық және 2,8 млрд тонна өте қауіпті (I класс) қалдықтарды құрайды (Zhanikulov, 2020).

Қарағанды облысында жылына 110 млн тоннадан астам қалдық түзіледі, 46,5 млн тоннадан астам қалдықтар көдеге жаратылады, бұл шамамен 42 % құрап отыр. Тұжырымдамага сәйкес 2030 жылға қарай елімізде қалдықтарды қайта өндіру үлесін 40 %-ға, 2050 жылға қарай 50 %-ға жеткізу көзделген. Осылан орай бұл мәселені оңтайлы шешу алдағы уақытта өзекті болып қала бермек (Қалдықтарды, 2023).

Бұл ғылыми зерттеудің мақсаты «ULYTAU GOLD PROCESSING» ЖШС-нің алтын кенін өндіруден алынған үйінді шаймалау қалдықтарын цемент өнеркәсібі үшін шикізат материал ретінде пайдалану мүмкіндігін зерттеу болып табылады. Үйінді шаймалау қалдықтарды цемент өндірісінде қолданудың бірнеше факторларын ескеру қажет:

1. Үйінді шаймалау қалдықтардың құрамында аз мөлшерде цементке қауіпті цианиттер мен олардың туындылары, зиянды қосылыстары, ауыр металдар мен құқірт қосылыстарынан тазарту;

2. Үйінді шаймалау қалдықтарға әктас, саз, шлак, күл, гипс және басқада қосымша материалдармен бірге араластыру арқылы портландцементке оңтайлы құрамға жеткізу;

3. Қоршаган ортаға тигізер қауіп-қатер және қайта өндіру кезінде жұмсалатын шығындардың экологиялық және экономикалық аспектілерін анықтау.

Бұл келтірілген факторларды ескеріп, үйінді шаймалау қалдықтарды физика-химиялық әдістермен зерттеу өзекті.

Материалдар мен зерттеу әдістері. Алтын кенін өндіру кезінде үйінді шаймалау әдісін пайдалана отырып, кеннің құрамынан алтын мен күмісті алуға бағытталады. Қалдықтардың түзілуі - ұсақтау, агломерациялау, шаймалау, сорбциялау, реагенттерді тазарту және регенерациялау, сондай-ақ өнімдерді түпкілікті алу кезеңдерден өтеді. Аталған кезеңдерден өткен үйінді шаймалау қалдықтың жалпы көрінісі 1 суретте көрсетілген.



Сурет 1. Үйінді шаймалау қалдықтары

Іріктелген үйінді шаймалау қалдықтан сынамалар алынып, оларды ЩД-6М маркалы жақты ұсақтағышта өлшемі 2 мм-ден аз болатындей етіп ұсақтаап алды. Бұдан әрі сынаманы FLSmidth компаниясының LM-2P маркалы зертханалық дискті диірменінде майдаланды. Ұнтақтаудың мөлшері бөлшектер үшін 74 мкм құрады.

Үймелі шаймалау қалдықтарынан алынған сынаманың көп элементті талдауы ГОСТ 34247-2017 «Мыс концентраты» бойынша ICP-OES Agilent 5900 ICP-OES G8020AA индуктивті байланысқан плазмамен ICP-OES оптикалық-эмиссиялық спектрометрде жүргізілді. Мыс пен қоспалардың массалық үлесін индуктивті байланысқан плазмамен атомдық-эмиссиялық спектрометрия әдісімен өлшеу, бұл өз кезегінде үлгілердегі әртүрлі элементтердің құрамын дәл анықтауга мүмкіндік берді. ICP-OES жоғары температуралы плазмада қозған атомдар мен иондар шығаратын жарықты өлшеуге негізделген. Плазма индуктивті байланыс арқылы жасалады және бұл процесс үлгілердегі элементтерге белгілі бір толқын ұзындығында жарық шығаруға мүмкіндік береді, содан кейін олар детекторлармен бекітіледі (Horgnies, 2013).

Үйінді шаймалау қалдықтарының сынамалары EPSILON 4 E4-30 рентген-флуоресцентті спектрометрінің көмегімен де талданды. Бұл құрал рентген сәулелеріне ұшыраған кезде үлгідегі элементтердің атомдары шығаратын сәулеленудің қарқындылығын өлшеу үшін рентгендік флуоресценция принципін колданады. Әрбір талданатын элемент үшін кернеу, ток, сұзгілер және талдау жүргізілетін орта сияқты арнайы өлшеу шарттары қолданылады. Элементтердің атомдық массасы мен қозу энергиясы сияқты физикалық сипаттамаларына байланысты параметрлер ең дәл нәтиже алу үшін өзгеруі мүмкін.

Алюминийді талдау 12 кВ кернеуде және 799 мкА токта жүргізілді, осы элементтің сәулеленуін тиімді оқшаулауға мүмкіндік беретін Al-50 сұзгісі қолданылды. Талдау ауда жүргізілді. Хром (Cr) және кобальт (Co) үшін кернеу 20 кВ деңгейінде орнатылды, ал ток 364 мкА құрайды. Осы элементтердің спектрін дәлірек таңдау үшін Al-200 сұзгісі қолданылды. Талдау ауда да жүргізілді. Фтор (F) мен кремнийді (Si) анықтау кезінде кернеудің тәменгі параметрлері — 5 кВ және 1432 мкА-ға тең жоғары ток мәні қолданылды. Бұл жағдайда сұзгі қолданылмайды (none) және талдау гелий ортасында жүргізілді. Бұл атомдық нөмірі тәмен элементтер үшін өлшеу дәлдігін арттыруға мүмкіндік берді. Молибденді (Mo) және сурьманы (Sb) талдау үшін 50 кВ жоғары кернеу мен 300 мкА ток қолданылды. Cu-300 сұзгісі осы элементтерді дәл анықтауға кедергі келтіруі мүмкін сәулеленуді сұзуге мүмкіндік берді. Өлшеу ауда да жүргізілді. Никель (Ni) және ниобий (Nb) үшін талдау үшін кернеу 50 кВ, ал ток 167 мкА болды. Оларды талдау үшін Ag сұзгісі қолданылды. Тағы да өлшеу ауда жүргізілді. Фосфор (P) және күкірт (S) үшін 9 кВ кернеу мен 1187 мкА ток орнатылды. Ті сұзгісі қолданылды және талдау гелий ортасында жүргізілді, бұл фони тәмен болуы мүмкін элементтердің дәлдігін арттырды (Макарова, 2011).

Үлгіні дифрактометриялық талдау мыс катодты тұтікпен жабдықталған Malvern Panalytical компаниясы шығарған Aeris рентгендік дифрактометрінің

көмегімен жүргізілді. Бұл құрылғы материалдың минералогиялық құрамын, сондай-ақ кристалдық торлардың құрылымын дәл анықтауға мүмкіндік беретін рентгендік фазалық талдауға арналған. Зат атомдарындағы рентген сәулелерінің дифракциясы үлгідегі әртүрлі фазаларды анықтау және сандық анықтау үшін пайдалануға болатын тән дифракциялық шындардың пайда болуына әкеледі. Бұл жағдайда талдау 600 Вт «жылдам талдау» режимінде жүргізілді, бұл үйінді шаймалау қалдықтары сияқты құрделі үлгілерді талдау үшін қажетті дәлдік пен сезімталдықты сақтай отырып, жоғары өлшеу жылдамдығына қол жеткізуге мүмкіндік берді. Рентгендік дифрактометрдің жұмыс принципі рентген сәулелерін генерациялаудан тұрады, яғни мыс катодты рентген тұтігінде рентген сәулелері электрондардың үдеуінде және олардың катодпен соқтығысуында пайда болады, нәтижесінде мыс сипаттамаларына сәйкес келетін толқын ұзындығы рентген сәулелері шығады. Рентген сәулелерінің сынуымен әрекеттескенде дифракция пайда болады, яғни сәулелердің белгілі бір бұрыштарға ауытқуы. Заттың құрылымы мен құрамына байланысты дифракциялық шындар әр түрлі ауытқу бұрыштарына ие болады. Үлгі сканерленеді және шағылысқан сәулелердің қарқындылығы жазылады, бұл минералогиялық құрамды анықтауға болатын дифракциялық картаны құруға мүмкіндік береді (Мырзақожа, 2014).

Дифференциалды термиялық талдау жылудың бөлінуімен немесе сіңуімен бірге қыздыру кезінде зерттелетін материалдарда болатын физика-химиялық түрлендірulerді зерттеу үшін қолданылады. Әдістің мәні зерттелетін және анықтамалық үлгілер арасындағы температура айырмашылығын бір уақытта және бірдей қыздыру немесе салқыннату кезінде өлшеу болып табылады. Бастапқы материалдардың дифференциалды-термиялық талдауы Q-1500D дериватограф аппаратында орындалды. Q-1500D дериватографы заттардың термиялық өзгеруін, зат массасының өзгеруін, заттың массасы мен жылу сыйымдылығының өзгеру жылдамдығын және квазитермиялық, квази-изобарлық зерттеулерді анықтауға арналған (Таймасов, 2019).

Электронды-микроскопиялық талдау үлгінің бетін электронды зондпен сканерлеу және осы процесте туындастырылған сәулеленудің кең спектрін анықтау (тану) арқылы жүргізіледі. Электрондық микроскопта кескін алу үшін сигналдар екінші, шағылысқан және жұтылған электрондар болып табылады. Басқа әсерлер, атап айтқанда рентген сәулелері, зерттелетін үлгі материалының химиялық құрамы туралы қосымша ақпарат алу үшін қолданылады. Үлгілерді электронды-микроскопиялық талдау JEOL JSM-6490 LV маркалы электронды микроскоптың көмегімен жүргізілді. Үлгінің беті электронды сәулемен сканерленеді және нәтижесінде пайда болған кері шашыраңқы электрондар беттің топографиясы, сондай-ақ үлгінің физикалық және химиялық қасиеттері туралы ақпаратты тасымалдайды. Бұл электрондар әртүрлі бағыттардан ұшады және оптикалық осыке қатысты симметриялы орналасқан жартылай өткізгіш элементтермен анықталады. Бұл жағдайда сканерлеу процесінде анықталатын электрондардың сандық өзгерістері электролік сигналдарға айналады. Детектор элементтерінің екі сигналы алдын ала қүшейткішпен қүшейтіліп, операциялық қүшейткішке түседі.

Операциялық күшеткіш бұл сигналдарды одан әрі күшетеді және оларды қосу мен азайтуды бір уақытта жасайды. Жиынтық сигнал композициялық кескінді қалыптастыру үшін бейне сигнал ретінде пайдаланылады, ал айырмашилық сигналы топографиялық кескінді қалыптастыру үшін бейне сигнал ретінде қызмет етеді. Үлгі бетінің гетерогенділігі және ондағы құрамдас элементтердің тараулуы туралы ақпаратты тасымалдайтын кері шашыраңқы электрондарды анықтау үлгі бетінің кескінін байқауға мүмкіндік береді. Электронды-оптикалық жүйе жұмыс қашықтығы (WD) 48 мм болған кезде $x8$ минималды үлкейту кезінде кескіндерді алуға мүмкіндік береді. JEOL JSM-6490 LV маркалы электронды микроскоп 3-100 мкм сзыбытық өлшемдердің өлшеу диапазонында, 0,03-1000 мкм сзыбытық өлшем көрсеткіштерінің ауқымында, электрмен жабдықтау 220 ± 5 Гц кернеу жиілігінде, үдеткіш кернеу 0,3-30 кВ диапазонында жұмыс жасайды. Үлгілерді электронды-микроскопиялық талдау JEOL JSM-6490 LV маркалы электронды микроскоптың көмегімен жүргізілді (Кузнецова, 2007).

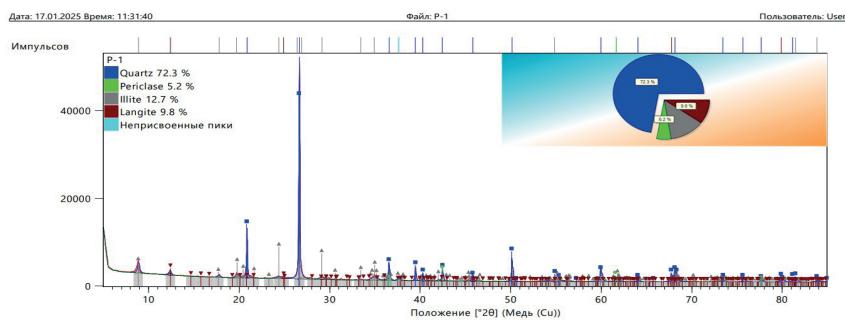
Нәтижелер және талқылаулар. ICP-OES оптикалық-эмиссиялық спектрометрде қалдықтың химиялық құрамына көп элементті талдау жүргізілді. Нәтижесі үйінді шаймалау қалдығының химиялық құрамы 1 кестеде көлтірілген.

1 – кесте. Үйінді шаймалау қалдығының химиялық құрамы

Шикізат	Химиялық құрамы, сал. %													
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CuO	PbO	ZnO	MnO	басқа	жалпы
Үйінді шаймалау қалдығы	73,15	13,18	5,55	1,19	1,52	0,15	1,51	2,58	0,19	0,04	0,04	0,3	0,6	100

Үйінді шаймалау қалдығының химиялық құрамы портландцемент клинкері өндірісінде сазды компонентті ретінде ішінара немесе толығымен ауыстыруға мүмкіндік береді. Кремний оксидінің мөлшері 73 %-дан асады, Al₂O₃ - 13,18 % болды, бұл шикізат қоспасында портландцемент клинкерін құйдіріп алу үшін қолданылатын шикізат шихтасының алюминий силикат компонентін толықтай алмастыра алады. Сонымен қатар, 0,6 % басқа оксидтерге: NiO – 0,003; CoO – 0,003; As₂O₃ – 0,013; SnO – 0,071; SeO – 0,094; MoO – 0,416 % жатады.

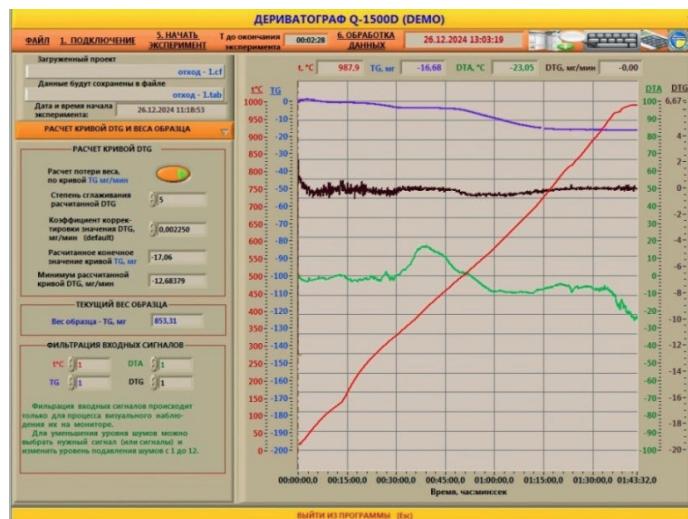
Malvern Panalytical компаниясының Aeris рентгендік дифрактометрінде үйінді шаймалау қалдығына рентгендік құрылымдық талдау жасалды. 2 суретте үйінді шаймалау қалдығының рентгенограммасы, рентгендік құрылымды талдау нәтижесі көрсетілген.



Сурет 2. Үйінді шаймалау қалдығының рентгенограммасы

Рентгендік құрылымдық талдау нәтижесінде кварц, периклаз, иллит, лангит минералдарының дифракциялық максимумдары тіркелді. Кварц минералының мөлшері – 72,3 %, периклаз минералы – 5,2 %, иллит сазды минералы 12,7 % және лангит минералы – 9,8 % қурады.

Q-1500D дериватограф көмегімен үйінді шаймалау қалдығына дифференциалды термиялық талдау жасалды. З суретте үйінді шаймалау қалдығының дериватограммасы келтірілген.



Сүрет 3. Үйінді шаймалау қалдығының дериватограммасы

Үйінді шаймалау қалдықтарында кездесетін аздаған цианидтер негізгі улы компонент болып табылады. Олар жоғары температура әсерінен жойылады. Цианидтер цианид түріне байланысты 300-ден 500°С-қа дейінгі температурада ыдырайды. Үйірау процесінде аммиак, көмірқышқыл газы, азот және сутегі сияқты аз улы заттар тұзіледі. Цианидтердің тотығуы оттегінің қатысуымен жүруі мүмкін, бұл олардың толық ыдырауына ықпал етеді. Цианидтердің ыдырау реакциясы келесідей:



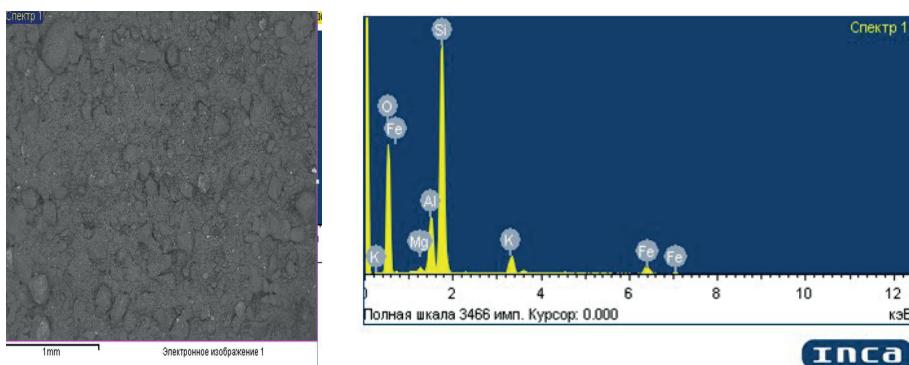
Ыдырағаннан кейін цианидтер көміркышқыл газы мен азот сияқты аз уытты қосылыстарға айналады, олар оңай жойылады.

Ал сульфидті қосылыстарды термиялық өндегу кезінде олардың тотығуы жүрді, бұл тұрақты оксидтердің пайда болуына әкеледі, сульфидтер сульфаттарға дейін тотығады:



Қалдықтарды жоғары температурада күйдіру процесінде құкіртсүтек (H_2S), аммиак (NH_3) және басқа ұшпа заттар сияқты қосылыстарды газ түрінде алып тастауга және газ тазарту қондырығыларында жинауға болады. Пиролиз-жоғары температурада (әдетте 500-600 °C) оттегі болмаған кезде органикалық заттардың термиялық ыдырауы орындалады. Пиролизде көміртегі бар қалдық заттар, сондай-ақ цианидтер сияқты үйінді шаймалау қалдықтарындағы органикалық коспаларды жоюға болады. Пиролиз процесі сонымен қатар атмосфераға улы заттардың шығарылуын азайтуға мүмкіндік береді. Термиялық өндеден кейінгі қалдықтар тұрақтандырылған және улы заттардан тазартылған жағдайда цемент өндіру үшін пайдалануға немесе басқа құрылымдарына қоспа ретінде пайдалануға болады.

JEOL JSM-6490 LV маркалы электронды микроскоптың көмегімен үйінді шаймалау қалдығына микрокұрылымдық талдау жасалды. 4 суретте үйінді шаймалау қалдығының микрокұрылымы және спектрограммасы келтірілген.



Сурет 4. Үйінді шаймалау қалдығының микрокұрылымы және спектрограммасы

Расторлы электронды микроскоптың көмегімен қалдық беттерін зерттеп, әртүрлі фазалардың болуын, олардың өлшемін, таралуын және құрылымын анықтауға болады. Микроскопиялық талдау кезінде, сынама құрамында кварц

және сазды минерал фазаларынан тұратындығы анықталды. Құрылымы бойынша кварцтың өлшемі 0,1-0,6 мм, ал сазды минерал иллит 0,1-0,2 мм өлшемінде ұсынылған. Шаймалау кезінде мыс сульфидтерінің тотығуы нәтижесінде пайда болған екіншілік лангит минералының фазаларында кездестіруге болады.

Қорытынды.

1. Үйінді шаймалау қалдығы құрамында SiO_2 – 73 %, Al_2O_3 - 13,18 % кездесетіндігі анықталды, бұл оны портландцемент клинкер құйдіру үшін шикізат құрамына сазды компонент ретінде қосуға болады. Химиялық құрамында ауыр металдардың мөлшері 1,17 % құрады, бұл шамадан артық емес екендігін дәлелдеді.

2. Үйінді шаймалау қалдығы құрамында кездесетін минералдардың мөлшері: SiO_2 – 72,3 %, периклаз – 5,2 %, иллит – 12,7 % және лангит – 9,8 % болды. Анықталған минералдардан басқа зиянды қоспалардың кездеспегендігі анықталды.

3. Үйінді шаймалау қалдықтарды жоғары 1000-1050 $^{\circ}\text{C}$ температурада термиялық өндеу нәтижесінде олардың құрамындағы улы заттарды (цианидтерді) жоюға, қалдықтардың құрамын тұрақтандыруға және оларды қауіпсіз етуге болатындығы анықталды.

4. Үйінді шаймалау қалдықтары құрамында кездесетін фазалардың, кварц минералы 0,1-0,6 мм және сазды минерал иллит 0,1-0,2 мм өлшемі анықталды.

Қорытындылай келе, жүргізілген зерттеу нәтижесінде портландцемент алу үшін құрамында алтыны бар кендерді өндеуден алынған үйінді шаймалау қалдықтарын пайдаланудың әлеуеттік мүмкіндігі жоғары, бірақ мұқият зерттеу мен өндеуді қажет етеді!

Әдебиеттер

Chatterjee A.K. (2018) Cement Production Technology: Principles and Practice, CRC Press: — FL, USA, — 439 p.

Her S., Park J., Li P., Bae S. (2022) Feasibility Study on Utilization of Pulverized Eggshell Waste as an Alternative to Limestone in Raw Materials for Portland Cement Clinker Production. Construction Building Materials, — 324, — 126589. (in English)

Hognies M., Chen J.J., Bouillon C. (2013) Overview about the use of fourier transform infrared spectroscopy to study cementitious materials. Transactions on Engineering Sciences, — 77. — 251-262. doi:10.2495/MC130221 (in English)

Zhanikulov N.N., Taimasov B.T., Borisov I.N., Dzhanmuldaeva Zh.K., Dauletiarov M.S. (2020) Research on the obtaining of low energy cements from technogenic raw materials. Journal of Chemical Technology and Metallurgy, — 4, —P. 814-823.

Кузнецова Т.В., Самченко С.В. (2007) Цемент өндірісі матеріалдарының микроскопиясы, МИКХиС басылымы: Мәскеу, — 2007, — 304 б.

Қазақстан Республикасы Президентінің 2013 жылғы 30 мамырдағы №577 Жарлығы «Қазақстан Республикасының «жасыл экономикаға» көшүі жөніндегі тұжырымдама туралы». Мына сілтемеде. <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/U1300000577>, 30.05.2013 ж.

Қазақстан Республикасы Үкіметінің 2023 жылғы 24 қазандары №941 қаулысы «Ең үздік қолжетімді техникалар бойынша «Цемент және әк өндірісі» анықтамалығын бекіту туралы». Мына сілтемеде. <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/P2300000941>, 24.10.2023 ж.

Қалдықтарды азайту, қайта өндеу және қайталама пайдалану туралы акпарат. Мына сілтемеде. https://egov.kz/cms/kk/articles/ecology/waste_reduction_recycling_and_reuse, 09.01.2023 ж.

Макарова И.А., Лохова Н.А. (2011) Құрылым материалдарын зерттеудің физика-химиялық әдістері, БМУ басылымы: Беларусь, — 2011. — 139 б.

Мырзакожа Да.А., Мирзаходжаев А.А. (2014) Заманауи зерттеу әдістері, Алматы, — 2014, — 352 б. (in Kazakh)

Потапова Е.Н. (2016) Цемент өндірісінің ең жақсы технологиялары. Ресейлік анықтамалықты әзірлеу тәжірибесі, Крокус: Мәскеу, — 2016, — 49 б.

Таймасов Б.Т., Әлжанова А.Ж. (2015) Тұтастырғыш заттардың химиялық технологиясы, Эверо: — Алматы, — 2015, — 380 б.

Таймасов Б.Т., Худякова Т.М., Даuletaryarov M.C. (2019) Тұтастырғыш материалдарды талдаудың физика-химиялық әдістері, М.Әuezov атын. ОҚМУ: Шымкент, — 2019, — 126 б.

References

- Chatterjee A.K. (2018) Cement Production Technology: Principles and Practice, CRC Press: — FL, USA, — 439 p. (in English)
- Her S., Park J., Li P., Bae S. (2022) Feasibility Study on Utilization of Pulverized Eggshell Waste as an Alternative to Limestone in Raw Materials for Portland Cement Clinker Production. Constriction Building Materials, — 324, — 126589. (in English)
- Horgnies M., Chen J.J., Bouillon C. (2013) Overview about the use of fourier transform infrared spectroscopy to study cementitious materials. Transactions on Engineering Sciences, — 77. — 251-262. doi:10.2495/MC130221 (in English)
- Kuznetsova T.V., Samchenko S.V. (2007) Mikroskopiya materialov tsementnogo proizvodstva [Microscopy of cement production materials]. MSAPUC edition: Moscow, — 2007, — 304 p. (in Russian)
- Makarova I.A., Lokhova N.A. (2011) Fiziko-khimicheskiye metody issledovaniya stroitel'nykh materialov [Physico-chemical methods of research of building materials]. BSU edition: Belarus, — 2011. — 139 p. (in Russian)
- Myrzakozha D.A., Mirzakhodzhaev A.A. (2014) Zamaunuiz zertteu adisteri [Modern research methods]. Almaty, — 2014, — 352 p. (in Kazakh)
- Potapova E.N. (2016) Nailuchshiye dostupnyye tekhnologii proizvodstva tsementa. Opyt razrabotki rossiyskogo spravochnika [The best cement production technologies. Experience in the development of the Russian directory]. Crocus: Moscow, — 2016, — 49 p. (in Russian)
- Qaldıqtardı azaytu, qayta ondeu Jane qaytalama paydalanan turali aqparat [Information on waste reduction, recycling and reuse]. On this link. https://egov.kz/cms/kk/articles/ecology/waste_reduction_recycling_and_reuse, 09.01.2023. (in Kazakh)
- Qazaqstan Respublikasi Prezidentinin 2013 jilgi 30 mamirdagi №577 Jarligi «Qazaqstan Respublikasının «jasıl ekonomikaga» koswi jonidegi tujirimdama twralı» [Decree of the president of the Republic of Kazakhstan dated May 30, 2013 No. 577 «On the concept of transition of the Republic of Kazakhstan to a «green economy»]. On this link. <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/U1300000577>, 30.05.2013. (in Kazakh)
- Qazaqstan Respublikasi Ukimetinin 2023 jilgi 24 qazandagi №941 qawlisi «En uzdik qoljetimdi texnikalar boyinsa «Cement Jane ak ondirisi» aniqtamaligini bekitu turali» [Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan dated October 24, 2023 No. 941 «On approval of the directory «Cement and lime production» by the best available techniques»]. On this link. <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/P2300000941>, 24.10.2023. (in Kazakh)
- Taimasov B.T., Alzhanova A.Zh. (2015) Tutastırğıw zattardin ximiyalyq texnologiyasi [Chemical Technology of binding materials]. Evero: — Almaty, — 2015, — 380 p. (in Kazakh)
- Taimasov B.T., Khudyakova T.M., Dauletaryarov M.S. (2019) Fiziko- khimicheskiye metody analiza vyazhushchikh materialov [Physico-chemical methods of analysis of binding materials]. M. Auezov SKSU: Shymkent, — 2019, — 126 p. (in Russian)
- Zhanikulov N.N., Taimasov B.T., Borisov I.N., Dzhanmuldaeva Zh.K., Dauletiarov M.S. (2020) Research on the obtaining of low energy cements from technogenic raw materials. Journal of Chemical Technology and Metallurgy, — 4, — 814-823. (in English)

REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
ISSN 2224-5227
Volume 1. Number 353 (2025), 196–205

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.335>

UDC 663.81

**A.A. Zheldybaeva^{1*}, A.CH. Katashova¹, K.A. Iskakov², D.E. Nurmukhanbetova³,
A. Azamatkyzy¹, 2025.**

¹Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan;

²Kazakh Scientific Research Institute of Animal and Fodder Production,
Almaty, Kazakhstan;

³Narxoz University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: runia_@mail.ru

NATURAL CRITERIA OF VEGETABLE JUICES AND THEIR QUALITY DETERMINATION

Zheldybayeva A.A. – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the «Food Safety and Quality» Department, Almaty Technological University, Kazakhstan, Almaty, e-mail: runia_@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2207-4177;

Katasheva A.Ch. – Candidate of Agricultural Sciences; Associate Professor of the Department of «Food Biotechnology», Almaty Technological University, Kazakhstan, Almaty, e-mail: alma_81.kz81@mail.ru, ORCID: 0000-0002-4242-4747;

Iskakov Kairat Alimgozhayevich – PhD Senior Researcher of the department of sheep breeding of the meat direction, Kazakh Scientific Research Institute of Animal and Fodder Production, Kazakhstan, Almaty, e-mail: kairat11101988@mali.ru. ORCID: 0000-0002-8424-009X;

Nurmukhanbetova D.E. – candidate of technical sciences, Narxoz University, EP “Restaurant and hotel business” Almaty, Republic of Kazakhstan, Almaty, E-mail: dinara.nurmukhanbetova@narxoz.kz. ORCID: 0000-0002-8939-6325;

Azamatkyzy A. – Master’s student of the «Food Safety and Quality» Department; Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan, Almaty, e-mail: azamatkyzy02@mail.ru. ORCID: 0009-0001-6555-9628.

Abstract. This article analyzes international and national requirements for evaluating vegetable juice quality standards, emphasizing their importance in maintaining consumer trust and product authenticity. Juice adulteration remains a major issue in the food industry, as some manufacturers and suppliers use modern methods to replace original ingredients with cheaper substitutes to maximize profits. This practice complicates chemical analysis and quality assurance.

To address these challenges and combat juice falsification in Kazakhstan, statistical guidelines have been developed to provide reliable benchmarks. While not official standards, these guidelines help regulate and organize the production of high-quality juices and juice-based products. In the competitive food market, studying the chemical properties of locally sourced vegetable juices is crucial for establishing natural quality indicators and ensuring authenticity.

This study analyzed the physical and chemical properties of tomato juice from retail markets in Almaty using standard analytical methods. Key parameters, including soluble solids, chloride levels, cellulose content, titratable acidity, and formaldehyde concentration, were assessed. Formaldehyde content, an indicator of the juice's amino acid composition and authenticity, should fall within 28–45 cm³ of 0.1 NaOH per 100 cm³. All 10 analyzed samples met this criterion, confirming their authenticity.

The findings highlight the importance of standardized analytical methods in monitoring juice quality. Further research is needed to refine quality standards, ensuring consumers have access to authentic, high-quality products while fostering the development of Kazakhstan's local juice industry.

Keywords: Juice, classification, criteria, identification, naturalness, vegetables, vegetable juices, quality.

**А.А. Жельдыбаева^{1*}, А.Ч. Каташева¹, К.А. Искаков², Д.Е. Нурмуханбетова³,
А. Азamatқызы¹, 2025.**

¹Алматы Технологиялық Университеті, Алматы, Қазақстан;

²Қазақ мал шаруашылығы және жемшөп өндірісі ғылыми-зерттеу институты,
Алматы, Қазақстан;

³Нархоз университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: runia_@mail.ru

ҚОҚӨНІС ШЫРЫНДАРЫНЫҢ ТАБИҒИ КРИТЕРИЙЛЕРІ МЕН САПАСЫН АНЫҚТАУ

Жельдыбаева А.А. – Химия ғылымдарының кандидаты, «Тағам өнімдерінің қауіпсіздігі және сапасы» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан, Алматы, e-mail: runia_@mail.ru. ORCID: 0000-0003-2207-4177;

Каташева А.Ч. – Ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, «Тағамдық биотехнология» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан, Алматы, e-mail: alma_81.kz81@mail.ru. ORCID: 0000-0002-4242-4747;

Искаков Кайрат Алимжоаевич – PhD, ет бағыттындағы қой шаруашылығы бөлімінің аға ғылыми қызметкери, Қазақ мал шаруашылығы және жемшөп өндірісі ғылыми-зерттеу институты, Қазақстан, Алматы, e-mail: kairat1101988@mali.ru, ORCID: 0000-0002-8424-009X;

Нурмуханбетова Д.Е. – техника ғылымдарының кандидаты, Нархоз университеті, «Мейрамхана және отель бизнесі» білім беру бағдарламасы, Қазақстан, Алматы, E-mail: dinara.nurmukhanbetova@narxoz.kz, ORCID: 0000-0002-8939-6325;

Азamatқызы Аружан – Тағам өнімдерінің қауіпсіздігі және сапасы “ кафедрасының магистранты, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан, Алматы, e-mail: azamatzy02@mail.ru, ORCID: 0009-0001-6555-9628.

Аннотация. Мақалада көкөніс шырындарының сапасын бағалауға арналған халықаралық және ұлттық талаптар талданып, оларға тұтынушылар сенімі мен өнімнің түпнұсқалығының қамтамасыз етудегі маңыздылығы атап көрсетілген. Бүгінде шырындарды жалған жасау мәселесі өзекті болып отыр, өйткені кейір өндірушілер пайда табу мақсатында жоғары сапалы ингредиенттердің орнына арзан баламаларды қолданады. Бұл өнім сапасын бақылауды және химиялық талдауды қыннадатады.

Қазақстанда шырындарды жалған жасаумен күресу үшін статистикалық ұсынымдар әзірленді. Олар ресми стандарттар болмаганымен, сапалы шырындар мен шырын негізіндегі өнімдерді өндіруді реттеуге және ұйымдастыруға ықпал етеді. Жергілікті шикізаттан алынған көкөніс шырындарының химиялық қасиеттерін зерттеу табиғи көрсеткіштерді анықтау және түпнұсқалықты растау үшін маңызды рөл атқарады.

Алматының бөлшек сауда орындарынан алынған қызанақ шырынының физика-химиялық қасиеттері зерттелді. Стандартты әдістер қолданылып, еритін қатты заттар, хлоридтер, целлюлоза мөлшері, титрленетін қышқылдық және формальдегид концентрациясы сияқты параметрлер зерттелді. Формальдегид деңгейі, ол аминқышыл құрамының маркері ретінде 28–45 см³ 0,1 NaOH аралығында болуы тиіс. Зерттелген 10 үлгінің барлығы осы шектерге сай келді.

Зерттеу шырындардың сапасын бақылауда стандартты әдістерді қолданудың маңыздылығын көрсетеді. Тұтынушыларды сапалы әрі түпнұсқа өнімдермен қамтамасыз ету және жергілікті шырын өндірісін дамыту үшін сапа стандарттарын жетілдіру қажет.

Түйін сөздер: Шырын, жіктеу, критерий, сәйкестендіру, табиғилық, көкөністер, көкөніс шырындары, сапа.

**А.А. Жельдыбаева^{1*}, А.Ч. Каташева¹, К.А. Искаков², Д.Е. Нурмуханбетова³,
А. Азаматқызы⁴, 2025.**

¹Алматинский Технологический Университет, Алматы, Казахстан;

²Казахский научно-исследовательский институт животноводства и

кормопроизводства, Алматы, Казахстан;

³Университет Нархоз, Алматы, Казахстан;

E-mail: runia_@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ КРИТЕРИЕВ И КАЧЕСТВА ОВОЩНЫХ СОКОВ

А. А. Жельдыбаева – кандидат химических наук, ассоциированный профессор кафедры «Безопасность и качество пищевых продуктов», Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан, Алматы, E-mail: runia_@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2207-4177;

А.Ч. Каташева – кандидат сельскохозяйственных наук, ассоциированный профессор кафедры «Пищевая биотехнология», Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан, E-mail: alma_81.kz81@mail.ru, ORCID: 0000-0002-4242-4747;

Д.Е. Нурмуханбетова – кандидат технических наук, Университет Нархоз, ОП «Ресторанный и отельный бизнес», Алматы, Казахстан, E-mail: dinara.nurmukhanbetova@narxoz.kz, ORCID: 0000-0002-8939-6325;

К.А. Искаков – PhD, старший научный сотрудник отдела овцеводства мясного направления, Казахский научно-исследовательский институт животноводства и кормопроизводства, Алматы, Казахстан, E-mail: kairat11101988@mali.ru, ORCID: 0000-0002-8424-009X;

А. Азаматқызы – магистрант кафедры «Безопасность и качество пищевых продуктов», Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан, E-mail: azamatyzy02@mail.ru, ORCID: 0009-0001-6555-9628.

Аннотация. В статье анализируются международные и национальные требования к оценке качества овощных соков, подчёркивается их важность для сохранения доверия потребителей и обеспечения подлинности продукции. Проблема фальсификации соков остаётся актуальной, так как недобросовестные производители часто используют дешёвые заменители оригинальных ингредиентов для увеличения прибыли. Это усложняет химический анализ и контроль качества продукции.

Для борьбы с фальсификацией соков в Казахстане были разработаны статистические рекомендации. Хотя они не являются официальными стандартами, данные ориентиры помогают регулировать и организовывать производство качественных соков и продуктов на их основе. Исследование химических свойств овощных соков из местного сырья играет важную роль в установлении их природных показателей и подтверждении подлинности.

В рамках исследования были изучены физико-химические свойства томатного сока с розничных рынков Алматы. Использовались стандартные аналитические методы для оценки растворимых твёрдых веществ, уровня хлоридов, содержания целлюлозы, титруемой кислотности и концентрации формальдегида. Уровень формальдегида, являющийся маркером аминокислотного состава и подлинности сока, должен находиться в пределах $28\text{--}45 \text{ см}^3$ $0,1 \text{ NaOH}$ на 100 см^3 . Все 10 проанализированных образцов соответствовали данному диапазону.

Результаты подчёркивают важность использования стандартных методов для контроля качества соков. Необходимы дальнейшие исследования для разработки стандартов, которые обеспечат доступ к качественной и подлинной продукции, а также поддержку местного производства соков.

Ключевые слова: сок, классификация, критерий, идентификация, натуральность, овощи, овощные соки, качество.

Introduction. Vegetable juices are a source of biologically active substances important for human life and are therefore always in demand. The production and sale of vegetable juices is a vital sector of food production and consumption in several countries. The juice industry in Kazakhstan is one of the rapidly developing sectors and is of interest in ensuring food safety. Along with fresh fruits and vegetables, their juices provide the human body with a full range of biologically active substances, such as vitamins, macro- and microelements, polyphenols, and many other substances essential for normal life. A well-balanced diet ensures the normal development, growth, and activity of the human body, helps adapt to environmental changes, fight infections, slows down aging, prevents premature aging, and increases the level of active and long life (Syzdykova, et al., 2022; Filippova, et al., 1999).

The Customs Union Technical Regulation 023/2013 “Technical Regulation on Juice Products from Fruits and Vegetables” provides a harmonized classification of juices according to international requirements (Autko, 2007).

The identification of quality indicators for juice products is performed to confirm that the product belongs to a specific category of fruit and vegetable juice, and also to

compare the product name with the category specified in the Customs Union technical regulation.

Naturalness refers to the product's ability to retain the original physical, chemical, organoleptic, and nutritional properties of the fruit or vegetable from which it is made. To confirm the naturalness of fruit and vegetable juice, the physical-chemical, organoleptic, and other relevant properties of the juice are evaluated, including the percentage of soluble solids, the amount of juice or puree in nectars and juice beverages, and the chemical composition of the juice considering varietal, geographical, climatic, and technological factors (TR TS 023/2011, 2011).

Modern quality analysis methods for vegetable juices include the use of multisensor technologies, such as electronic noses and tongues. These devices replicate human sensory organs and can measure volatile compounds and taste characteristics. These methods enable a more objective and precise evaluation of the naturalness and quality of juices compared to traditional sensory assessments.

To prevent falsification, several statistical documents have been developed worldwide for evaluating the quality of juices, even though they are not standard documents. These documents provide a sufficient basis for controlling and organizing the production of high-quality juice and juice-containing products. In the EU, there are several regulatory documents used to evaluate the authenticity and quality of fruit and vegetable juices. These include:

- The European Fruit and Vegetable Juice Producers Association (AIJN) guidelines for evaluating the quality of fruit and vegetable juices (Nizharadze, 2005);
- Permissible values and limits for juice quality standards in Germany (RSK);
- The AFNOR quality standards set by the French Standardization Organization (France);
 - The Authenticity Criteria Code of the Netherlands. These documents include a compilation of the physical-chemical and biochemical characteristics of fruit and vegetable juices, as well as detailed descriptions of analysis methods for juice composition (Code of Practice for Evaluation of Fruit and Vegetable Juices, 1993).

Materials and research methods

The Code of Practice (AIJN) is particularly significant. AIJN currently unites 13 full members – national associations of fruit and vegetable juice producers from EU member states (Austria, Belgium, Denmark, Finland, France, Germany, Ireland, Italy, Netherlands, Portugal, Spain, Sweden, United Kingdom) and two affiliate members (Hungarian Juice Association and Polish Juice and Beverage Producers Association) along with eight observer organizations. The AIJN Technical Committee has developed and confirmed the physical-chemical properties of juices from fruits and vegetables. These indicators reflect the chemical composition of natural fruit and vegetable juices and serve as reliable criteria for determining juice quality and authenticity (Code of Practice for Evaluation of Fruit and Vegetable Juices, 1993).

Properly produced fresh fruit and vegetable juices should contain no volatile acids, lactic acid, or ethanol. The presence of these substances may indicate poor-quality raw materials or hygiene issues in production. Low-quality raw materials can also lead to

the formation of harmful substances like mycotoxins, such as patulin, and therefore its content must be monitored. The contamination of juice products with external environmental pollutants, especially when packed in metal containers, should also be strictly controlled. Levels of iron and tin should not exceed permissible limits (Kolesnov, 2009). Oxymethylfurfural (OMF) content increases in juices that have undergone excessive thermal treatment or have been stored improperly for too long. An increase in OMF is usually accompanied by a decrease in L-ascorbic acid, a change in color, and other organoleptic properties. Additional indicators for assessing juice quality and naturalness include titratable acidity, mineral content, the number of formaldehyde compounds, sugar content (glucose, fructose, sucrose), and non-sugar extractives. Only the L-isomer of malic acid is found in fruits and vegetables. The D-isomer appears only after the industrial addition of D/L-malic acid. These isomers can be identified enzymatically (Schobinger, 2004).

The biochemical properties of fruits and vegetables depend on several natural factors, including variety, growing region, climatic conditions, soil quality, and ripeness, which in turn affect the physical-chemical characteristics of juices derived from them. AIJN's guidelines are not limited to the EU but have gained international significance, especially for trade in fruit and vegetable juices worldwide. These guidelines are used globally, not only for juice production but also for setting contractual quality requirements for juice trade. AIJN's comprehensive database of physical-chemical properties of juices is widely used for quality assessment within the European Quality Control System (EQCS) (Kolesnov, 2009).

Results and Discussion

At the Department of Food Biotechnology, methods for assessing the quality and safety of food products have been developed. These methods allow for determining the natural and complex properties of vegetable juices, based on international standards. Among the key physical-chemical characteristics, soluble solids, acidity, chlorides, and cellulose content are used to assess the quality of juices. For tomato juices, the minimum requirement for soluble solids is 5.0%, and the acidity should be at least 0.3%. All the tested samples met these technical standards. The pH level, ranging from 4.1 to 4.4, is a crucial indicator for determining food safety, as it correlates with the proper sanitation and hygiene standards in production (Filippova, et al., 1999).

The number of formaldehyde compounds in juice, which reflects free amino acids, was measured by treating juice samples with formaldehyde, resulting in a release of protons. The number of released protons was determined by titration with alkali. For the tomato juice samples, the number of formaldehyde compounds ranged from 28 to 45 cm³ of 0.1 NaOH per 100 cm³. Although the number of formaldehyde compounds is not standardized, its variation is considered an important indicator for assessing juice authenticity, particularly in detecting fraudulent products. The determination of naturalness for juices from local raw materials, including pumpkin juice, has been established based on the defined criteria for quality and authenticity.

Modern quality analysis methods for vegetable juices include the use of multisensor technologies, such as electronic noses and tongues. These devices replicate human

sensory organs and can measure volatile compounds and taste characteristics. These methods enable a more objective and precise evaluation of the naturalness and quality of juices compared to traditional sensory assessments. Non-destructive techniques, such as near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging, are actively used for quality assessment of fruits and vegetables. These approaches are also applicable to juices as they allow for the evaluation of parameters like soluble solids, acidity, and the presence of defects while preserving the original composition of the analyzed product. When assessing juice quality, key parameters include taste, texture, appearance, and nutritional value. Studies show that factors like soluble solids content, acidity, and color play a crucial role in determining the authenticity and appeal of the product to consume (Osmólska, et al., 2023; Pathare, et al., 2022; Ponnusamy, 2022).

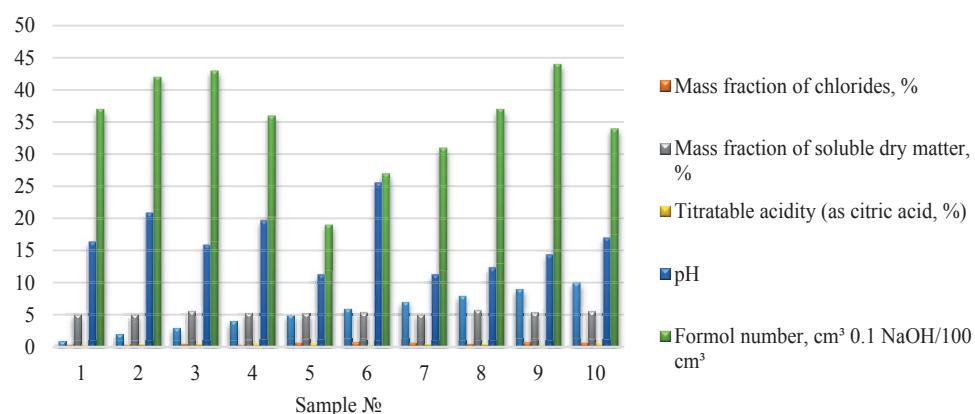


Figure 1. Results of the physicochemical analysis of tomato juice

Figure 1 presents the results of the analysis of 10 tomato juice samples based on five key indicators: mass fraction of chlorides, soluble dry matter, titratable acidity (expressed as citric acid), pH, and formal number. The analysis shows significant variations among the samples. The mass fraction of chlorides remains low, while the mass fraction of soluble dry matter varies, reaching its highest values in samples 3 and 5. Titratable acidity demonstrates moderate differences, which may indicate variations in tomato ripeness. The pH remains relatively stable, confirming the acidic nature of the product. The formal number shows the highest values in samples 2, 3, 5, and 9, which may indicate a higher content of amine compounds.

Table 1. Identification Indicators of Pumpkin Juice

Indicator name	Unit of measurement	Indicator value		
		Minimum	Maximum	average
Relative density	-	1,016	1,056	1,036
Soluble dry matter	%	3,8	13,6	8,7
Titratable acidity	mmol H+/dm³	7	27	17
Citric acid	mg/dm³	11	321	161

L-malic acid	mg/dm ³	0,4	1,8	1,05
Ash	g/dm ³	3,6	6,1	5,1
Sodium	mg/dm ³	2,6	9,1	5,6
Potassium	mg/dm ³	1166	3881	2531
Magnesium	mg/dm ³	59	207	133
Calcium	mg/dm ³	66	231	151
Phosphorus	mg/dm ³	121	441	281
Formol number	cm ³ 0.1 NaOH	6	25	16
Glucose	g/dm ³	11	41	26
Fructose	g/dm ³	9	41	26
Glucose-to-fructose ratio	-	0,9	1,4	1,2
Sucrose	g/dm ³	0	67	33
Sugar-free extract	g/dm ³	8	21	14

The results indicate (table1) that the relative density varies from 1.016 to 1.056, while the mass fraction of soluble dry matter ranges from 3.8% to 13.6%, with an average of 8.7%, reflecting differences in sugar, organic acid, and extractive substance content. Titratable acidity fluctuates between 7 and 27 mmol H+/dm³, and citric acid content reaches 321 mg/dm³, influencing the taste and acidity of the juice. The mineral composition shows significant variations, with sodium content ranging from 1,166 to 3,881 mg/dm³, potassium from 121 to 441 mg/dm³, and calcium from 66 to 231 mg/dm³. Sugar levels also vary: glucose and fructose concentrations reach 41 g/dm³, while sucrose content is up to 67 g/dm³.

Conclusion

Using international methodologies for assessing the quality and authenticity of juice products, modern high-precision techniques allow for a thorough evaluation of juices to identify potential adulteration. Parameters like the levels of total solids, acidity, chloride concentration, and soft solids are crucial in evaluating the maturity of vegetables and the overall quality of the juice. However, since these indicators can be easily modified by adding acids or sugars, they cannot reliably serve as natural markers for juice authenticity. To verify authenticity, it is critical to consider more intricate indicators, such as the formal titration value, sugar isomer ratios, and other characteristics that are less prone to manipulation.

As part of this study, a comprehensive physicochemical analysis was conducted on various juice samples, including tomato and pumpkin juices. The research involved determining soluble solids content, pH levels, acidity, and chloride concentration, using titration and spectroscopic techniques. Additionally, formaldehyde compound measurements were performed to assess the presence of free amino acids, which serve as indirect markers of product authenticity. The results showed that all analyzed samples met the established standards for acidity and soluble solids, while variations in formal titration values indicated differences in raw material composition and potential processing methods.

Furthermore, modern multisensor technologies, such as electronic noses and tongues, were explored for their potential in improving juice authenticity assessment. These methods allow for objective evaluation of taste and aroma profiles, reducing the subjectivity of traditional sensory analysis. Additionally, non-destructive analytical techniques, including near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging, demonstrated their effectiveness in assessing the quality of juices while preserving their original composition.

Overall, the study confirms that while conventional quality parameters are important, they should be supplemented with advanced analytical techniques to ensure the authenticity and safety of juice products. The obtained data provide valuable insights for improving quality control processes in the food industry and developing more accurate methodologies for detecting adulteration in vegetable juices.

Әдебиеттер

Сыздыкова Л.С., Зарицкая Н.Е., Абдиева К.М., (2022) Кожахиева М.О. Исследование пищевой и биологической ценности кислых овощных соков. Вестник Алматинского Технологического Университета, 86-90 с. DOI: <https://doi.org/10.48184/2304-568X-2022-1-86-90>.

Филиппова Р. Л. (1999) Роль фруктовых и овощных соков в профилактике заболеваний / Р. Л. Филиппова, Е. М. Володина, А. Ю. Колеснов. Пищевая промышленность. № 6, 64-65 с. DOI:[org/doi/pdf/10.5555/20183124395](https://doi.org/10.5555/20183124395) (in Russian)

Аутко А.А. (2007) Значение овощей для питания и здоровья человека: [беседа с директором Института овощеводства НАН Беларусь А.А. Аутко / записал В. Лебедев]. Наука и инновации. № 9, 18-21с. DOI:<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2017-4-123-129> (in Russian)

TP TC 023/2011. (2011) Технический регламент на соковую продукцию из фруктов и овощей. - Утв. Решением Комиссии Таможенного союза от 9 дек. 2011г. №882, 56 с. DOI: https://www.rustandard.com/images/CU_TR/TR_CU_023.2011_succhi_di_frutta_e_verdura.pdf

Нижарадзе Э. (2005) Проблема фальсификации цитрусовых соков и методы ее обнаружения. Э. Нижарадзе. - Батуми: БГУ им. Ш. Руставели, 198 с. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2017-4-123-129>

Code of practice for evaluation of fruit and vegetable juices. Association of Judustry of Juices and Nectars from Fruits and Vegetables of the European Union. A.J.J.N., (1993), 75 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-5422-1_9

Колеснов А.Ю. (2009) Оценка подлинности как основная составляющая системы защиты потребительского рынка соков. А. Ю. Колеснов. Методы оценки соответствия. № 5, 38-42 с. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2017-4-123-129>

Шобингер У. (2004) Фруктовые и овощные соки: научные основы и технологии. У. Шобингер. - СПб. : Профессия, 640 с. DOI: file:///C:/Users/User/Downloads/10.pdf

ГОСТ 31082-2002. (2003) Соки фруктовые и овощные. Метод определения L-яблочной кислоты. - Введ. 01.11.03. - Минск : Госстандарт, 5 с. DOI: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293736/4293736580.pdf>

Fibre concentrates from apple pomace and citrus peel as potential fibre sources for food enrichment / F. Figuerola et al. Journal of Food Science, (2004) №52 (6). - P. 1595-1599. DOI: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/120082/Figuerola_F.pdf?sequence=1

Jurr M. Dietary fibres. M. Jurr, N. Asp. (1996) - Madrid : ILSI Press, 22 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-1435-7_15

Kostalova, Z. (2009) Chemical evaluation of seeded fruit biomass of oil pumpkin (Cucurbitaceae pepo L. var Starica). Z. Kostalova, Z. Hromadkova, A. Ebringerov. Chemical Papers, Vol. 63 (4), 406-413 p. DOI: https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2009ChPap..63..406K/doi:10.2478/s11696-009-0035-5

Osmólska E., Stoma M., Starek-Wójcicka A. (2023) "Juice Quality Evaluation with Multisensor Systems—A Review". Sensors, 23(10), 4824. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23104824>

Pathare P.B., Opara U.L., Al-Said F.A.J. (2023) "Nondestructive Quality Assessment Techniques for Fresh Fruits and Vegetables". Springer, DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-5422-1_9

Ponnusamy V. (2022) "A Review on Quality Determination for Fruits and Vegetables". Algorithms for Intelligent Systems, 175-185. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-1435-7_15

References

- Syzdykova L.S., Zaritskaya N.E., Abdieva K.M., Kozakhieva M.O. (2022) Issledovanie pishchevoy i biologicheskoy tsennosti kislykh ovoshchnykh sokov [Study of the nutritional and biological value of acidic vegetable juices]. Bulletin of the Almaty Technological University; 86-90 p. DOI: <https://doi.org/10.48184/2304-568X-2022-1-86-90>. (in Russian)
- Philippova R.L., Volodina E.M., Kolesnov A.Yu. (1999) Rol' fruktovykh i ovoshchnykh sokov v profilaktike zbolevaniy [The role of fruit and vegetable juices in the prevention of diseases. Food Industry]. No. 6, 64-65 p. DOI:<https://doi.org/10.5555/20183124395> (in Russian)
- Autko A.A. (2007) Znachenije ovoshchey dlya pitaniya i zdrov'ya cheloveka: beseda s direktorom Instituta ovoshchovedstva NAN Belarusi A.A. Autko. [The importance of vegetables for human nutrition and health: interview with the director of the Institute of Horticulture, National Academy of Sciences of Belarus, A.A. Autko] / recorded by V. Lebedev. Science and Innovations. No. 9, 18-21 p. DOI:<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2017-4-123-129> (in Russian)
- TR TC 023/2011. Tekhnicheskiy reglament na sokovuyu produktsiyu iz fruktov i ovoshchey [Technical regulations for juice products from fruits and vegetables]. Approved by the Decision of the Commission of the Customs Union on Dec. 9, (2011), No. 882. 56 p. DOI: https://www.rustandard.com/images/CU_TR/TR_CU_023.2011_succhi_di_frutta_e_verdura.pdf (in Russian)
- Nizharradze E. (2005) Problema falsifikatsii tsitrusovykh sokov i metody yeye obnaruzheniya [The problem of citrus juice adulteration and methods for its detection]. Batumi: Shota Rustaveli State University, 198 p. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2017-4-123-129> (in Russian)
- Code of Practice for Evaluation of Fruit and Vegetable Juices. Association of the Industry of Juices and Nectars from Fruits and Vegetables of the European Union. A.J.J.N. (1993). 75 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-5422-1_9 (in English)
- Kolesnov A.Yu. (2009) Otsenka podlinnosti kak osnovnaya sostavlyayushchaya sistemy zashchity potrebitel'skogo rynka sokov [Authenticity assessment as a key component of the fruit juice market protection system]. Methods for Compliance Assessment. No. 5. 38-42 p. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2017-4-123-129>
- Schobinger U. (2004) Fruktovye i ovoshchnye soki: nauchnye osnovy i tekhnologii [Fruit and vegetable juices: scientific foundations and technologies]. St. Petersburg: Profession, 640 p. DOI: file:///C:/Users/User/Downloads/10.pdf (in Russian)
- GOST 31082-2002. (2003) Soki fruktovye i ovoshchnye. Metod opredeleniya L-yablochnoy kisloty [Fruit and vegetable juices. Method for determining L-malic acid]. Introduced 01.11.03. Minsk: State Standard, 5 p. DOI: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293736/4293736580.pdf> (in Russian)
- Figueroa F. (2004) Fibre concentrates from apple pomace and citrus peel as potential fibre sources for food enrichment. Journal of Food Science. Vol. 52 (6), 1595-1599 p. DOI: https://repository.uchile.cl/bitstream/handle/2250/120082/Figueroa_F.pdf?sequence=1 (in English)
- Jurr M., Asp N. Dietary fibres. (2009) Madrid: ILSI Press, (1996) 22 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-1435-7_15 (in English)
- Kostalova Z., Hromadkova Z., Ebringerova A. Chemical evaluation of seeded fruit biomass of oil pumpkin (*Cucurbita pepo* L. var *Styarica*). Chemical Papers. Vol. 63 (4), 406-413 p. DOI: https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2009ChPap..63..406K/doi:10.2478/s11696-009-0035-5 (in English)
- Osmólska E., Stoma M., Starek-Wójcicka A. (2023) "Juice Quality Evaluation with Multisensor Systems—A Review". Sensors, 23(10), 4824. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23104824> (in English)
- Pathare P.B., Opara U.L., Al-Said F.A.J. (2023) "Nondestructive Quality Assessment Techniques for Fresh Fruits and Vegetables". Springer, DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-5422-1_9 (in English)
- Ponnusamy V. (2022) "A Review on Quality Determination for Fruits and Vegetables". Algorithms for Intelligent Systems, 175-185. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-1435-7_15 (in English)

© A.B. Issayeva^{1,2*}, A.A. Sharipova¹, M.O. Issakhov³, G.A. Kadyrbekova², 2025.

¹Scientific and Production Enterprise «Antigen» LLP, Almaty, Kazakhstan;

² Satbayev University, Almaty, Kazakhstan;

³ Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: isa-asem@mail.ru

ROLE OF MICROENCAPSULATED HUMIC ACID BASED ON BIOPOLYMERS IN PLANT GROWTH STIMULATION

Issayeva Assem Bakhytzhanovna – PhD, Scientific researcher, Scientific and Production Enterprise «Antigen» LLP, Almaty, Kazakhstan, E-mail: isa-asem@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6727-0257>;

Sharipova Altynai Azigarovna – PhD, Research professor. Satbayev university, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: a_sharipova85@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2217-9975>;

Issakhov Miras Orynbasarovich – PhD-student, Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: mir001@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-6660-5787>;

Kadyrbekova Gulzhamal Asylbekkyzy – Student, Satbayev university, Almaty, Kazakhstan, E-mail: gulzhi.kadirbrkova@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-5025-7707>.

Abstract. Microencapsulation is the process of creating a protective shell around active substances in order to protect them from external factors, slow or regulate their release and improve stability. One of the promising microencapsulation technologies is the use of sodium alginate as a shell material. The use of microencapsulated biostimulants in agroindustry allows to significantly increase the efficiency of active substances due to their prolonged release and protection from external factors. One of the promising approaches is the use of natural polymers such as sodium alginate and humic acids. The emulsifier Span 80 is widely used to stabilise emulsions in the preparation of microcapsules. Evaluation of parameters such as surface tension, particle size and zeta potential is necessary to understand the stability and properties of the system.

This article focuses on the process of microencapsulation of humic acid using sodium alginate, investigating the features of this technology and its possible applications, discussing the methods and mechanisms of microencapsulation using biopolymers and emulsifiers and the different applications of the resulting microcapsules. Special attention is paid to environmental aspects including biodegradability and safety of the obtained microcapsules. In this paper, the parameters of microcapsules prepared by emulsion microencapsulation method using sodium alginate, humic acid and Span 80 emulsifier were investigated. Characteristics such as surface tension using RAT-1 tensiometer, particle size and zeta potential by dynamic light scattering (DLS) method

were investigated. The results demonstrate the stability of the obtained microcapsules, which is confirmed by their size and zeta potential values.

Key words: biostimulants, biopolymers, humic acid, microencapsulation, sodium alginate.

© А.Б. Исаева^{1,2*}, А.А. Шарипова², М.О. Исахов³, Г.А. Кадирбекова², 2025.

¹ «Антиген ғылыми-өндірістік кәсіпорны» ЖШС, Алматы, Қазақстан;

² Satbayev university, Алматы, Казахстан;

³ Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: isa-asem@mail.ru

БИОПОЛИМЕРЛЕРГЕ НЕГІЗДЕЛГЕН МИКРОКАПСУЛДАНҒАН ГУМИН ҚЫШҚЫЛЫНЫҢ ӨСІМДІКТЕРДІҢ ӨСҮІН ЫНТАЛАНДЫРУДАҒЫ РОЛІ

Исаева Асем Бахытжанқызы – PhD, «Антиген» ФӘК ЖШС ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан, E-mail: isa-asem@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6727-0257>;

Шарипова Алтынай Азигаровна – PhD, зерттеуші профессор, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, E-mail: a_sharipova85@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2217-9975>;

Исахов Мирас Орынбасарұлы – PhD докторант, Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: mir001@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-6660-5787>;

Кадирбекова Гульжамал Асылбекқызы – Студент Satbayev University, Алматы, Казахстан, E-mail: gulzhi.kadirbrkova@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-5025-7707>.

Аннотация. Микрокапсуляция – бұл сыртқы факторлардан қорғау, босатуды бәсендегу немесе реттеу және тұрақтылықты жақсарту мақсатында белсенді заттардың айналасында корганыс қабығын құру процесі. Микрокапсуляцияның перспективалы технологияларының бірі – натрий альгинатын қабықша материалы ретінде пайдалану. Агрономеркәсіпте микрокапсуляцияланған биостимуляторларды колдану олардың ұзақ үақыт босатылуы және сыртқы факторлардан қорғалуы есебінен белсенді заттардың тиімділігін едәуір арттыруға мүмкіндік береді. Перспективалы тәсілдердің бірі – натрий альгинаты және гумин қышқылдары сияқты табиғи полимерлерді колдану. Микрокапулаларды алу кезінде эмульсияларды тұрақтандыру үшін Span 80 эмульгаторы кеңінен колданылады. Жүйенің тұрақтылығы мен қасиеттерін түсіну үшін беттік керілу, бөлшектердің мөлшері және дзета потенциалы сияқты параметрлерді бағалау қажет. Бұл макала натрий альгинатының көмегімен гумин қышқылның микрокапсуляция процесіне, осы технологияның ерекшеліктерін және оның мүмкін қолданылуын зерттеуге, биополимерлер мен эмульгаторларды колданатын микрокапсуляция әдістері мен механизмдерін, сондай-ақ алынған микрокапулаларды қолданудың әртурлі салаларын қарастырады. Алынған микрокапулалардың биодеградациялануы мен қауіпсіздігін қоса алғанда, экологиялық аспектілерге ерекше назар аударылады. Бұл жұмыста натрий альгинаты, гумин қышқылы және span 80 эмульгаторы көмегімен эмульсиялық микрокапсуляция әдісімен алынған микрокапулалардың

параметрлері зерттелді. РАТ-1 тензиометрімен беттік керілу, бөлшектердің мөлшері және динамикалық жарық шашырау (DLS) әдісімен дзета потенциалы сияқты сипаттамалар зерттелді. Нәтижелер алынған микрокапсулалардың тұрақтылығын көрсетеді, бұл олардың мөлшері мен дзета потенциалының мәндерімен расталады.

Түйін сөздер: биостимуляторлар, биополимерлер, гумин қышқылы, микрокапсуляция, натрий альгинаты.

©А.Б. Исаева^{1,2*}, А.А. Шарипова², М.О. Исахов³, Г.А. Кадирбекова², 2025.

¹ТОО Научно-производственное предприятие Антиген,

Алматинская область, Казахстан;

²Satbayev University, Алматы, Казахстан;

³Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан.

E-mail: isa-asem@mail.ru

РОЛЬ МИКРОКАПСУЛИРОВАННОЙ ГУМИНОВОЙ КИСЛОТЫ НА ОСНОВЕ БИОПОЛИМЕРОВ В СТИМУЛЯЦИИ РОСТА РАСТЕНИЙ

Исаева Асем Баҳытжановна – PhD, научный сотрудник, ТОО НПП «Антиген», Алматы, Казахстан, E-mail: isa-asem@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6727-0257>;

Шарипова Алтынай Азигаровна – PhD, профессор-исследователь, Сатпаев университет, Алматы, Казахстан, E-mail: a_sharipova85@mail.ru;

Исахов Мирас Орынбасарович – докторант, Казахско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан, E-mail: mir001@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-6660-5787>;

Кадирбекова Гульжамал Асылбеккызы – студент, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан, E-mail: gulzhi.kadirbrkova@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-5025-7707>.

Аннотация. Микрокапсулирование представляет собой процесс создания защитной оболочки вокруг активных веществ с целью их защиты от внешних факторов, замедления или регулирования высвобождения и улучшения стабильности. Одной из перспективных технологий микрокапсулирования является использование альгината натрия в качестве материала для оболочки. Применение микрокапсулированных биостимуляторов в агропромышленности позволяет значительно повысить эффективность действующих веществ за счет их пролонгированного высвобождения и защиты от внешних факторов. Одним из перспективных подходов является использование природных полимеров, таких как альгинат натрия и гуминовые кислоты. Для стабилизации эмульсий при получении микрокапсул широко применяется эмульгатор Span 80. Оценка таких параметров, как поверхностное натяжение, размер частиц и дзета-потенциал, необходима для понимания стабильности и свойств системы.

Эта статья посвящена процессу микрокапсулирования гуминовой кислоты с помощью альгината натрия, исследованию особенности этой технологии и её возможные применения, рассматриваются методы и механизмы микрокапсулирования с использованием биополимеров и эмульгаторов, а также

различные области применения полученных микрокапсул. Особое внимание уделено экологическим аспектам, включая биодеградируемость и безопасность полученных микрокапсул. В данной работе проведено исследование параметров микрокапсул, полученных методом эмульсионного микрокапсулирования с использованием альгината натрия, гуминовой кислоты и эмульгатора Span 80. Исследованы такие характеристики, как поверхностное натяжение с использованием тензиометра PAT-1, размер частиц и дзета-потенциал методом динамического светорассеяния (DLS). Результаты демонстрируют стабильность полученных микрокапсул, что подтверждается их размером и значениями дзета-потенциала.

Ключевые слова: биостимуляторы, биополимеры, гуминовая кислота, микрокапсулирование, альгинат натрия.

Финансирование: Работа выполнена в рамках проекта КН МНиВО РК по проекту: AP22785889 «Разработка новых микрокапсулированных биостимуляторов на основе природных полимеров с высокой стабильностью и пролонгированным действием, применяемых в агропромышленности».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. Основным приоритетом развития современной агропромышленности является поиск экологически безопасных методов для стимулирования роста растений и увеличения производительности сельскохозяйственных культур. Одними из которых являются биостимуляторы - натуральные вещества, способствующие повышению урожайности растений и улучшению усвоения питательных веществ, в то же время снижающих зависимость от использования химических удобрений. Разработка биостимулятора для целевого рынка также необходима из-за глобального дисбаланса питательных веществ (Lin, и др., 2018)

На сегодняшний день в Казахстане применяются различные виды биостимуляторов, такие как Fitovak (Atoeva, et al., 2023) которые получают из синтетического полимера – тетраметилметилендиамин, Biodux (Peut, et al., 2017) изготавливается из низшего почвенного гриба Mortierella alpine, 0.1% Mers – содержит растительный белково-ферментный комплекс, в основе которого лежат хлорофиллпептидно-витаминно-белковые вещества, полученные из экстрактов семи растений, и соли железа, меди, цинка, молибдена, марганца, кобальта, бария, йода, органические биостимуляторы Азотофертил на основе штамма Azotobacter chroococcum (Kalymbetov, et al., 2023) Сапропель из остатков микроорганизмов, Биогумус изготовленный из навоза и др. (Yuldasheva, et al., 2023). Анализ применяемых биостимуляторов в Казахстане и за рубежом в целом показал, что большинство из них основаны на использовании синтетических полимеров, микроорганизмов, навоза и др.

Применяемые синтетические полимеры являются небиодеградируемыми и могут нанести негативный экологический эффект для окружающей среды. Более

того, несмотря на их положительное влияние на рост растений и увеличения урожайности, они не обладают способностью улавливать тяжелые металлы и вредные вещества, такие как пестициды, гербициды и др., которые попадают в организм животных и человека через растения и овощи, и в данном направлении, к сожалению, исследований на сегодняшний день практически нет. Исследования показали, что инкапсулированные с применением природных полимеров обладают более высокой биосовместимостью и биодеградируемостью, чем синтетические полимеры. Это делает их более предпочтительными для инкапсуляции биостимуляторов.

Внесение зеленых удобрений, остатков или навоза животного происхождения, рыбной муки, и гуминовой кислоты - вот некоторые варианты управления сельскохозяйственным производством в неблагоприятных почвенных условиях (Daur, et al., 2013) Все эти варианты направлены на улучшение почвенных условий для роста и качества урожая. Учитывая размер партии и доступность во всем мире, гуминовая кислота, по-видимому, является наилучшим вариантом среди альтернатив (Daur, et al., 2013).

Ветровая и водная эрозия, а также выщелачивание водой удаляют гуминовые кислоты из почв, требуя их регулярного пополнения. В этой связи, необходимо обогащать почву гуминовыми кислотами для увеличения урожайности (Susic, et al., 2016). Для увеличения эффективности и пролонгированного действия гуминовой кислоты актуальным направлением является проведение ее капсулирования, которая позволит контролировать и постепенно высвобождать биостимулятор, и тем самым будет способствовать уменьшению количества ее потребления и иметь положительный экономический эффект, а применение природных полимеров для капсуляции будет иметь экологический эффект.

В 2016 году Европейская комиссия отнесла биостимуляторы к категории CE, определив их как удобрения, которые способствуют росту и развитию растений независимо от применяемого количества (Xiong, et al., 2018). Они должны оказывать одно из следующих воздействий на ризосферу растений в 2018 году, как определено Советом Европейского союза в качестве поправки к определению: (i) более эффективное использование питательных веществ, (ii) устойчивость к абиотическому стрессу, (iii) влияние на качество урожая и (iv) доступность из ограниченных питательных веществ в почве или ризосфере (Huppertsberg, и др., 2020). Таким образом, проведение исследований в направлении инкапсуляции биостимуляторов с природными полимерами для улучшения стабильности и эффективности микро- и нанокапсул в агропромышленности является актуальной и перспективной.

Материалы и методы. *Материалы:* Альгинат натрия (0,1%, 0,5%, 1% раствор), гуминовая кислота (0,1% раствор), Span 80 (0,5% от массы масла), 0,1M кальций хлорид, соевое масло.

Методы:

Приготовление микрокапсул: Эмульсионное микрокапсулирование с варьированием концентрации альгината натрия.

Измерение поверхностного натяжения: Для измерения межфазного натяжения и дилатационных реологических характеристик адсорбционных слоев использован Тензиометр PAT-1.

Определение размеров и дзета-потенциала: Динамическое светорассеяние (DLS) на анализаторе размеров частиц и дзета потенциала Winner 901.

Результаты и обсуждение. Основным классом растительных биостимуляторов являются гуминовые и фульвовые кислоты, за которыми следуют гидролизаты белков, экстракты морских водорослей, в то время как микробные биоэфекторы — это полезные грибы (например, грибы арbusкулярной микоризы и *Trichoderma* spp.) и бактерии, стимулирующие рост растений (Savarese, и др., 2022). Стимулирование производства растительной биомассы биостимуляторами было связано с их влиянием на несколько биохимических или молекулярных путей и физиологических процессов. Авторами было обнаружено, что немикробные и микробные растительные биостимуляторы положительно влияют на эффективность использования питательных веществ (NUE) за счет улучшения архитектуры корневой системы и исследования почвы, а также увеличения растворимости макро- и микроэлементов, что может привести к повышению продуктивности растений. Например, было показано, что различные типы растительных биостимуляторов (например, гуминовые и растительные / водорослевые экстракты) содержат ауксин-подобные соединения, которые могут напрямую влиять на биологические процессы, такие как развитие растений и регуляция роста, или косвенно влиять на гормональный статус растений (Savarese, et al., 2022).

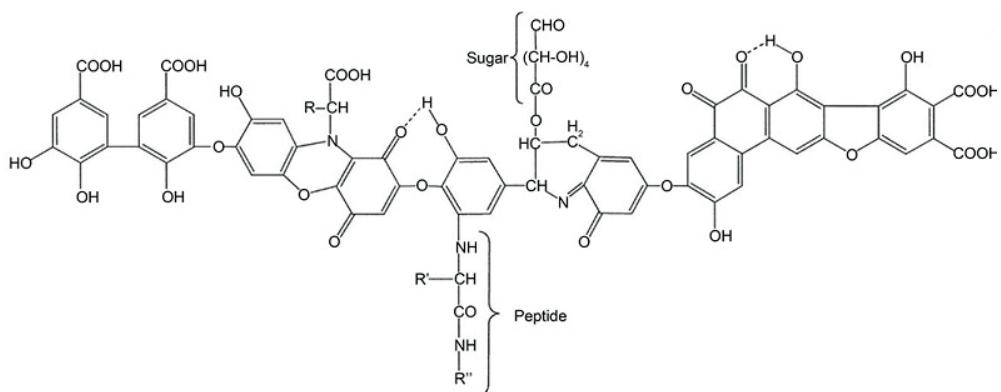


Рисунок 1 – Типичная структура гуминовой кислоты (Amro, et al., 2016).

Гуминовая кислота как часть гумуса является естественным компонентом почвы и способствует улучшению биологических свойств почвы. Общеизвестно, что одним из важнейших компонентов BS является гуминовая кислота. Даже фульвокислота и подобные ей соединения оказывают скоординированное аналогичное воздействие на общее улучшение здоровья растения. Прошлые исследования показывают, что гуминовая кислота, по своей природе являясь

полионной, способствует ионному обмену, осуществляющемуся в почве, что приводит к блокировке свободного кальция. Кальций теперь недоступен для реакции с фосфатами, и, следовательно, доступность Р для растений увеличивается.

Гуминовая кислота также улучшает первичный и вторичный метаболизм растений, вызывая определенные необходимые изменения, авторы (Savarese, et al., 2022) сообщили представляющих общее увеличение урожайности абрикосов при обработке гуминовой кислотой.

Принципы микрокапсулирования. Микрокапсулирование – это формирование небольших капсул, в которых активный ингредиент заключен в защитную оболочку (Мадыбекова, et al., 2024). Процесс обычно состоит из трех основных этапов:

- Подготовка основного материала:* Гуминовую кислоту растворяют или диспергируют в подходящей среде.

- Формирование эмульсии:* Основной материал эмульгируется с раствором биополимера, например альгинат натрия.

- Инкапсуляция и затвердевание:* Полимерная матрица затвердевает вокруг сердцевины либо за счет химической сшивки, либо за счет гелеобразования под воздействием температуры, либо за счет испарения растворителя.

Биополимеры, такие как пектин, хитозан, альгинат и желатин, стали предпочтительными инкапсулирующими агентами благодаря своей биосовместимости, биоразлагаемости и способности образовывать стабильные матрицы. Эмульгаторы, такие как Span 80 (сорбитан моноолеат), играют решающую роль в формировании стабильных эмульсий при инкапсуляции. В таблице 1 представлены некоторые биополимеры, и эмульгаторы, применяемые в микрокапсулировании.

Таблица 2 – Основные биополимеры и их свойства для инкапсуляции

Биополимер	Характеристика	Применение
Пектин	Полисахарид растительного происхождения, обладает высокой гелеобразующей способностью, требует ионов кальция для сшивания.	Используется в сельском хозяйстве и пищевой промышленности для инкапсуляции биоактивных веществ. (Rehman, et al., 2019)
Хитозан	Производное хитина, обладает пленкообразующими и биоадгезивными свойствами, улучшает растворимость и контролируемое высвобождение активных веществ.	Применяется в фармацевтике, экологии и агротехнологиях. (Zulfiqar, et al., 2020)
Альгинат	Полисахарид из морских водорослей, образует гели при взаимодействии с двухвалентными катионами, подходит для гидрофильных веществ.	Широко используется для контролируемого высвобождения удобрений и фармацевтических препаратов. (Song, et al., 2024)
Желатин	Белковый полимер с эмульгирующими и гелеобразующими свойствами, может комбинироваться с другими биополимерами.	Применяется в медицине, фармацевтике и пищевой промышленности. (Naidu, et al., 2011)
Span 80	Гидрофобное неионогенное поверхностно-активное вещество, снижает межфазное натяжение и стабилизирует эмульсии.	Используется в эмульсиях типа «вода в масле» (W/O) и «масло в воде» (O/W) для инкапсуляции. (Yousefi, et al., 2023)

Tween 80	Гидрофильное неионогенное ПАВ, способствует образованию стабильных эмульсий.	Применяется в пищевой, фармацевтической и косметической промышленности. (Yang, et al., 2023)
Лецитин	Натуральный эмульгатор, получаемый из сои или яичного желтка, стабилизирует эмульсии и улучшает растворимость липофильных веществ.	Широко используется в пищевой промышленности, фармацевтике и косметике. (Celli, et al., 2021)

Эта таблица структурирует информацию о биополимерах и эмульгаторах и их применении в инкапсуляции, подчеркивая их свойства и области применения.

Микрокапсулы удобно наносить непосредственно на почву, во время высадки рассады или в качестве покрытия для семян, и они обладают гибкостью, позволяющей наносить их немедленно или хранить в течение длительного времени как при низких температурах, так и при температуре окружающей среды, что является наиболее распространенным методом защиты в настоящее время.

В работе (Nazarbek, et al., 2023) в качестве полимера для микрокапсулирования гуминовой кислоты использовали карбоксиметилцеллюлозу.

Изучение физико-химических свойств микрокапсул предполагает использование различных аналитических методик и приборов. Применение современных физико-химических методов исследований: метод тензиометрии, метод динамического светорассеяния, метод электронной дисперсионной спектроскопии EDX/EDS, метод УФ-видимой спектроскопии, СЭМ, термогравиметрический анализ, инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье, позволяют проводить сверку экспериментальных данных в достоверности.

Методы исследования поверхностного натяжения, для определения поверхностно-активных свойств и обоснования подбора компонентов, составляющих микрокапсулы.

Динамическое светорассеяние (DLS) для измерения распределения частиц по размерам и дзета-потенциала инкапсулированной гуминовой кислоты. Распределение частиц по размерам и дзета-потенциал необходимо для определения стабильности и поверхностного заряда капсул.

Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (FTIR) для идентификации функциональных групп, присутствующих на поверхности инкапсулированной гуминовой кислоты.

УФ спектроскопия – для количественного определения гуминовой кислоты в микро- и нанокапсуле.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) для визуализации морфологии инкапсулированной гуминовой кислоты. Данная информация может быть использована для определения размера, формы и однородности капсул.

Для проведения исследования по микрокапсулированию гуминовой кислоты был разработан экспериментальный дизайн, представленный на рисунке 2.

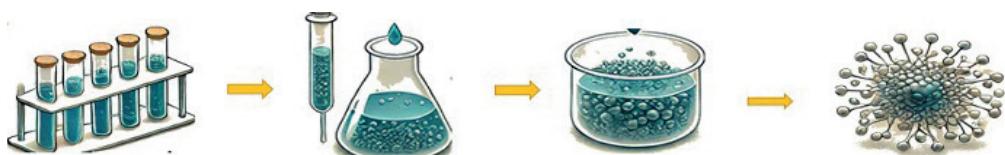


Рисунок 2 – Схема микрокапсулирования гуминовой кислоты с альгинатом натрия

Микрокапсулирование гуминовой кислоты обладает некоторыми значительными преимуществами, представленных в таблице 2.

Таблица 2 – Преимущества микрокапсулирования гуминовой кислоты в альгинате натрия

Преимущество	Описание
Защита от внешних факторов	Обеспечивает защиту гуминовой кислоты от разрушения под воздействием света, кислорода и температурных колебаний, продлевая срок её хранения.
Контролируемое высвобождение	Позволяет регулировать скорость высвобождения гуминовой кислоты, обеспечивая её постепенное поступление в окружающую среду. Важно для сельского хозяйства и медицины.
Улучшение растворимости	Повышает растворимость гуминовой кислоты в воде, что способствует её лучшему усвоению растениями и расширяет области применения.
Безопасность и биосовместимость	Альгинат натрия является экологически чистым, биосовместимым и безопасным материалом, подходящим для использования в аграрной и медицинской сферах.

Как показано в таблице 2, микрокапсулирование гуминовой кислоты в альгинате натрия обеспечивает значительные преимущества, повышающие её эффективность и расширяющие возможности применения.

Для исследования поверхностного и межфазного натяжения измерения проводили с использованием тензиометра PAT-1 (SINTERFACE Technologies). В качестве дисперсной среды использовалась вода с растворенным альгинатом натрия и гуминовой кислотой, а в качестве масляной фазы - соевое масло с добавлением Span 80. Измерения показали, что добавление гуминовой кислоты снижает поверхностное натяжение водной фазы, способствуя стабилизации эмульсии. Введение Span 80 приводит к значительному уменьшению межфазного натяжения на границе масло–вода, что улучшает формирование эмульсий и образование микрокапсул.

Для получения микрокапсул гуминовой кислоты использовался метод эмульсионного микрокапсулирования. В качестве основного полимера использовали альгинат натрия (0,1–1% раствор), гуминовая кислота (0,1% раствор) – активное вещество, заключаемое в микрокапсулы, в качестве эмульгатора использовали Span 80 (0,5% от массы масла), который улучшает однородность микрокапсул, предотвращая их коалесценцию, 0,1M кальций хлорид – сивающий агент, запускает процесс ионного гелеобразования альгината, соевое масло. Все процессы проводились при комнатной температуре (~25°C).

Водную фазу приготовили растворением альгината натрия в дистиллированной воде при интенсивном перемешивании до получения однородного раствора. Добавлением эмульгатора Span 80 в соевое масло и перемешиванием получили

масляную фазу. Для эмульгирования постепенно добавили водную фазу в масляную при интенсивном перемешивании с помощью магнитной мешалки для формирования эмульсии типа «вода в масле» (W/O). Гомогенизация проводилась в течение 10 минут при скорости 800 об/мин. Для гелеобразования, в раствор 0,1М кальция хлорида постепенно добавили смесь из альгината натрия, образцы выдерживались в растворе хлорида кальция в течение 30 минут для завершения формирования микрокапсул, промыли дистиллированной водой для удаления ионов кальция и высушили при комнатной температуре.

В таблице 3 приведены результаты полученных микрокапсул с разными концентрациями альгината натрия с 0,1% гуминовой кислотой

Таблица 3 - Результаты по размеру и дзета-потенциала микрокапсул

Концентрация AlgNa (%)	Размер микрокапсул (нм)	Дзета-потенциал (мВ)
0.1	619 ± 20	-25 ± 2
0.5	497 ± 15	-35 ± 3
1.0	350 ± 10	-45 ± 3

Согласно полученным данным полученные эмульсии отрицательно заряжены во всем диапазоне исследуемых концентраций, при этом размеры эмульсий в диапазоне 350-619 нм (Таблица 3).

Как видно таблицы, увеличение концентрации альгината натрия приводит к уменьшению среднего размера частиц, что связано с более высокой вязкостью раствора и улучшенной стабилизацией эмульсии. Дзета-потенциал микрокапсул становится более отрицательным при увеличении концентрации альгината натрия, что указывает на повышение стабильности системы. Эти данные подтверждают, что повышение содержания альгината натрия способствует формированию более устойчивых микрокапсул с меньшим размером и улучшенными электростатическими характеристиками.

После эмульгирования, добавили смесь в 0,1М раствор кальция хлорида, получили сферическую форму капсул, представленной на рисунке 3.

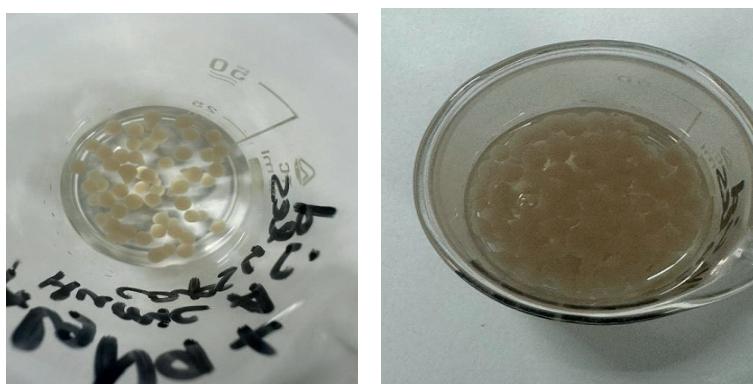


Рисунок 3 – Процесс гелеобразования 0,5% альгината натрия с 0,1% гуминовой кислотой в растворе 0,1М кальция хлорида

Из рисунка видно, что при контакте 0,5% альгината натрия с гуминовой кислотой с ионами кальция хорошо видна сферическая форма капсул, что свидетельствует о равномерном гелеобразовании. Относительно однородный размер частиц указывает на стабильность процесса эмульгирования перед гелеобразованием.

Таким образом, микрокапсулирование с использованием альгината натрия и гуминовой кислоты позволяет получить стабильные микрокапсулы с контролируемым размером и зарядом, что делает их перспективными для применения в агропромышленности.

Заключение: Микрокапсулирование гуминовой кислоты с использованием альгината натрия представляет собой эффективное решение для продления её действия в почве, повышения усвоемости растениями и минимизации потерь, связанных с вымыванием и разложением. Биополимерные микрокапсулы обеспечивают постепенное высвобождение биостимулятора, что способствует снижению частоты внесения удобрений и повышению их эффективности. Кроме того, применение природных полимеров делает данную технологию экологически безопасной альтернативой синтетическим методам. Исследования методов микрокапсулирования и их физико-химических свойств подтверждают значимость данной технологии в различных сферах промышленности и медицины, а также открывают перспективы для дальнейших научных разработок. Метод эмульгирования способствует стабильности активных веществ и обеспечивает их контролируемое высвобождение, особенно при использовании полимерных оболочек, таких как альгинаты. Развитие и внедрение данной технологии в агропромышленность позволит повысить урожайность сельскохозяйственных культур, улучшить структуру почвы и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

Литература

Amro K.F., Elham M.A., Salwa A.A., Mai M.R. (2016) Fabrication and Characterisation of Novel Natural Lycopodium clavatum Sporopollenin Microcapsules Loaded In-Situ with Nano-Magnetic Humic Acid-Metal Complexes. Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences Vol 6(4). <https://doi.org/10.4236/jeas.2016.64009>.

Atoeva R.O., Kazakova D., Gozieva G.A. (2023) The Effect of the Immunostimulatory “Fitovak” on the Growth and Development of the Root System of Mung Bean. Eurasian Research Bulletin. V.18. P.186-188. <https://geniusjournals.org/index.php/erb/article/view/3740>.

Celli G.B., Comunian T.A. (2021) Chapter 9 - Application of Nano/Microencapsulated Ingredients in Oil/Fat-Based Products. Application of Nano/Microencapsulated Ingredients in Food Products. V.6 in Nanoencapsulation in the Food Industry. P.387-434. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815726-8.00009-X>.

Daur I., Bakhshwain A. (2013) Effect of Humic Acid on Growth and Quality of Maize Fodder Production. Pak. J. Bot. 45(S1):21-25. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/157568>.

Huppertsberg S., Zahn D., Pauelsen F., Reemtsma T., Knepper T.P. (2020) Making Waves: Water-Soluble Polymers in the Aquatic Environment: An Overlooked Class of Synthetic Polymers?. Journal Water Res. V.181:115931. DOI: [10.1016/j.watres.2020.115931](https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115931).

Kalymbetov G., Kedelbayev B., Yelemanova Zh., Sapargaliyeva B. (2023) Effects of Different Biostimulants on Seed Germination of Sorghum Plants. Journal of Ecological Engineering. V.24(3):134-142. <https://doi.org/10.12911/22998993/157568>.

Lin X., Danny G. (2018) Developing Biostimulants From Agro-Food and Industrial By-Products. J. Front. Plant Sci. Vol 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01567>.

Мадыбекова Г.М., Туребаева Т.Т., Муталиева Б.Ж., Лесбекова Д.М., Исаева А.Б. (2024) Преимущества и потенциал применения методов микрокапсулирования для доставки активных агентов: обзор. Доклады НАН РК. №2. С.183-197. <https://doi.org/10.32014/2024.2518-1483.288>.

Naidu B.V.K., Allan T.P. (2011) A New Method for the Preparation of Gelatin Nanoparticles: Encapsulation and Drug Release Characteristics. *Journal of Applied Polymer Science*. V.121:3495-3500. <https://doi.org/10.1002/app.34171>.

Nazarbek U., Nazarbekova S., Raiymbekov Ye., Kambatyrov M., Abdurazova P. (2023) Prolonged Action Fertilizer Encapsulated by CMC/Humic Acid. *e-Polymers* 23:20230013. DOI: 10.1515/epoly-2023-0013.

Rehman A., Ahmad T., Aadil R.M., Spotti M.J., Bakry A.M., Khan I.M., Zhao L., Riaz T., Tong Q. (2019) Pectin Polymers as Wall Materials for the Nano-Encapsulation of Bioactive Compounds. *Trends in Food Science & Technology*. V. 90. P.35-46. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.05.015>.

Пеут А.А., Миронова Л.Н. (2017) Использование регуляторов роста растений при вегетативном размножении некоторых представителей семейства Iridaceae juss. Сборник научных трудов ГНБС. Т145. С.285-288. <https://scbook.elpub.ru/jour/article/view/233/198>.

Savarese C., Cozzolino V., Verrillo M., Vinci G., Martino A.D., Scopa A., Piccolo A. (2022) Combination of Humic Biostimulants with a Microbial Inoculum Improves Lettuce Productivity, Nutrient Uptake, and Primary and Secondary Metabolism. *Plant and Soil* 481(11). P.285-314. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-022-05634-8>.

Song J., Wang Y., Niu Y., Hui B., Wu H. (2024) Synthesis and Characterization of pH-Responsive Sodium Alginate/Humic Acid Composite Hydrogels for Sustained Drug Release of L-Ascorbic Acid. *International Journal of Biological Macromolecules*. V.280:135777. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135777>.

Susic M. (2016) Replenishing Humic Acids in Agricultural Soils. *Agronomy*. 6(4):45. <https://doi.org/10.3390/agronomy6040045>.

Xiong B., Loss R.D., Shields D., Pawlik T., Hochreiter R., Zydny A.L., Kumar M. (2018) Polyacrylamide Degradation and Its Implications in Environmental Systems. *npj Clean Water* V.1. P.1-9. <https://www.nature.com/articles/s41545-018-0016-8>.

Yang T., Liu C., Zheng Y., Tristan C.L., Li K., Liu J., Liu Y., Zhou P. (2023) Effect of WPI/Tween 80 Mixed Emulsifiers on Physicochemical Stability of Ginsenosides Nanoemulsions. *Food Bioscience*. V.53:102519. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102519>.

Yousefi S., Rajaei P., Nateghi L., Nodeh H.R., Rashidi L. (2023) Encapsulation of Sesamol and Retinol Using Alginate and Chitosan-Coated W/O/W Multiple Emulsions Containing Tween 80 and Span 80. *International Journal of Biological Macromolecules*. V.242(2):124766. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124766>.

Yuldasheva Z.F., Karabayeva D.J. (2023) The Effect of Different Doses of Different Biostimulants on the Yield of Oily Sunflower. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* DOI: 10.1088/1755-1315/1142/1/012097.

Zulfiqar A.R., Khalil S., Ayub A., Banat I.M. (2020) Recent Developments in Chitosan Encapsulation of Various Active Ingredients for Multifunctional Applications. *Carbohydrate Research*, V.492:108004. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2020.108004>.

References

Atoeva R.O., Kazakova D., Gozieva G.A. (2023) The Effect of the Immunostimulatory “Fitovak” on the Growth and Development of the Root System of Mung Bean. *Eurasian Research Bulletin*. V.18. P.186-188. <https://geniusjournals.org/index.php/erb/article/view/3740> (in Eng.).

Amro K.F., Elham M.A., Salwa A.A., Mai M.R. (2016) Fabrication and Characterisation of Novel Natural Lycopodium clavatum Sporopollenin Microcapsules Loaded In-Situ with Nano-Magnetic Humic Acid-Metal Complexes. *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences* Vol 6(4). <https://doi.org/10.4236/jeas.2016.64009> (in Eng.).

Celli G.B., Comunian T.A. (2021) Chapter 9 - Application of Nano/Microencapsulated Ingredients in Oil/Fat-Based Products. *Application of Nano/Microencapsulated Ingredients in Food Products*. V.6 in *Nanoencapsulation in the Food Industry*. P.387-434. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815726-8.00009-X> (in Eng.).

Daur I., Bakhshwain A. (2013) Effect of Humic Acid on Growth and Quality of Maize Fodder Production. *Pak. J. Bot.* 45(S1):21-25. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/157568> (in Eng.).

Huppertsberg S., Zahn D., Paelsen F., Reemtsma T., Knepper T.P. (2020) Making Waves: Water-Soluble Polymers in the Aquatic Environment: An Overlooked Class of Synthetic Polymers?. *Journal Water Res.* V.181:115931. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115931 (in Eng.).

Kalymbetov G., Kedelbayev B., Yelemanova Zh., Sapargaliyeva B. (2023) Effects of Different Biostimulants on Seed Germination of Sorghum Plants. *Journal of Ecological Engineering.* V.24(3):134–142. <https://doi.org/10.12911/22998993/157568> (in Eng.).

Lin X., Danny G. (2018) Developing Biostimulants From Agro-Food and Industrial By-Products. *J. Front. Plant Sci.* Vol 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01567> (in Eng.).

Madybekova G.M., Turebayeva T.T., Mutualieva B.Zh., Lesbekova D.M., Issayeva A.B. (2024) Preimushchestva i potentsial ispol'zovaniya metodov mikrokapsulirovaniya dlya dostavki aktivnykh agentov: Obzor. [Advantages and potential of using microencapsulation methods for delivery of active agents: A review]. *Doklady NAN RK.* №2. P.183-197. <https://doi.org/10.32014/2024.2518-1483.288> (in Russ.).

Naidu B.V.K., Allan T.P. (2011) A New Method for the Preparation of Gelatin Nanoparticles: Encapsulation and Drug Release Characteristics. *Journal of Applied Polymer Science.* V.121:3495-3500. <https://doi.org/10.1002/app.34171> (in Eng.).

Reut A.A., Mironova L.N. (2017) Ispol'zovanie regulyatorov rosta rastenii pri vegetativnom razmnozhenii nekotorykh predstavitelei semeistva Iridaceae juss. [The use of plant growth regulators in the vegetative reproduction of some representatives of the family Iridaceae juss.]. *Sbornik nauchnykh trudov GNBS.* T.145. P.285-288. <https://scbook.elpub.ru/jour/article/view/233/198> (in Russ.).

Rehman A., Ahmad T., Aadil R.M., Spotti M.J., Bakry A.M., Khan I.M., Zhao L., Riaz T., Tong Q. (2019) Pectin Polymers as Wall Materials for the Nano-Encapsulation of Bioactive Compounds. *Trends in Food Science & Technology.* V. 90. P.35-46. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.05.015> (in Eng.).

Susic M. (2016) Replenishing Humic Acids in Agricultural Soils. *Agronomy.* 6(4):45. <https://doi.org/10.3390/agronomy6040045> (in Eng.).

Savarese C., Cozzolino V., Verrillo M., Vinci G., Martino A.D., Scopa A., Piccolo A. (2022) Combination of Humic Biostimulants with a Microbial Inoculum Improves Lettuce Productivity, Nutrient Uptake, and Primary and Secondary Metabolism. *Plant and Soil* 481(11). P.285-314. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-022-05634-8> (in Eng.).

Song J., Wang Y., Niu Y., Hui B., Wu H. (2024) Synthesis and Characterization of pH-Responsive Sodium Alginate/Humic Acid Composite Hydrogels for Sustained Drug Release of L-Ascorbic Acid. *International Journal of Biological Macromolecules.* V.280:135777. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135777> (in Eng.).

Xiong B., Loss R.D., Shields D., Pawlik T., Hochreiter R., Zydney A.L., Kumar M. (2018) Polyacrylamide Degradation and Its Implications in Environmental Systems. *npj Clean Water* V.1. P.1-9. <https://www.nature.com/articles/s41545-018-0016-8> (in Eng.).

Yuldasheva Z.F., Karabayeva D.J. (2023) The Effect of Different Doses of Different Biostimulants on the Yield of Oily Sunflower. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* DOI: 10.1088/1755-1315/1142/1/012097 (in Eng.).

Yousefi S., Rajaei P., Nateghi L., Nodeh H.R., Rashidi L. (2023) Encapsulation of Sesamol and Retinol Using Alginate and Chitosan-Coated W/O/W Multiple Emulsions Containing Tween 80 and Span 80. *International Journal of Biological Macromolecules.* V.242(2):124766. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124766> (in Eng.).

Yang T., Liu C., Zheng Y., Tristan C.L., Li K., Liu J., Liu Y., Zhou P. (2023) Effect of WPI/Tween 80 Mixed Emulsifiers on Physicochemical Stability of Ginsenosides Nanoemulsions. *Food Bioscience.* V.53:102519. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102519> (in Eng.).

Zulfiqar A.R., Khalil S., Ayub A., Banat I.M. (2020) Recent Developments in Chitosan Encapsulation of Various Active Ingredients for Multifunctional Applications. *Carbohydrate Research,* V.492:108004. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2020.108004> (in Eng.).

Nazarbek U., Nazarbekova S., Raiymbekov Ye., Kambatyrov M., Abdurazova P. (2023) Prolonged Action Fertilizer Encapsulated by CMC/Humic Acid. *e-Polymers* 23:20230013. DOI: 10.1515/epoly-2023-0013 (in Eng.).

REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ISSN 2224-5227

Volume 1. Number 353 (2025), 219–232

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.337>

МРНТИ 35.15.28, 61.51.17

УДК 665.6;66.097;541.128

**A.T. Massenova*, A.S. Zhumakanova, I.I. Torlopov, K.S. Rakhmetova,
A.Z. Abilmagzhanov, 2025.**

JSC “D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry”,
Almaty, Kazakhstan.

E-mail: almasenova@mail.ru

HIERARCHICAL ZEOLITES BASED ON SYNTHETIC ZEOLITES ZSM-5, HY AND BEA FOR ALKYLATION OF AROMATIC HYDROCARBONS

Massenova Alma Tulegenovna – Doctor of Chemical Sciences, Chief Researcher, Laboratory of Organic Catalysis, JSC “D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry”, Almaty, Kazakhstan, E-mail: almasenova@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2251-0549>;

Zhumakanova Ardark Sydykovna – Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Organic Catalysis, JSC “D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry”, Almaty, Kazakhstan, E-mail: zhumakanova62@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4983-4199>;

Torlopov Ivan Igorevich – Junior Researcher, Sector of Design of Technological Processes, JSC “D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry”, Almaty, Kazakhstan, E-mail: myndfrea@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9660-6397>;

Rakhmetova Kenzhegul Saginbayevna – Researcher, Sector of Modeling of Technological Processes, JSC “D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry”, Almaty, Kazakhstan, E-mail: rahmetova_75@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2098-3169>;

Abilmagzhanov Arlan Zainutallaevich – Candidate of Chemical Sciences, First Deputy General Director, JSC “D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry”, Almaty, Kazakhstan, E-mail: a.abilmagzhanov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2931-9640>.

Abstract. Alkylation of aromatic hydrocarbons is a basic large-scale petrochemical process for the production of styrene-based polymers (polystyrene, styrene-butadiene rubber, polystyrene foam, etc.), with global demand for these products increasing annually. Currently, the old technology of alkylation of benzene with ethylene in the presence of AlCl_3 is used, replacement of which is relevant not only for Kazakhstan, but for whole world. The replacement of these catalysts with effective solid acid zeolites, which can be synthesized with specified controlled properties (size and shape of pores and channels, dispersion, etc.) for synthesis of chemical compounds with certain structures, is necessary, potentially opening up enormous prospects for selective production of necessary products, especially for petrochemical processes. However, zeolites have limitations associated with size and shape of channels of regular framework structure of zeolites, determined by mass transfer (diffusion inhibition and configurational effect) and direction of chemical transformations (size and shape selectivity) in the pores.

These limitations can be removed by the use of hierarchical zeolites, characterized by the presence of both micropores and mesopores, i.e. different porous structures within one material. There are various methods of the synthesis of hierarchical zeolites, such as bitemplate synthesis, silanization, delamination, pillarization, etc. Among them, recrystallization of synthetic zeolites using surfactants is attractive, which consists of two-stage hydrothermal treatment of zeolite in the presence of alkali and surfactants with intermediate correction of pH of reaction mixture. This paper presents the results of studies on recrystallization of three types of synthetic zeolites – Y, BEA and ZSM-5 using polyethyleneglycol-10000 for synthesis of hierarchical zeolites. Formation of hierarchical structure of zeolites is shown using X-ray diffraction, SEM, IR-spectroscopy and BET methods.

Keywords: alkylation, hierarchical zeolite, synthetic zeolite, catalyst, recrystallization.

**А.Т. Масенова*, А.С. Жұмақанова, И.И. Торлопов, К.С. Рахметова,
А.З. Абильмагжанов, 2025.**

«Д.В. Сокольский атындағы жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ, Алматы, Қазақстан.

E-mail: almasenova@mail.ru

АРОМАТТЫ КӨМІРСУТЕКТЕРДІ АЛКИЛДЕУҮГЕ АРНАЛҒАН ZSM-5, НУ ЖӘНЕ ВЕА СИНТЕТИКАЛЫҚ ЦЕОЛИТТЕРИНЕ НЕГІЗДЕЛГЕН ИЕРАРХИЯЛЫҚ ЦЕОЛИТТЕР

Масенова Алма Төлегенқызы – химия ғылымдарының докторы, АҚ «Д.В. Сокольский атындағы жанармай, катализ және электрохимия институты» органикалық катализ зертханасының бас ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан, E-mail: almasenova@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2251-0549>;

Жұмақанова Ардақ Сыдыққызы – химия ғылымдарының кандидаты, АҚ «Д.В. Сокольский атындағы жанармай, катализ және электрохимия институты» органикалық катализ зертханасының жетекші ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан, E-mail: zhumakanova62@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4983-4199>;

Торлопов Иван Игоревич – АҚ «Д.В. Сокольский атындағы жанармай, катализ және электрохимия институты» технологиялық процестерді модельдеу секторының кіші ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан, E-mail: myndfrea@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9660-6397>;

Рахметова Қенжегүл Сағынбайқызы – АҚ «Д.В. Сокольский атындағы жанармай, катализ және электрохимия институты» технологиялық процестерді модельдеу секторының ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан, E-mail: rahmetova_75@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2098-3169>;

Әбілмагжанов Арлан Зайнуталлаұлы – химия ғылымдарының кандидаты, Бас директордың бірінші орынбасары, АҚ «Д.В. Сокольский атындағы жанармай, катализ және электрохимия институты», Алматы, Қазақстан, E-mail: a.abilmagzhanov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2931-9640>.

Аннотация. Ароматты көмірсүтектерді алкилдеу – стирол негізіндегі полимерлерді (полистирол, стирол-бутадиенді каучукты, пенополистиролды және т.б.) аладың негізгі ауқымды мұнай-химиялық процесі, оған әлемдік сұраныс жыл

сайын артып келеді. Қазіргі уақытта әлемде AlCl_3 қатысында бензолды этиленмен алкилдеудің ескі технологиясы қолданылады, оны ауыстыру тек Қазақстан үшін ғана емес, бүкіл әлемде өзекті болып табылады. Химиялық қосылыстардың белгілі бір құрылымын синтездеу үшін катализаторларды белгіленген бақыланатын қасиеттерімен (кеуектер мен арналардың мөлшері мен пішіні, дисперстілігі және т.б.) синтездеуге болатын тиімді қатты қышқылды цеолиттермен алмастыру қажет, бұл қажет өнімдерді, әсіресе мұнай-химиялық процестерде ірікten алу үшін орасан зор перспективалар ашады. Дегенмен, цеолиттердің қалыпты қаңқалық құрылымы арналарының өлшемдері мен пішініне байланысты шектеулері бар, олар кеуектердегі масса алмасу (диффузияны тежеу және конфигурациялау әсері) және химиялық өзгерістер бағыты (көлемі мен пішіні бойынша таңдау) арқылы анықталады. Иерархиялық цеолиттер бұл шектеулерді жоюға мүмкіндік береді, олар микрокеуектер мен мезокеуектердің болуымен сипатталады, яғни бір материалдағы әртүрлі кеуекті құрылымдар. Иерархиялық цеолиттерді синтездеудің әртүрлі әдістері бар, мысалы, бitemплатты синтездеу, силанизациялау, деламинирлеу пилларирилеу және т.б. Олардың ішінде синтетикалық цеолиттердің беттік-белсенді заттардың (БАЗ) көмегімен қайта кристалдануы тартымды болып табылады, ол реакциялық қоспаның pH-ын аralық түзетумен цеолитті сіltінің және беттік белсенді заттың қатысуымен екі сатылы гидротермиялық өндөуден тұрады. Бұл жұмыста қолданылған синтетикалық цеолиттердің негізінде иерархиялық цеолиттерді синтездеу үшін полиэтиленгликоль-10000 көмегімен синтетикалық цеолиттердің үш түрін – Y, BEA және ZSM-5 қайта кристалдандыру бойынша зерттеулердің нәтижелері берілген. Цеолиттердің иерархиялық құрылымының қалыптасуы РФА, СЭМ, ИК-спектроскопия, БЭТ және порометрия әдістерін колдану арқылы көрсетілді.

Түйін сөздер: алкилдену, иерархиялық цеолит, синтетикалық цеолит, катализатор, қайта кристалдану.

**А.Т. Масенова*, А.С. Жумаканова, И.И. Торлопов, К.С. Рахметова,
А.З. Абильмагжанов, 2025.**

АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского»,
Алматы, Казахстан.
E-mail: almasenova@mail.ru

ИЕРАРХИЧЕСКИЕ ЦЕОЛИТЫ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ЦЕОЛИТОВ ZSM-5, НУ И ВЕА ДЛЯ АЛКИЛИРОВАНИЯ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ

Масенова Алма Тулегеновна – доктор химических наук, главный научный сотрудник, Лаборатория органического катализа, АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан, E-mail: almasenova@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2251-0549>;

Жумаканова Ардак Сыдыковна – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, Лаборатория органического катализа, АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан, E-mail: zhumaanova62@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4983-4199>;

Торлопов Иван Игоревич – младший научный сотрудник АО «Институт топлива, катализа и

электрохимии им. Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан, E-mail: myndfrea@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9660-6397>;

Рахметова Кенжегтуль Сагинбаевна – научный сотрудник, АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», E-mail: rahmetova_75@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2098-3169>;

Абильмагжанов Арлан Зайнуталлаевич – кандидат химических наук, Первый заместитель генерального директора АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан, E-mail: a.abilmagzhanov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2931-9640>.

Аннотация. Алкилирование ароматических углеводородов – это базовый многотоннажный процесс нефтехимии для производства полимеров на основе стирола (полистирола, бутадиен-стирольного каучука, пенополистирола и др.), мировой спрос на которые ежегодно увеличивается. В настоящее время в мире применяется старая технология алкилирования бензола этиленом в присутствии AlCl_3 , замена которой актуальна не только для Казахстана, но и всего мира. Необходима замена катализаторов на эффективные твердокислотные цеолиты, которые можно синтезировать с заданными регулируемыми свойствами (размер и форма пор и каналов, дисперсность и др.) для синтеза определенного строения химических соединений, что открывает огромные перспективы для избирательного получения нужных продуктов, особенно в нефтехимических процессах. Однако цеолиты имеют ограничение, связанные с размером и формой каналов регулярной каркасной структуры цеолитов, которые определяются массопереносом (диффузионное торможение и конфигурационный эффект) и направлением химических превращений (селективность по размеру и форме) в порах. Эти ограничения позволяют снять иерархические цеолиты, характеризующиеся наличием одновременно микропор и мезопор, т.е. различными пористыми структурами в рамках одного материала. Существуют различные методы синтеза иерархических цеолитов, как битемплатный синтез, силанизация, деламинирование, пилларирование и др. Среди них привлекает рекристаллизация синтетических цеолитов с помощью ПАВ, заключающаяся в двухстадийной гидротермальной обработке цеолита в присутствии щелочи и ПАВ с промежуточной коррекцией pH реакционной смеси. В настоящей работе приводятся результаты исследований по рекристаллизации трех типов синтетических цеолитов - Y, BEA и ZSM-5 с применением полиэтиленгликоля-10000 для синтеза иерархических цеолитов. Методами РФА, СЭМ, ИК-спектроскопии и БЭТ показано формирование иерархической структуры цеолитов.

Ключевые слова: алкилирование, иерархический цеолит, синтетический цеолит, катализатор, рекристаллизация.

Работа выполнена при финансовой поддержке по программе целевого финансирования МОН РК BR24992812 «Создание научных основ в области разработки новых композитных катализических систем с улучшенными свойствами на основе переходных и редкоземельных металлов»

Введение. Синтез этилбензола – основной процесс алкилирования, является одним из самых многотоннажных базовых процессов нефтехимии, при этом он используется для производства полимеров на основе стирола (полистирола, бутадиен-стирольного каучука, пенополистирола и др.), мировой спрос на которые ежегодно увеличивается. В настоящее время в мире применяется старая технология алкилирования бензола этиленом в присутствии AlCl_3 , замена которой актуальна не только для Казахстана, но и всего мира (Niwa, et al, 2010).

В последнее время цеолитные катализаторы повсеместно вытесняют традиционные катализаторы во многих процессах нефтепереработки и нефтехимического синтеза. Механизм алкилирования базируется на образовании промежуточного карб-катиона, поэтому наиболее подходящими катализаторами этой реакции являются цеолиты. Варьированием методики приготовления, природы темплага и ПАВ можно конструировать цеолиты с заданными параметрами (размер и форма пор и каналов, дисперсность и др.) для синтеза определенного строения химических соединений, что открывает огромные перспективы для избирательного получения нужных продуктов, особенно в нефтехимических процессах (Farrauto, et al, 2006; Primo, et al, 2014).

Однако, диффузионные ограничения внутри микропор, применяемых в таких нефтехимических процессах, как крекинг, изомеризация и алкилирование, ведут к их низкой степени использования и быстрой дезактивации за счет закоксования и блокировки пор (Pai, et al, 2021; Huseynova, et al, 2022). Было показано, что, несмотря на значительный интерес к поиску активных и стабильных твердокислотных катализаторов алкилирования, применение коммерческих цеолитов, удовлетворяющих требованиям к кислотно-основным характеристикам поверхности, сталкивается с трудностями в применении ввиду ограничений, связанных с размером и формой каналов регулярной каркасной структуры цеолитов (Алиев, 2010). Эти ограничения определяются массопереносом (диффузионные торможения и конфигурационный эффект) и направлением химических превращений (селективность по размеру и форме) в порах. В этой связи особенную значимость приобрели иерархические цеолиты – модифицированные материалы, характеризующиеся наличием одновременно микропор и мезопор, т.е. различными пористыми структурами в рамках одного цеолитного каркаса.

Согласно данным исследований последних лет, иерархические цеолиты, содержащие помимо микропор транспортную систему мезо/макропор, оказались эффективнее и стабильнее традиционных микропористых катализаторов в промышленно важных реакциях синтеза этилбензола, каталитического крекинга и изомеризации (Dong, et al, 2018; Han, et al, 2021; Rastegar, et al, 2020).

Иерархические цеолиты представляют собой алюмосиликаты с кристаллической структурой, обладающие рядом с микропорами вторичной пористостью в диапазоне мезопор и/или мелких макропор. Они включают в себя мезопористые и макропористые сети. Мезо- и макропористость обеспечивают эффективный транспорт молекул при сохранении высокой селективности формы, достижимой за счет микропористости исходного цеолита. Иерархические цеолиты

в основном разрабатываются путем постсинтеза и предсинтеза или модификации цеолитов (Ratnakar, et al, 2022; Na, et al, 2015). Иерархические цеолиты демонстрируют улучшенные каталитические характеристики по сравнению с обычными микропористыми цеолитами. Это улучшение во многом объясняется участием крупных соединений, поскольку вторичная пористость позволяет им беспрепятственно диффундировать в активные центры внутри каналов.

Иерархические цеолиты обычно могут быть получены путем (i) создания внутрикристаллических мезопор внутри микропористой структуры цеолита, или (ii) введения межкристаллических мезопор в пространства, которые срастаются наноразмерными кристаллами цеолита. Методы синтеза играют очень важную роль на разных уровнях иерархической пористости (Kerstens, et al, 2020; Chen, et al, 2020).

В настоящее время разработаны и изучены такие методы синтеза иерархических цеолитов, как битемплатный синтез, силанизация, деламинирование, пилларирование и др. (Lee, et al, 2023; Ivanova, et al, 2013). Среди перечисленных методов рекристаллизация практически не изучена, хотя она может быть отнесена к наименее энерго- и ресурсоемким методам синтеза. Сущность метода рекристаллизации заключается в двухстадийной гидротермальной обработке цеолита в присутствии щелочи и ПАВ с промежуточной коррекцией pH реакционной смеси. Как показано на примере цеолитов MFI, MOR и BEA (Lin, et al, 2018; Wawrzynczak, et al, 2023; Xu, et al, 2019), на первой стадии под действием щелочи происходит частичное растворение цеолита с переходом цеолитных фрагментов различной дисперсности в жидкую fazу. В ходе второй стадии после коррекции pH происходит сборка полученных цеолитных фрагментов в мезопористую структуру, локализация и количество которой зависит от концентрации щелочи и степени деструкции цеолита на первой стадии.

В настоящей работе приводятся результаты исследований по рекристаллизации трех типов синтетических цеолитов – Y, BEA и ZSM-5 с применением полиэтиленгликоля-10000 для синтеза иерархических цеолитов на основе использованных синтетических цеолитов.

Материалы и основные методы

Для отработки методики рекристаллизации использовали импортные коммерческие цеолиты, перечисленные в таблице 1, а также дополнительные материалы и реагенты, представленные в таблице 2.

Таблица 1 – Коммерческие цеолиты, использовавшиеся при отработке методики рекристаллизации

Марка цеолита	Катион	Si:Al	Средний размер пор, нм	$S_{\text{яд}}, \text{м}^2/\text{г}$
Цеолит Y	H	80	0,70	780
Цеолит BEA	H	40	0,60–0,65	725
Цеолит ZSM-5	NH ₄	80	0,54	425

Таблица 2 – Материалы, использовавшиеся при отработке методики рекристаллизации

Материал	Квалификация	Формула	НТД
Кислота азотная	«х.ч.»	HNO ₃	ГОСТ 4461–77
Аммиак водный	«х.ч.»	NH ₃ ·H ₂ O	ГОСТ 3760–79
Кислота лимонная	«ч.д.а.»	C ₃ H ₅ O(COOH) ₃	ГОСТ 3652–69

Полиэтиленгликоль–10000	«имп.»	$C_{2n}H_{4n+2}O_{n+1}$	—
Натрия гидроокись	«х.ч.»	NaOH	ГОСТ 4328–77
Вода дистиллированная	—	H ₂ O	ГОСТ 6709–72

Для отработки методики кристаллизации рассматривались различные методики, представленные в литературе (Lee, et al, 2023; Na, et al, 2015; Chen, et al, 2020). В ходе анализа составлена методика, аналогичная описанной в (Al-Ani, et al, 2019).

Исходные цеолиты обрабатывали следующим образом: навеску цеолита смешивали с водой, pH суспензии доводили до $\sim 5,5\text{--}5,7$ с помощью азотной кислоты или водного аммиака. Далее суспензию перемешивали с 10%-ной лимонной кислотой в течение 1 ч при комнатной температуре. После центрифугирования и промывки дистиллированной водой порошок отделяли и сушили 1 ч при комнатной температуре.

Далее цеолит повторно суспендировали в растворе, содержащем NaOH и полиэтиленгликоль (ПЭГ). Смесь выдерживали в течение 8 ч при 80–100 °C, во избежание испарения воды использовали установку, составленную из колбы со смесью, соединенной с вертикальным холодильником.

По окончании введения ПЭГ порошок отделяли двукратным фильтрованием горячего раствора на фильтре «Синяя лента», промывали и сушили в течение ночи.

Для удаления ПЭГ образец прокаливали в печи при 450 °C в течение 1 ч, затем поднимали температуру печи до 550 °C и выдерживали еще 2 ч.

Исходные и обработанные образцы исследовали рядом физико-химических методов:

- рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре ДРОН–4–07;
- ИК-спектроскопии (ИКС) на ИК-спектрометре Nicolet iS5;
- сканирующей электронной микроскопии на микроскопе (СЭМ) JEOL JES-ME–3Х;
- определения текстуры методом БЭТ на газоадсорбционном поромере Thermo Scientific Surfer.

Результаты и обсуждение

Метод рекристаллизации включает частичное растворение и повторную сборку структуры цеолита [17–19, 28–30]. Первый этап рекристаллизации представляет собой частичное растворение каркаса цеолита и удаление его фрагментов, в то время как второй этап повторной сборки заключается в том, чтобы эти растворяющиеся частицы образовали мезопористую фазу. Ключевым параметром процесса является степень растворения, определяющая структурные и текстурные свойства конечного продукта (рисунок 1).

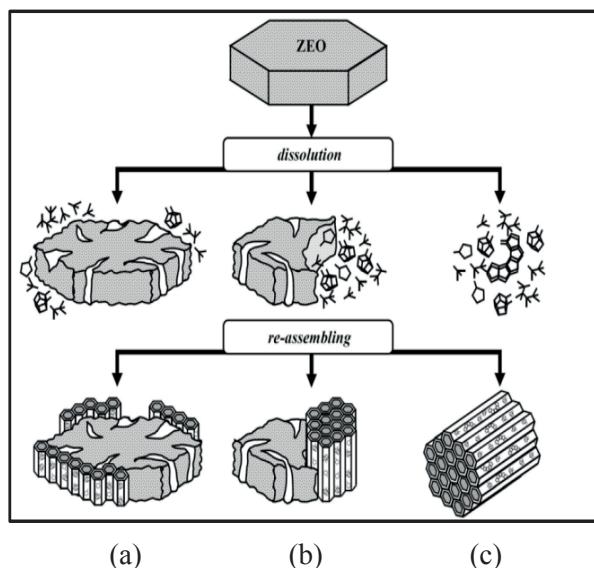


Рисунок 1 – Схематическое отображение процесса рекристаллизации и возможных видов образуемых материалов (Ivanova, et al, 2013)

При мягкой перекристаллизации образуются мезоструктурированные кристаллы с внутрикристаллическими и межкристаллическими мезопорами (рисунок 1, а), при глубокой перекристаллизации – микро-мезопористые нанокомпозиты, содержащие сокристаллизованные кристаллы цеолитов и упорядоченные мезопористые фазы (рисунок 1, б), и при полной перекристаллизации – мезопористые материалы из малых цеолитовых ячеек (рисунок 1, в). Метод рекристаллизации, в отличие от темплатирования в ходе кристаллизации, удобен, т.к. позволяет исходить из некоторой исходной структуры и топологии поверхности цеолита.

Для придания цеолитам дополнительной пористости, как правило, широко используются ПАВ. Процессы перекристаллизации с использованием темплатных ПАВ разделяют на две категории.

В качестве реагента, придающего при сборке цеолиту мезопористость, применяют различные ПАВ (СТАВ, ПЭГ, полисахариды и т.д.). При этом разработки в данной области сохраняют актуальность ввиду недостаточной изученности влияния разных ПАВ и условий рекристаллизации на конечные характеристики продукта.

В данной работе в процессе рекристаллизации трех синтетических цеолитов использовался ПЭГ-1000.

На рисунке 2 представлены данные анализа исходных образцов методом РФА. Полученные дифрактограммы позволяют утверждать, что все исходные образцы представляют собой фазово-чистые цеолиты: HY (JCPDS 77–1549), BEA (JCPDS 47–183), ZSM-5 (JCPDS 43–322).

Обработка цеолитов привела к значительной аморфизации, связанной с

разрушением их исходной структуры: данные РФА (рисунок 3) показали, что в случае цеолитов HY и BEA аморфизация произошла полностью, в случае цеолита ZSM-5 – частично. На это в том числе указывает и разупорядочение структуры цеолита ZSM-5, о котором свидетельствует сдвиг положений основных дифракционных максимумов в направлении больших значений:

- грань (421) – от 4,260 до 4,289 Å;
- грань (501) – от 3,849 до 3,854 Å;
- грань (303) – от 3,722 до 3,745 Å;
- грань (133) – от 3,649 до 3,664 Å.

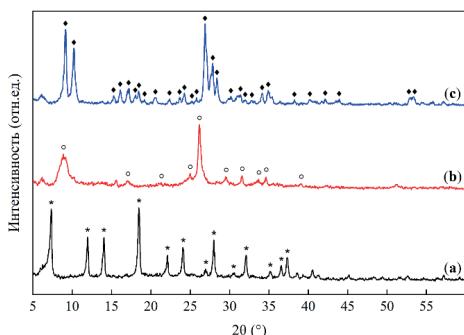


Рисунок 2 – Дифрактограммы исходных цеолитов: а – цеолит HY, б – цеолит BEA, в – цеолит ZSM-5

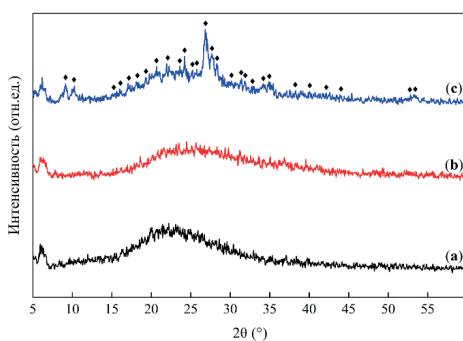


Рисунок 3 – Дифрактограммы обработанных цеолитов: а – цеолит HY, б – цеолит BEA, в – цеолит ZSM-5

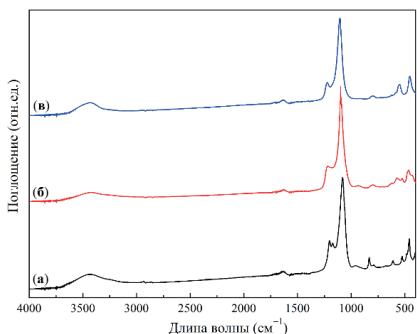


Рисунок 4 – ИК-спектры исходных цеолитов: а – цеолит HY, б – цеолит BEA, в – цеолит ZSM-5

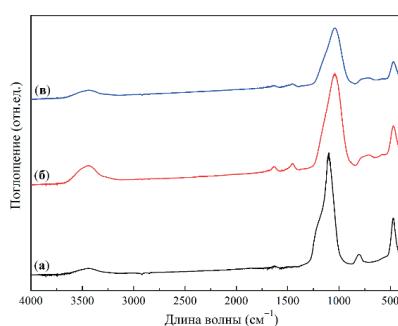


Рисунок 5 – ИК-спектры обработанных цеолитов: а – цеолит HY, б – цеолит BEA, в – цеолит ZSM-5

Аналогичные результаты можно получить из данных ИК-спектроскопии (рисунки 4, 5). Так, помимо общего уменьшения и сглаживания всего спектра, по итогу процедуры обработки наблюдается значительное уменьшение характерной полосы (п.п.) поглощения при 540–580 см⁻¹, интенсивность которой напрямую связана со степенью кристалличности. Последняя в случае высококремнистых цеолитов со структурой типа MFI (ZSM-5, ЦВМ) может быть рассчитана по эмпирической формуле (Флориан Сильвейра, 1989):

$$C = 2072 D/g - 29, \quad (1)$$

где D – интенсивность п.п. 540–580 см⁻¹, g – навеска образца, мг.

Ориентировочный расчет по формуле (1) дал уменьшение степени кристалличности на 85% относительно исходной величины.

Из результатов РФА и ИКС следует, что полученные образцы были подвергнуты избыточной аморфизации, и для дальнейших работ необходимо уточнение отработанной методики для получения кристаллических образцов.

Результаты анализов исходных и обработанных образцов методом СЭМ сведены на рисунок 6. Данные СЭМ показали, что исходные образцы цеолитов состоят из агломератов размером 0,5–1,0 мкм (особенно узкий диапазон размеров заметен для исходного цеолита BEA, рисунок 5, с), которые частично соединены во вторичные агрегаты. Обработка цеолитов, согласно данных СЭМ, ведет к срастанию исходных агломератов в более крупные (до 2,0 мкм) и образованию последними крупных вторичных структур.

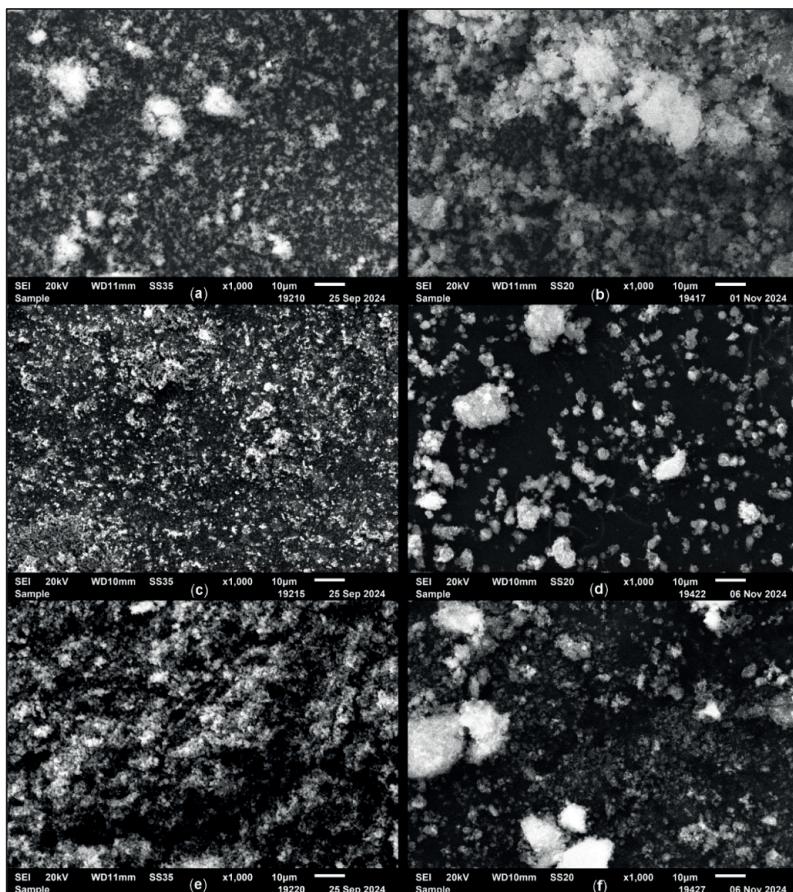


Рисунок 6 – Микрофотографии образцов цеолитов: а – исходный цеолит HY, б – обработанный цеолит HY, в – исходный цеолит BEA, г – обработанный цеолит BEA, е – исходный цеолит ZSM-5, ж – обработанный цеолит ZSM-5

По результатам исследования образцов цеолита HY до и после обработки были построены изотермы адсорбции азота, представленные на рисунке 7. Данные о величинах удельной поверхности и объема различных пор образцов сведены в таблице 3.

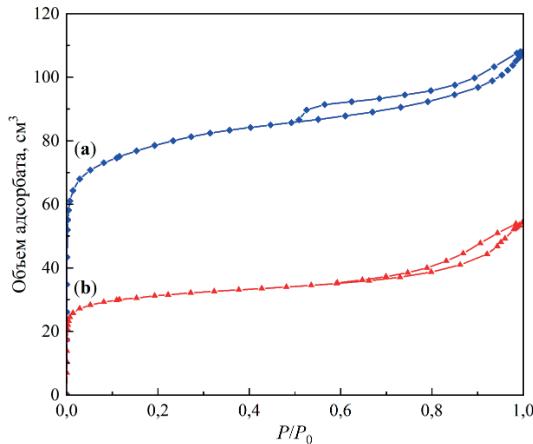


Рисунок 7 – Изотермы адсорбции БЭТ образцов: а – исходный цеолит HY, б – модифицированный цеолит HY

Таблица 3 – Текстурные характеристики образцов цеолита HY

Образец	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$			Объем пор, $\text{см}^3/\text{г}$			Средний радиус пор, нм	
	Общая	Микро-	Мезо-	Общий	Микро-	Мезо-	Микро-	Мезо-
Исходный	795,4	695,6	99,8	0,528	0,384	0,144	0,6	2,4
Обработанный	427,7	145,3	282,4	0,192	0,047	0,145	1,0	6,9

При модификации цеолита, как видно из рисунка 6, наблюдается общее уменьшение объема адсорбируемого азота, равно как и характерное уменьшение гистерезиса по сравнению с изотермой адсорбции исходного цеолита. Таким образом, из полученных результатов можно заключить, что в ходе перекристаллизации цеолита HY было успешно достигнуто увеличение поверхности мезопор путем их расширения: общий объем мезопор, вычисленный различными методами, в ходе обработки не изменился и для обоих образцов составил $0,145 \text{ см}^3/\text{г}$, в то время как поверхность и средний радиус мезопор значительно увеличились при общем уменьшении объема и поверхности микропор.

Наблюдаемые изменения текстуры образцов свидетельствуют о формировании иерархического цеолита из исходного коммерческого цеолита HY, что позволяет говорить о пригодности разработанной методики рекристаллизации для осуществления синтеза иерархических цеолитов с заданными свойствами.

Заключение

Синтетические цеолиты типа Y, BEA и ZSM-5, являющиеся активными и стабильными твердокислотными катализаторами алкилирования, они

имеют недостатки в применении ввиду ограничений, связанных с размером и формой каналов регулярной каркасной структуры цеолитов. Эти ограничения определяются массопереносом (диффузионное торможение и конфигурационный эффект) и направлением химических превращений (селективность по размеру и форме) в порах. В этой связи особенную актуальность имеет исследование иерархических цеолитов, характеризующихся наличием одновременно микропор и мезопор, т.е. различными пористыми структурами в рамках одного материала. Среди различных методов синтеза иерархических цеолитов (деалюминирование, десилицирование, деламинирование, рекристаллизация, темплатный синтез) одним из более привлекательных является рекристаллизация, сводящаяся к частичному растворению исходной структуры цеолита и сборку новой, частично мезопористой структуры.

В качестве реагента, придающего при сборке цеолиту мезопористость, применялся ПЭГ-10000. Была составлена и отработана методика рекристаллизации с ПЭГ трех коммерческих цеолитов Y, BEA и ZSM-5. Результаты анализа продуктов методами РФА, ИКС и СЭМ показали значительную аморфизацию цеолитов, из данных ИКС определена степень аморфизации для цеолита ZSM-5 (85%). При этом результаты исследования изменения текстуры на примере цеолита Y методом БЭТ позволили выявить увеличение поверхности мезопор за счет их расширения при одновременном (неполном) сокращении объема микропор. При этом объем мезопор остается постоянным, подтверждая известные ограничения метода рекристаллизации. Полученные результаты свидетельствуют о формировании иерархических цеолитов по разработанной методике для осуществления дальнейшего синтеза иерархических цеолитов на базе синтетических цеолитов.

Литература

- Al-Ani A., Haslam J.J., Mordinova N.E., Lebedev O.I., Vicente A., Fernandez C., Zholobenko V. (2019) Synthesis of nanostructured catalysts by surfactant-templating of large-pore zeolites, *Nanoscale Advances*, 1:5:2029-2039. <https://doi.org/10.1039/C9NA00004F>
- Алиев Р.Р. (2010) Катализаторы и процессы переработки нефти. Москва: М, 389 с. ISBN 978-5-94013-138-0.
- Chen L.H., Sun M.H., Wang Z., Yang W., Xie Z., Su B.L. (2020) Hierarchically structured zeolites: from design to application, *Chemical Reviews*, 120:20:1:1194-11294
- Dong P., Li Z., Ji D., Wang X., Yun H., Du Z., Bian J., Li G. (2018) Catalytic benzene mono-alkylation over three catalysts: improving activity and selectivity with MY catalyst, *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 90:149-155. <https://doi.org/10.1007/s10847-017-0771-z>
- Farrauto R.J. Bartholomew C.H. (2006) Fundamentals of Industrial Catalytic Processes. 2nd ed. N.Y.:Wiley. 995 p. <https://doi.org/10.1002/9780471730071>. ISBN 9780471730071
- Han M., Xue Z., Ling L., Zhang R., Fan M., Wang B. (2021) Effect of Lewis/Brønsted acid sites in HZSM-5 zeolite on the selectivity of *para*-xylene during methylation of toluene with methanol, *Molecular Catalysis*, 509:111622. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2021.111622>
- Huseynova G., Muxtarova G., Aliyeva N., Gasimova G., Rashidova S. (2022) Zeolite-containing catalysts in alkylation processes, *Catalysis Research*, 2:3:1-12. <https://doi.org/10.21926/cr.2203019>
- Ivanova I. I., Knyazeva E.E. (2013) Micro-mesoporous materials obtained by zeolite recrystallization: synthesis, characterization and catalytic applications, *Chemical Society Reviews*, 42:9:3671-3688. <https://doi.org/10.1039/C2CS35341E>.
- Kerstens D., Smeyers B., Van Waeyenberg J., Zhang Q., Yu J., Sels B.F. (2020) State of the art and

perspectives of hierarchical zeolites: practical overview of synthesis methods and use in catalysis, *Advanced Materials*, 32:44:2004690. <https://doi.org/10.1002/adma.202004690>

Lee G., Jang E., Lee T., Jeong Y., Kim H., Lee S., Chung Y.G., Ha K.-S., Baik H., Jang H.-G., Cho S.J., Choi J. (2023) Effective delamination of a layered two-dimensional MCM–22 zeolite: Quantitative insights into the role of the delaminated structure on acid catalytic reactions, *Catalysis Today*, 411:113856. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2022.07.024>

Lin J., Cichocka M.O., Peng F., Yang T., Sun J. (2018) Hierarchical shell-like ZSM–5 with tunable porosity synthesized by using a dissolution-recrystallization approach, *Chemistry A European Journal*, 24:56:14974-14981. <https://doi.org/10.1002/chem.201802014>

Na K., Somorjai G.A. (2015) Hierarchically nanoporous zeolites and their heterogeneous catalysis: current status and future perspectives, *Catalysis Letters*, 145:193-213. <https://doi.org/10.1007/s10562-014-1411-5>

Pai S.M., Das R.K., Kumar S.K., Kumar L., Karemre A.L., Newalkar B.L. (2021) Emerging trends in solid acid catalyst alkylation processes, *Catalysis for Clean Energy and Environmental Sustainability: Petrochemicals and Refining Processes*, ed. K.K. Pant, S.K. Gupta, E. Ahmad. – Cham, Switzerland: Springer, 2:109-148. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65021-6_4

Primo A., Garcia H. (2014) Zeolites as catalysts in oil refining, *Chemical Society Reviews*, 43:22:7548-7561. <https://doi.org/10.1039/C3CS60394F>

Rastegar S.F., Sadowska G., Pilar R., Moravkova J., Kaucky D., Brabec L., Pastvova J., Sazama P. (2020) Analysis of decisive structural parameters of zeolites for alkylation of benzene with ethylene, *Applied Catalysis A: General*, 591:117379. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2019.117379>

Ratnakar R.R., Dindoruk B. (2022) The role of diffusivity in oil and gas industries: fundamentals, measurement, and correlative techniques, *Processes*, 10:6:1194. <https://doi.org/10.3390/pr10061194>

Wawrzyniczak A., Nowak I., Woźniak N., Chudzińska J., Feliczkak-Guzik A. (2023) Synthesis and characterization of hierarchical zeolites modified with polysaccharides and its potential role as a platform for drug delivery, *Pharmaceutics*, 15:2:535. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15020535>

Флориан Сильвейра Х.Л. (1989) Влияние условий декатионирования на физико-химические и катализитические свойства высококремнеземных цеолитов: автореф. дисс. к.х.н. Л.: ЛТИ, 22 с.

Xu L., Wang F., Feng Z., Liu Z., Guan J. (2019) Hierarchical ZSM–5 zeolite with enhanced catalytic activity for alkylation of phenol with *tert*-butanol, *Catalysts*, 9:2:202. <https://doi.org/10.3390/catal9020202>

References

- Al-Ani A., Haslam J.J., Mordinova N.E., Lebedev O.I., Vicente A., Fernandez C., Zholobenko V. (2019) Synthesis of nanostructured catalysts by surfactant-templating of large-pore zeolites, *Nanoscale Advances*, 1:5:2029-2039. <https://doi.org/10.1039/C9NA00004F> (in Eng.).
- Aliyev R.R. (2010) Katalizatory i processy pererabotki nefti [Catalysts and oil refining processes]. Moscow: M, 389 p. ISBN 978-5-94013-138-0 (in Russian)
- Chen L.H., Sun M.H., Wang Z., Yang W., Xie Z., Su B.L. (2020) Hierarchically structured zeolites: from design to application, *Chemical Reviews*, 120:20:1:1194-11294 (in Eng.).
- Dong P., Li Z., Ji D., Wang X., Yun H., Du Z., Bian J., Li G. (2018) Catalytic benzene mono-alkylation over three catalysts: improving activity and selectivity with MY catalyst, *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 90:149-155. <https://doi.org/10.1007/s10847-017-0771-z> (in Eng.).
- Farrauto R.J. Bartholomew C.H. (2006) Fundamentals of Industrial Catalytic Processes. 2nd ed. N.Y.:Wiley. 995 p. <https://doi.org/10.1002/9780471730071>. ISBN 9780471730071 (in Eng.).
- Florian Silveira J.L. (1989) Vliyanie uslovij dekationirovaniya na fiziko-himicheskie i kataliticheskie svojstva vysokokremnezemnyh ceolitov [The influence of decationization conditions on the physicochemical and catalytic properties of high-silica zeolites], author's abstract. diss. L. LTI, 22 p (in Russian)
- Han M., Xue Z., Ling L., Zhang R., Fan M., Wang B. (2021) Effect of Lewis/Brønsted acid sites in HZSM–5 zeolite on the selectivity of *para*-xylene during methylation of toluene with methanol, *Molecular Catalysis*, 509:111622. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2021.111622> (in Eng.).
- Huseynova G., Muxtarova G., Aliyeva N., Gasimova G., Rashidova S. (2022) Zeolite-containing catalysts in alkylation processes, *Catalysis Research*, 2:3:1-12. <https://doi.org/10.21926/cr.2203019> (in Eng.).
- Ivanova I. I., Knyazeva E.E. (2013) Micro-mesoporous materials obtained by zeolite recrystallization:

synthesis, characterization and catalytic applications, *Chemical Society Reviews*, 42:9:3671-3688. <https://doi.org/10.1039/C2CS35341E>. (in Eng.).

Kerstens D., Smeyers B., Van Waeyenberg J., Zhang Q., Yu J., Sels B.F. (2020) State of the art and perspectives of hierarchical zeolites: practical overview of synthesis methods and use in catalysis, *Advanced Materials*, 32:44:2004690. <https://doi.org/10.1002/adma.202004690> (in Eng.).

Lee G., Jang E., Lee T., Jeong Y., Kim H., Lee S., Chung Y.G., Ha K.-S., Baik H., Jang H.-G., Cho S.J., Choi J. (2023) Effective delamination of a layered two-dimensional MCM-22 zeolite: Quantitative insights into the role of the delaminated structure on acid catalytic reactions, *Catalysis Today*, 411:113856. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2022.07.024> (in Eng.).

Lin J., Cichocka M.O., Peng F., Yang T., Sun J. (2018) Hierarchical shell-like ZSM-5 with tunable porosity synthesized by using a dissolution-recrystallization approach, *Chemistry A European Journal*, 24:56:14974-14981. <https://doi.org/10.1002/chem.201802014> (in Eng.).

Na K., Somorjai G.A. (2015) Hierarchically nanoporous zeolites and their heterogeneous catalysis: current status and future perspectives, *Catalysis Letters*, 145:193-213. <https://doi.org/10.1007/s10562-014-1411-5> (in Eng.).

Pai S.M., Das R.K., Kumar S.K., Kumar L., Karemire A.L., Newalkar B.L. (2021) Emerging trends in solid acid catalyst alkylation processes, *Catalysis for Clean Energy and Environmental Sustainability: Petrochemicals and Refining Processes*, ed. K.K. Pant, S.K. Gupta, E. Ahmad. – Cham, Switzerland: Springer, 2:109-148. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65021-6_4 (in Eng.).

Primo A., Garcia H. (2014) Zeolites as catalysts in oil refining, *Chemical Society Reviews*, 43:22:7548-7561. <https://doi.org/10.1039/C3CS60394F> (in Eng.).

Rastegar S.F., Sadovska G., Pilar R., Moravkova J., Kaucky D., Brabec L., Pastvova J., Sazama P. (2020) Analysis of decisive structural parameters of zeolites for alkylation of benzene with ethylene, *Applied Catalysis A: General*, 591:117379. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2019.117379> (in Eng.).

Ratnakar R.R., Dindoruk B. (2022) The role of diffusivity in oil and gas industries: fundamentals, measurement, and correlative techniques, *Processes*, 10:6:1194. <https://doi.org/10.3390/pr10061194> (in Eng.).

Wawrzyńczak A., Nowak I., Woźniak N., Chudzińska J., Feliczkak-Guzik A. (2023) Synthesis and characterization of hierarchical zeolites modified with polysaccharides and its potential role as a platform for drug delivery, *Pharmaceutics*, 15:2:535. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15020535> (in Eng.).

Xu L., Wang F., Feng Z., Liu Z., Guan J. (2019) Hierarchical ZSM-5 zeolite with enhanced catalytic activity for alkylation of phenol with *tert*-butanol, *Catalysts*, 9:2:202. <https://doi.org/10.3390/catal9020202> (in Eng.).

A.K. Nurlybekova^{1,2}, A.A. Minkayeva¹, E. Shybyrai¹, H.A. Aisa³, J. Jenis^{1,2*}, 2025.

¹Research Center for Medicinal Plants, Al Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;

²Research Institute of Natural Products and Technology, Almaty, Kazakhstan;

³Xinjiang Technical Institutes of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, China.

E-mail: janarjenis@kaznu.kz

GC-MS STUDY OF ORGANIC AND MINERAL COMPONENTS IN ARTEMISIA SPECIES FROM KAZAKHSTAN

Nurlybekova Aliya Kairatovna – PhD student, Scientific Researcher of the Research Center for Medicinal Plants, Al Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: nurl_al@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9797-284X;

Minkayeva Ayaulym Azamatkyzy – Master student, Scientific Researcher of the Research Center for Medicinal Plants, Al Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: minkaeva.a@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6236-5393;

Shybyray Yergazy – PhD, Senior Researcher of Research Center for Medicinal Plants, Al Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: Erhazi88@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-5718-5053;

Aisa Haji Akber – PhD, Professor, Xinjiang Technical Institutes of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, China, e-mail: haji@ms.xjb.ac.cn, https://orcid.org/0000-0003-4652-6879;
Jenis Janar – PhD, Professor, Director of the Research Center for Medicinal Plants, Al Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: janarjenis@kaznu.kz, https://orcid.org/0000-0002-7148-7253.

Abstract. The article represent the comparable results of qualitative and quantitative analysis together with mineral composition and GC-MS based examination of liposoluble constituents of two Artemisia species: Artemisia albida and Artemisia diffusa. The genus Artemisia, one of the largest within the Asteraceae family, represents a promising source of bioactive compounds, particularly sesquiterpenoids, such as guaiac, germacran, and eudesman types. These compounds have demonstrated a range of pharmacological activities, including antimalarial, antidiabetic, antitumor, antimicrobial, anti-inflammatory, and immunomodulatory properties. In this regard, the purpose of the paper is to conduct in depth research of the phytochemical content of insufficient studied Artemisia species growing in the Republic of Kazakhstan. The results of investigation have shown the maximum content of extractive substances (20.76%), polysaccharides (2.14%), and tannins (1.52%) in the plant A. albida. The content of organic acid (1.45%), flavonoids (0.06%), alkaloids (0.60%) and coumarins

(1.60%) can be noticed in higher concentration in the plant *A. diffusa*. The species *A. diffusa* showed intriguing results of elements daily needed by the human, including – K (39.19 mg/g), Ca (11.15 mg/g), Fe (0.181 mg/g) and Zn (0.043 mg/g). The liposoluble constituents in petroleum ether extract of investigated medicinal plants have been identified by GC-MS method. The results of analyses indicated that the studied plants contain a significant amount of bioactive substances, which could potentially expand the range of effective domestic phytopreparations from the Kazakhstan in the future.

Keywords: *Artemisia albida*; *Artemisia diffusa*; phytochemical components; macro-microelements; petroleum ether extract; liposoluble constituents, GC-MS.

Acknowledgments

Authors thank Research Institute of Natural Products and Technology, Almaty, Kazakhstan for support in conducting analyses.

**А.К. Нұрлышбекова^{1,2}, А. А. Минкаева¹, Е. Шыбырай¹, Х.А. Айса³,
Ж. Женіс^{1,2*}, 2025.**

¹Дәрілік өсімдіктерді ғылыми зерттеу орталығы, Әл-Фараби атындағы қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан;

²Табиғи өнімдер мен технологияларды ғылыми-зерттеу институты,
Алматы, Қазақстан;

³Синцзян Физика және Химия Техникалық Институты, Қытай Ғылымдар Академиясы, Урімші, Қытай.
E-mail: janarjenis@kaznu.kz

ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ *ARTEMISIA* ТҮРЛЕРИНІҢ ОРГАНИКАЛЫҚ ЖӘНЕ МИНЕРАЛДЫ ҚҰРАМЫН ГХ-МС АРҚЫЛЫ ЗЕРТТЕУ

Нұрлышбекова Алия Кайратовна – PhD докторанты, Дәрілік өсімдіктерді ғылыми зерттеу орталығының ғылыми қызметкері, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: nurl_al@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9797-284X>;

Минкаева Аяулым Азаматқызы – Магистрант, Дәрілік өсімдіктерді ғылыми зерттеу орталығының ғылыми қызметкері, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: minkaeva.a@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6236-5393>;

Шыбырай Ергазы – PhD, Дәрілік өсімдіктерді ғылыми зерттеу орталығының аға ғылыми қызметкері, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: Erhazi88@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-5718-5053>;

Айса Хаджи Ақбер – PhD, Профессор, Шыңқаш Техникалық Физика және Химия Институты, Қытай Ғылым Академиясы, Урімші, Қытай, e-mail: haji@ms.xjb.ac.cn, <https://orcid.org/0000-0003-4652-6879>;

Женіс Жанар – PhD, Профессор, Дәрілік өсімдіктерді ғылыми зерттеу орталығының директоры, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан, e-mail: janarjenis@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7148-7253>.

Аннотация. Мақалада *Artemisia* өсімдігінің екі түрінің: *Artemisia albida* және *Artemisia diffusa* майда еритін құрамдас бөліктерінің минералды құрамы мен ГХ-МС негізіндегі зерттеуімен бірге сапалық және сандық талдаудың салыстырмалы

нәтижелері ұсынылды. *Artemisia* тұқымдасы, Asteraceae тұқымдасының ең үлкендерінің бірі, биоактивті қосылыстардың, әсіреле гуаяқ, гермақран және эвдесман сияқты сесквитерпеноидтардың перспективалы көзі болып табылады. Бұл қосылыстар безгекке, диабетке, ісікке, микробқа, қабынуға қарсы және иммуномодуляциялық қасиеттер сияқты бірқатар фармакологиялық белсенділік көрсетеді. Осылан байланысты *жұмыстық мақсаты* Қазақстан Республикасында өсетін *Artemisia* өсімдігінің жеткіліксіз зерттелген түрлерінің фитохимиялық құрамын терең зерттеу. Зерттеу нәтижелері бойынша, *A. albida* өсімдігі экстрактивті заттардың (20,76%), полисахаридтердің (2,14%) және таниндердің (1,52%) максималды мөлшерін көрсетті. Органикалық қышқылдың (1,45%), флавоноидтардың (0,06%), алкалоидтардың (0,60%) және кумариндердің (1,60%) концентрациясы *A. diffusa* өсімдігінде жоғары концентрацияда байқауга болады. *A. diffusa* түрі адамға күнделікті қажет элементтердің жоғары нәтижелерін көрсетті, соның ішінде – K (39,19 мг/г), Ca (11,15 мг/г), Fe (0,181 мг/г) және Zn (0,043 мг/г). Зерттелетін дәрілік өсімдіктердің мұнай эфирінің сығындысындағы майда еритін компоненттері ГХ-МС әдісімен анықталды. Талдау нәтижелері зерттелетін өсімдіктерде биоактивті заттардың едәуір мөлшері бар екенін көрсетті, бұл болашакта Қазақстанда тиімді отандық фитопрепараттардың ассортиментін көнегейтуге ықпалын тигізеді.

Түйін сөздер: *Artemisia albida*; *Artemisia diffusa*; фитохимиялық компоненттер; макро-микроэлементтер; мұнай эфирлі сығынды; майда еритін компоненттер, ГХ-МС.

**А.К. Нурлыбекова^{1,2}, А.А. Минкаева¹, Е. Шыбырай¹, Х.А. Айса³,
Ж. Женис^{1,2*}, 2025.**

¹Научно-исследовательский центр лекарственных растений, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

²Научно-исследовательский институт природных продуктов и технологий, Алматы, Казахстан;

³Синьцзянский технический институт физики и химии, Китайская Академия Наук, Урумчи, Китай.
E-mail: janarjenis@kaznu.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ И МИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ ВИДОВ *ARTEMISIA* ИЗ КАЗАХСТАНА МЕТОДОМ ГХ-МС

Нурлыбекова Алия Кайратовна – PhD докторант, научный сотрудник Научно-исследовательского центра лекарственных растений, Казахский Национального Университета имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан, E-mail: nurl_al@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9797-284X>;

Минкаева Аяулым Азаматқызы – магистрант, научный сотрудник Научно-исследовательского центра лекарственных растений Казахского Национального Университета имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан, E-mail: minkaeva.a@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6236-5393>;

Шыбырай Ергазы – PhD, старший научный сотрудник Научно-исследовательского центра

лекарственных растений Казахского Национального Университета имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан, E-mail: Erhazi88@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-5718-5053>;

Айса Хаджи Акбер – PhD, профессор Синьцзянского технического института физики и химии Китайской академии наук, Урумчи, Китай, E-mail: haji@ms.xjb.ac.cn, <https://orcid.org/0000-0003-4652-6879>;

Женис Жанар – PhD, профессор, директор научно-исследовательского центра лекарственных растений Казахского Национального Университета имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан, E-mail: janarjenis@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7148-7253>.

Аннотация. В статье представлены сопоставимые результаты качественного и количественного анализа, а также минерального состава и исследования на основе ГХ-МС жирорастворимых компонентов двух видов *Artemisia*: *Artemisia albida* и *Artemisia diffusa*. Род *Artemisia*, один из крупнейших в семействе астровых, представляет собой многообещающий источник биологически активных соединений, в частности сесквитерпеноидов, таких как гвяжковый, гермакран и эвдесман. Эти соединения продемонстрировали целый ряд фармакологических свойств, включая противомалярийные, противодиабетические, противоопухолевые, противомикробные, противовоспалительные и иммуномодулирующие свойства. В связи с этим целью данной работы является проведение углубленного исследования фитохимического состава недостаточно изученных видов *Artemisia*, произрастающих в Республике Казахстан. Результаты исследований показали максимальное содержание экстрактивных веществ (20,76%), полисахаридов (2,14%) и дубильных веществ (1,52%) в растении *A. albida*. А в виде *A. diffusa* можно заметить более высокое содержание органических кислот (1,45%), флавоноидов (0,06%), алкалоидов (0,60%) и кумаринов (1,60%). Вид *A. diffusa* показал впечатляющие результаты по содержанию элементов, необходимых человеку ежедневно, включая – К (39,19 мг/г), Са (11,15 мг/г), Fe (0,181 мг/г) и Zn (0,043 мг/г). Методом ГХ-МС определены жирорастворимые компоненты в петролейном эфирном экстракте исследуемых лекарственных растений. Результаты анализов показали, что исследуемые растения содержат значительное количество биологически активных веществ, которые потенциально могут расширить ассортимент эффективных отечественных фитопрепаратов из Казахстана в будущем.

Ключевые слова: *Artemisia albida*, *Artemisia diffusa*, фитохимические компоненты, макро-микроэлементы, петролейно-эфирный экстракт, жирорастворимые компоненты, ГХ-МС.

Introduction. *Artemisia* L. includes more than 500 species belonging to the Asteraceae family, which is one of the widely distributed herbal plants all over the world. The *Artemisia* L. species are found across of different temperature regions of Asia, Africa, Australia, and North America (Pavlov, 1961). Most species have been identified in Central Asia. For instance, there are 186 species in China, among which 82 are endemic. There are more than 80 species in Russian Federation's flora, 54 species distributed in Kyrgyzstan (1 endemic), 47 species of *Artemisia* are in Uzbekistan and 33 species with only one endemic grows in Turkmenistan. Comparing with Central Asian countries,

Artemesia species have wide range in Kazakhstan: 81 species are registered and 19 of them are endemic (Nurlybekova, et al, 2022). Phytochemical investigations have shown that the *Artemesia* L. species from Kazakhstan contain various chemical substances such as sesquiterpene lactone, lignans, flavonoids, coumarins, polysaccharides, alkaloids, extractive substances that show variety of health benefits (Adekenov, 2016).

Artemesia albida Willd (*A. albida*) is a semi-white medicinal plant, which is occupied in Altai, Tarbagatai, Zaysan and Akmola regions of East Kazakhstan (Pavlov, 1961). Firstly, Adekenov S.M and Suleimenov E.M. studied *A. albida* Willd, from 2005 to 2008. As a result of the study, sesquiterpene lactones such as austricin, matricarin, canin and agrolide were obtained (Suleimenov, et al, 2005). In addition to this, anhydroaustricin was isolated from *A. albida* (Suleimenov, et al, 2008). These constituents possess pharmacological activities like angioprotector and antilipidemic, low activity against malaria (Plutno, et al, 1995).

Artemesia diffusa (*A. diffusa*) grows in the desert zone on sandy and sandy loam soils, along the outcrops of variegated flowers. Occurs in North Ustyurt, Muyunkum, South Ustyurt, Kyzyl Kum, Turkestan region (Baitenov, 2001). *A. diffusa* is a family of Asteraceae, a genus of Seriphidium, a plant resistant to drought and cold. Pests do not damage leaves and seeds. *Artemesia* genus has been studied chemically and presence of monoterpenes, sesquiterpenes, especially sesquiterpene lactones and essential oils were reported (Kelsey, et al, 1979).

It is clear that the pharmacological characteristics of plants that belong to the wormwood family (antimalarial, antitumor, anthelmintic, cardiotonic, anti-inflammatory, analgesic characteristics, etc.) are justified by the presence of essential oils and sesquiterpene lactones in their composition (Kupriyanov, et al, 2012; Geissman, et al, 2000; Pandey, et al, 2017). The studies on chemical composition of Iranian *Artemesia* species have been reported about the presence of monoterpenes, sesquiterpenes, especially sesquiterpene lactones and essential oils (Rustaiyan, et al, 1987; Rustaiyan, et al, 2000 a; Rustaiyan, et al, 2000 b; Rustaiyan, et al, 1989; Costa, et al, 2009).

Twenty-six compounds were identified in the oil of *A. diffusa*, which represented about 94.43% of the total composition of the oil. In the volatile oil of this species, the oxygen containing monoterpenoids represented the most abundant constituents (92.59%) (Khazraei-Alizadeh, et al, 2001; Khayyat, et al, 2004). The *in vivo* antimalarial activity of *A. diffusa* extracts was investigated and the fraction which contains sesquiterpene lactones as tehranolide showed activity against *Plasmodium berghei* on the mice model of malaria (Noori, et al, 2014; Rustaiyan, et al, 2009; Taghizadeh, et al, 2011; Rustaiyan, et al, 2011).

In current study, the medicinal plants *A. albida* and *A. diffusa* growing in Kazakhstan were analyzed on quantitative-qualitative content, mineral composition and lipophilic substituents for the first time. The research involved evaluating key biologically active components, including the determination of organic acids, flavonoids, polysaccharides, moisture content, total ash, and extractive substances. The concentrations of macro- and microelements in the plant ash were assessed using multi-element atomic emission spectral analysis. Additionally, liposoluble components in petroleum ether extracts of *A.*

albida and *A. diffusa* from Kazakhstan were identified for the first time using the GC-MS (gas chromatography-mass spectrometry) method.

Materials and methods. Plant material. Research sources such as *A. albida* were collected in September 2023 from Almaty region in Southern Kazakhstan. The aerial part of plant *A. diffusa* was collected in September 2020 from Turkestan region, Kazakhstan. Raw materials after being well dried in the shade, were crushed into small pieces in a crushing machine and preserved at room temperature.

The quantitative and qualitative profile of biologically active constituents of *A. albida* and *A. diffusa* was determined in strict accordance with the methodologies prescribed in the I edition of the State Pharmacopoeia of the Republic of Kazakhstan (2008).

The mineral composition was identified, using a Shimadzu 6200 series spectrometer. 3 g of raw material was placed in a pre-calcined and accurately weighed porcelain crucible. Then the crucible was gently heated, first letting the substance burn at the lowest possible temperature, and the flame was gradually increased. Calcination was performed at 500°C to obtain a constant mass. At the end of the calcination, the crucible was cooled in a desiccator and then the resulting ash was burned again at 600°C until a uniform gray color was obtained. The ash of plant was dissolved in 10.0 mL of 40% nitric acid by heating. After that, the resulting solution was heated to obtain wet salts. Subsequently, it was dissolved in 15.0 mL of 1 N nitric acid and transferred to a 25.0 mL volumetric flask for analysis. And so, it will need to be done with each of the three plants (Nurlybekova, et al, 2021).

GC-MS conditions. Analyses were conducted on Agilent 7890A/5975C gas chromatograph coupled to mass spectrometer equipped with a 7683B auto injector (Agilent Technologies, USA). Separation was carried out with a HP-5MS fused silica capillary column (0.25 mm x 30 m, 0.25 µm film, J&W Scientific, USA). The injection port temperature was 310°C. The injection volume was 1 µL, split ratio 5:1. Helium (99.99 %, China) was used as the carrier gas at a rate of 1.0 mL/min. The column temperature was held at 50°C for 10 min, increased by 10°C/min to 300°C, and then held for 40 min. Mass spectra were obtained by electron impact (EI) ionization at 70 eV in scan mode (m/z 30-1000 amu). Solvent delay was 3 min. The detector, ion source and transfer line temperature were set to 150, 230 and 250 °C, respectively (Adams, 1974).

Identification and quantitation. The compounds were identified using NIST14 library. Mass fraction of each detected compound was estimated using normalization of peak areas. The sample was analyzed three times. All data are expressed as the mean ± standard deviation of three replicates.

Results and Discussion. A quantitative and qualitative analysis of bioactive constituents, moisture content, total ash, and extractives was conducted on *A. albida* and *A. diffusa*. The results are presented in Table 1, Figure 1.

Moisture and ash content fluctuate within specific limits for each plant, depending on the characteristics of the plant material, as well as how it is harvested and dried. These data are essential for further calculations during analysis, making the determination of these contents necessary to confirm the high quality of *A. albida* and *A. diffusa*.

The highest quantity of extractive substances from two plant species was obtained

using 80% ethyl alcohol. Therefore, this solvent is the most optimal for extraction of bioactive complexes. Identifying extractive substances with the appropriate solvent is crucial, as it indicates the quality of the plant based on its biological metabolite content.

Flavonoids are the largest class of dietary polyphenols, comprising over 4,000 different biologically active compounds synthesized during plant metabolism. Once consumed, flavonoids can contribute to a variety of beneficial biological activities in human body. Strong and consistent evidence now shows that flavonoids help maintain and enhance nitric oxide levels, improving endothelial function. Additionally, these compounds have been shown to influence blood pressure, oxidative stress, inflammation, platelet function, thrombosis, blood lipids, and glucose metabolism. These effects may help explain why flavonoids and flavonoid-rich foods are associated with cardioprotective and antineoplastic properties.

Organic acids play a key role in the taste, flavor, microbial stability, and consistency of plant-derived beverages. They are also used in food preservation due to their ability to affect bacterial growth. Polysaccharides, on the other hand, are unique substances that help retain moisture in the skin, maintain its elasticity, stimulate collagen fiber synthesis, and enhance cellular immunity.

Tannin bioactivity is related to their chemistry. Tannins have been studied during years due to their beneficial properties including anti-inflammatory, antidiabetic, antihypercholesterolemic, and anticancer activity.

In plants, alkaloids protect plants from predators and regulate their growth. Therapeutically, alkaloids are particularly well known as anaesthetics, cardioprotective, and anti-inflammatory agents. Well-known alkaloids used in clinical settings include morphine, strychnine, quinine, ephedrine, and nicotine.

Numerous coumarins possess several biological activities such as anti-inflammatory, anti-ulcers, anti-tumor, anti-microbial, anti-coagulant.

Table 1 – Quantitative and qualitative analysis of biologically active constituents of *A. albida* and *A. diffusa*

No.	Content	<i>A. albida</i> , %	<i>A. diffusa</i> , %
1	Moisture	8.19	8.08
2	Ash content	6.78	5.70
3	Extractives (80% EtOH)	20.76	14.83
4	Organic acids	0.21	1.45
5	Flavonoids	0.03	0.06
6	Polysaccharides	2.14	0.90
7	Tannins	1.52	1.91
8	Alkaloids	0.53	0.60
9	Coumarins	1.60	5.02

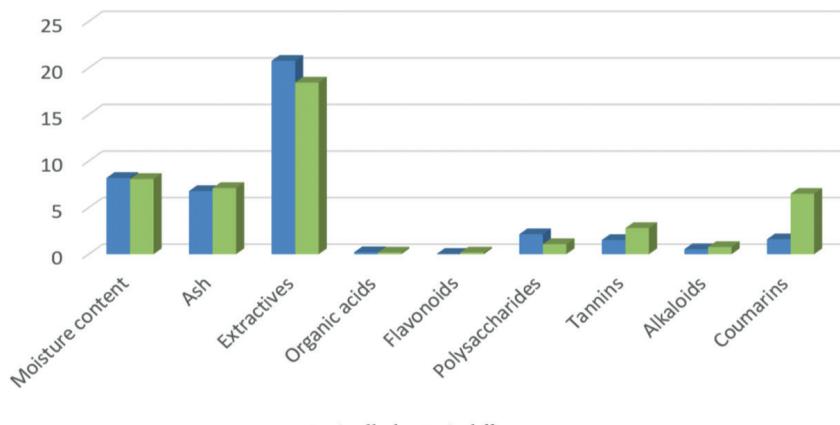


Figure 1 – Quantitative and qualitative content of biologically active constituents of *A. albida* and *A. diffusa*

According to the data obtained during quantitative and qualitative assays, moisture and ash content of both species have almost equivalent values, which are equal to 8.19 and 8.08 percent of moisture and 6.78 and 5.70 percent by ash content appropriately to *A. albida* and *A. diffusa*. Comparing the extractive substances concentration isolated during the extraction by 80% ethanol, *A. albida* differentiated with the higher content – 20.76% of the total plant and 14.83% of biocomplexes extracted from *A. diffusa*. The content of organic acid (1.45%), flavonoids (0.06%), alkaloids (0.60%) and coumarins (5.02%) was higher in the plant *A. diffusa*. By contrast, analysis on *A. albida* has shown the maximum content of polysaccharides and tannins, which are 2.15 and 1.52 by percent, respectively.

Eleven mineral compounds were identified from the ash of the plant that consists of seven microelements and four macroelements, as shown in Table 2 and Figure 2. These findings indicate that the two plants are excellent sources of macro- and microelements essential for the functioning of the muscular, cardiovascular, immune, and nervous systems. They also play a role in the synthesis of vital compounds, metabolic processes, hematopoiesis, digestion, and the neutralization of metabolic byproducts.

The results of our research revealed the highest content of iron (0.160 mg/g) in the plant *A. albida*. In contrast, the levels of Cd, Cu, Mn, Zn, Ca, Mg, Na, and K were found to be higher in *A. diffusa*.

Table 2 – Composition of macro-, microelements in the ash and plant of *A. albida* and *A. diffusa*

Element	Content in ash, mg/g		Content in the plant, mg/g	
	<i>A. albida</i>	<i>A. diffusa</i>	<i>A. albida</i>	<i>A. diffusa</i>
Microelements				
Cd	0.002	0.014	0.0001	0.001
Ni	0.039	0.208	0.002	0.011
Pb	-	-	-	-

Cu	0.037	0.458	0.002	0.025
Mn	0.413	2.676	0.026	0.145
Zn	0.099	0.801	0.006	0.043
Fe	2.573	2.468	0.160	0.181
Macroelements				
Ca	46.08	206.5	2.866	11.15
Mg	16.86	95.19	1.049	5.140
Na	4.731	5.509	0.294	0.889
K	57.87	725.8	3.600	39.19

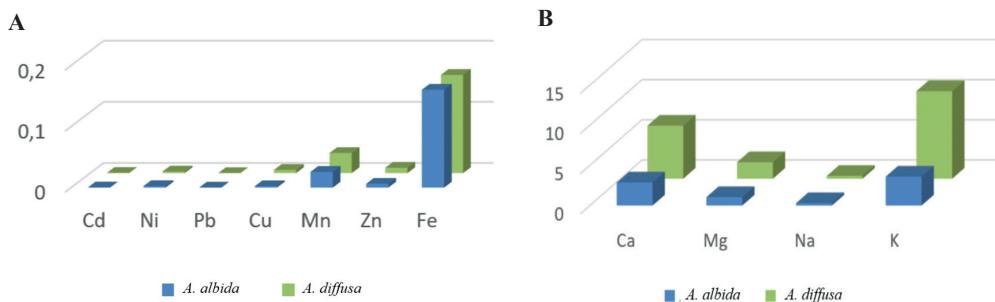


Figure 2 – Composition of micro- (A) and macroelements (B) of *A. albida* and *A. diffusa*

Our research revealed that the studied plants are rich in macronutrients, with K, Na, Mg, and Ca being the most abundant, while micro elements such as Cu, Fe, Zn, and Mn are present in high concentrations. Therefore, all two plants tested can be regarded as potential sources of trace elements, which could expand the potential applications of these plant materials in the future. The macro- and microelements in *A. albida* and *A. diffusa* play an important role in supporting various physiological functions. Macroelements such as calcium, magnesium, sodium, and potassium contribute to bone strengthening, improving cardiovascular and muscle function, as well as maintaining fluid balance and nerve activity. Microelements like iron, copper, zinc, and manganese support blood health, the immune system, tissue healing, and protect cells from oxidative stress. The high concentrations of these elements in *A. albida* and *A. diffusa* make them promising for the development of phytopharmaceuticals aimed at improving bone health, cardiovascular function, immunity, and metabolic processes.

The liposoluble constituents present in petroleum ether extract from *A. albida* were analyzed by GC-MS for the first time (Table 3). Twenty compounds from *A. albida* were separated and their relative contents were determined by area normalization in which the major constituents were neoisolongifolene, 8-oxo- (14.8%), cyclohexane, 1,2,3,4-bis(epoxy)-2,6,6-trimethyl-1-(pent-2-en-4-one-2-yl)- (11.5%), 2-propen-1-ol, 3-phenyl- (7.9%), (+)-2-bornanone (6.1%), 2H-1-benzopyran-2-one, 7-methoxy- (3.9%) (Figure 3).

Table 3 – The liposoluble constituents from the petroleum ether extract of *A. albida*

Nº	Retention time, min	Constituents	Structure	Degree of compliance, %	Content ^a , %
	13.56	l-Menthone		92	0.5±0.02
	14.23	(+)-2-Bornanone		97	6.1±0.03
	16.20	Bornyl acetate		86	0.5±0.01
	17.80	Cyclohexanol, 5-methyl-2-(1-methylethyl)-, (1 α ,2 β ,5 α)-(±)-		95	1.1±0.02
	18.25	Butanedioic acid, diethyl ester		94	1.1±0.02
	18.72	Endo-Borneol		95	2.3±0.03
	24.00	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-2-(2-pentenyl)-, (Z)-		88	0.7±0.01
	24.52	1,3-Cyclopentadiene, 5,5-dimethyl-1-ethyl-		83	0.8±0.01

	25.56	3-Phenylpropanol		90	0.7±0.03
	27.53	(-)Spathulenol		88	0.7±0.02
	27.89	Tetradecanic acid		88	0.8±0.01
	29.77	2-Propen-1-ol, 3-phenyl-		90	7.9±0.03
	34.84	9,12-Octadecadienoic acid, ethyl ester		89	2.8±0.03
	36.65	Dibutyl phthalate		96	3.6±0.03
	36.84	Neoisolongifolene, 8-oxo-		75	14.8±0.03
	37.57	Isoaromadendrene epoxide		83	2.3±0.03

	38.87	Cyclohexane, 1,2,3,4-bis(epoxy)-2,6,6-trimethyl-1-(pent-2-en-4-one-2-yl)-		75	11.5±0.03
	40.17	2H-1-Benzopyran-2-one, 7-methoxy-		91	3.9±0.03
	42.93	9-Octadecenoic acid, (E)-		83	1.4±0.03
	43.54	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-		86	1.3±0.02

^a Data are expressed as means ± standard deviation of three replicates

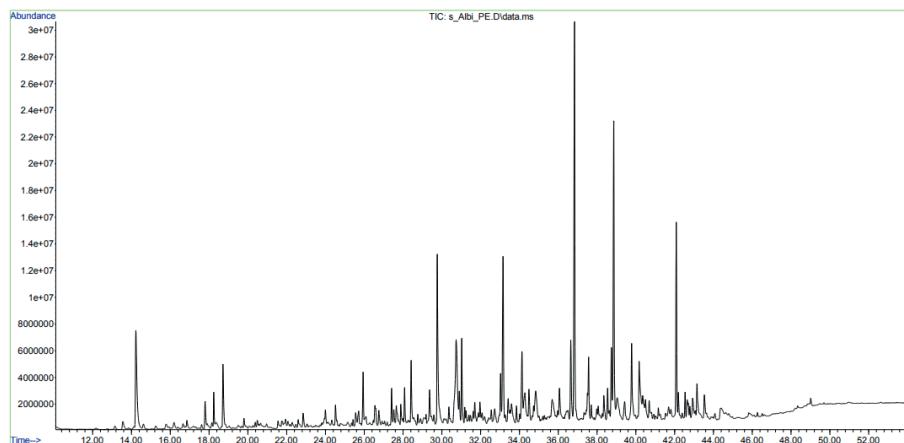


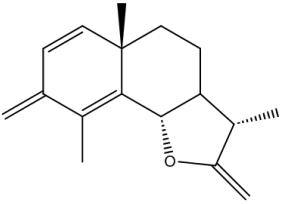
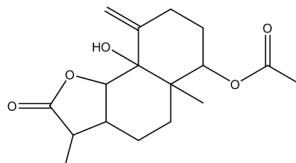
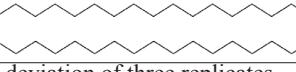
Figure 3 – Chromatogram of petroleum ether extract of *A. albida*

For the first time, the liposoluble constituents in the petroleum ether extract of *A. diffusa* were analyzed using GC-MS (Table 4). Twenty compounds were detected in the *A. diffusa* extract, and their relative contents were determined through area normalization. The major constituents identified were eudesma-5,11(13)-dien-8,12-olide (6.02%), nitrosine (4.33%), α-santonin (4.16%), nonacosane (3.71%), and hexadecanoic acid, ethyl ether (2.63%) (Figure 4).

Table 4 – The liposoluble constituents from the petroleum ether extract of *A. diffusa*

No	Retention time, min	Constituents	Structure	Degree of compliance, %	Content ^a , %
	10.29	Cyclohexanol, 1- methyl-4-(1- methylphenyl)-,cis-		92	0.94±0.02
	11.33	2-Heptanone, 3- propylidene-		79	0.52±0.02
	11.41	Bicyclo[3.1.0]hexane- 2-ol, 2-methyl-5-(1- methylethyl)-, (1 α ,2 β ,5 α)-		89	1.05±0.02
	11.56	Nonanal		87	0.43±0.01
	12.13	2(3H)-Furanon, 5-ethinylidihydro-5- methyl-		91	1.78±0.02
	13.73	Endo-Borneol		85	0.40±0.02
	17.81	1,4-dihydroxy-p- Menth-2-ene		83	0.78±0.01

	23.07	Vanillin		86	0.66±0.01
	24.92	(-)-Spathulenol		88	1.96±0.01
	28.49	Tetradecanic acid		86	1.22±0.03
	32.26	Hexadecanoic acid, ethyl ether		89	2.63±0.02
	32.65	Hexadecanoic acid		88	2.04±0.02
	34.29	Dibutyl phthalate		92	1.68±0.02
	36.13	Octadecanoic acid		78	1.16±0.02
	40.20	Eudesma-5,11(13)-dien-8,12- olide		76	6.02±0.03
	41.18	Behenic alcohol		88	1.46±0.02

	41.77	α -Santonin		91	4.16±0.03
	43.17	Nitrosine		91	4.33±0.03
	45.87	Nonacosane		91	3.71±0.03
	48.55	Tetratricontane		92	1.77±0.02

^a Data are expressed as means ± standard deviation of three replicates

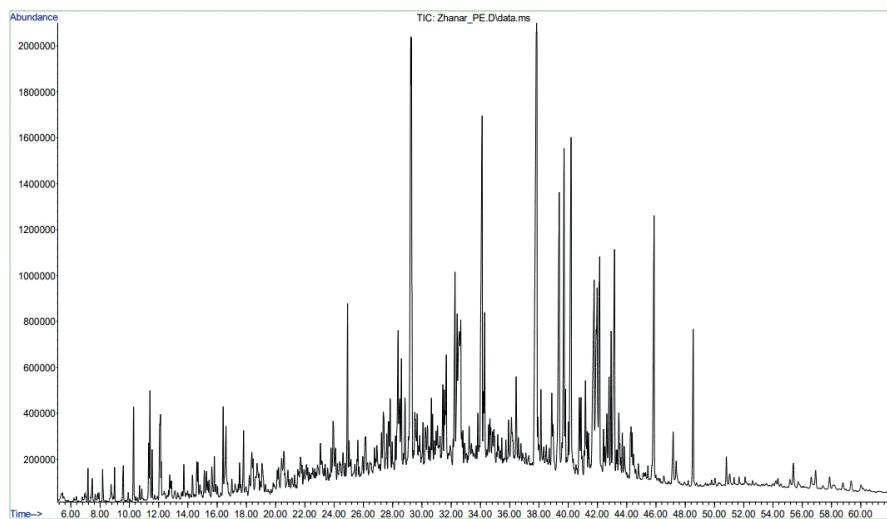


Figure 4. Chromatogram of petroleum ether extract of *A. diffusa*

By comparing the liposoluble constituent compositions of these species, it is evident that *A. albida* is chemotaxonically related to *A. diffusa*. The results show that the differences in their volatile profiles are primarily qualitative. The liposoluble compounds present in both species exhibit anti-inflammatory, antimicrobial, and anticancer properties. Collectively, these findings imply that *A. albida* and *A. diffusa* could be crucial in the development of new plant-based pharmaceutical preparations.

In comparison to the more extensively studied species like *A. annua* (Juteau, et al, 2002) and *A. absinthium* (Akzhigitova, et al, 2018), *A. albida* and *A. diffusa* have a different, yet complementary, profile of bioactive compounds. While *A. annua* remains

the gold standard for artemisinin production, both *A. albida* and *A. diffusa* contribute to the broader medicinal potential of the *Artemisia* genus with unique essential oil compositions, flavonoids, and other secondary metabolites. These species could hold untapped therapeutic potentials, especially for antimicrobial, anti-inflammatory, and antioxidant applications. Further research would be beneficial to explore these species' full phytochemical profiles and their potential medicinal uses.

In summary, the identified compounds in *A. albida* and *A. diffusa*, especially sesquiterpene lactones, flavonoids, and essential oils, show promise for a variety of therapeutic activities. Future studies can focus on conducting *in vivo* and clinical trials to further evaluate the efficacy of these compounds in treating conditions such as inflammation, infections, and cancer. Based on the identified bioactive compounds, further phytochemical research could lead to the development of targeted drugs or supplements.

Conclusion. The quantitative and qualitative analysis was conducted on the plants *A. albida* and *A. diffusa*, which were collected from the territory of the Republic of Kazakhstan. The study determined the overall quantity of biologically active components and the levels of macro- and microelements in the plant materials. Notably, the species *A. albida* and *A. diffusa* showed high concentrations of elements vital for the daily needs of the human body. The liposoluble constituents in petroleum ether extracts of *A. albida* and *A. diffusa* from Kazakhstan have been identified by GC-MS method for the first time. The presence of these bioactive constituents suggests that the plant extracts may have anti-inflammatory, antimicrobial, and anticancer properties. These findings can serve as a basis for future studies on *A. albida* and *A. diffusa*, enhancing our understanding of the plant and providing a platform for developing and exploring new ideas. Further phytochemical research on *A. albida* and *A. diffusa* holds promise for the creation of new phytopreparations. In recent years, the use of medicinal plants has been increasing due to their affordability, wide-ranging therapeutic benefits, low toxicity, and the potential for prolonged use without causing side effects. Advancing this field by integrating medicinal plants into medical practice and expanding the range of phytopharmaceuticals is highly promising.

Әдебиеттер

Adams R.F. (1974) Determination of amino acid profiles in biological samples by gas chromatography. Journal of Chromatography A, 95(2), 189-212. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(00\)84078-9](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(00)84078-9)

Adekenov S.M. (2016) Chemical modification of arglabin and biological activity of its new derivatives. Fitoterapia, 110, 196-205. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2015.11.018>

Akzhigitova Zh.Zh., Baiseitova A.M., Ye Yang, Jenis J. (2018) Investigation of chemical constituents of *Artemisia absinthium*. International Journal of Biology and Chemistry, 11 (1), -P. 169-177

Байтегенов М.С. (2001) Флора Казахстана. Гылым, Казахстан. ISBN 9965-07-036-9.

Costa R., De Fina M.R., Valentino M. R., Rustaiyan A., Dugo P., Dugo G., Mondello L. (2009) An investigation on the volatile composition of some *Artemisia* species from Iran. Flavour and Fragrance Journal, 24(2), 75-82. <https://doi.org/10.1002/ffj.1919>

Geissman T. A., Irwin M. A. (1970) Chemical contributions to taxonomy and phylogeny in the genus *Artemisia*. Pure and Applied Chemistry, 21(2), 167-180. <https://doi.org/10.1351/pac197021020167>

Государственная фармакопея Республики Казахстан (2008) Алматы: Жибек жолы, 592-609.

Juteau F., Masotti V., Bessiere J.M., Dherbomez M., Viano J. (2002) Antibacterial and antioxidant

- activities of *Artemisia annua* essential oil, 73 (6), 532-535. [https://doi.org/10.1016/s0367-326x\(02\)00175-2](https://doi.org/10.1016/s0367-326x(02)00175-2)
- Kelsey R.G., Shafizadeh F. (1979) Sesquiterpene lactones and systematics of the genus *Artemisia*. *Phytochemistry*, 18(10), 1591-1611. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(79\)80167-3](https://doi.org/10.1016/0031-9422(79)80167-3)
- Khayyat M.H., Karimi H. (2005) Composition of the Volatile Oils of Three Different Species of *Artemisia*: Composition of volatile oils of *Artemisia* species. *Iranian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 1(1), 33-37. <https://doi.org/10.22037/ijps.v1.39440>
- Khazraei-Alizadeh K., Rustaiyan A. (2001) Composition of the volatile oil of *Artemisia diffusa* Krasch. ex Poljak. growing wild in Iran. *Journal of Essential Oil Research*, 13(3), 185-186. <https://doi.org/10.1080/10412905.2001.9699656>
- Куприянов А.Н., Адекенов С.М. (2012) Полянь (Artemisia L.) казахского мелкосопочника. *Rastitelnyj mir i ego ohrana [Растительный мир и его охрана]*, 55-56.
- Noori S., Hassan Z.M. (2014) Tehranolide inhibits cell proliferation via calmodulin inhibition, PDE, and PKA activation. *Tumor Biology*, 35, 257-264. <https://doi.org/10.1007/s13277-013-1031-5>
- Nurlybekova A., Kudaibergen A.A., Dyusebaeva M.A., Ibrahim M., Jenis J. (2021) Chemical constituents of *Artemisia serotina*. *Reports of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, 5(339), 158-165.
- Nurlybekova A.K., Kudaibergen A.A., Kazymbetova A., Amangeldi M., Baiseitova A., Ospanov M., Haji Akber Aisa, Yang Ye, Mohamed Ali Ibrahim, Jenis J. (2022) Traditional use, phytochemical profiles and pharmacological properties of *Artemisia* genus from Central Asia. *Molecules*, 27(16), 5128. <https://doi.org/10.3390/molecules27165128>
- Pandey A.K., & Singh P. (2017) The genus *Artemisia*: A 2012–2017 literature review on chemical composition, antimicrobial, insecticidal and antioxidant activities of essential oils. *Medicines*, 4(3), 68. <https://doi.org/10.3390/medicines4030068>
- Павлов Х.В. (1961) Флора Казахстана, составные растения. 8-е изд., Академия наук Казахской ССР. Ин-т ботаники, Алматы, Казахстан.
- Plutno A.B., Sham'yanov I.D., Aizikov M.I., Prokhorova M.R., Galyust'yan G.G., Kurmukov A.G. (1995) Modification of the sesquiterpene lactones leukomisin and austricin biological activities of some of their derivatives. *Chemistry of Natural Compounds*, 31, 579-583. <https://doi.org/10.1007/BF01164884>
- Rustaiyan A., Komeylizadeh H., Masoudi S., Yari M., Monfared A., Kardar M., Shahgholi A. (2000 a) Composition of the volatile oil of *Artemisia deserti* Krasch and *Artemisia oliveriana*. *J. Gayex DC. from Iran. J. Sci. I.R. Iran*, 3, 213-215
- Rustaiyan A., Masoudi S. (2011) Chemical constituents and biological activities of Iranian *Artemisia* species. *Phytochemistry Letters*, 4(4), 440-447. <https://doi.org/10.1016/j.phytol.2011.07.003>
- Rustaiyan A., Bamonieri A., Raffatrad M., Jakupovic J., Bohlmann F. (1987) Eudesmane derivatives and highly oxygenated monoterpenes from Iranian *Artemisia* species. *Phytochemistry*, 26(8), 2307-2310. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)84708-1](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)84708-1)
- Rustaiyan A., Nahrevanian H., Kazemi M. (2009) A new antimalarial agent: Effect of extracts of *Artemisia diffusa* against *Plasmodium berghei*. *Pharmacognosy Magazine*, 5(17). <http://www.phcog.com/text.asp?2009/5/17/1/57978>
- Rustaiyan A., Sigari H., Jakupovic J., Grenz M. (1989) A sesquiterpene lactone from *Artemisia diffusa*. *Phytochemistry*, 28(10), 2723-2725. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)98075-0](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)98075-0)
- Rustaiyan A., Balalaei S., Mohammadi F., Masoudi S., Yari M. (2000 b) Comparison of the volatile oils of *Artemisia santolina Schrenk* and *Artemisia gypsacea Krasch.*, M. Pop. et Lincz. *Journal of Essential Oil Research*, 12(3), 330-332. <https://doi.org/10.1080/10412905.2000.9699529>
- Suleimenov E.M., Raldugin V.A., Adekenov S.M. (2008) Anhydroaustricin from *Artemisia albida*. *Chemistry of Natural Compounds*, 44, 541-542. <https://doi.org/10.1007/s10600-008-9118-8>
- Suleimenov E.M., Smagulova F.M., Morozova O.V., Raldugin V.A., Bagryanskaya I.Y., Gatalov Y.V., Yamovoi S.M., Adekenov S. M. (2005) Sesquiterpene lactones and flavonoids from *Artemisia albida*. *Chemistry of Natural Compounds*, 41, 689-691. <https://doi.org/10.1007/s10600-006-0013-x>
- Taghizadeh Rabe S.Z., Mahmoudi M., Ahi A., Emami S.A. (2011) Antiproliferative effects of extracts from Iranian *Artemisia* species on cancer cell lines. *Pharmaceutical Biology*, 49(9), 962-969. <https://doi.org/10.3109/13880209.2011.559251>

References

- Adams R. F. (1974) Determination of amino acid profiles in biological samples by gas chromatography. *Journal of Chromatography A*, 95(2), 189-212. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(00\)84078-9](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(00)84078-9) (in English)
- Adekenov S. M. (2016) Chemical modification of arglabin and biological activity of its new derivatives. *Fitoterapia*, 110, 196-205. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2015.11.018> (in English)
- Akzhigitova Zh.Zh., Baiseitova A.M., Ye Yang, Jenis J. (2018) Investigation of chemical constituents of *Artemisia absinthium*. *International Journal of Biology and Chemistry*, 11 (1), 169-177 (in English)
- Baitenov M.S. (2001) Flora Kazakhstan [Flora of Kazakhstan]. Gylym, Kazakhstan. ISBN 9965-07-036-9. (in Russian)
- Costa R., De Fina M.R., Valentino M.R., Rustaiyan A., Dugo P., Dugo G., Mondello L. (2009) An investigation on the volatile composition of some *Artemisia* species from Iran. *Flavour and Fragrance Journal*, 24(2), 75-82. <https://doi.org/10.1002/ffj.1919> (in English)
- Geissman T.A., Irwin M.A. (1970) Chemical contributions to taxonomy and phylogeny in the genus *Artemisia*. *Pure and Applied Chemistry*, 21(2), 167-180. <https://doi.org/10.1351/pac197021020167> (in English)
- Gosudarstvennaya farmakopeya respubliki Kazakhstan [State Pharmacopoeia of the Republic of Kazakhstan] (2008) Almaty: Zhibek zholy, 592-609. (in Russian)
- Juteau F., Masotti V., Bessiere J.M., Dherbomez M., Viano J. (2002) Antibacterial and antioxidant activities of *Artemisia annua* essential oil, 73 (6), 532-535. [https://doi.org/10.1016/s0367-326x\(02\)00175-2](https://doi.org/10.1016/s0367-326x(02)00175-2) (in English)
- Kelsey R.G., Shafizadeh F. (1979) Sesquiterpene lactones and systematics of the genus *Artemisia*. *Phytochemistry*, 18(10), 1591-1611. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(79\)80167-3](https://doi.org/10.1016/0031-9422(79)80167-3) (in English)
- Khayyat M.H., Karimi H. (2005) Composition of the Volatile Oils of Three Different Species of *Artemisia*: Composition of volatile oils of *Artemisia* species. *Iranian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 1(1), 33-37. <https://doi.org/10.22037/ijps.v1.39440> (in English)
- Khazraei-Alizadeh K., Rustaiyan A. (2001) Composition of the volatile oil of *Artemisia diffusa* Krasch. ex Poljak. growing wild in Iran. *Journal of Essential Oil Research*, 13(3), 185-186. <https://doi.org/10.1080/10412905.2001.9699656> (in English)
- Kupriyanov A.N., Adekenov S.M. (2012) Polyn (*Artemisia* L.) kazakhskogo melkosopochnika [Wormwood (*Artemisia* L.) of the Kazakh melkosopochnik]. *Rastitelnyj mir i ego okhrana* [Flora and its protection], 55-56. (in Russian)
- Noori S., Hassan Z.M. (2014) Tehranolide inhibits cell proliferation via calmodulin inhibition, PDE, and PKA activation. *Tumor Biology*, 35, 257-264. <https://doi.org/10.1007/s13277-013-1031-5> (in English)
- Nurlybekova A., Kudaibergen A.A., Dyusebaeva M.A., Ibrahim M., Jenis J. (2021) Chemical constituents of *Artemisia serotina*. *Reports of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, 5(339), 158-165. (in English)
- Nurlybekova A.K., Kudaibergen A.A., Kazymbetova A., Amangeldi M., Baiseitova A., Ospanov M., Haji Akber Aisa, Yang Ye, Mohamed Ali Ibrahim, Jenis J. (2022) Traditional use, phytochemical profiles and pharmacological properties of *Artemisia* genus from Central Asia. *Molecules*, 27(16), 5128. <https://doi.org/10.3390/molecules27165128> (in English)
- Pandey A.K., & Singh P. (2017) The genus *Artemisia*: A 2012–2017 literature review on chemical composition, antimicrobial, insecticidal and antioxidant activities of essential oils. *Medicines*, 4(3), 68. <https://doi.org/10.3390/medicines4030068> (in English)
- Pavlov H.V. (1961) Flora Kazakhstan, Compositae [Flora of Kazakhstan, Compositae]. 8th ed., Academy of Sciences of the Kazakh SSR. In-t Botany: Almaty, Kazakhstan (in Russian)
- Plutno A.B., Sham'yanov I.D., Aizikov M.I., Prokhorova M.R., Galyust'yan G.G., Kurmukov A.G. (1995) Modification of the sesquiterpene lactones leukomisin and austricin biological activities of some of their derivatives. *Chemistry of Natural Compounds*, 31, 579-583. <https://doi.org/10.1007/BF01164884> (in English)
- Rustaiyan A., Komeylizadeh H., Masoudi S., Yari M., Monfared A., Kardar M., Shahgholi A. (2000 a)

Composition of the volatile oil of *Artemisia deserti Krasch* and *Artemisia oliveriana*. J. Gayex DC. from Iran. J. Sci. I.R. Iran, 3, 213-215 (in English)

Rustaiyan A., Masoudi S. (2011) Chemical constituents and biological activities of Iranian *Artemisia* species. Phytochemistry Letters, 4(4), 440-447. <https://doi.org/10.1016/j.phytol.2011.07.003> (in English)

Rustaiyan A., Bamonieri A., Raffatrad M., Jakupovic J., Bohlmann F. (1987) Eudesmane derivatives and highly oxygenated monoterpenes from Iranian *Artemisia* species. Phytochemistry, 26(8), 2307-2310. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)84708-1](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)84708-1) (in English)

Rustaiyan A., Nahrevanian H., Kazemi M. (2009) A new antimalarial agent: Effect of extracts of *Artemisia diffusa* against *Plasmodium berghei*. Pharmacognosy Magazine, 5(17). <http://www.phcog.com/text.asp?2009/5/17/1/57978> (in English)

Rustaiyan A., Sigari H., Jakupovic J., Grenz M. (1989) A sesquiterpene lactone from *Artemisia diffusa*. Phytochemistry, 28(10), 2723-2725. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)98075-0](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)98075-0) (in English)

Rustaiyan A., Balalaei S., Mohammadi F., Masoudl S., Yari M. (2000 b) Comparison of the volatile oils of *Artemisia santolina Schrenk* and *Artemisia gypsacea Krasch.*, M. Pop. et Lincz. Journal of Essential Oil Research, 12(3), 330-332. <https://doi.org/10.1080/10412905.2000.9699529> (in English)

Suleimenov E. M., Raldugin V. A., Adekenov S. M. (2008) Anhydroaustriolin from *Artemisia albida*. Chemistry of Natural Compounds, 44, 541-542. <https://doi.org/10.1007/s10600-008-9118-8> (in English)

Suleimenov E.M., Smagulova F.M., Morozova O.V., Raldugin V.A., Bagryanskaya I.Y., Gatilov Y.V., Yamovoi S.M., Adekenov S.M. (2005) Sesquiterpene lactones and flavonoids from *Artemisia albida*. Chemistry of Natural Compounds, 41, 689-691. <https://doi.org/10.1007/s10600-006-0013-x> (in English)

Taghizadeh Rabe S. Z., Mahmoudi M., Ahi A., Emami S. A. (2011) Antiproliferative effects of extracts from Iranian *Artemisia* species on cancer cell lines. Pharmaceutical Biology, 49(9), 962-969. <https://doi.org/10.3109/13880209.2011.559251> (in English)

REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
ISSN 2224-5227

Volume 1. Number 353 (2025), 252–265

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.339>

УДК 615.322: 543.422.3

**T.S. Khosnudinova^{1*}, A.O. Sapieva², N.G. Gemedzhieva³,
Zh.Zh. Karzhaubekova³, N.A. Sultanova¹, 2025.**

¹NJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Astana, Kazakhstan;

² NJSC «Astana Medical University», Astana, Kazakhstan;

³RSE on the REM «Institute of Botany and Phytointroduction» FWC of the Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan.

*E-mail: khosnudinovat@gmail.com

DEVELOPMENT OF A BIOLOGICALLY ACTIVE COMPLEX FROM THE ROOTS OF *FERULA FOETIDA* (BUNGE) REGEL EXHIBITING ANTIOXIDANT ACTIVITY

Khosnudinova Tatyana Sergeevna – PhD student, Departments of Chemistry, NJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Astana, Kazakhstan, E-mail: khosnudinovat@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1775-8304>;

Sapieva Ardark Onalbekovna – Candidate of chemical science, head of department of general and biological chemistry, NpJSC «Astana Medical University», Astana, Kazakhstan, E-mail: ardaksapieva73@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7038-1740>;

Gemejyeva Nadezhda Gennadievna – Doctor of biological sciences (D. Sc.), professor, Head of the Laboratory of Plant Resources, RSE on the REM «Institute of Botany and Phytointroduction» FWC of the Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan, E-mail: ngemed58@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7317-2685>;

Karzhaubekova Zhanat Zhumabekovna – candidate of chemical sciences, senior researcher, RSE on the REM «Institute of Botany and Phytointroduction» FWC of the Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan, E-mail: zhanna1322@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4750-0884>;

Sultanova Nurgul Adaybayevna – Doctor of chemical sciences, Professor, Department of Chemistry, NpJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Astana, Kazakhstan, E-mail: nureu@mail.ru, <https://orcid.org/0000 0002-7970-9105>.

Abstract. The quality indicators of *Ferula foetida* (Bunge) Regel roots were determined: moisture loss during drying – 4.01%, total ash – 5.53%, and acid-insoluble ash – 1.60%. These values comply with the standards of the State Pharmacopoeia of the Republic of Kazakhstan. The presence of flavonoids in the raw material extracts was identified using thin-layer chromatography (TLC) with appropriate solvent systems and specific reagents.

A method for obtaining a biologically active complex from *Ferula foetida* (Bunge) Regel roots by maceration was developed. Optimal extraction conditions were

established by varying parameters such as the type of extractant, the raw material-to-extractant ratio, extraction time, and temperature. The best conditions were found to be 30% and 50% aqueous-ethanol solutions as extractants, raw material extractant ratios of 1:10 and 1:15, extraction times of 12 and 48 hours, and a temperature not exceeding 40°C.

The antioxidant activity of the obtained aqueous-ethanol extracts was studied *in vitro* using the Ferric Reducing/Antioxidant Power (FRAP) assay. Concentration-dependent optical density values were compared to the standard, ascorbic acid. The antioxidant properties followed the order: 50% ethanol extract > standard > 30% ethanol extract > 70% ethanol extract > 90% ethanol extract.

The 50% aqueous-ethanol extract at concentrations of 0.25, 0.5, 0.75, and 1 mg/mL exhibited high antioxidant activity, exceeding that of the standard.

The obtained data can be used for the development of new antioxidant drugs and biologically active supplements containing flavonoids.

Keywords: *Ferula foetida* (Bunge) Regel, roots, extraction, flavonoids, spectrophotometry, antioxidant activity (*in vitro*).

**Т.С. Хоснұтдинова^{1*}, А.О. Сәпиева², Н.Г. Гемеджиева³,
Ж.Ж. Қаржаубекова, Н.А. Сұлтанова¹, 2025.**

¹«Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ,
Астана, Қазақстан;

²«Астана медицина университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан;

³КР ЭТРМ ОШЖДК «Ботаника және фитоинтродукция институты» ШЖҚ РМК,
Алматы, Қазақстан.

*E-mail: khosnudinovat@gmail.com

FERULA FOETIDA (BUNGE) REGEL ТАМЫРЫНАН АНТИОКСИДАНТТЫҚ БЕЛСЕНДІЛІГІ БАР БИОЛОГИЯЛЫҚ БЕЛСЕНДІ КЕШЕНДІ АЛУ

Хоснұтдинова Татьяна Сергеевна – PhD докторант, «Химия» кафедрасы, «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан, E-mail: khosnudinovat@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1775-8304>;

Сәпиева Ардак Оңалбекқызы – химия ғылымдарының кандидаты, Жалпы және биологиялық химия кафедрасының менгерушісі, «Астана медицина университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан, E-mail: ardaksapieva73@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7038-1740>;

Гемеджиева Надежда Геннадьевна – биология ғылымдарының докторы, профессор, зертхана менгерушісі, КР ЭТРМ ОШЖДК «Ботаника және фитоинтродукция институты» ШЖҚ РМК, Алматы, Қазақстан, E-mail: ngemed58@mail.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7317-2685>;

Қаржаубекова Жанат Жұмабекқызы – химия ғылымдарының кандидаты, аға ғылыми қызметкер, КР ЭТРМ ОШЖДК «Ботаника және фитоинтродукция институты» ШЖҚ РМК, Алматы, Қазақстан, E-mail: zhanna1322@mail.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4750-0884>;

Сұлтанова Нұргүл Адайбайқызы – химия ғылымдарының докторы, химия кафедрасының профессоры, «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан, E-mail: nureu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7970-9105>.

Аннотация. Өсімдік шикізаты бойынша Қазақстан Республикасының Мемлекеттік Фармакопеясына (ҚР МФ) сай рұқсат етілген нормативтер шегіне сәйкес келетін сапа көрсеткіштері (кептіру кезіндегі массалық шығын – 4,01%, жалпы күл – 5,53%, тұз қышқылында ерімейтін күл – 1,60%) анықталды. Сәйкес еріткіш жүйелерінде жазық хроматографияны қолдану және арнайы әзірлеушілерді қолдану арқылы сырғындылардың құрамында негізінен flavonoidтар бар екені анықталды. *Ferula foetida* (Bunge) Regel тамырынан мацерация арқылы биологиялық белсендерді кешен алу әдісі әзірленді. Зерттелетін өсімдік шикізатынан flavonoid кешенін алудың онтайлы шарттары экстрагенттің табигаты, шикізат-реагент қатынасы, экстракция уақыты және температурасы сияқты әртүрлі параметрлер арқылы жасалған. Биологиялық белсендерді кешен алудың онтайлы шарттары экстрагент – 30% және 50% сулы этил спирті, шикізат пен экстрагент қатынасы – 1:10 және 1:15, экстракция уақыты 12 және 48 сағат, ал экстракция температурасы 40°C аспауы керек.

Ferula foetida (Bunge) Regel тамырынан алынған сулы-спирт сырғындыларының антиоксиданттық белсендерділігі темірді қалпына келтіретін потенциалды Ferric Reducing/Antioxidant Power assay (FRAP) *in vitro* жағдайында анықтау арқылы зерттелді. Нәтижесінде өсімдік сырғындылары үшін оптикалық тығыздық мәндерінің концентрацияға тәуелділіктері стандартты үлпі – аскорбин қышқылымен (АК) салыстырғанда алынды. Антиоксиданттық қасиеттер келесі ретпен өсті: 50%-дық этил сырғындысы > стандарт > 30%-дық этил сырғындысы > 70%-дық этил сырғындысы > 90%-дық этил сырғындысы.

Алынған 50%-дық сулы-етил сырғындысы әзірленген әдіс бойынша 0,25; 0,5; 0,75 және 1 мг/мл концентрацияларда стандарттан асатын жоғары антиоксиданттық белсендерділікті көрсетті.

Алынған деректер flavonoidтар бар жаңа антиоксиданттық препараттар мен биологиялық белсендерді қоспаларды әзірлеу үшін пайдаланылуы мүмкін.

Тұйین сөздер: *Ferula foetida* (Bunge) Regel, тамырлар, сырғынды, flavonoidтар, спектрофотометрия, антиоксиданттық белсендерділік (*in vitro*).

**Т.С. Хоснұтдинова^{1*}, А.О. Сапиева², Н.Г. Гемеджиева³, Ж.Ж. Каржаубекова³,
Н.А. Султанова¹, 2025.**

¹НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева»,
Астана, Казахстан;

²НАО «Медицинский университет Астана», Астана, Казахстан;

³ РГП на ПХВ «Институт ботаники и фитоинтродукции» КЛХЖМ МЭПР РК,
Алматы, Казахстан.

*E-mail: khosnutdinovat@gmail.com

ПОЛУЧЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНОГО КОМПЛЕКСА ИЗ КОРНЕЙ *FERULA FOETIDA* (BUNGE) REGEL, ОБЛАДАЮЩЕГО АНТИОКСИДАНТНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

Хоснудтдинова Татьяна Сергеевна – докторант PhD, кафедра химии, НАО «Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева», Астана, Казахстан, E-mail: khosnudtдиноват@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1775-8304>;

Сапиева Ардак Оналбековна – кандидат химических наук., зав.кафедрой общей и биологической химии, НАО «Медицинский университет Астана», Астана, Казахстан, E-mail: ardaksapieva73@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7038-1740>;

Гемеджиева Надежда Геннадьевна – доктор биологических наук, профессор, зав. лаб. растительных ресурсов, РГП на ПХВ «Институт ботаники и фитоинтродукции» КЛХЖМ МЭПР РК, Алматы, Казахстан, E-mail: ngeemed58@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7317-2685>;

Каржаубекова Жанат Жумабековна – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, РГП на ПХВ «Институт ботаники и фитоинтродукции» КЛХЖМ МЭПР РК, Алматы, Казахстан, E-mail: zhanna1322@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4750-0884>;

Султанова Нургуль Адайбаева – доктор химических наук, профессор, кафедра химии, НАО «Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева», Астана, Казахстан, E-mail: nureu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7970-9105>.

Аннотация. Определены показатели доброкачественности корней *Ferula foetida* (Bunge) Regel: потеря в массе при высушивании – 4,01%, общая зола – 5,53%, зола, нерастворимая в соляной кислоте, – 1,60%. Эти показатели соответствуют допустимым нормам, установленным Государственной Фармакопеей Республики Казахстан (ГФ РК).

Методом плоскостной хроматографии в соответствующих системах растворителей с использованием специфических проявителей выявлено, что экстракты сырья содержат флавоноиды.

Разработан способ получения биологически активного комплекса из корней *Ferula foetida* (Bunge) Regel методом мацерации. Оптимизированы условия экстракции флавоноидного комплекса из исследуемого растительного сырья путем варьирования следующих параметров: природа экстрагента, соотношение сырье-экстрагент, время и температура экстракции. Оптимальными условиями получения биологически активного комплекса являются: экстрагенты – 30%-ный и 50%-ный водно-этанольные растворы; соотношение сырье-экстрагент – 1:10 и 1:15; время экстракции – 12 и 48 часов; температура экстракции – не выше 40 °C.

Исследована антиоксидантная активность полученных водно-этанольных извлечений методом определения железо-восстанавливающего потенциала Ferric Reducing/Antioxidant Power assay (FRAP) *in vitro*. Получены концентрационные зависимости значений оптической плотности растительных экстрактов в сравнении со стандартным образцом – аскорбиновой кислотой (АК). Антиоксидантные свойства увеличивались в следующем ряду: 50%-ный этанольный экстракт > стандарт > 30%-ный этанольный экстракт > 70%-ный этанольный экстракт > 90%-ный этанольный экстракт.

Полученный 50%-ный водно-этанольный экстракт из корней *Ferula foetida* (Bunge) Regel по разработанной методике при концентрациях 0,25; 0,5; 0,75 и 1 мг/мл проявил высокую антиоксидантную активность, превышающую стандарт.

Полученные данные могут быть использованы для разработки новых антиоксидантных препаратов и биологически активных добавок с содержанием флавоноидов.

Ключевые слова: *Ferula foetida* (Bunge) Regel, корни, экстракция, флавоноиды, спектрофотометрия, антиоксидантная активность (*in vitro*).

Введение. Растения рода *Ferula* L. семейства *Apiaceae* Lindl. широко распространены во всем мире и представлены 180 видами (Mohammadhosseini, et al., 2018). По разным флористическим сводкам, на территории Республики Казахстан произрастает от 47 до 52 видов ферулы (Павлов, 1963; Байтенов, 2001), из которых 4 эндемичных (*Ferula glaberrima*, *F. gypsacea*, *F. pachyphylla*, *F. xeromorpha*), 10 редких видов (*Ferula leucographa*, *F. gypsacea*, *F. glaberrima*, *F. peucedanifolia*, *F. iliensis*, *F. Krylovii*, *F. xeromorpha*, *F. malacophylla*, *F. sugatensis*, *F. taucumica*), и 15 видов характеризуются лекарственными свойствами (Грудзинская, и др., 2014). Растения применяются как противораковое, противовоспалительное, антимутагенное, противоопухолевое противовирусное, антибактериальное, спазмолитическое, антисептическое, противоязвенное, гепатопротекторное, анти-ВИЧ средство (Ghasemi, et al., 2021; Abdel-Kader, et al., 2022). Химический состав *Ferula* L. весьма разнообразен, выделены эфирные масла, терпеноиды, сесквитерпеноиды, кумарины, флавоноиды и др. (Mohammadhosseini, et al., 2018; Khosnutdinova, et al., 2023; Taghinia, et al., 2019).

Известно, что фенольные соединения проявляют широкий спектр фармакологической активности, в том числе являются ингибиторами процессов окисления, обладая защитной функцией для клеток, их мембран и внутриклеточных структур от воздействия ультрафиолетовых лучей, активно разрушая свободные радикалы (Чиряпкин, и др., 2023).

Среди распространённых фенольных соединений выделяют флавоноиды, которые обладают широким спектром биологической активности. Они играют важную роль в метаболизме, и в защитных механизмах живого организма. Благодаря своему разнообразному биологическому действию, флавоноиды являются перспективными соединениями для применения в медицине, косметологии и пищевой промышленности. Их изучение продолжает оставаться актуальной задачей современной науки.

Целью исследования является разработка оптимального способа получения флавоноидного комплекса из корней *Ferula foetida* (Bunge) Regel и изучение его антиоксидантной активности.

Материалы и методы. Объект исследования – корни *Ferula foetida* (Bunge) Regel, заготовленные в фазу бутонизации на территории Туркестанской области Республики Казахстан в мае 2023 года. Гербарные образцы исследуемого вида хранятся в лаборатории растительных ресурсов Института ботаники и фитоинтродукции «Институт ботаники и фитоинтродукции» Комитета лесного хозяйства и животного мира Министерства экологии и природных ресурсов Республики Казахстан. Сушку сырья до воздушно-сухого состояния проводили естественным образом под навесом без доступа прямых солнечных лучей. Растительное сырье измельчали с помощью сито до размера 2 мм. Во всех экспериментах использовали тщательно отсортированное, высушенное, измельченное и просеянное сырье.

Показатели доброкачественности растительного сырья (потеря массы при высушивании, общая зольность и зола, нерастворимая в 10% HCl) определены по методикам Государственной Фармакопеи Республики Казахстан (ГФ РК) (Тулегенова, 2008).

Качественный состав экстрактов на флавоноиды определяли с помощью тонкослойной хроматографии на пластинах «Sorbfil» (Россия) размером 15x15 см в системе органических растворителей: н-бутанол – ледяная уксусная кислота – вода (5:1:1). В качестве специфичных реагентов использовали УФ-свет, пары NH₃ и 3%-ный спиртовой раствор AlCl₃.

Для получения экстрактов методом мацерации использовали смеси растворителей этиловый спирт и дистиллированную воду в различных соотношениях 30, 50, 70 и 90%-ный. Экстрагирование проводили как при комнатной температуре (без T°), так и с нагревом не выше 40°C (T°). Соотношение между количеством сырья и экстрагента варьировалось от 1:5, 1:10 до 1:15. Время экстракции изменялось в пределах от 30 минут до 72 часов.

Для количественного определения флавоноидов в извлечениях использовали метод дифференциальной спектрофотометрии (Курдюков и др., 2019). Спектральные характеристики водно-этанольных извлечений оценивали на спектрофотометре Cary 60 UV-Vis (Agilent Technologies). Испытуемый раствор готовили следующим образом: 2 мл раствора A помещали в мерную колбу вместимостью 25 мл, прибавляли 2 мл 3%-го раствора хлорида алюминия в спирте и через 10 минут – 2 капли разведенной уксусной кислоты. Объем раствора доводили спиртом этиловым 90%-ным до метки и оставляли на 30 минут (раствор B). В качестве раствора сравнения использовали раствор, приготовленный при тех же условиях, но без AlCl₃. Содержание суммы флавоноидов в пересчете на рутин в процентах (x) вычисляли по формуле (1):

$$x = \frac{A * 100 * 25 * 100}{190 * a * 2 * (100 - W)},$$

где A – оптическая плотность раствора;

190 удельный показатель поглощения комплекса рутина с алюминия хлоридом при длине волны 410 нм;

a – навеска сырья, г;

W – влажность сырья, %.

Антиоксидантную активность полученных водно-спиртовых экстрактов изучали методом определения железо-восстанавливающего потенциала FRAP (Ferric Reducing/Antioxidant Power assay) *in vitro*. В качестве стандарта сравнения использовали аскорбиновую кислоту.

К 1 мл исследуемого экстракта в диапазоне концентраций 0–1 мг/мл добавляли 2,5 мл фосфатного буфера (0,2 М, pH 6,6) и 2,5 мл 1%-го раствора гексацианоферрата (III) калия. Реакционную смесь инкубировали в течение 25

минут при температуре 50°C, реакцию останавливали добавлением 2,5 мл 10%-го раствора трихлоруксусной кислоты. Смесь центрифугировали 3 минуты (1500 оборотов/мин.). Верхний слой объемом 2,5 мл смешивали с 2,5 мл дистиллированной воды и 0,5 мл 0,1% FeCl₃. Измерение оптической плотности производили на спектрофотометре Cary 60 UV-Vis (Agilent Technologies) при длине волны 700 нм (Benzie, et al., 1996).

Статистическая обработка.

Статистическую обработку полученных результатов проводили с помощью программного пакета Statistica 10 (StatSoft, США). Результаты представлены в виде X±m, где X – среднее значение, m – стандартная ошибка среднего. Повторность n=5.

Результаты и обсуждение. Доброточастенность растительного сырья определяется рядом показателей, которые регламентируются фармакопейными стандартами. Основные показатели включают: влажность, зольность и другие.

Влажность сырья (потеря в массе при высушивании) – определяет содержание влаги, которая влияет на стабильность и сохранность сырья. Чрезмерная влажность может привести к росту плесени или снижению качества активных веществ.

Зольность – уровень общей и растворимой в воде золы, что показывает степень чистоты и наличие посторонних примесей. Определение нерастворимой в соляной кислоте (HCl) золы является важным показателем качества растительного сырья. Эта процедура позволяет выявить наличие посторонних минеральных примесей, таких как песок, кремнезем или другие неорганические вещества, которые могут попасть в сырье при сборе или обработке. Для растительного сырья установлены стандарты на содержание нерастворимой золы, которые гарантируют его пригодность для медицинского или другого применения.

Показатели доброточастенности исследуемого растительного сырья корней *Ferula foetida* (Bunge) Regel: потеря в массе при высушивании, общая зола, зола нерастворимая в HCl находятся в пределах допустимых норм согласно ГФ РК. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Показатели доброточастенности корней *Ferula foetida* (Bunge) Regel

Показатель	Содержание, %	Методы испытаний
Потеря в массе при высушивании	4,01	ГФ РК I, т. 1, 2.2.32
Общая зола	5,53	ГФ РК, т. 1, 2.4.16
Зола нерастворимая в HCl	1,60	ГФ РК, т. 1, 2.8.1

Эти показатели помогают установить пригодность сырья для использования в фармацевтической, косметической или пищевой промышленности.

Качественный анализ на содержание флавоноидов проводили хроматографированием в тонком слое в системе растворителей: н-бутанол – ледяная уксусная кислота – вода (5:1:1) и использованием специфических реагентов.

Для каждого образца рассчитаны величины относительной скорости перемещения веществ, после обнаружения характерных окрашиваний

воздействием паров NH_3 (желтое), 3%-ного спиртового раствора AlCl_3 (желтое) и УФ-света (темное свечение), свидетельствующие о наличии флавоноидов.

Для последующего извлечения флавоноидов изучены следующие факторы, определяющие выход экстрактивных веществ: природа экстрагента, концентрация экстрагента, время экстракции, соотношение сырье-экстрагент.

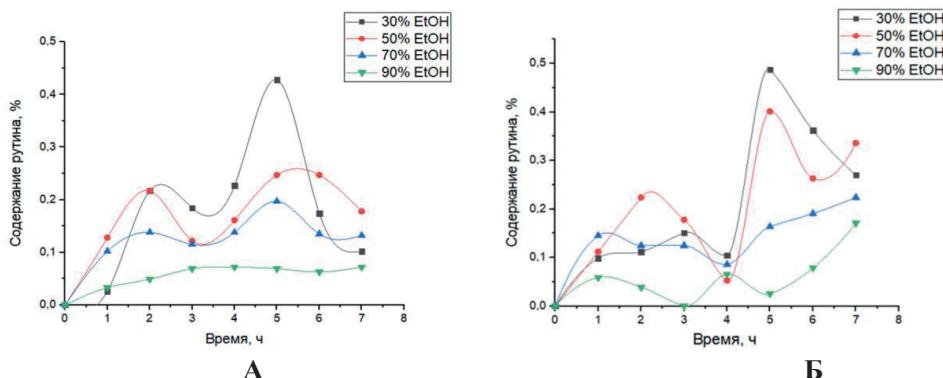
В качестве экстрагента использовали спирт этиловый различной концентрации.

Этанол используется для получения экстрактов в фармацевтической, пищевой и косметической промышленности. Например, он применяется для экстракции активных компонентов из растений, таких как шалфей, женьшень, куркума, или при создании настоек, масел и экстрактов для лекарств. Спирт этиловый является эффективным, безопасным и универсальным растворителем, который обеспечивает качественное извлечение биологически активных веществ. Разведение этилового спирта водой позволяет регулировать его полярность, что позволяет избирательно проводить процесс экстракции под определенные группы соединений. Низкая концентрация этилового спирта больше извлекает полярные компоненты, а высокая – менее полярные соединения.

Выбор оптимальных параметров экстрагирования контролировали по содержанию суммы флавоноидов в пересчете на рутин, который представляет собой гликозид, состоящий из флавонола (кверцетина) и сахарного остатка (рутинозы). Следует отметить, что в экстрактах исследуемого растительного сырья нами предварительно обнаружен рутин в сравнении с достоверным образцом.

Наибольший выход экстрактивных веществ наблюдается при нагревании, что связано с усилением процесса диффузии, сырье быстрее набухает, что в ряде случаев приводит к разрыву клеток материала, уменьшается вязкость этилового спирта по сравнению с экстракцией при комнатной температуре. Однако дальнейшее повышение температуры нецелесообразно, так как это может привести к разрушению термолабильных веществ – гликозидов, переходу в извлечение других балластных веществ.

На рисунке 1 представлены данные содержания флавоноидов в зависимости от времени водно-этанольных извлечений и соотношения сырье-экстрагент при $T = 40^\circ\text{C}$.



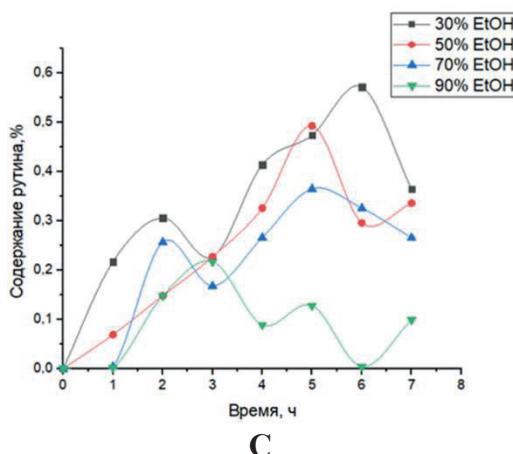


Рисунок 1. Содержание флавоноидов в водно-этанольных извлечениях корней *Ferula foetida* (Bunge) Regel в зависимости от времени экстракции (1 – 0,5 ч; 2 – 1 ч; 3 – 1,5 ч; 4 – 2 ч; 5 – 12 ч; 6 – 48 ч; 7 – 72 ч) и соотношения сырье-экстрагент: 1:5 (A), 1:10 (B) и 1:15 (C) при T= 40°C.

Из полученных данных следует, что преимущественное извлечение флавоноидных гликозидов происходит в 30% и 50%-ных по сравнению с 70% и 90%-ными растворами этилового спирта. Содержание флавоноидов повышается до определенного времени экстракции. Так, при 12 и 48 часах наблюдается максимальное количество, а в дальнейшем их концентрация снижается.

Соотношение сырье-экстрагент варьировали от 1:5 до 1:15. В результате, оптимальными соотношениями сырье-экстрагент являются 1:10 и 1:15 соответственно.

Обобщённые результаты экстракции биологически активного комплекса, содержащего флавоноиды из корней *Ferula foetida* (Bunge) Regel приведены в таблице 2.

Таким образом, в результате проведенного исследования оптимальными условиями извлечения флавоноидного комплекса являются: 30%-ный и 50%-ный водно-этанольные экстрагенты; соотношение сырье-экстрагент 1:10 и 1:15; время экстракции 12 и 48 часов при температуре 40°C. При данных условиях выход экстрактивных веществ варьируется от 0,40 до 0,57 %.

При получении биологически активного комплекса следуют также проводить экстрагирование трижды при периодическом перемешивании, что значительно увеличивает выход экстрактивных веществ.

Антиоксидантную активность полученных водно-этанольных извлечений изучили путем определения железо-восстанавливающего потенциала Ferric Reducing/Antioxidant Power assay (FRAP) *in vitro*.

Таблица 2. Условия экстракции флавонида комплекса из корней *Fenugula foetida* (Bunge) Regel

Время экстракции, ч	Содержание суммы флавонидов в пересчете на рутин и абсолютное сухое сырье, %											
	30%-ный водно-этанольный экстракт				50%-ный водно- этанольный экстракт				70%-ный водно-этанольный экстракт			
	без Т	Т	без Т	Т	без Т	Т	без Т	Т	без Т	Т	без Т	Т
0,5	0,161±0,005	0,026±0,004	0,158±0,005	0,128±0,009	0,089±0,005	0,102±0,006	0,030±0,005	0,033±0,008				
1	0,069±0,004	0,217±0,006	0,164±0,005	0,217±0,007	0,135±0,003	0,138±0,006	0,059±0,005	0,049±0,006				
1,5	0,148±0,002	0,184±0,007	0,135±0,003	0,122±0,006	0,092±0,006	0,115±0,002	0,056±0,005	0,059±0,004				
2	0,194±0,004	0,227±0,006	0,184±0,007	0,161±0,006	0,092±0,008	0,138±0,006	0,063±0,005	0,072±0,002				
12	0,270±0,005	0,428±0,008	0,355±0,006	0,247±0,004	0,227±0,006	0,197±0,004	0,095±0,007	0,069±0,006				
48	0,158±0,005	0,174±0,004	0,168±0,005	0,247±0,004	0,118±0,006	0,135±0,003	0,066±0,005	0,063±0,005				
72	0,115±0,004	0,102±0,006	0,132±0,003	0,178±0,005	0,148±0,007	0,132±0,004	0,001±0,001	0,072±0,002				
Соотношение сырье-экстрагент – 1:5												
Время экстракции, ч	30%-ный водно-этанольный экстракт				50%-ный водно- этанольный экстракт				70%-ный водно- этанольный экстракт			
	без Т	Т	без Т	Т	без Т	Т	без Т	Т	без Т	Т	без Т	Т
	0,138±0,008	0,099±0,010	0,145±0,009	0,112±0,009	0,158±0,015	0,145±0,005	0,079±0,008	0,059±0,010				
1	0,178±0,010	0,112±0,005	0,217±0,005	0,224±0,005	0,092±0,007	0,125±0,009	0,079±0,008	0,039±0,005				
1,5	0,250±0,015	0,151±0,010	0,237±0,012	0,178±0,005	0,217±0,005	0,125±0,010	0,092±0,007	0,001±0,003				
2	0,237±0,012	0,105±0,014	0,184±0,012	0,053±0,007	0,171±0,017	0,086±0,010	0,059±0,012	0,066±0,010				
12	0,401±0,015	0,487±0,008	0,329±0,010	0,401±0,010	0,250±0,015	0,164±0,010	0,112±0,009	0,026±0,008				
48	0,164±0,008	0,362±0,008	0,066±0,008	0,263±0,012	0,072±0,008	0,191±0,012	0,059±0,010	0,079±0,014				
72	0,434±0,009	0,270±0,008	0,079±0,012	0,336±0,008	0,039±0,005	0,224±0,005	0,013±0,009	0,171±0,010				
Соотношение сырье-экстрагент – 1:10												
Время экстракции, ч	30%-ный водно-этанольный экстракт				50%-ный водно- этанольный экстракт				70%-ный водно- этанольный экстракт			
	без Т	Т	без Т	Т	без Т	Т	без Т	Т	без Т	Т	без Т	Т
	0,002±0,004	0,217±0,007	0,069±0,016	0,069±0,014	0,020±0,016	0,004±0,009	0,002±0,004	0,002±0,004				
1	0,336±0,016	0,306±0,017	0,257±0,016	0,148±0,016	0,178±0,016	0,257±0,022	0,109±0,016	0,148±0,016				
1,5	0,266±0,014	0,227±0,014	0,118±0,012	0,227±0,012	0,148±0,020	0,168±0,018	0,089±0,007	0,217±0,018				
2	0,178±0,016	0,414±0,018	0,148±0,016	0,326±0,007	0,138±0,016	0,266±0,010	0,099±0,018	0,089±0,012				
12	0,336±0,012	0,474±0,016	0,306±0,017	0,493±0,016	0,217±0,007	0,365±0,018	0,089±0,012	0,128±0,016				
48	0,444±0,007	0,572±0,014	0,355±0,018	0,296±0,014	0,247±0,014	0,326±0,007	0,128±0,016	0,004±0,005				
72	0,148±0,016	0,365±0,018	0,257±0,016	0,336±0,007	0,217±0,007	0,266±0,016	0,168±0,007	0,099±0,012				
Соотношение сырье-экстрагент – 1:15												
Время экстракции, ч	30%-ный водно-этанольный экстракт				50%-ный водно- этанольный экстракт				70%-ный водно- этанольный экстракт			
	без Т	Т	без Т	Т	без Т	Т	без Т	Т	без Т	Т	без Т	Т
	0,002±0,004	0,217±0,007	0,069±0,016	0,069±0,014	0,020±0,016	0,004±0,009	0,002±0,004	0,002±0,004				
1	0,336±0,016	0,306±0,017	0,257±0,016	0,148±0,016	0,178±0,016	0,257±0,022	0,109±0,016	0,148±0,016				
1,5	0,266±0,014	0,227±0,014	0,118±0,012	0,227±0,012	0,148±0,020	0,168±0,018	0,089±0,007	0,217±0,018				
2	0,178±0,016	0,414±0,018	0,148±0,016	0,326±0,007	0,138±0,016	0,266±0,010	0,099±0,018	0,089±0,012				
12	0,336±0,012	0,474±0,016	0,306±0,017	0,493±0,016	0,217±0,007	0,365±0,018	0,089±0,012	0,128±0,016				
48	0,444±0,007	0,572±0,014	0,355±0,018	0,296±0,014	0,247±0,014	0,326±0,007	0,128±0,016	0,004±0,005				
72	0,148±0,016	0,365±0,018	0,257±0,016	0,336±0,007	0,217±0,007	0,266±0,016	0,168±0,007	0,099±0,012				
Соотношение сырье-экстрагент – 1:10												

Получены концентрационные зависимости значений оптической плотности для экстрактов по сравнению стандартным веществом аскорбиновой кислотой (АК). Прослеживается следующая последовательность возрастания антиоксидантных свойств в ряду: 50%-ный этанольный экстракт >стандарт> 30%-ный этанольный экстракт > 70%-ный этанольный экстракт > 90%-ный этанольный экстракт. Увеличение значения оптической плотности указывает на рост восстановительного потенциала (табл. 3, рис.2).

Таблица 3. Изменение оптической плотности в зависимости от концентрации экстрактов из корней *Ferula foetida* (Bunge) Regel

№	Экстракты	Концентрация экстракта, мг / мл			
		0,25	0,5	0,75	1,0
		Оптическая плотность			
1	30%-ный водно-этанольный экстракт	0,4416 ± 0,03	0,7075 ± 0,07	0,9031 ± 0,08	1,2326 ± 0,08
2	50%-ный этанольный экстракт	1,8368 ± 0,20	2,7436 ± 0,26	3,7588 ± 0,21	4,0520 ± 0,27
3	70%-ный этанольный экстракт	0,5129 ± 0,003	0,7035 ± 0,09	0,8379 ± 0,03	1,0905± 0,003
4	90%-ный этанольный экстракт	0,4748± 0,02	0,7100 ± 0,01	0,8841 ± 0,04	1,0507± 0,07
5	Аскорбиновая кислота	1,569 ± 0,01	1,589 ± 0,04	1,748 ± 0,02	1,879 ± 0,04

Полученные водно-этанольные извлечения по разработанной методике при всех исследуемых концентрациях (0,25; 0,5; 0,75 и 1 мг/мл) проявили антиоксидантную активность. Следует отметить, что 50%-ный водно-этанольный экстракт показал активность выше по сравнению со стандартом – аскорбиновой кислотой при всех концентрациях. Причем, при концентрации 1 мг/мл активность экстракта превышает почти в 2 раза.

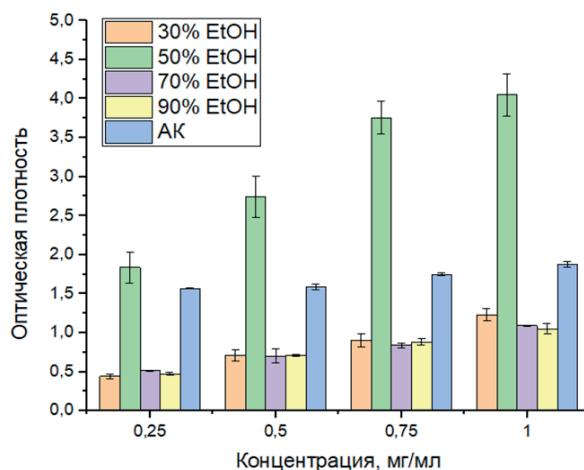


Рисунок 2. Сравнительная оценка антиоксидантной активности водно-этанольных экстрактов корней *Ferula foetida* (Bunge) Regel: 30% EtOH – 30%-ный водно-этанольный экстракт, 50% EtOH – 50%-ный этанольный экстракт, 70% EtOH – 70%-ный этанольный экстракт, 90% EtOH – 90%-ный этанольный экстракт, АК – аскорбиновая кислота

Таким образом, для получения экстракта, содержащего флавоноидный комплекс и проявляющего высокую антиоксидантную активность, оптимальными условиями являются: экстрагент – 50%-ный водно-этанольный спирт; соотношение сырье-экстрагент – 1:15; время экстракции – 12 часов при температуре 40°C.

Согласно литературным данным, полифенолы обладают высокой антиоксидантной активностью, которая варьируется в зависимости от структуры соединения (Rice-Evans, et al., 1997). Так, иранскими учеными было выявлено, что свободные и связанные фенольные соединения из *Ferula persica* оказались наиболее активными в удалении радикалов (Taghinia, et al., 2019). Причем, водно-спиртовые экстракты, полученные из цветков, стеблей и листьев *Ferula gummosa* Boiss., содержащие флавоноиды и фенолы, продемонстрировали антиоксидантную активность ниже, чем витамин С (Nabavi, et al., 2010). Турецкими учеными установлено, что этилацетатный экстракт надземной части *Ferula caspica* M. Bieb. также обладает антиоксидантным эффектом (Kahraman, et al., 2019). Экстракты из надземной части (цветки, стебли и листья) *Ferula communis*, содержащие фенольные соединения проявляют антиокислительную способность, что коррелирует с самым высоким общим содержанием фенолов (Rahali, et al., 2019).

Антиоксидантная активность для водно-этанольных экстрактов полученных из корней *Ferula foetida* (Bunge) Regel изучена нами впервые.

Заключение. Определены показатели доброкачественности для корней *Ferula foetida* (Bunge) Regel, которые соответствуют пределам допустимых норм согласно ГФ РК. Отработана оптимальная методика получения суммы флавоноидов из корней *Ferula foetida* (Bunge) Regel, обладающей антиоксидантной активностью: экстрагент – 50%-ный водно-этанольный спирт; соотношение сырье-экстрагент – 1:15; время экстракции – 12 часов при температуре 40°C.

Установлено высокое антиоксидантное действие 50%-ного водно-этанольного экстракта, методом определения железо-восстанавливающего потенциала Ferric Reducing/Antioxidant Power assay (FRAP) *in vitro*.

Полученные данные могут быть использованы для разработки новых антиоксидантных препаратов и биологически активных добавок с содержанием флавоноидов.

Литература

Abdel-Kader M.S., Alqarni M.H., Baykan S., Oztürk B., Salkini M.A.A., Yusufoglu H.S., Alam P., Foudah A.I. (2022). Ecofriendly Validated RP-HPTLC Method for Simultaneous Determination of the Bioactive Sesquiterpene Coumarins Feselol and Samarcandin in Five *Ferula* Species Using Green Solvents. Separations. Vol. 9(8). P.206. <https://doi.org/10.3390/separations9080206>

Benzie I. F.F., Strain J.J. (1996). The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: The FRAP Assay. Analytical Biochemistry. Vol. 239(1). Pp. 70–76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>

Ghasemi Z, Rezaee R, Aslani MR, Boskabady M.H. (2021). Anti-inflammatory, anti-oxidant, and immunomodulatory activities of the genus *Ferula* and their constituents: A review. Iran J Basic Med Sci. Vol. 24(12). Pp. 1613–1623. <https://doi.org/10.22038/IJBM.S.2021.59473.13204>

Kahraman C., Topcu G., Bedir E., Tatli I.I., Ekizoglu M., Akdemir Z.S. (2019). Phytochemical screening and evaluation of the antimicrobial and antioxidant activities of *Ferula caspica* M. Bieb. extracts. Saudi Pharmaceutical Journal. Vol. 27(4). Pp. 525–531. <https://doi.org/10.1016/j.jps.2019.01.016>

Khosnutdinova T.S., Gemejyeva N.G., Karzhaubekova Zh.Zh., Sultanova N.A. (2023). Coumarins of genus *Ferula* L. (Apiaceae Lindl.). Eurasian Chem.-Technol. J. Vol. 25(1). Pp. 39–56. <https://doi.org/10.18321/ectj1494>

Mohammadhosseini M., Venditti A., Sarker S.D., Nahar L., Akbarzadeh A. (2018). The genus *Ferula*: ethnobotany, phytochemistry and bioactivities – a review. Industrial Crops and Products. Vol. 1(129). Pp. 350–394. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.012>

Nabavi S. F., Ebrahimzadeh M. A., Nabavi S. M., Eslami B. (2010). Antioxidant activity of flower, stem and leaf extracts of *Ferula gummosa* Boiss. Grasas y aceites. Vol. 61(3). Pp. 244–250. <https://doi.org/10.3989/gya.110809>

Rahali F.Z., Kefi S., Bettaieb Rebey I., Hamdaoui G., Tabart J., Kevers C., Franck T., Mouithys-Mickalad A., Hamrouni Sellami I. (2019). Phytochemical composition and antioxidant activities of different aerial parts extracts of *Ferula communis* L. Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology. Vol. 153(2). Pp. 213–221. <https://doi.org/10.1080/11263504.2018.1461696>

Rice-Evans C., Miller N., Paganga G. (1997). Antioxidant properties of phenolic compounds. Trends in Plant Science. Vol. 2(4). Pp. 152–159. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(97\)01018-2](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(97)01018-2)

Taghinia P., Haddad Khodaparast M.H., Ahmadi M. (2019). Free and bound phenolic and flavonoid compounds of *Ferula persica* obtained by different extraction methods and their antioxidant effects on stabilization of soybean oil. Food Measure. Vol. 13(4). Pp. 2980–2987. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00218-0>

Байтевов М. С. (2001). Флора Казахстана в 2-х т. Т. 2. Родовой комплекс флоры. Алматы: Фылым. 156 с.

Грудзинская Л.М., Гемеджиева Н.Г., Нелина Н.В., Каржаубекова Ж.Ж. (2014). Анnotated list of medicinal plants of Kazakhstan: Reference book. Almaty. С. 20–22.

Курдюков Е.Е., Кузнецова А.В., Семенова Е.Ф., Моисеева И.Я. (2019). К вопросу стандартизации по содержанию флавоноидов листьев стевии как перспективного лекарственного растительного сырья. Химия растительного сырья. №1. С. 217–224. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2019014067>

Тулегенова А. У. Государственная фармакопея Республики Казахстан. Алматы. Изд-во: Жибек жолы. 2008. Т.1. 592 с.

Флора Казахстана. Т. 6. / Под редакцией Н.В. Павлова. Алма-Ата: Изд-во АН КазССР. 1963. С. 385–416.

Чиряпкин А.С., Золотых Д.С., Поздняков Д.И. (2023). Обзор биологической активности флавоноидов: кверцетина и кемпферола. Juvenis scientia. Т. 9. № 2. С. 5–20. 10.32415/jscientia_2023_9_2_5-20. EDN: WCLBZG.

References

- Abdel-Kader M.S., Alqarni M.H., Baykan, S., Ozturk, B., Salkini M.A.A., Yusufoglu H.S., Alam P., Foudah A.I. (2022). Ecofriendly Validated RP-HPTLC Method for Simultaneous Determination of the Bioactive Sesquiterpene Coumarins Feselol and Samarcandin in Five *Ferula* Species Using Green Solvents. Separations. Vol. 9(8). P.206. <https://doi.org/10.3390/separations9080206> (in Eng.).
- Benzie I. F.F., Strain J.J. (1996). The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: The FRAP Assay. Analytical Biochemistry. Vol. 239(1). Pp. 70–76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292> (in Eng.).
- Ghasemi Z., Rezaee R., Aslani MR, Boskabady MH. (2021). Anti-inflammatory, anti-oxidant, and immunomodulatory activities of the genus *Ferula* and their constituents: A review. Iran J Basic Med Sci. Vol. 24(12). Pp. 1613–1623. <https://doi.org/10.22038/IJBM.2021.59473.13204> (in Eng.).
- Kahraman C., Topcu G., Bedir E., Tatli I. I., Ekizoglu M., Akdemir Z. S. (2019). Phytochemical screening and evaluation of the antimicrobial and antioxidant activities of *Ferula caspica* M. Bieb. extracts. Saudi Pharmaceutical Journal. Vol. 27(4). Pp. 525–531. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2019.01.016> (in Eng.).
- Khosnutdinova T.S., Gemejyeva N.G., Karzhaubekova Zh.Zh., Sultanova N.A. (2023). Coumarins of genus *Ferula* L. (Apiaceae Lindl.). Eurasian Chem.-Technol. J. Vol. 25(1). Pp. 39–56. <https://doi.org/10.18321/ectj1494> (in Eng.).
- Mohammadhosseini M., Venditti A., Sarker S.D., Nahar L., Akbarzadeh A. (2018). The genus *Ferula*:

ethnobotany, phytochemistry and bioactivities – a review. *Industrial Crops and Products*. Vol. 1(129). Pp. 350–394. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.012> (in Eng.).

Nabavi S. F., Ebrahimzadeh M. A., Nabavi S. M., Eslami B. (2010). Antioxidant activity of flower, stem and leaf extracts of *Ferula gummosa* Boiss. *Grasas y aceites*. Vol. 61(3). Pp. 244–250. <https://doi.org/10.3989/gya.110809> (in Eng.).

Rahali F. Z., Kefi S., Bettaieb Rebey I., Hamdaoui G., Tabart J., Kevers C., Franck T., Mouithys-Mickalad A., Hamrouni Sellami I. (2019). Phytochemical composition and antioxidant activities of different aerial parts extracts of *Ferula communis* L. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*. Vol. 153(2). Pp. 213–221. <https://doi.org/10.1080/11263504.2018.1461696> (in Eng.).

Rice-Evans C., Miller N., Paganga G. (1997). Antioxidant properties of phenolic compounds. *Trends in Plant Science*. Vol. 2(4). Pp. 152–159. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(97\)01018-2](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(97)01018-2) (in Eng.).

Taghinia P., Haddad Khodaparast M.H., Ahmadi M. (2019). Free and bound phenolic and flavonoid compounds of *Ferula persica* obtained by different extraction methods and their antioxidant effects on stabilization of soybean oil. *Food Measure*. Vol. 13(4). Pp. 2980–2987. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00218-0> (in Eng.).

Bajtenov M. S. (2001). *Flora Kazahstana v 2-h t. T. 2. Rodovoj kompleks flory*. [Flora of Kazakhstan in 2 volumes. Vol. 2. Generic complex of flora]. Almaty: Gylym, 156 p. (in Russian).

Grudzinskaia L.M., Gemejiyeva N.G., Nelina N.V., Karzhaubekova Zh.Zh. (2014). *Annotirovannyi spisok lekarstvennykh rastenii Kazakhstana: Spravochnoe izdanie*. [Annotated listing of medicinal plants of Kazakhstan: Spravochnoe izdanie]. Almaty, pp. 20–22. (in Russian).

Kurdiukov E.E., Kuznetsova A.V., Semenova E.F., Moiseeva I.IA. (2019). K voprosu standartizatsii po soderzhaniyu flavonoidov listev stevii kak perspektivnogo lechebnogo rastitelnogo syrya [On the issue of standardizing the flavonoid content in stevia leaves as a promising medicinal plant raw material] *Khimia rastitelnogo Syriya*, no. 1, pp. 217–224. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2019014067> (in Russian).

Tulegenova A. U. (2008) *Gosudarstvennaia farmakopeia Respubliki Kazakhstan*. [State Pharmacopoeia of the Republic of Kazakhstan]. Almaty. Izd-vo: Zhibek zholy, vol. 1, 592 p. (in Russian).

Flora Kazahstana T.6. [Flora of Kazakhstan Vol. 6.]. Pod redakcijej N.V. Pavlova. Alma-Ata: Izd-vo AN Kaz SSR, 1963. pp. 385–416. (in Russian).

Chiriapkin A.S., Zolotykh D.S., Pozdniakov D.I. (2023). Obzor biologicheskoy aktivnosti flavonoidov: kvercetina i kempferola [Review of the Biological Activity of Flavonoids: Quercetin and Kaempferol] *Juvenis scientia* vol. 9, no. 2, pp. 5–20. [10.32415/jscientia_2023_9_2_5-20](https://doi.org/10.32415/jscientia_2023_9_2_5-20). EDN: WCLBZG. (in Russian).

CONTENTS**PHYSICS**

B.Zh. Abdikarimov, A.Zh. Seitmuratov, B.K. Kaliev, A.G. Ganiulla, T.M. Karabala	
VISCOSITY PROPERTIES OF THE ISOBUTYRIC ACID-WATER SOLUTION NEAR THE CRITICAL SEPARATION TEMPERATURE.....	5
 D.T. Agishev, S.A. Khokhlov, A.T. Agishev, N.L. Vaidman, A.T. Agishev	
THE STUDY OF RADIATIVE AND CONVECTIVE TRANSPORT IN CLOSE BINARY SYSTEMS WITH LOW ACCRETION RATES.....	17
 T.M. Aldabergenova, M.F. Vereshchak, A.S. Dikov, S.B. Kislitsin	
FINE STRUCTURE OF COATING BASED ON HIGH ENTROPY ALLOY NITRIDES (ALTIZRYNB)N, DETERMINED BY THE CAMS METHOD ON IMPLANTED IRON-57 CORES.....	29
 E. Bondar, A. Shongalova, A. Fedosimova, S. Ibraimova, A. Kemelbekova	
ENHANCING HYDRONIUM ION MOBILITY IN GRAPHENE OXIDE-BASED PROTON EXCHANGE MEMBRANES.....	39
 N.N. Zhanturina, G.K. Beketova, Z.K. Aimaganbetova, K.B. Bizhanova	
MODERN PEROVSKITE SOLAR CELLS: INNOVATIONS IN MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR ENHANCED EFFICIENCY.....	50
 U.K. Zhapbasbayev, G.I. Ramazanova, M.A. Pakhomov	
TURBULENT FLOW OF VISCOPLASTIC FLUID IN A PIPE WITH SUDDEN EXPANSION.....	64
 D.M. Zazulin, S.E. Kemelzhanova, N.A. Beissen, A.Sh. Tursumbekov, M.O. Alimkulova	
GEOMETROTHERMODYNAMICS OF A HOLOGRAPHIC SYSTEM WITH ZERO SOUND.....	78
 Y. Myrzakulov, A. Altaibayeva, A. Bulanbayeva	
PHASE TRANSITIONS AND THERMODYNAMIC BEHAVIOR OF AdS BLACK HOLES COUPLED WITH NONLINEAR ELECTRODYNAMICS.....	89
 Sh.A. Myrzakulova, A.A. Zhadyranova	
INVESTIGATION OF F(G) GRAVITY USING NOETHER SYMMETRY.....	101

D.A. Tolekov, D.M. Zharylgapova, A.M. Mukhambetzhan, A.A. Almagambetova, U.A. Abitaeva ELECTRON-HOLE TRAPPING CENTERS IN ULTRA-VIOLET IRRADIATED Li ₂ SO ₄ -Mn CRYSTALS.....	115
S.U. Sharipov, I.F. Spivak-Lavrov ELECTROSTATIC CHARACTERISTICS OF THE EDGE FIELD BETWEEN THE DEFLECTOR PLATES AND THE GROUNDED SCREEN.....	125
L.I. Shestakova, A.V. Serebryanskiy, Spassyuk Ruslan, Ch.T. Omarov SEARCH FOR COMETARY-METEORITIC DUST IN THE INNER REGION OF THE SOLAR SYSTEM: THERMAL EMISSION IN THE DUST CORONA.....	138
CHEMISTRY	
R.S. Abzhalov, Sh.T. Koshkarbayeva, A.K. Dikanbayeva, M.S. Satayev, B.S. Serikbayeva STUDY OF THE OBTAINING OF SILVER NANOPARTICLES ON THE POLYMER SURFACE USING PHOTOCHEMICAL ACTIVATION.....	147
K.T. Arynov, A.P. Auyeshov, Ch.Z. Yeskibayeva, A.K. Dikanbayeva, A.M. Ibrayeva X-RAY PHASE AND THERMOANALYTICAL STUDY OF NEMALITE FROM THE ZHITIKARINSKOE DEPOSIT (KAZAKHSTAN).....	160
G.Zh. Baisalova, A.S. Zhumadil, B.B. Torsykbaeva, D.T. Sadyrbekov, K.T. Umerdzhanova CHEMICAL COMPOSITION OF FRUITS OF ELEAAGNUS ANGUSTIFOLIA.....	173
N.N. Zhanikulov, D.K. Zhurgarayeva, G. Mukhtarhanova INVESTIGATION OF THE SUITABILITY OF HEAP LEACHING WASTE FROM THE PROCESSING OF GOLD-BEARING ORE AS A RAW MATERIAL FOR PORTLAND CEMENT.....	184
A.A. Zheldybaeva, A.CH. Katashova, K.A. Iskakov, D.E. Nurmukhanbetova, A. Azamatkyzy NATURAL CRITERIA OF VEGETABLE JUICES AND THEIR QUALITY DETERMINATION.....	196
A.B. Issayeva, A.A. Sharipova, M.O. Issakhov, G.A. Kadyrbekova ROLE OF MICROENCAPSULATED HUMIC ACID BASED ON BIOPOLYMERS IN PLANT GROWTH STIMULATION.....	205

A.T. Massenova*, A.S. Zhumakanova, I.I. Torlopov, K.S. Rakhmetova, A.Z. Abilmagzhanov, 2025.	
HIERARCHICAL ZEOLITES BASED ON SYNTHETIC ZEOLITES ZSM-5, HY AND BEA FOR ALKYLATION OF AROMATIC HYDROCARBONS.....	219
 A.K. Nurlybekova, A.A. Minkayeva, E. Shybyrai, H.A. Aisa, J. Jenis GC-MS STUDY OF ORGANIC AND MINERAL COMPONENTS IN ARTEMISIA SPECIES FROM KAZAKHSTAN.....	233
 T.S. Khosnudinova, A.O. Sapieva, N.G. Gemedzhieva, Zh.Zh. Karzhaubekova, N.A. Sultanova DEVELOPMENT OF A BIOLOGICALLY ACTIVE COMPLEX FROM THE ROOTS OF <i>FERULA FOETIDA</i> (BUNGE) REGEL EXHIBITING ANTIOXIDANT ACTIVITY.....	252

МАЗМҰНЫ

ФИЗИКА

Б.Ж. Әбдікәрімов, А.Ж. Сейтмұратов, Б.К. Калиев, Ә.Ғ. Ғаниұлла, Т.М. Қарабала СЫНДЫҚ ТЕМПЕРАТУРА МАҢЫНДАҒЫ ИЗОМАЙ ҚЫШҚЫЛЫ – СҮ ЕРІТІНДІСІНІҢ ТҮТҚЫРЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРИ.....	5
Д.Т. Агишев, С.А. Хохлов, А.Т. Агишев, Н.Л. Вайдман, А.Т. Агишев АККРЕЦИЯ ҚАРҚЫНЫ ТӨМЕН ТЫҒЫЗ ҚОС ЖҮЙЕЛЕРДЕГІ РАДИАЦИЯЛЫҚ ЖӘНЕ КОНВЕКТИВТІ ТАСЫМАЛДАУДЫ ЗЕРТТЕУ.....	17
Т.М. Алдабергенова, М.Ф. Верещак, А.С. Диков, С.Б. Кислицин ИМПЛАНТАЦИЯЛАНГАН ТЕМІР-57 ЯДРОЛАРЫНДА КИМС ӘДІСІМЕН АНЫҚТАЛГАН ЖОҒАРЫ ЭНТРОПИЯЛЫҚ ҚОРЫТПА НИТРИДТЕРИ (ALTIZRYNB) Н НЕГІЗІНДЕГІ ЖҮҚА ЖАБЫН ҚҰРЫЛЫМЫ.....	29
Е. Бондарь, А. Шонғалова, А. Федосимова, С. Ибраимова, А. Кемелбекова ГРАФЕН ОКСИДІ НЕГІЗІНДЕГІ ПРОТОН АЛМАСУ МЕМБРАНАЛАРЫНДА ГИДРОНИЙ ИОНДАРЫНЫҢ ҚОЗҒАЛҒЫШТЫҒЫН АРТТЫРУ.....	39
Н.Н. Жантурина, Г.К. Бекетова, З.К. Аймаганбетова, К.Б. Бижанова, Л.У. Таймуратова ҚАЗІРГІ ЗАМАНҒЫ ПЕРОВСКИТТІ КҮН БАТАРЕЯЛАРЫ: ТИМДІЛІКТІ АРТТЫРУҒА АРНАЛГАН МАТЕРИАЛДАР МЕН ТЕХНОЛОГИЯЛАРДАҒЫ ИННОВАЦИЯЛАР.....	50
Ұ.Қ. Жапбасбаев, Г.І. Рамазанова, М.Ф. Пахомов КЕНЕТТЕН КЕҢЕЮІ БАР ҚҰБЫРДАҒЫ ТҮТҚЫР-ПЛАСТИКАЛЫҚ СҮЙЫҚТЫҚТЫҢ ТУРБУЛЕНТТІК АҒЫНЫ.....	64
Д.М. Зазулин, С.Е. Кемелжанова, Н.Ә. Бейсен, А.Ш. Турсумбеков, М.О. Алимқулова НӨЛДІК ДЫБЫСЫ БАР ГОЛОГРАФИЯЛЫҚ ЖҮЙЕНИҢ ГЕОМЕТРОТЕРМОДИНАМИКАСЫ.....	78
Е.М. Мырзакулов, А.Б. Алтайбаева, А.С. Бұланбаева СЫЗЫҚТЫ ЕМЕС ЭЛЕКТРОДИНАМИКАМЕН БАЙЛАНЫСҚАН AdS ҚАРА ҚҮРДЫМДАРДЫҢ ФАЗАЛЫҚ АУЫСУЛАРЫ МЕН ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ.....	89

Ш.А. Мырзакурова, А.А. Жадыранова НЕТЕР СИММЕТРИЯСЫН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, F(G) ГРАВИТАЦИЯСЫН ЗЕРТТЕУ.....	101
Д.А. Төлеков, Д.М. Жарылғапова, А.М. Мұхамбетжанова, А.А. Алмагамбетова, Ұ.Ә. Әбітаева УЛЬТРА-КУЛГІНМЕН СӘУЛЕЛЕНГЕН Li_2SO_4 -Мп-дегі ЭЛЕКТРОНДЫ- КЕМТІКТІ ҚАРМАУ ОРТАЛЫҚТАРЫ.....	115
С.Ү. Шарипов, И.Ф. Спивак-Лавров ДЕФЛЕКТОРЛЫҚ ПЛАСТИНАЛАР МЕН ЖЕРГЕ ТҮЙЫҚТАЛҒАН ЭКРАН АРАСЫНДАҒЫ ШЕТТІК ӨРІСТІҢ ЭЛЕКТРОСТАТИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ.....	125
Л.И. Шестакова, А.В. Серебрянский, Р.Р. Спасюк, Ч.Т. Омаров КҮН ЖҮЙЕСІНІҢ ШШКІ АЙМАҒЫНДАҒЫ КОМЕТАЛЫҚ-МЕТЕОРЛЫҚ ШАҢДЫ ІЗДЕУ: ШАҢДЫ КОРОНАДАҒЫ ЖЫЛУ ЭМИССИЯСЫ.....	138
ХИМИЯ	
Р.С. Абжалов, Ш.Т. Кошкарбаева, А.К. Диканбаева, М.С. Сатаев, Б.С. Серикбаева ФОТОХИМИЯЛЫҚ АКТИВТЕҢДІРУ АРҚЫЛЫ ПОЛИМЕР БЕТИНЕН КҮМІС НАНОБӨЛШЕКТЕРДІ АЛУДЫ ЗЕРТТЕУ.....	147
К. Арынов, А. Ауешов, Ч. Ескибаева, А. Диканбаева, А. Ибраева ЖІТІҚАРА КЕНОРНЫНЫң НЕМАЛИТҚҰРАМДАС ХРИЗОТИЛ-АСБЕСТИН РЕНТГЕНОФАЗАЛЫҚ ЖӘНЕ ТЕРМОАНАЛИТИКАЛЫҚ ЗЕРТТЕУ.....	160
Г.Ж. Байсалова, Ә.С. Жұмаділ, Б.Б. Торсықбаева, Д.Т. Садырбеков, К.Т. Умерджанова ELAEAGNUS ANGUSTIFOLIA ЖЕМІСТЕРІНІҢ ХИМИЯЛЫҚ КОМПОНЕНТТЕРІ.....	173
Н.Н. Жаникулов, Д.К. Жургараева, Г. Мұхтарханова, А.С. Байлен, А.К. Свидерский ПОРТЛАНДЦЕМЕНТ АЛУ ҮШІН АЛТЫН КЕНИН ӨНДЕУДЕН АЛЫНГАН ҮЙІНДІ ШАЙМАЛАУ ҚАЛДЫҚТАРДЫ ШИКІЗАТ РЕТИНДЕ ЖАРАМДЫЛЫҒЫН ЗЕРТТЕУ.....	184
А.А. Жельдыбаева, А.Ч. Каташева, К.А. Искаков, Д.Е. Нурмуханбетова, А. Азаматқызы КӨКӨНІС ШЫРЫНДАРЫНЫң ТАБИҒИ КРИТЕРИЙЛЕРІ МЕН САПАСЫН АНЫҚТАУ.....	196

А.Б. Исаева, А.А. Шарипова, М.О. Исахов, Г.А. Кадирбекова БИОПОЛИМЕРЛЕРГЕ НЕГІЗДЕЛГЕН МИКРОКАПСУЛДАНҒАН ГУМИН ҚЫШҚЫЛЫНЫҢ ӨСІМДІКТЕРДІҢ ӨСУІН ҮНТАЛАНДЫРУДАҒЫ РӨЛІ.....	205
А.Т. Масенова, А.С. Жумақанова, И.И. Торлопов, К.С. Рахметова, А.З. Абильмагжанов АРОМАТТЫ ҚӨМІРСУТЕКТЕРДІ АЛКИЛДЕУГЕ АРНАЛҒАН ZSM-5, HY ЖӘНЕ ВЕА СИНТЕТИКАЛЫҚ ЦЕОЛИТТЕРІНЕ НЕГІЗДЕЛГЕН ИЕРАРХИЯЛЫҚ ЦЕОЛИТТЕР.....	219
А.К. Нұрлыбекова, А.А. Минкаева, Е. Шыбырай, Х.А. Айса, Ж. Женіс ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ <i>ARTEMISIA</i> ТҮРЛЕРІНІҢ ОРГАНИКАЛЫҚ ЖӘНЕ МИНЕРАЛДЫ ҚҰРАМЫН ГХ-МС АРҚЫЛЫ ЗЕРТТЕУ.....	233
Т.С. Хоснұтдинова, А.О. Сәпиева, Н.Г. Гемеджиева, Ж.Ж. Қаржаубекова, Н.А. Сұлтанова FERULA FOETIDA (BUNGE) REGEL ТАМЫРЫНАН АНТИОКСИДАНТТЫҚ БЕЛСЕНДІЛІГІ БАР БИОЛОГИЯЛЫҚ БЕЛСЕНДІ КЕШЕНДІ АЛУ.....	252

СОДЕРЖАНИЕ**ФИЗИКА**

Б.Ж. Абдикаримов, А.Ж. Сейтмуратов, Б.К. Калиев, А.Г. Ганиулла, Т.М. Карабала СВОЙСТВА ВЯЗКОСТИ РАСТВОРА ИЗОМАСЛЯНАЯ КИСЛОТА – ВОДА ВБЛИЗИ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ РАССЛОЕНИЯ.....	5
Д.Т. Агишев, С.А. Хохлов, А.Т. Агишев, Н.Л. Вайдман, А.Т. Агишев ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО И КОНВЕКТИВНОГО ПЕРЕНОСА В ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ С МАЛЫМ ТЕМПОМ АККРЕЦИИ ВЕЩЕСТВА.....	17
Т.М. Алдабергенова, М.Ф. Верещак, А.С. Диков, С.Б. Кислицин ТОНКАЯ СТРУКТУРА ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ НИТРИДОВ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА (ALTIZRYNb)N, ОПРЕДЕЛЕННАЯ КЭМС МЕТОДОМ НА ЯДРАХ ИМПЛАНТИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗА-57.....	29
Е. Бондарь, А. Шонгалова, А. Федосимова, С. Ибраимова, А. Кемелбекова ПОВЫШЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ ИОНОВ ГИДРОНИЯ В ПРОТОНООБМЕННЫХ МЕМБРАНАХ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ГРАФЕНА....	39
Н.Н. Жантуриня, Г.К. Бекетова, З.К. Аймаганбетова, К.Б. Бижанова, Л.У. Таймуратова СОВРЕМЕННЫЕ ПЕРОВСКИТНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ: ИННОВАЦИИ В МАТЕРИАЛАХ И ТЕХНОЛОГИЯХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ.....	50
У.К. Жапбасбаев, Г.И. Рамазанова, М.А. Пахомов ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ С РЕЗКИМ РАСШИРЕНИЕМ.....	64
Д.М. Зазулин, С.Е. Кемелжанова, Н.А. Бейсен, А.Ш. Турсумбеков, М.О. Алимкулова ГЕОМЕТРОТЕРМОДИНАМИКА ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С НУЛЕВЫМ ЗВУКОМ.....	78
Е.М. Мырзакулов, А.Б. Алтайбаева, А.С. Буланбаева ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ AdS ЧЕРНЫХ ДЫР СВЯЗАННЫХ С НЕЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКОЙ....	89

Ш.А. Мырзакулова, А.А. Жадыранова ИССЛЕДОВАНИЕ F(G) ГРАВИТАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИММЕТРИИ НЁТЕР.....	101
 Д.А. Толеков, Д.М. Жарылгапова, А.М. Мухамбетжанова, А.А. Алмагамбетова, У.А. Абитаева ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЕ ЦЕНТРЫ ЗАХВАТА В ОБЛУЧЕННОМ УЛЬТРА-ФИОЛЕТОМ-КРИСТАЛАХ $\text{Li}_2\text{SO}_4\text{-Mn}$	115
 С.У. Шарипов, И.Ф. Спивак-Лавров ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРАЕВОГО ПОЛЯ МЕЖДУ ДЕФЛЕКТОРНЫМИ ПЛАСТИНАМИ И ЗАЗЕМЛЕННЫМ ЭКРАНОМ.....	125
 Л.И. Шестакова, А.В. Серебрянский, Р.Р. Спасюк, Ч.Т. Омаров ПОИСК ПЫЛИ КОМЕТНО-МЕТЕОРНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ВО ВНУТРЕННЕЙ ОБЛАСТИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ: ТЕПЛОВАЯ ЭМИССИЯ В ПЫЛЕВОЙ КОРОНЕ	138
 ХИМИЯ	
 Р.С. Абжалов, Ш.Т. Кошкарбаева, А.К. Диканбаева, М.С. Сатаев, Б.С. Серикбаева ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРА С ПОМОЩЬЮ ФОТОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ.....	147
 К.Т. Арынов, А.П. Ауешов, Ч.З. Ескибаева, А.К. Диканбаева, А.М. Ибраева РЕНТГЕНОФАЗОВОЕ И ТЕРМОАНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕМАЛИТА ЖИТИКАРИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (КАЗАХСТАН).....	160
 Г.Ж. Байсалова, А.С.Жумадил, Б.Б. Торсыкбаева, Д.Т. Садырбеков, К.Т. Умерджанова ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПЛОДОВ <i>Elaeagnus angustifolia</i>	173
 Н.Н. Жаникулов, Д.К. Жургараева, Г. Мухтарханова, А.С. Байлен, А.К. Свидерский ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИГОДНОСТИ ОТХОДОВ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД В КАЧЕСТВЕ СЫРЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА.....	184

А.А. Жельдыбаева, А.Ч. Каташева, К.А. Искаков, Д.Е. Нурмуханбетова, А. Азаматкызы ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ КРИТЕРИЕВ И КАЧЕСТВА ОВОЩНЫХ СОКОВ.....	196
А.Б. Исаева, А.А. Шарипова, М.О. Исахов, Г.А. Кадирбекова РОЛЬ МИКРОКАПСУЛИРОВАННОЙ ГУМИНОВОЙ КИСЛОТЫ НА ОСНОВЕ БИОПОЛИМЕРОВ В СТИМУЛЯЦИИ РОСТА РАСТЕНИЙ.....	205
А.Т. Масенова, А.С. Жумаканова, И.И. Торлопов, К.С. Рахметова, А.З. Абыльмагжанов ИЕРАРХИЧЕСКИЕ ЦЕОЛИТЫ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ЦЕОЛИТОВ ZSM-5, HY И VEA ДЛЯ АЛКИЛИРОВАНИЯ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ.....	219
А.К. Нурлыбекова, А.А. Минкаева, Е. Шыбырай, Х.А. Айса, Ж. Женис ИССЛЕДОВАНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ И МИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ ВИДОВ <i>ARTEMISIA</i> ИЗ КАЗАХСТАНА МЕТОДОМ ГХ-МС.....	233
Т.С. Хоснудинова, А.О. Сапиева, Н.Г. Гемеджиева, Ж.Ж. Каржаубекова, Н.А. Султанова ПОЛУЧЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНОГО КОМПЛЕКСА ИЗ КОРНЕЙ <i>FERULA FOETIDA</i> (BUNGE) REGEL, ОБЛАДАЮЩЕГО АНТИОКСИДАНТНОЙ АКТИВНОСТЬЮ.....	252

Publication Ethics and Publication Malpractice in the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the work described has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct (http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf). To verify originality, your article may be checked by the originality detection service Cross Check <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

www.nauka-nanrk.kz

ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)

<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>

Директор отдела издания научных журналов НАН РК *А. Ботанқызы*

Редакторы: *Д.С. Аленов, Ж.Ш. Эден*

Верстка на компьютере *Г.Д. Жадырановой*

Подписано в печать 31.03.2025.

Формат 60x88¹/₈.

18,0 п.л. Заказ 1.