ISSN: 1991-346X (Print)
ISSN: 2518-1726 (Online)

ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES

№4
2025

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

2025 • 4

CENTRAL ASIAN ACADEMIC
RESEARCH CENTER

ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES

PUBLISHED SINCE JANUARY 1944

ALMATY, NAS RK

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), (Daecheon, Korea), https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700

BERSIMBAYEV Rakhmetkazhi 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 Avgazyevich, 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 Zhabagaevich, 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

ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES.

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

Owner: «Central Asian Academic Research Center» LLP (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 **№ KZ93VPY00121157** issued **05.06.2025**

Thematic scope: *physics and chemistry.*

Periodicity: 4 times a year.

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

© «Central Asian Academic Research Center» LLP, 2025

Бас редактор:

ЖҰРЫНОВ Мұрат Жұрынұлы, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, ҚР ҰҒА РҚБ президенті м.а., АҚ «Д.В. Сокольский атындағы Отын, катализ және электрохимия институтының» бас директоры (Алматы, Қазақстан) https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960

Редакция ұжымы:

ҚАЛИМОЛДАЕВ Мақсат Нұрәділұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі (Алматы, Қазақстан) https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500

ӘДЕКЕНОВ Серғазы Мыңжасарұлы, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, «Фитохимия» халықаралық ғылыми-өндірістік холдингінің директоры (Қарағанды, Қазақстан) https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118

РАМАЗАНОВ Тілекқабыл Сәбитұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің ғылыми-инновациялық қызмет жөніндегі проректоры, (Алматы, Қазақстан) 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 меңгерушісі, (Санкт-Петербург, Ресей) https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602431781

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

ТИГИНЯНУ 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, агрохимия), профессор, Корей Биоғылым және биотехнология ғылыми-зерттеу институты (KRIBB), өсімдіктердің инженерлік жүйелері ғылыми-зерттеу орталығының бас ғылыми қызметкері, (Дэчон, Корея) https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700

БЕРСІМБАЕВ Рахметқажы Ескендірұлы, биология ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті. (Астана, Қазақстан) https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004012398

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

БОШКАЕВ Қуантай Авғазыұлы, Ph.D. Теориялық және ядролық физика кафедрасының доценті, әл-Фарабиатындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54883880400

Бүркітбаев Мұхамбетқали, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан) 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

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

КОВАЛЕВ Александр Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, Украина ҰҒА академигі, Қолданбалы математика және механика институты (Донецк, Украина), https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321

ТАКИБАЕВ Нұрғали Жабағаұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24077239000

ХАРИН Станислав Николаевич, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063

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

ӘБІШЕВ Медеу Ержанұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан) https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900

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

ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)

Меншіктеуші: «Орталық Азия академиялық ғылыми орталығы» ЖШС (Алматы қ.).

Ақпарат агенттігінің мерзімді баспасөз басылымын, ақпарат агенттігін және желілік басылымды қайта есепке қою туралы ҚР Мәдениет және Ақпарат министрлігі «Ақпарат комитеті» Республикалық мемлекеттік мекемесі **05.06.2025 ж.** берген **№ KZ93VPY00121157** Куәлік.

Тақырыптық бағыты: *физика, химия.*

Мерзімділігі: жылына 4 рет.

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

© «Орталық Азия академиялық ғылыми орталығы» ЖШС, 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 Росси Чезаре, доктор философии (PhD, химия), профессор Университета Калабрии (Калабрия, Италия), https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979

ТИГИНЯНУ Ион Михайлович, доктор физико-математических наук, академик, президент Академии наук Молдовы, Технический университет Молдовы (Кишинев, Молдова), https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935

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 Рахметкажи Искендирович, 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=54883880400

БУРКИТБАЕВ 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 Зайнуталлаевич, 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

ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)

Собственник: ТОО «Центрально-азиатский академический научный центр» (г. Алматы).

Свидетельство **№ KZ93VPY00121157** 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 **05.06.2025**

Тематическая направленность: *физика, химия.*

Периодичность: 4 раза в год.

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

© ТОО «Центрально-азиатский академический научный центр», 2025

CONTENTS

PHYSICS

U.A. Ualikhanova, Y.Y. Kurban, A.M. Syzdykova, A.B. Altaibayeva, G.S. Altayeva
Dynamical systems analysis of the Starobinsky cosmological model.....11

M.B. Zhassybayeva, Z. Myrzakulova, M. Abeuova
Darboux transformation for the two-layer M-LXXII equation.....24

G.K. Beketova, N.N. Zhanturina, Z.K. Aimaganbetova
$Cs_2AgBiBr_6$ double halide perovskites as advanced materials for high-efficiency solar cells.....38

L.I. Shestakova, R. Spassyuk
Spectral studies of the k–f corona interface at 5000–6000 Å.....52

A.Khazhidinova, A. Khazhidinov
On the issue of fuel consumption of a thermal power plant.....66

T.B. Koshtybayev, K.K. Zhantleuov, M.E. Aliyeva
Greens function in the theory of quantum fluids.....77

A.V. Serebryanskiy, Ch.B. Akniyazov, Ch.T. Omarov, S. Sittykova, D. Kadyrova
Analysis of lunar impact flashes statistics.....91

G.T. Omarova, Zh.T. Omarova
The Lagrange - Jacobi equation and its application to the N - body problem.....105

Zh. Muratkhan, M. Khassanov
Methods for estimation of stellar wind parameters in high-mass X-ray binary systems with neutron stars.....113

V. Mukamedenkyzy, A. Izbasar, A. Aqikat
Investigation of structured flows induced by concentration-driven convection in ternary gases systems.....127

K. Saurova, S. Nysanbaeva, G. Turlybekova
Modeling of the optical system of a star tracker for accurate spacecraft attitude determination.....140

CHEMISTRY

B.S. Serikbayeva, M.S. Satayev, N.K. Sarypbekova
Study of the electroplating process on polypropylene using a conductive layer.....157

A.P. Auyeshov, Ch.Z. Yeskibayeva, A.K. Dikanbayeva
Resource-efficient utilization of serpentinite waste for magnesium sulfate production.....172

A.K. Kozybaev, Zh.D. Alimkulova, S.O. Abilkasova
Kinetic and thermodynamic studies of heavy metal adsorption onto water-washed Ca-montmorillonite clay.....184

A.Abdrakhmanova, V. Krivchenko, A. Sabitova1, B. Kuderina
DOL-enhanced electrolytes as a route to stable anodes in Li–V_2O_5 systems.....196

B.K. Massalimova, A.S. Shayakhmetova, A.S.Darmenbayeva
Water resources of Northern Kazakhstan: environmental monitoring and sustainable anagement.....208

A. Rakhimov, N. Zhanikulov, B. Taimasov, E. Potapova, A.K. Sviderskiy
Investigation of lead slag processing waste as raw material for cement industry.....227

L.M. Kalimoldina, K.Zh. Zhalgasbayev, A.S. Dauletbayev
Comparative study of industrial wastewater treatment methods.....241

A. Nurlan, S.R. Konuspayev, T.S. Abildin, K. Toshtay
Transformations of hydrocarbons during the hydrogenation of gasoline containing benzene.....256

G.J. Baisalova, B.K. Yertay, A.A. Taltenov, P. Kuzhatova, G. Saspugayeva
A quantitative determination of the phenol compounds sum in the thallus of *Parmelia sulcata*.....274

B.E. Myrzabekov, A.B. Makhanbetov, T.E. Gaipov, B.S. Abzhalov, N.N. Nurgaliyev
Electrochemical reduction of manganese (II) ions on titanium and lead electrodes.....286

A.S. Darmenbayeva, G.M. Zhussipnazarova, R. Reshmy, Zh.B. Mukazhanova, V.A. Rube
Biocoatings based on flax stem cellulose and their properties.....298

МАЗМҰНЫ

ФИЗИКА

У.А. Уалиханова, Е.Е. Құрбан, А.М. Сыздыкова, А.Б. Алтайбаева, Г.С. Алтаева
Старобинскийдің космологиялық моделін динамикалық жүйелер арқылы талдау.....11

М.Б. Жасыбаева, Ж. Мырзакулова, М. Абеуова
Қос қабатты M-LXXII теңдеуі үшін дарбу түрлендіруі.....24

Г.К. Бекетова, Н.Н. Жантурина, З.К. Аймаганбетова
$Cs_2AgBiBr_6$ қос галоидты перовскиттер: күн батареяларына арналған тиімділігі жоғары жаңа озық материалдары.....38

Л.И. Шестакова, Р.Р. Спасюк
5000–6000 Å диапазонында k- және f-короналар арасындағы өтпелі аймақты спектрлік зерттеу.....52

А. Хажидинова, А. Хажидинов
Жылу электр станциясының отын тұтыну мәселесі.....66

Т.Б. Қоштыбаев, К.Қ. Жантлеуов, М.Е. Алиева
Кванттық сұйықтар теориясындағы Грин функциялары.....77

А.В. Серебрянский, Ч.Б. Акниязов, Ч.Т. Омаров, С. Ситтыкова, Д. Кадырова
Айдың беткі қабатына метеоридтардың соқтығысуын статистикалық тұрғыдазерттеу.....91

Г.Т. Омарова, Ж.Т. Омарова
Лагранж – Якоби туңдеуі және оны N -денелі есепке қолдану.....105

Ж. Мұратхан, М. Хасанов
Нейтрон жұлдыздары бар массивті рентгендік екілік жүйелердегі жұлдыздық жел параметрлерін бағалау әдістері.....113

В. Мукамеденкызы, А. Ізбасар, А. Ақиқат
Үшкомпонентті газ жүйелеріндегі концентрациялық конвекцияның әсерінен құрылымдық ағындардың пайда болуын зерттеу.....127

К. Саурова, С. Нысанбаева, Г. Турлыбекова
Ғарыш аппараттарының ориентациясын нақты анықтау үшін жұлдыз сенсорының оптикалық жүйесін модельдеу.....140

ХИМИЯ

Б.С. Серикбаева, М.С. Сатаев, Н.К. Сарыпбекова
Электрөткізгіш қабатты қолданып, полипропиленге гальваникалық қаптама алу процесін зерттеу.....157

А.П. Ауешов, Ч.З. Ескибаева, А.К. Диканбаева
Серпентинит қалдығынан магний сульфатын алудың техникалық-экономикалық зерттеуі.....172

А.Қ. Қозыбаев, Ж.Д. Әлімқұлова, С.О. Әбілқасова
Сумен жуылған са-монтмориллонит сазында ауыр металдардың сорбциясының кинетикасы мен термодинамикасы.....184

А. Абдрахманова, В. Кривченко, А. Сабитова, Б. Кудерина
Li– V_2O_5 жүйесіндегі тұрақты анодтарға қол жеткізуге арналған DOL-мен модификацияланған электролиттер.....196

Б.К. Масалимова, А.С. Шаяхметова, А.С. Дарменбаева
Солтүстік Қазақстанның су ресурстары: экологиялық мониторинг және ұтымды басқару.....208

А. Рахимов, Н. Жаникулов, Б. Таймасов, Е. Потапова, А.К. Свидерский
Цемент өнеркәсібі үшін шикізат ретінде қорғасын қожын өңдеу қалдықтарын зерттеу.....227

Л.М. Калимолдина, Қ.Ж. Жалгасбаев, А.С. Даулетбаев
Өнеркәсіптік сарқынды суларды тазартудың әдістерін салыстырмалы түрде зерттеу.....241

Ә. Нұрлан, С.Р. Конуспаев, Т.С. Абильдин, Ḱ. Тоштай
Құрамында бензол бар бензинді гидрлеу кезінде көмірсутектердің өзгеруі.....256

Г.Ж. Байсалова, Б.К. Ертай, А.А.Талтенов, П. Кужатова, Г.Е. Саспугаева
PARMELIA SULCATA талломындағы фенолды қосылыстардың жиынтық мөлшерін сандық анықтау.....274

Б.Э. Мырзабеков, А.Б. Маханбетов, Т.Э. Гаипов, Б.С. Абжалов, Н.Н. Нұрғалиев
Марганец (II) ионының титан және қорғасын электродында электрохимиялық тотықсыздануы.....286

А.С. Дарменбаева, Г.М. Жусипназарова, Р. Решми, Ж.Б. Мукажанова, В.А. Рубе
Зығыр сабағынан алынған целлюлоза негізіндегі биожабындар және олардың қасиеттері.....298

CC BY NC

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА

У.А. Уалиханова, Е.Е. Курбан, А.М. Сыздыкова, А.Б. Алтайбаева, Г.С. Алтаева
Анализ космологической модели старобинского с помощью динамических систем.....11

М.Б. Жасыбаева, Ж. Мырзакулова, М. Абеуова
Преобразование Дарбу для двухслойного уравнения M-LXXII.....24

Г.К. Бекетова, Н.Н. Жантурина, З.К. Аймаганбетова
$Cs_2AgBiBr_6$**:** двойные галоидные перовскиты как передовые материалы для высокоэффективных солнечных элементов 38

Л.И. Шестакова, Р. Спасюк
Спектральные исследования области перехода между K и F короной в диапазоне 5000–6000Å.....52

А. Хажидинова, А. Хажидинов
К вопросу о расходе топлива на тепловой электростанции.....66

Т.Б. Коштыбаев, К.К. Жантлеуов, М.Е. Алиева
Функции Грина в теории квантовых жидкостей 77

А.В. Серебрянский, Ч.Б. Акниязов, Ч.Т. Омаров, С. Ситтыкова, Д. Кадырова
Исследование статистики ударов метеороидов о поверхность луны 91

Г.Т. Омарова, Ж.Т. Омарова
Уравнение Лагранжа – Якоби и его применение к задаче N -тел.....105

Ж. Муратхан, М. Хасанов
Методы оценки параметров звездного ветра в массивных двойных рентгеновских системах с нейтронными звездами.....113

В. Мукамеденкызы, А. Избасар, А. Акикат
Исследование возникновения структурированных течений, обусловленных концентрационной конвекцией в трёхкомпонентных газовых системах.....127

К. Саурова, С. Нысанбаева, Г. Турлыбекова
Моделирование оптической системы звёздного датчика для точного определения ориентации космических аппаратов.....140

ХИМИЯ

Б.С. Серикбаева, М.С. Сатаев, Н.К. Сарыпбекова
Исследование процесса гальванопокрытия на полипропилене с использованием электропроводного слоя.....157

А.П. Ауешов, Ч.З. Ескибаева, А.К. Диканбаева
Технико-экономическое исследование получения сульфата магния из серпентинитового отхода.....172

А.К. Козыбаев, Ж.Д. Алимкулова, С.О. Абилкасова
Кинетика и термодинамика сорбции тяжелых металлов на промытой водой кальциево-монтмориллонитовой глине.....184

А. Абдрахманова, В. Кривченко, А. Сабитова, Б. Кудерина
DOL – модифицированные электролиты как путь к стабильным анодам в системах Li–V_2O_5.....196

Б.К. Масалимова, А.С. Шаяхметова, А.С. Дарменбаева
Водные ресурсы Северного Казахстана: экологический мониторинг и устойчивое управление.....208

А. Рахимов, Н. Жаникулов, Б. Таймасов, Е. Потапова, А.К. Свидерский
Исследование отходов переработки свинцового шлака в качестве сырья для цементной промышленности.....227

Л.М. Калимолдина, К.Ж. Жалгасбаев, А.С. Дәулетбаев
Сравнительное исследование методов очистки промышленных сточных вод241

А. Нурлан, С.Р. Конуспаев, Т.С. Абильдин, К. Тоштай
Превращения углеводородов при гидрировании бензина, содержащего бензол.....256

Г.Ж. Байсалова, Б.К. Ертай, А.А.Талтенов, П. Кужатова, Г.Е. Саспугаева
Количественное определение суммы фенольных соединений в талломе *PARMELIA SULCATA*.....274

Б.Э. Мырзабеков, А.Б. Маханбетов, Т.Э. Гайпов, Б.С. Абжалов, Н.Н. Нургалиев
Электрохимическое восстановление ионов марганца (II) на титановом и свинцовом электродах.....286

А.С. Дарменбаева, Г.М. Жусипназарова, Р. Решми, Ж.Б. Мукажанова, В.А. Рубе
Биопокрытия на основе целлюлозы из стебля льна и их свойства.....298

CC BY NC

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 11–23

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.380

ҒТМР 29.05.45
ӘОЖ 524.834

©U.A. Ualikhanova*, Y.Y. Kurban, A.M. Syzdykova, A.B. Altaibayeva, G.S. Altayeva, 2025.
L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.
E-mail: ulbossyn.ualikhanova@gmail.com

DYNAMICAL SYSTEMS ANALYSIS OF THE STAROBINSKY COSMOLOGICAL MODEL

Ualikhanova Ulbossyn — PhD, senior lecturer of the department of general and theoretical physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
E-mail: ulbossyn.ualikhanova@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2351-0658;
Kurban Yermakhan — 2nd year master's student of the department of general and theoretical physics**,** L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
E-mail: kuermahan@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6639-0437;
Syzdykova Arailym — PhD student of the department of general and theoretical physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
E-mail: syzdykovarailym@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8999-6566;
Altaibayeva Aziza — PhD, associate professor of the department of general and theoretical physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
E-mail: aziza.ltaibayeva@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9254-7027;
Altayeva Gulsinay — Master of Natural Sciences, senior lecturer of the department of mathematics, physics and computer science, Shokan Ualikhanov Kokshetau University, Kokshetau, Kazakhstan,
E-mail: gulsinay.altayeva@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2611-7413.

Abstract. We analyze the main stages of the evolution of the Universe within the framework of modified gravity theories. The study relies on the metric-affine approach, in which the metric and the affine connection are treated as independent variables. This formalism generalizes the standard metric description and makes it possible to include effects of torsion and non-metricity, leading to a broader class of cosmological field equations. Using the expansion rate, the deceleration parameter, and the dark energy density, we show that the Universe initially experienced a decelerated expansion phase dominated by matter. As time progressed, influence of dark energy increased and eventually initiated the transition to accelerated expansion. We consider f(R) gravity model with a quadratic modification of the Ricci scalar. In the metric-affine formulation, this model gains additional degree of freedom due to independent variation of the connection. This extension allows for a more flexible quantitative description of

the evolution of the Universe's dynamical parameters. Numerical results indicate that contribution of dark energy was very small in the early Universe but grew steadily and today constitutes about 70% of total energy density. Our findings agree with current observations and support hypothesis that dark energy will remain dominant component, driving further acceleration of cosmic expansion. This study shows that modified gravity theories, including their metric-affine generalizations, can serve as viable alternatives to the standard ΛCDM model. Future work may include more detailed observational tests of the proposed model and refinement of the parameters that govern the expansion dynamics of the Universe.

Keywords: cosmology, dark energy, dark matter, observational constraints, $f(R)$ gravity

©У.А. Уалиханова*, Е.Е. Құрбан, А.М. Сыздыкова, А.Б. Алтайбаева, Г.С. Алтаева, 2025.
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан.
E-mail: ulbossyn.ualikhanova@gmail.com

СТАРОБИНСКИЙДІҢ КОСМОЛОГИЯЛЫҚ МОДЕЛІН ДИНАМИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕР АРҚЫЛЫ ТАЛДАУ

Уалиханова Улбосын — PhD, Жалпы және теориялық физика кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,
E-mail: ulbossyn.ualikhanova@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2351-0658;
Құрбан Ермахан — Жалпы және теориялық физика кафедрасының 2 курс магистранты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,
E-mail: kuermahan@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6639-0437;
Сыздыкова Арайлым — Жалпы және теориялық физика кафедрасының PhD студенті, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,
E-mail: syzdykovarailym@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8999-6566;
Алтайбаева Азиза — PhD, Жалпы және теориялық физика кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,
E-mail: aziza.ltaibayeva@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9254-7027;
Алтаева Гульсинай — Жаратылыстану ғылымдары магистрі, математика, физика және информатика кафедрасының аға оқытушысы, Ш.Ш. Уәлиханов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау, Қазақстан,
E-mail: gulsinay.altayeva@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2611-7413.

Аннотация. Бұл жұмыста біз модификацияланған гравитация теориялары аясында Ғалам эволюциясының негізгі кезеңдерін талдаймыз. Атап айтқанда, зерттеу метрико-аффиндік гравитация тәсіліне сүйенеді, онда метрика мен аффиндік байланыс тәуелсіз айнымалылар ретінде қарастырылады. Мұндай формализм стандартты метрикалық сипаттаманы кеңейтіп, бұралу мен аффинділік емес үлесін ескеруге мүмкіндік береді, нәтижесінде космологиялық теңдеулердің неғұрлым жалпы құрылымы алынады. Үдемелі ұлғаюды, бәсеңдеу параметрін және күңгірт энергия тығыздығын сипаттайтын теңдеулерді қолдана отырып, біз Ғаламның бастапқыда материя басым болған баяу ұлғаю фазасын басынан

CC BY NC

өткергенін көрсетеміз. Уақыт өте келе күңгірт энергияның әсері күшейіп, үдемелі ұлғаю кезеңіне алып келді. Біз Риччи скалярының квадраттық модификациясы бар f(R) гравитация моделін қарастырамыз; бұл модель метрика-аффиндік формализмде байланыс үшін тәуелсіз вариациялық анықтауға қатысты қосымша еркіндік дәрежесін иеленеді. Мұндай жалпыланған модель Ғаламның динамикалық параметрлерінің эволюциясын неғұрлым икемді сандық сипаттауға мүмкіндік береді. Сандық есептеулер ерте Ғаламда күңгірт энергияның үлесі өте төмен болғанын, бірақ біртіндеп өсіп, бүгінде жалпы энергия тығыздығының шамамен 70%-ын құрайтынын растайды. Біздің нәтижелер бақылаулармен үйлеседі және болашақта күңгірт энергияның үстемдігі жалғасып, ғарыштық кеңеюдің одан әрі үдеуіне әкелетінін растайды. Бұл зерттеу модификацияланған гравитация теориялары, соның ішінде олардың метрико-аффиндік жалпыламалары, космологиялық эволюцияны түсіндіруде стандартты ΛCDM моделіне өміршең балама бола алатынын көрсетеді. Болашақ зерттеулер ұсынылған модельді астрономиялық бақылаулар арқылы егжей-тегжейлі тексеруді және Ғаламның ұлғаю динамикасын анықтайтын негізгі параметрлерді нақтылауды қамтуы мүмкін.

Түйін сөздер: космология, күңгірт энергия, күңгірт материя, бақылау шектері, $f(R)$ гравитация

Алғыс: *зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландыруымен жүзеге асты (жоба № AP26101851).*

©У.А. Уалиханова*, Е.Е. Курбан, А.М. Сыздыкова, А.Б. Алтайбаева, Г.С. Алтаева, 2025.
Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
Астана, Казахстан.
E-mail: ulbossyn.ualikhanova@gmail.com

АНАЛИЗ КОСМОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТАРОБИНСКОГО С ПОМОЩЬЮ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Уалиханова Улбосын — PhD, старший преподаватель кафедры общей и теоретической физики, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
E-mail: ulbossyn.ualikhanova@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2351-0658;
Курбан Ермахан — магистрант 2 курса кафедры общей и теоретической физики, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
E-mail: kuermahan@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6639-0437;
Сыздыкова Арайлым — PhD докторант кафедры общей и теоретической физики, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
E-mail: syzdykovarailym@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8999-6566;
Алтайбаева Азиза — PhD, ассоциированный профессор кафедры общей и теоретической физики, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
E-mail: aziza.ltaibayeva@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9254-7027;

Алтаева Гульсинай — магистр естественных наук, старший преподаватель кафедры математики, физики и информатики, Кокшетауский университет имени Ш. Уалиханова, Кокшетау, Казахстан, E-mail: gulsinay.altayeva@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2611-7413.

Аннотация. В этой работе мы анализируем ключевые этапы эволюции Вселенной в рамках модифицированных теорий гравитации. В частности, исследование опирается на подход метрико-аффинной гравитации, в котором метрика и аффинное соединение рассматриваются как независимые переменные. Такой формализм расширяет стандартное метрическое описание и позволяет учитывать вклад кручения и неаффинности, что приводит к более общей структуре космологических уравнений. Используя уравнения, описывающие ускорение расширения, параметр замедления и плотность тёмной энергии, мы демонстрируем, что Вселенная изначально испытала фазу замедленного расширения, в которой доминировала материя. Со временем влияние тёмной энергии стало доминирующим, что привело к фазе ускоренного расширения. Мы рассматриваем модель гравитации f(R) с квадратичной модификацией скаляра Риччи, которая в метрико-аффинном формализме приобретает дополнительную степень свободы, связанную с независимым вариационным определением связи. Такая обобщённая модель даёт более гибкое количественное описание эволюции динамических параметров Вселенной. Численные расчёты подтверждают, что в ранней Вселенной вклад тёмной энергии был незначительным, но постепенно увеличивался и теперь составляет примерно 70% от общей плотности энергии. Наши результаты согласуются с данными наблюдений и подтверждают гипотезу о том, что тёмная энергия продолжит доминировать в будущем, приводя к дальнейшему ускорению космического расширения. Это исследование подчёркивает, что модифицированные теории гравитации, включая их метрико-аффинные обобщения, могут служить жизнеспособными альтернативами стандартной модели ΛCDM при объяснении космологической эволюции. Дальнейшие исследования могут включать более детальную проверку предложенной модели посредством астрономических наблюдений и уточнения ключевых параметров, управляющих динамикой расширения Вселенной.

Ключевые слова: космология, темная энергия, темная материя, наблюдательные ограничения, $f(R)$ гравитация

Кіріспе. $f(R)$ гравитация сияқты модификацияланған гравитация теориялары іргелі космологиялық бақылауларды, соның ішінде Ғаламның үдемелі ұлғайуын түсіндірудің балама тәсілдерін береді. Бұл модельдер гравитация әрекетіне Риччи скалярынан сызықтық емес функцияларды енгізу арқылы жалпы салыстырмалық теориясын (ЖСТ) қорытады (Nojiri, 2011, 2; Davies, 1980, 2; Riess, 1998, 3; Dimopoulos, 2021, 3). Космологиялық тұрактының болуын болжайтын классикалық Эйнштейн моделінен айырмашылығы, $f(R)$ теориялары гравитацияның динамикалық эволюциясын қарастырады, бұл күңгірт энергияны енгізудің қажеті жоқ кейінгі кезеңдегі космологиялық ұлғаюды түсіндіруге мүмкіндік береді (Gamonal, 2021, 3).

CC BY NC

Бұл жұмыста $f(R)$ –гравитация шеңберінде алынған негізгі теңдеулерді қарастырамыз және олардың Ғаламның үдемелі ұлғайуы үшін салдарын талдаймыз. Атап айтқанда, біз Лагранж және Гамильтон формализмін пайдалана отырып, Фридман-Лемейтр-Робертсон-Уолкер (ФРЛУ) метрикасындағы масштаб факторының динамикасын зерттейміз. Бұл метрикадағы Риччи скалярының өрнегі осы өзгертілген теория шеңберінде Ғаламның эволюциясын сипаттайтын қозғалыс теңдеулерін алуға мүмкіндік береді. Біздің талдауымыздың негізгі аспектілерінің бірі үдемелі және баяуланған ұлғаю режимдерінің ауысуын зерттеу болып табылады (Capozziello, 2016, 3; Capozziello, 2008, 2). Бұл ауысу модельдің гравитациялық және космологиялық компоненттері арасындағы тепе-теңдікті анықтайтын масштаб факторының екінші туындысының белгісінің өзгеруімен байланысты. Біз $f(R)$ функциялардың белгілі бір кластары үшін ұзақ мерзімді үдемелі кеңейтуді немесе тербелмелі шешімді қоса алғанда, әртүрлі эволюция сценарийлері мүмкін екенін көрсетеміз. Зерттеудің тағы бір маңызды бөлігі күңгірт энергияның эффективті күй параметрін және фантомдық шекарадан өту құбылысын талдау болып табылады — қарапайым күңгірт энергияны $(w > -1)$ фантомнан $(w < -1)$ бөлетін шекара. Біз w_{DE} күй параметрінің теңдеуі Ғаламның болашақ тағдырын модельдеуде маңызды рөл атқаратын осы шекараны динамикалық түрде кесіп өтуге болатын жағдайларын қарастырамыз (Capozziello, 1996, 2; Paliathanasis, 2019, 2).

Соңында біз Хаббл параметрі H, баяулау параметрі q және жалпы тығыздық балансының теңдеуіне зат пен күңгірт энергияның әртүрлі құрамдас бөліктерінің үлесі сияқты бақылау параметрлерін зерттейміз. Бұл параметрлер теориялық болжамдарды бақылау деректерімен байланыстыруға және $f(R)$ модельдерінің заманауи космологияға жақсы сәйкес келетінін анықтауға мүмкіндік береді. Осылайша, бұл жұмыс $f(R)$ –гравитацияның іргелі аспектілерін және оның Ғаламның динамикасына әсерін, оның ішінде үдемелі ұлғаю мен фазалық ауысуларды зерттеуге бағытталған (Papagiannopoulos, 2018, 2; Cataneo, 2016, 3).

Зерттеу материалдары. $f(R)$ гравитация әрекетін келесі өрнек арқылы жазамыз

$$S = \int d^4x\sqrt{-g}f(R). \qquad (1)$$

(1) теңдеудегі модель үшін масштаб факторының түрін біртекті және изотропты Ғаламдағы сфералық координаталардағы Фридман-Лемейтр-Робертсон-Уолкер (ФЛРУ) метрикасымен сипаттап келесідей жазуға болады (Nojiri, 2011, 3; Kumar, 2023, 2)

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t)\left[\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\phi^2)\right], \qquad (2)$$

мұндағы $a(t)$ — масштаб коэффициенті және k — кеңістіктің қисықтық параметрі. Бұл метрикада Риччи скаляры төмендегі теңдеу арқылы жазылады

$$R = -6\left(\dot{H} + 2H^2\right) = -6\left[\frac{\ddot{a}}{a} + \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2}\right]. \quad (3)$$

Космологиялық теңдеулерді шығару үшін канондық лагранжды $\mathcal{L} = \mathcal{L}\left(a, \dot{a}, R, \dot{R}\right)$ анықтауға болады, мұндағы $Q = \{a, R\}$ — конфигурация кеңістігі, ал $\mathcal{T}Q = \left\{a, \dot{a}, R, \dot{R}\right\} - \mathcal{L}$ сәйкес анықталған жанама байлам (Qi, 2023, 2).

Олай болса жоғарыдағы теңдеулерді пайдала отырып, келесідей теңдеу аламыз

$$S = 4\pi \int dt\, \mathcal{L}\left(a, \dot{a}, R, \dot{R}\right). \quad (4)$$

(4) теңдеуге (3), (1) теңдеулерді қойып a және R тәуелсіз айнымалыларына сәйкес Лагранж көбейткіші алынған теңдеуді аламыз

$$S = 4\pi \int dt \left\{a^3 f(R) - \lambda\left[R + 6\left(\frac{\ddot{a}}{a} + \frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{k}{a^2}\right)\right]\right\}. \quad (5)$$

(5) теңдеуді R бойынша туынды алу арқылы λ Лагранж көбейткішін келесідей анықтаймыз

$$\lambda = a^3 f'(R). \quad (6)$$

$f_R = \frac{df}{dR}$ **дегеніміз** $f(R)$ функциясының R-ге қатысты туындысы.

Әдістері. (6) теңдеуді (5) теңдеудің орынана қоя отырып, бөлшектері бойынша интегралдағаннан кейін Лагранжды табамыз

$$\mathcal{L} = a^3[f(R) - Rf'(R)] + 6a^2 f''(R)\dot{a}\dot{R} + 6f'(R)a\dot{a}^2 - 6kaf'(R). \quad (7)$$

Кейін a және R тәуелсіз айнымалылары және Эйлер-Лагранж теңдеуі $\frac{d}{dt}\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{a}} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial a}$ арқылы келесідей теңдеулерді анықтаймыз

$$2\left(\frac{\ddot{a}}{a}\right) + \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = -p \quad (8)$$

және

$$f''(R)\left\{R + 6\left[\frac{\ddot{a}}{a} + \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2}\right]\right\} = 0. \quad (9)$$

Атап айтқанда, (9) теңдеуді Лагранж көбейткіші арқылы алынған терминдерде баламалауға болады, ол әдістің сәйкестігін қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, Гамильтондық шектеулерді келесідей жазамыз

CC BY NC

$$E_{\mathcal{L}} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{a}}\dot{a} + \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{R}}\dot{R} - \mathcal{L} = 0. \tag{10}$$

(10) теңдеу космологиялық эволюцияны сипаттайтын өрнек болып табылады және Ғаламның ұлғаюын табамыз

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{1}{3}\rho. \tag{11}$$

Жоғарыдағы теңдеулерді қолдана отырып, біз қысымды

$$p = \frac{1}{f'(R)}\left\{2\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)\dot{R}f''(R) + \ddot{R}f''(R) + \dot{R}^2 f'''(R) - \frac{1}{2}[f(R) - Rf'(R)]\right\} \tag{12}$$

және тығыздықты келесідей анықтаймыз

$$\rho = \frac{1}{f'(R)}\left\{\frac{1}{2}[f(R) - Rf'(R)] - 3\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)\dot{R}f''(R)\right\}. \tag{13}$$

Нәтижелер мен талқылау. *Ғаламның үдемелі ұлғаюы.* $f(R)$ гравитациясы үшін маңызды сұрақтардың бірі, ол Ғаламның үдемелі ұлғаю кезеңін қолдайды ма және баяулау мен үдемелеу арасында ауысулар бар ма? Осы сұрақтар қазіргі таңда ең өзекті мәселе болып табылады. Бұл сұраққа шешім табу үшін, ең алдымен Хаббл параметрінің уақытқа тәуелді теңдеуін жазамыз (Hohmann, 2017, 4)

$$\dot{H} = \frac{d}{dt}\frac{\dot{a}}{a} = \frac{\ddot{a}a - \dot{a}^2}{a^2} = \frac{\ddot{a}}{a} - H^2. \tag{14}$$

Демек, (14) теңдеуден үдеу арқылы келесідей анықтаймыз

$$\frac{\ddot{a}}{a} = H^2 + \dot{H} = -\frac{1}{6}(\rho + 3p) = 0. \tag{15}$$

(13) және (12) теңдеулерді (15) теңдеуге апарып қоямыз

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{1}{6f_R}\left[-\frac{1}{2}(f(R) - f_R R) - 2f_{RR}\dot{R}H + 3f_{RR}\ddot{R} + 3f_{RRR}\dot{R}^2\right]. \tag{16}$$

Енді біз үдемелеу мен баяулау арасындағы ауысуға, атап айтқанда $\ddot{a} = 0$ сызығы арқылы өтетін фазалық кеңістік траекторияларына назар аударамыз. (18) теңдеу нөлге тең болатын шарттарды табу үшін

$$-\frac{1}{6f_R}\left\{-f(R) + f_R R + 3f_{RR}\dot{R}H + 3f_{RR}\ddot{R} + 3f_{RRR}\dot{R}^2\right\} = 0, \tag{17}$$

яғни келесідей шарт орындалуы керек

$$f(R) + f_R R + 3f_{RR}\dot{R}H + 3f_{RR}\ddot{R} + 3f_{RRR}\dot{R}^2 = 0. \tag{18}$$

CC BY NC

Ықтимал шарттар:

Тривиалды жағдай $f_R \neq 0$, әйтпесе теңдеу анықталмайды.

(17) теңдеудегі жақша нөлге тең болуы керек, ал бұл өз кезегінде келесі шарттың орындалуына алып келеді

$$f(R) = f_R R. \tag{19}$$

Бұл $f(R)$ функциясы осы қатынасты қанағаттандыратынын білдіреді

$$3f_{RR}\dot{R}H + 3f_{RR}\ddot{R} + 3f_{RRR}\dot{R}^2 = 0 \tag{20}$$

және $\dot{R}$ және $\ddot{R}$ динамикалық мүшелерінің бірін-бірі жоққа шығаруын талап етеді.

Ерекше жағдайлар:

Егер $\dot{R} = 0$ және $\ddot{R} = 0$ болса, онда теңдеу келесі түрге ықшамдалады

$$f_R R = f(R). \tag{21}$$

Егер $H = 0$ болса, тек қалған мүшелері қалады.

Ескере кететін жағдай, $H = 0$ үшін бұл шарт $\dot{H} = 0$ алып келіп, тұрақты нүктеге сәйкес келеді, сондықтан бұл жағдайда ешқандай ауысу болмайды. Осылайша, ауысулар тек $H \neq 0$ кезде, келесідей теңдеу арқылы орындалады

$$H = \frac{3f_{RR}\ddot{R} + 3f_{RRR}\dot{R}^2 - \frac{1}{2}(f(R) - Rf_R)}{2f_{RR}\dot{R}}. \tag{22}$$

Күңгірт энергия және фантомдық шекара

Енді күңгірт энергия мен фантомды шекараны өту шарттарын анықтау үшін тиімді баротропты индексті келесідей жазамыз

$$w_{DE} = \frac{p}{\rho}. \tag{23}$$

(13) және (12) теңдеулерді (23) теудеуге апарып қойғанда алатынымыз

$$w_{DE} = \frac{-\frac{1}{2}(f(R) - f_R R) + 2f_{RR}\dot{R}H + f_{RR}\ddot{R} + f_{RRR}\dot{R}^2}{\frac{1}{2}(f(R) - f_R R) - 3f_{RR}\dot{R}H}. \tag{24}$$

Мұнда бізді әсіресе баротроптық индекс -1 мәнінен аз немесе үлкен бе, әлде осы екі мүмкіндіктің арасында динамикалық түрде өзгеретін $H = H^{\times}$ бар ма деген сұрақ қызықтырады. $w_{DE} = -1$ критикалық мән фантомдық және фантомдық емес күңгірт энергия деп аталатын энергиялар шекарасы болып табылады, сондықтан «фантомдық шекара» ретінде де белгілі.

Келесідей шарт орындалғанда

CC BY NC

$$H^{\times} = \frac{f_{RR}\ddot{R} + f_{RRR}\dot{R}^2}{f_{RR}\dot{R}} \qquad (25)$$

$w_{\mathrm{DE}} = -1$ тең болады, яғни фантомды шекара байқалады.

Баяулау параметрі $\boldsymbol{q}$

Біз енді осы космологиялық модель шеңберінде Ғаламның эволюциясын сипаттайтын негізгі параметрлерді зерттейміз. Біздің модельде күңгірт энергия тығыздығының параметрі

$$\Omega_{\mathrm{DE}} = 1 - \frac{f_R R - f(R)}{6H^2 f_R}. \qquad (26)$$

Бұл теңдеу модификацияланған гравитацияда күңгірт энергия космологиялық тұрақтыдан емес, қосымша қисықтық скалярынан келетінін көрсетеді.

Дәстүрлі түрде кеңістіктік қисықтықпен байланысты Ω_r параметрі де анықталады. Дегенмен, бұл параметр біздің модель үшін бірдей жоғалады, өйткені біз FLRW кеңістіктік тегіс кеңістік-уақытпен шектеледі. Нәтижесінде параметрлер шектеу теңдеуін қанағаттандыратын келесідей теңдеу аламыз:

$$\Omega_m + \Omega_r + \Omega_{\mathrm{DE}} = 1. \qquad (27)$$

Мұндағы Ω_m - зат тығыздығының параметрі, Ω_r- сәуле шығару тығыздығының параметрі, Ω_{DE} - күңгірт энергия тығыздығының параметрі.

Бұл теңдеу Ғаламның энергия балансын білдіреді және барлық компоненттердің қосындысы 1-ге тең болуы керек екенін көрсетеді, бұл стандартты космологиядағы жалпақ Ғаламға сәйкес келеді.

Бақыланатын параметрлердің тағы бір маңызды жиынтығы, H Хаббл параметрі арқылы өрнектелген q баяулау параметрі. Оны келесідей теңдеу арқылы жазамыз:

$$q = -1 - \frac{\dot{H}}{H^2} = \frac{1}{6f_R H^2}\left[-\frac{1}{2}(f(R) - f_R R) - 2f_{RR}\dot{R}H + 3f_{RR}\ddot{R} + 3f_{RRR}\dot{R}^2\right]. \qquad (28)$$

Бұл теңдеу Ғаламның ұлғаюының баяулауын немесе үдемелеуін көрсететін q мөлшерін анықтайды. q теріс мәні үдемелі кеңейуді көрсетеді.

Старобинский моделі

Бұдан ары қарай біз (16), (26) және (28) теңдеулерін Старобинский моделі үшін зерттеп, графиктерін тұрғызамыз.

Старобинский моделі үшін Ғалам үдеуінің эволюциясы $\boldsymbol{\ddot{a}/a}$

Старобинский моделі келесідей функция арқылы беріледі

$$f(R) = R + \alpha R^2. \qquad (29)$$

Енді (18) теңдеуге (31) теңдеуді апарып қойып, келесідей мәндерді қолдана отырып

$$f_R = 1 + 2\alpha R \qquad (30a)$$

$$f_{RR} = 2\alpha \qquad (30b)$$

$$f_{RRR} = 0 \qquad (30c)$$

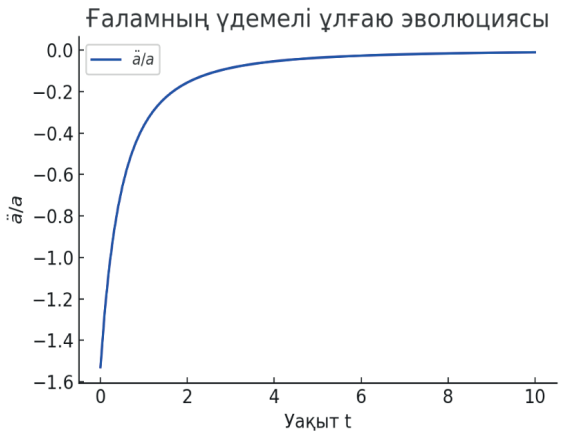
$$R = \frac{12}{t+1} \qquad (30d)$$

$$H = \frac{2}{t+1} \qquad (30e)$$

$$\dot{R} = -\frac{12}{(t+1)^2}, \qquad (30f)$$

$$\ddot{R} = \frac{24}{(t+1)^3} \qquad (30g)$$

график тұрғызайық.



Сурет 1. Ғаламның үдемелі ұлғаю эволюциясының уақытқа тәуелді графигі

1-суретте y өсі Ғаламның $(\ddot{a}/a)$ ұлғаюының үдеуін көрсетеді, ал x өсі уақытты көрсетеді. Бастапқыда (уақыттың шағын мәндерінде) үдеу теріс болды, бұл ұлғаюды баяулатады. Содан кейін ол көтеріле бастап, графиктің соңында ол нөлге жақындады. Бұл бұрын Ғаламның ұлғаюы баяулағанын яғни материяның гравитациялық тартылуына байланысты, бірақ кейін күңгірт энергияның әсерінен жеделдей бастағанын көрсетеді.

1- суретте Ғаламның ұлғаю жылдамдығын қалай өзгертетіні көрсетілген. Енді осы Ғаламның үдеуінің эволюциясындағы төмендегідей шарттарды қарастырамыз:

Егер $\ddot{a}/a > 0$ болса, онда Ғаламның үдеуінің эволюциясы *үдейді.* Себебі, Ғаламның үдеуінің эволюциясы күңгірт энергияның үстемдік ету фазасына сәйкес келеді.

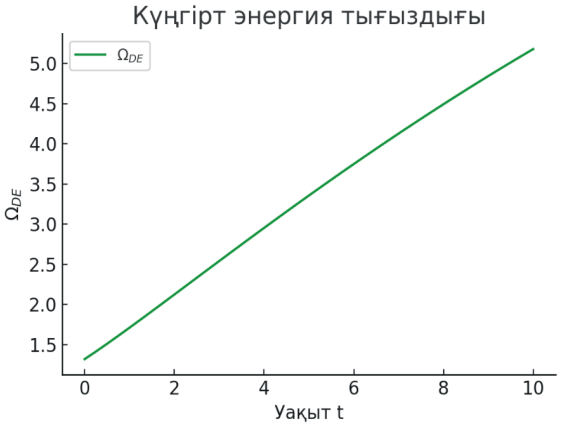
CC BY NC

Егер $\ddot{a}/a < 0$ болса, онда материя үстемдік еткен кездегі ерте Ғаламға тән болатын *баяулау* құбылысы байқалады.

Егер $\ddot{a}/a = 0$ болса, онда осы арқылы өту фазалардың өзгеруін көрсетеді баяу ұлғаюден жеделдетілгенге дейін.

Старобинский моделі үшін күңгірт энергияның тығыздығы Ω_{DE}

(30a)-(30g) теңдеулерін қолдана отырып, біз қарастырып отырған модель үшін (26) теңдеуде берілген Ω_{DE} күңгірт энергияның тығыздығы үшін график тұрғызайық.



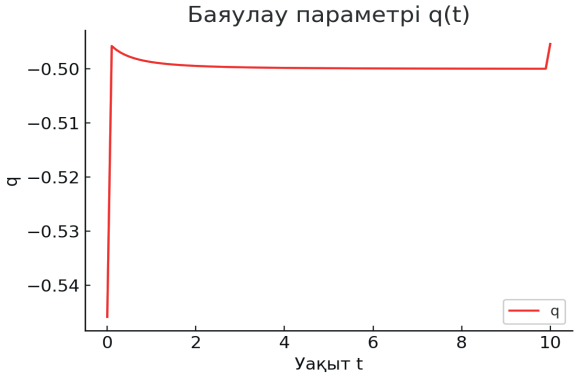
Сурет 2. Күңгірт энергия тығыздығының уақытқа тәуелді графигі.

2-суретте y өсі Ғаламдағы күңгірт энергияның салыстырмалы мөлшерін, ал x өсі уақытты көрсетеді. Мұнда күңгірт энергияның тығыздығы уақыт өткен сайын арта түсетінін көруге болады. Бұл уақыт өткен сайын күңгірт энергияның Ғаламның эволюциясына қосқан үлесі арта түсетінін білдіреді. 2-суретте Ғаламдағы жалпы энергия тығыздығының қандай үлесі күңгірт энергия екенін көрсетеді. Бастапқы кезеңде $\Omega_{DE} \approx 0$, себебі зат пен радиация басым. Уақыт өте келе Ω_{DE} өсіп, 1-ге ұмтылады, бұл ағымдағы үдемелі кеңейуді түсіндіреді. Болашақта бұл үрдіс жалғаса берсе, күңгірт энергия толығымен үстемдік етеді. Бұл стандартты космологиялық модельге сәйкес келеді, мұнда қазір $\Omega_{DE} \approx 0{,}7$.

Старобинский моделі үшін Баяулау параметрі q

(30a)-(30g) теңдеулерін қолдана отырып, біз қарастырып отырған модель үшін (28) теңдеуде берілген q баяулау параметрі үшін график тұрғызайық. (30) теңдеудегі $\dot{H}$ уақыт бойынша H туындысы арқылы сандық түрде есептеледі.

CC BY NC



Сурет 3. q баяулау параметрінің уақытқа тәуелді графигі.

Бұл параметр Ғаламның жылдамдығын немесе баяулауын көрсетеді. $q > 0$ болса, Ғалам баяулайды, $q < 0$ болса, ол жеделдейді.

3-суретте q теріс екенін көруге болады, бұл Ғаламның үдемелі ұлғаюын білдіреді. Уақыттың басында график сәл көтеріледі, бұл аздап баяулауды көрсетуі мүмкін, бірақ кейін ол теріс мәндерде тұрақтанады. q баяулау параметрі Ғаламның ұлғаю жылдамдығы қаншалықты жылдам өзгеретінін көрсетеді. Енді шарттар қарастырамыз:

Егер $q > 0$ болса, Ғалам *баяулайды* (материя үстемдік етеді, тартылыс күші тартады).

Егер $q < 0$ болса, онда Ғалам үдемелі кеңейеді (күңгірт энергия басым).

Егер $q = 0$ нүктесінде баяу кеңейтуден жеделдетілген кеңейтуге ауысу орын алады.

Қазіргі космологияда бақылаулар қазір $q \approx -0{,}55$ екенін көрсетеді, бұл жеделдетілген ұлғаюды білдіреді.

Қорытынды. Бұл жұмыста Ғалам эволюциясының негізгі кезеңдері модификацияланған гравитация тұрғысынан қарастырылды. Ұлғаю үдеуін, баяулау параметрін және күңгірт энергияның тығыздығын сипаттайтын теңдеулерді талдау Ғаламның өткен уақытта материяның гравитациясынан туындаған баяу ұлғаю фазасын бастан өткергенін көрсетті. Дегенмен, уақыт өте келе күңгірт энергияның әсері басым болып, бұл үдемелі ұлғаюға көшуге әкелді.

Риччи скалярының квадраттық модификациясы бар $f(R)$ –гравитацияның қарастырылған моделі Ғаламның динамикалық параметрлерінің өзгеруін график арқылы сипаттауға мүмкіндік берді. Есептеулер ерте Ғаламда күңгірт энергияның тығыздығы шамалы болғанын растады, бірақ уақыт өте келе оның үлесі артып, қазіргі дәуірдегі жалпы энергия тығыздығының 70% жақындады.

Бұл нәтиже бақылау деректерімен сәйкес келеді және болашақта күңгірт энергияның үстемдігі туралы гипотезаны растайды және Ғаламның одан да көп мөлшерде үдемелі ұлғаюына әкеледі. Зерттеу модификацияланған гравитация теориялары стандартты ΛCDM үлгісімен бірге космологиялық эволюцияға балама түсініктеме бола алатынын көрсетеді. Болашақта астрономиялық бақылаулар

CC BY NC

негізінде ұсынылған модельді егжей-тегжейлі тексеру және Ғаламның ұлғаю динамикасын сипаттайтын параметрлерді нақтылау мүмкін болады.

Әдебиеттер

Capozziello S. et al. Noether symmetries in cosmology. La Rivista del Nuovo Cimento (1978-1999). — 1996. — T. 19. — C. 1-114.

Capozziello S., Francaviglia M. Extended theories of gravity and their cosmological and astrophysical applications. General Relativity and Gravitation. — 2008. — T. 40. — C. 357-420.

Capozziello S., SJ G. G., Vernieri D. String duality transformations in f (R) gravity from Noether symmetry approach. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2016. — T. 2016. — №. 01. — C. 015.

Cataneo M. et al. Cluster abundance in chameleon f (R) gravity I: toward an accurate halo mass function prediction. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2016. — T. 2016. — №. 12. — C. 024.

Davies P. C. W. Quantum fields in curved space. General Relativity and Gravitation. Vol. 1. One hundred years after the birth of Albert Einstein. Edited by A. Held. New York. — 1980. — T. 1. — C. 255.

Dimopoulos K., Sánchez López S. Quintessential inflation in Palatini f (R) gravity. Physical Review D. — 2021. — T. 103. — №. 4. — C. 043533.

Gamonal M. Slow-roll inflation in f (R, T) gravity and a modified Starobinsky-like inflationary model. Physics of the Dark Universe. — 2021. — T. 31. — C. 100768.

Hohmann M., Järv L., Ualikhanova U. Dynamical systems approach and generic properties of f (T) cosmology. Physical Review D. — 2017. — T. 96. — №. 4. — C. 043508.

Kumar S. et al. New late-time constraints on f (R) gravity. Physics of the Dark Universe. — 2023. — T. 42. — C. 101281.

Nojiri S., Odintsov S. D. Unified cosmic history in modified gravity: from F (R) theory to Lorentz non-invariant models. Physics Reports. — 2011. — T. 505. — №. 2-4. — C. 59-144.

Nojiri S., Odintsov S. D. Unified cosmic history in modified gravity: from F (R) theory to Lorentz non-invariant models. Physics Reports. — 2011. — T. 505. — №. 2-4. — C. 59-144.

Paliathanasis A. Similarity solutions for the Wheeler-Dewitt equation in f R-cosmology. The European Physical Journal C. — 2019. — T. 79. — №. 12. — C. 1031.

Papagiannopoulos G. et al. New integrable models and analytical solutions in f (R) cosmology with an ideal gas. Physical Review D. — 2018. — T. 97. — №. 2. — C. 024026.

Qi Y. et al. The late-time dynamics of F (R) gravity dark energy model. Physics of the Dark Universe. — 2023. — T. 40. — C. 101180.

Riess A. G. et al. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. The astronomical journal. — 1998. — T. 116. — №. 3. — C. 1009.

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 24–37

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.381

УДК 53.01, 53.02
МРНТИ 29.01.11

©M.B. Zhassybayeva*, Z. Myrzakulova, M. Abeuova, 2025.
L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.
E-mail: mbzhassybayeva@gmail.com

DARBOUX TRANSFORMATION FOR THE TWO-LAYER M-LXXII EQUATION

Zhassybayeva Meruyert — senior lecturer of the department of general and theoretical physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
E-mail: mbzhassybayeva@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8491-0893;
Zhaidary Myrzakulova — PhD, senior lecturer of the department of algebra and geometry, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
E-mail: zhrmyrzakulova@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4047-4484;
Abeuova Marzhangul — master's student of the department of general and theoretical physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
E-mail: abeuovamarzhan7@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0009-5678-6747.

Abstract. In this paper, we study an integrable model for describing nonlinear wave processes in multilayer media typical of various physical systems. These systems include optical media, magnetic materials, plasma formations, as well as quantum and spin structures with internal degrees of freedom. The main focus is on constructing a new two-layer equation, the M-LXXII, which is gauge equivalent to the two-component Fokas-Lenells equation. This equation represents an important generalization of classical models used to describe complex nonlinear interactions in dispersive, anisotropic, and spatially inhomogeneous media, including effects of multimode behavior, multicomponent coupling, and spatiotemporal dependence. The integrability of this model is confirmed by constructing a Lax pair, which enables the application of methods from integral geometry and the theory of the theory inverse scattering. The Fokas-Lenells equation is known for its ability to describe the evolution of light and dark solitons in optical fibers taking into account higher orders of nonlinearity and dispersion effects. In this paper, we additionally construct a Darboux transformation that allows finding exact analytical solutions, including multisoliton configurations. In particular, a single-soliton solution for the M-LXXII equation is presented, which emphasizes its applicability to modeling specific wave structures in multilayer and multicomponent physical systems. The presented results can be used for further analysis of complex nonlinear interactions and

dynamics in multilayer media, and also find important application in applied problems of modern theoretical and mathematical physics, contributing to the development of new methods for modeling and controlling wave processes in various materials and structures.

Keywords: Two-component Fokas-Lenells equation, spin system, Lax representation, two-layer M-LXXII equation, Darboux transformation, gauge equivalence

Financing. *This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP25794905).*

©М.Б. Жасыбаева*, Ж. Мырзакулова, М. Абеуова, 2025.
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан.
E-mail: mbzhassybayeva@gmail.com

ҚОС ҚАБАТТЫ M-LXXII ТЕҢДЕУІ ҮШІН ДАРБУ ТҮРЛЕНДІРУІ

Жасыбаева Меруерт — Жалпы және теориялық физика кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,
E-mail: mbzhassybayeva@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8491-0893;
Мырзакулова Жайдары — PhD, Алгебра және геометрия кафедрасының кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,
E-mail: zhrmyrzakulova@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4047-4484;
Абеуова Маржангуль — Жалпы және теориялық физика кафедрасының магистранты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,
E-mail: abeuovamarzhan7@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0009-5678-6747.

Аннотация. Бұл жұмыста әр түрлі физикалық жүйелерге тән қос қабатты ортадағы сызықтық емес толқындық процестерді сипаттаудың интегралды моделін зерттейміз. Мұндай жүйелерге оптикалық орталар, магниттік материалдар, плазмалық түзілімдер және ішкі еркіндік дәрежесі бар кванттық және спиндік құрылымдар жатады. Негізгі назар екі компонентті Фокас-Ленэллс теңдеуіне калибровті эквивалентті жаңа қос қабатты M-LXXII теңдеуін құруға аударылады. Бұл теңдеу дисперсиялық, анизотропты және кеңістікте біртекті емес орталардағы күрделі сызықты емес әрекеттесулерді сипаттау үшін қолданылатын классикалық модельдердің маңызды жалпылауы болып табылады, соның ішінде мультимодалық, көпкомпонентті және кеңістік-уақыттық тәуелділік әсерлері. Бұл модельдің интегралдылығы интегралдық геометрия әдістерін және шашыраудың кері есебінің теориясын қолдануға мүмкіндік беретін Лакс жұбын құру арқылы расталады. Фокас-Ленэллс теңдеуі сызықты емес және дисперсиялық әсерлердің жоғары реттілігін ескере отырып, оптикалық талшықтардағы ашық және күңгірт солитондардың эволюциясын сипаттау қабілетімен танымал. Бұл мақалада дәл аналитикалық шешімдерді, соның ішінде мультисолитонды конфигурацияларды табуға мүмкіндік беретін Дарбу түрлендіруін қосымша құрастырамыз. Атап айтқанда, M-LXXII теңдеуі үшін бір солитонды шешім ұсынылған, ол оның көп қабатты және көп компонентті физикалық жүйелердегі нақты толқындық

құрылымдарды модельдеу үшін қолданылуын атап көрсетеді. Ұсынылған нәтижелер көп қабатты орталардағы күрделі сызықтық емес өзара әрекеттесулер мен динамикаларды одан әрі талдау үшін пайдаланылуы мүмкін, сонымен қатар әр түрлі материалдар мен құрылымдардағы толқындық процестерді модельдеу және басқарудың жаңа әдістерін дамытуға ықпал ететін қазіргі теориялық және математикалық физиканың қолданбалы мәселелерінде маңызды қолдануды табады.

Түйін сөздер: Екі компонентті Фокас-Ленэллс теңдеуі, спиндік жүйе, Лакс көрінісі, қос қабатты M-LXXII теңдеуі, Дарбу түрлендіруі, калибровті эквиваленттілік

Алғыс: *бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (Грант No AP25794905).*

©М.Б. Жасыбаева*, Ж. Мырзакулова, М. Абеуова, 2025.
Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
Астана, Казахстан.
E-mail: mbzhassybayeva@gmail.com

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ДАРБУ ДЛЯ ДВУХСЛОЙНОГО УРАВНЕНИЯ M-LXXII

Жасыбаева Меруерт — старший преподаватель кафедры общей и теоретической физики, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
E-mail: mbzhassybayeva@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8491-0893;
Мырзакулова Жайдары — PhD, старший преподаватель кафедры алгебры и геометрии, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
E-mail: zhrmyrzakulova@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4047-4484;
Абеуова Маржангуль — магистрант кафедры общей и теоретической физики, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
E-mail: abeuovamarzhan7@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0009-5678-6747.

Аннотация. В данной работе исследуется интегрируемая модель, предназначенная для описания нелинейных волновых процессов в многослойных средах, характерных для различных физических систем. К таким системам относятся оптические среды, магнитные материалы, плазменные образования, а также квантовые и спиновые структуры с внутренними степенями свободы. Основное внимание уделяется построению нового двухслойного уравнения M-LXXII, которое является калибровочно-эквивалентным двухкомпонентному уравнению Фокаса-Ленэллса. Данное уравнение представляет собой важное обобщение классических моделей, применяемых для описания сложных нелинейных взаимодействий в дисперсионных, анизотропных и пространственно неоднородных средах, включая эффекты многомодовости, многокомпонентности и пространственно-временной зависимости. Интегрируемость данной модели

CC BY NC

подтверждается путем построения пары Лакса, что позволяет применять методы интегральной геометрии и теории обратной задачи рассеяния. Уравнение Фокаса-Ленэллса известно своей способностью описывать эволюцию светлых и тёмных солитонов в оптических волокнах с учетом высших порядков нелинейных и дисперсионных эффектов. В рамках данной работы дополнительно построено преобразование Дарбу, позволяющее находить точные аналитические решения, включая многосолитонные конфигурации. В частности, приведено односолитонное решение для уравнения M-LXXII, что подчеркивает его применимость к моделированию конкретных волновых структур в многослойных и многокомпонентных физических системах. Представленные результаты могут быть использованы для дальнейшего анализа сложных нелинейных взаимодействий и динамики в многослойных средах, а также находят важное применение в прикладных задачах современной теоретической и математической физики, способствуя развитию новых методов моделирования и управления волновыми процессами в различных материалах и структурах.

Ключевые слова: двухкомпонентное уравнение Фокаса-Ленэллса, спиновая система, представление Лакса, двухслойное уравнение M-LXXII, преобразование Дарбу, калибровочная эквивалентность

«Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант No AP25794905)».

Введение. Некоторые физические явления в природе, включая распространение волн в оптических средах, динамику магнитных материалов и поведение плазмы, могут быть описаны с помощью спиновых и других многокомпонентных нелинейных систем, отражающих ключевые физические свойства моделируемых объектов. Спиновые системы представляют собой ансамбли взаимодействующих спинов, демонстрирующие коллективные эффекты, включая когерентные волновые процессы и солитоны. Такие системы встречаются в магнитных материалах, квантовых структурах и плазме.

Среди нелинейных уравнений особый интерес представляют уравнения типа Шрёдингера, описывающие эволюцию медленно модулированных волн в слабонелинейных дисперсионных средах. Они широко применяются в нелинейной оптике, квантовой физике, физике конденсированных состояний, а также в волновой гидродинамике (Chabchoub, 2016; Belyaeva, 2007; Carretero González, 2008; Myrzakulov, 2019). В последние десятилетия большое внимание уделяется изучению различных обобщений нелинейного уравнения Шрёдингера, включая учёт эффектов высших порядков, сильной дисперсии, взаимодействий между модами и нелинейных поправок.

Одним из таких обобщений является уравнение Фокаса-Ленэллса (ФЛ), которое описывает нелинейное распространение импульсов в оптических волокнах с учётом линейных и нелинейных оптических эффектов высшего порядка. Важной особенностью уравнения ФЛ по сравнению с классическим нелинейным

уравнением Шрёдингера является то, что оно допускает как светлые, так и тёмные солитонные решения (Matsuno, 2012a; Matsuno, 2012b). Интегрируемое уравнение ФЛ имеет вид (Hu, 2012; Fokas, 1995; Bekova, 2023).

$$iq_{xt} - iq_{xx} + 2q_x - |q|^2 q_x + iq = 0, \qquad (1)$$

где $q(x,t)-$ комплексная оболочка поля, x - расстояние распространения и t запаздывающее время, которые обозначают частичное дифференцирование по аргументам x,t и i - мнимая единица.

Кроме того, в последние годы наблюдается растущий интерес к многомодовым и многомерным моделям, превосходящим по сложности традиционные одномерные системы (Myrzakul, 2019). Рассматриваются многокомпонентные и многослойные системы, моделирующие взаимодействие волн с различными частотами, модами или поляризациями. Это особенно актуально в задачах волнового взаимодейсвия в сложных оптических структурах, многоуровневых квантовых системах, анизотропных средах, а также в спиновых системах и магнитных материалах с несколькими подсистемами (Geng, 2021; Song, 2017).

В данной работе находится двухслойное уравнения двухкомпонентного уравнения ФЛ, называемое двухслойным уравнением M-LXXII. Также, основной целью является построения преобразования Дарбу (ПД) для этого уравнения, что позволяет получать точные солитонные решения, а также исследовать динамику многослойных спиновых систем. Подобные подходы дают возможность глубже понять структуру и поведение сложных физических систем и находят все большее применение как в теоретических, так и в прикладных задачах.

Материалы и основные методы. В данной работе получено двухслойное уравнение M-LXXII, которое выводится из двухкомпонентного уравнения ФЛ с помощью калибровочного преобразования. Это уравнение описывает нелинейное взаимодействие волн в многослойных средах. Также, построена соответствующая пара Лакса. Далее применяется метод ПД, который позволяет находить точные аналитические решения, включая солитонные решения.

Таким образом, использованные методы включают:

• калибровочное преобразование;

• преобразование Дарбу.

Эти методы позволяют эффективно анализировать динамику многослойных и многокомпонентных нелинейных систем.

Результаты и обсуждение. В данной работе строим двухслойное уравнение M-LXXII, которое калибровочно эквивалентно двухкомпонентному уравнению ФЛ. Интерес к двухкомпонентным уравнениям обусловлен их способностью описывать взаимодействие волн с различными частотами. Поскольку они могут описывать волны разной частоты. Рассмотрим двухкомпонентное уравнение ФЛ (Feng, 2018):

CC BY NC

$$iq_{1xt} - iq_{1xx} + iq_1 - q_1 r_1 q_{1x} + 2q_{1x} - \frac{1}{2} q_2 r_2 q_{1x} - \frac{1}{2} q_1 r_2 q_{2x} = 0, \quad (2а)$$

$$iq_{2xt} - iq_{2xx} + iq_2 - q_2 r_2 q_{2x} + 2q_{2x} - \frac{1}{2} q_1 r_1 q_{2x} - \frac{1}{2} q_2 r_1 q_{1x} = 0, \quad (2б)$$

$$ir_{1xt} - ir_{1xx} + ir_1 + q_1 r_1 r_{1x} - 2r_{1x} + \frac{1}{2} q_2 r_2 r_{1x} + \frac{1}{2} q_2 r_1 r_{2x} = 0, \quad (2в)$$

$$ir_{2xt} - ir_{2xx} + ir_2 + q_2 r_2 r_{2x} - 2r_{2x} + \frac{1}{2} q_1 r_1 r_{2x} + \frac{1}{2} q_1 r_2 r_{1x} = 0, \quad (2г)$$

где $q_i, r_i -$ комплексные функции (* означает комплексное сопряжение), индексы x, t - частные производные, а и i - мнимое число.

Представление Лакса (ПЛ) для системы (2) имеет следующий вид:

$$\Psi_x = U_2 \Psi, \quad (3)$$

$$\Psi_t = V_2 \Psi, \quad (4)$$

в котором матричные операторы U_2 и V_2 опреднлены как

$$U_2 = -i\lambda^2 \Sigma + \lambda Q,$$

$$V_2 = -i\lambda^2 \Sigma + \lambda Q + i\frac{V_o}{2} + i\Sigma + \frac{i}{2\lambda} V_{-1} - \frac{i}{4\lambda^2} \Sigma,$$

и далее приведены явные формы матриц Σ, Q, V_o, V_{-1}

$$\Sigma = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \; Q = \begin{pmatrix} 0 & q_{1x} & q_{2x} \\ r_{1x} & 0 & 0 \\ r_{2x} & 0 & 0 \end{pmatrix}, \; V_0 = \begin{pmatrix} -(q_1 r_1 + q_2 r_2) & 0 & 0 \\ 0 & q_1 r_1 & r_1 q_2 \\ 0 & q_1 r_2 & q_2 r_2 \end{pmatrix}, \; V_{-1} = \begin{pmatrix} 0 & q_1 & q_2 \\ -r_1 & 0 & 0 \\ -r_2 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Теперь перейдем к построению двухслойного уравнения M-LXXII. Необходимо сначала найти для нее пару Лакса. Начнём с рассмотрения следующего калибровочного преобразования:

$$\Phi = g^{-1} \Psi, g = \Psi |_{\lambda = \lambda_0},$$

где $g(x,t)$ унитарная 3×3 матрица калибровочного преобразования.

Найдем производные векторной функции Φ по аргументам x и t:

$$\Phi_x = (g^{-1} \Psi_x - g^{-1} g_x g^{-1}) \Psi = U' \Phi, \quad (5)$$

$$\Phi_t = (g^{-1} \Psi_t - g^{-1} g_t g^{-1}) \Psi = V' \Phi. \quad (6)$$

CC BY NC

Выбираем $g(x,t)$ унитарную матрицу, удовлетворяющую совместной системе уравнений

$$g_x = U_0 g,$$
$$g_t = Wg,$$

здесь $U_0(x,t)$ и $W(x,t)$ являются антиэрмитовыми матрицами, удовлетворяющими условию нулевой кривизны в системе уравнений (3)-(4)

$$U_0(x,t) = -i\lambda_0^2 \sum + \lambda_0 Q,$$

$$W(x,t) = -i\lambda_0^2 \sum + \lambda_0 Q + \frac{i}{2} V_0 + i\sum + \frac{i}{2\lambda_0} V_{-1} - \frac{i}{4\lambda_0^2} \sum.$$

Где λ_0 - постоянная. Следовательно, учитывая (3)-(4) , получаем

$$\Phi_x = \left(-i(\lambda^2 - \lambda_0^2) g^{-1} \sum g + (\lambda - \lambda_0) g^{-1} Q g\right)\Phi,$$

$$\Phi_t = \left(-i(\lambda^2 - \lambda_0^2) g^{-1} \sum g + (\lambda - \lambda_0) g^{-1} Q g + \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0}\right) g^{-1} V_{-1} g - \frac{i}{4}\left(\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_0^2}\right) g^{-1} \sum g\right)\Phi.$$

Известно, что

$$g^{-1} \sum g = \Gamma, \quad \Gamma^2 = I.$$

После сложных вычислений и преобразований мы получили связь между решениями искомой спиновой системы и системой уравнений (2) в следующем виде:

$$g^{-1} Q g = \frac{1}{2\lambda_0} \Gamma \Gamma_x,$$

$$g^{-1} V_{-1} g = \frac{\lambda_0}{2} (\mathbf{\Gamma}_t - \mathbf{\Gamma}_x).$$

Теперь систему уравнений (5) и (6) можно переписать как

$$\Phi_x = \left(-i(\lambda^2 - \lambda_0^2)\Gamma + \frac{\lambda - \lambda_0}{2\lambda_0} \mathbf{\Gamma}_x\right)\Phi,$$

CC BY NC

$$\Phi_t = \left(-i\left(\lambda^2-\lambda_0^2+\frac{1}{4\lambda^2}-\frac{1}{4\lambda_0^2}\right)\Gamma+\left(\frac{\lambda}{2\lambda_0}-\frac{\lambda_0}{2\lambda}\right)\Gamma_x+\left(\frac{\lambda_0}{2\lambda}-\frac{1}{2}\right)\Gamma_t\right)\Phi.$$

Для удобства:

$$\Phi_x = U'\Phi, \qquad (7)$$

$$\Phi_t = V'\Phi, \qquad (8)$$

где

$$U' = -i(\lambda^2-\lambda_0^2)\Gamma+\frac{(\lambda-\lambda_0)}{2\lambda_0}\Gamma_x,$$

$$V' = -i\left(\lambda^2-\lambda_0^2+\frac{1}{4\lambda^2}-\frac{1}{4\lambda_0^2}\right)\Gamma+\left(\frac{\lambda}{2\lambda_0}-\frac{\lambda_0}{2\lambda}\right)\Gamma_x+\left(\frac{\lambda_0}{2\lambda}-\frac{1}{2}\right)\Gamma_t.$$

Таким образом, получается новое ПЛ.
Перекрестно дифференцируя уравнения (7) и (8) получаем

$$U_t' - V_x' + [U', V'] = 0. \qquad (9)$$

Здесь

$$U_t' = -i(\lambda^2-\lambda_0^2)\Gamma_t+\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}-1\right)(\Gamma_t\Gamma_x+\Gamma\Gamma_{xt}),$$

$$V_x' = \left(-i\left(\lambda^2-\lambda_0^2-\frac{1}{4\lambda_0^2}+\frac{1}{4\lambda^2}\right)\right)\Gamma_x+\left(\frac{\lambda}{2\lambda_0}-\frac{\lambda_0}{2\lambda}\right)(\Gamma_x^2+\Gamma\Gamma_{xx})+\left(\frac{\lambda_0}{2\lambda}-\frac{1}{2}\right)(\Gamma_x\Gamma_t+\Gamma\Gamma_{tx})$$

$$[U', V'] = -2i(\lambda^2-\lambda_0^2)\left(\frac{\lambda}{2\lambda_0}-\frac{\lambda_0}{2\lambda}\right)\Gamma_x-2i(\lambda^2-\lambda_0^2)\left(\frac{\lambda_0}{2\lambda}-\frac{1}{2}\right)\Gamma_t-\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}-1\right)\left(-i\left(\lambda^2-\lambda_0^2-\frac{1}{4\lambda_0^2}+\frac{1}{4\lambda^2}\right)\right)\Gamma_x+$$
$$+\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}-1\right)\left(\frac{\lambda_0}{2\lambda}-\frac{1}{2}\right)(\Gamma_t\Gamma_x-\Gamma_x\Gamma_t).$$

Подставим все это в уравнение (9) и рассмотрим его по степеням λ

$$\lambda^1 \;:\; -i\lambda_0\Gamma_t+i\lambda_0\Gamma_x-\frac{i\Gamma_x}{4\lambda_0^3}+\frac{1}{2\lambda_0}\Gamma_t\Gamma_x+\frac{1}{2\lambda_0}\Gamma\Gamma_{xt}-\frac{1}{2\lambda_0}\Gamma_x^2-\frac{1}{2\lambda_0}\Gamma\Gamma_{xx}-\frac{1}{4\lambda_0}[\Gamma_t,\Gamma_x]=0, \qquad (10)$$

$$\lambda^0 \;:\; -\frac{1}{2}\Gamma_t\Gamma_x-\frac{1}{2}\Gamma\Gamma_{xt}+\frac{1}{2}\Gamma_x\Gamma_t+\frac{\Gamma\Gamma_{tx}}{2}+\frac{1}{2}[\Gamma_t,\Gamma_x]=0, \qquad (11)$$

$$\lambda^{-1} \;:\; i\lambda_0^3\Gamma_t-i\lambda_0^3\Gamma_x+\frac{i\Gamma_x}{4\lambda_0}-\frac{\lambda_0}{2}\Gamma_x\Gamma_t-\frac{\lambda_0}{2}\Gamma\Gamma_{tx}+\frac{\lambda_0}{2}\Gamma_x^2+\frac{\lambda_0}{2}\Gamma\Gamma_{xx}-\frac{\lambda_0}{4}[\Gamma_t,\Gamma_x]=0. \qquad (12)$$

CC BY NC

Умножая уравнение (10) на $-1/\lambda_0$, имеем

$$i\Gamma_t - i\Gamma_x + \frac{i\Gamma_x}{4\lambda_0^4} - \frac{1}{2\lambda_0^2}\left(\Gamma_t\Gamma_x + \Gamma\Gamma_{xt} - \Gamma_x^2 - \Gamma\Gamma_{xx} - \frac{[\Gamma_t, \Gamma_x]}{2}\right) = 0,$$

или

$$i\Gamma_t + \frac{1}{4\lambda_0^2}[\Gamma, \Gamma_{xx} - \Gamma_{xt}] + \frac{i(1-4\lambda_0^4)}{4\lambda_0^4}\Gamma_x = 0, \qquad (13)$$

здесь квадратные скобки обозначают коммутаторы. Таким образом, уравнение (19) представляет собой искомое двухслойное уравнение M-LXXII.

Теперь, построим ПД для уравнения (13). ПД представляет собой один из ключевых методов интегрируемой теории, позволющий на основе известных решений систематически строить новые, зачастую более сложные структуры (Matveev, 1991; Myrzakulov, 2016; Huang, 1989). Его применение к двухслойному уравнению M-LXXII не только сохраняет интегрируемость системы, но и порождает богатую иерархию решений, от солитонных до рациональных и других типовых форм.

В этом разделе построим ПД для уравнения (13). Пусть

$$\Phi' = L\Phi,$$

где матрица L

$$L = \lambda N - I.$$

Φ' должен удовлетворят тем же ПЛ, что и уравнения (7) и (8), так что

$$\Phi'_x = U'\Phi',$$
$$\Phi'_t = V'\Phi',$$

в котором матричные операторы U' и V' зависят от Γ', как матричные операторы U и V от Γ. Кроме того, они имеют следующий вид:

$$U' = -i(\lambda^2 - \lambda_0^2)\Gamma' + \frac{(\lambda - \lambda_0)}{2\lambda_0}\Gamma'\Gamma'_x,$$

CC BY NC

$$V' = -i\left(\lambda^2 - \lambda_0^2 + \frac{1}{4\lambda^2} - \frac{1}{4\lambda_0^2}\right)\Gamma' + \left(\frac{\lambda}{2\lambda_0} - \frac{\lambda_0}{2\lambda}\right)\Gamma'\Gamma'_x + \left(\frac{\lambda_0}{2\lambda} - \frac{1}{2}\right)\Gamma'\Gamma'_t.$$

Матрица L подчиняется следующим уравнениям:

$$L_x + LU = U'L, \qquad (14)$$

$$L_t + LV = V'L. \qquad (15)$$

Таким образом, из уравнения (14) получаем

$$\Gamma' = N\Gamma N^{-1},$$
$$N_x = 0,$$

и из уравнения (15) имеем

$$\Gamma' = \Gamma,$$
$$N_t = 0$$

Теперь предположим, что матрицу N можно записать как

$$N = H\Lambda^{-1}H^{-1} = \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} \end{pmatrix} \qquad (16)$$

и

$$N^{-1} = H\Lambda H^{-1} = \frac{1}{n}\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix}, \qquad (17)$$

где

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix}, \qquad (18)$$

и $n = n_{11}n_{22}n_{33} + n_{12}n_{23}n_{31} + n_{13}n_{32}n_{21} - n_{31}n_{22}n_{13} - n_{12}n_{21}n_{33} - n_{11}n_{23}n_{32}$.

После некоторых вычислений следует

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_1^*, \quad H = \begin{pmatrix} \psi_1(\lambda_1;t,x) & -\psi_2^*(\lambda_1;t,x) & -\psi_3^*(\lambda_1;t,x) \\ \psi_2(\lambda_1;t,x) & \psi_1^*(\lambda_1;t,x) & 0 \\ \psi_3(\lambda_1;t,x) & 0 & \psi_1^*(\lambda_1;t,x) \end{pmatrix},$$

$$H^{-1} = \frac{1}{\Delta\psi_1^*}\begin{pmatrix} \psi_1^2 & \psi_1^*\psi_2^* & \psi_1^*\psi_3^* \\ -\psi_1^*\psi_2 & |\psi_1|^2 + |\psi_3|^2 & -\psi_2\psi_3^* \\ -\psi_1^*\psi_3 & -\psi_2^*\psi_3 & |\psi_1|^2 + |\psi_2|^2 \end{pmatrix},$$

в котором

$$\Delta \neq |\psi_1|^2 + |\psi_2|^2 + |\psi_3|^2 .$$

И так, для матрицы N получаем следующее выражение

$$N = \frac{1}{\Delta}\begin{pmatrix} \frac{|\psi_1|^2}{\lambda_1} + \frac{|\psi_2|^2}{\lambda_2} + \frac{|\psi_3|^2}{\lambda_3} & \psi_1\psi_2^*\varepsilon_{12} + \frac{\psi_2^*|\psi_3|^2}{\psi_1^*}\varepsilon_{32} & \psi_1\psi_3^*\varepsilon_{13} + \frac{\psi_3^*|\psi_2|^2}{\psi_1^*}\varepsilon_{23} \\ \psi_1^*\psi_2\varepsilon_{12} & \frac{|\psi_2|^2}{\lambda_1} + \frac{|\psi_1|^2 + |\psi_3|^2}{\lambda_2} & \psi_2\psi_3^*\varepsilon_{12} \\ \psi_1^*\psi_3\varepsilon_{13} & \psi_2^*\psi_3\varepsilon_{13} & \frac{|\psi_3|^2}{\lambda_1} + \frac{|\psi_1|^2 + |\psi_2|^2}{\lambda_3} \end{pmatrix}, \tag{19}$$

$$N^{-1} = \frac{1}{\Delta}\begin{pmatrix} \lambda_1|\psi_1|^2 + \lambda_2|\psi_2|^2 + \lambda_3|\psi_3|^2 & \psi_1\psi_2^*(\lambda_1 - \lambda_2) + \frac{\psi_2^*|\psi_3|^2}{\psi_1^*}(\lambda_3 - \lambda_2) & \psi_1\psi_3^*(\lambda_1 - \lambda_3) + \frac{\psi_3^*|\psi_2|^2}{\psi_1^*}(\lambda_2 - \lambda_3) \\ \psi_1^*\psi_2(\lambda_1 - \lambda_2) & \lambda_1|\psi_2|^2 + \lambda_2(|\psi_1|^2 + |\psi_3|^2) & \psi_2\psi_3^*(\lambda_1 - \lambda_2) \\ \psi_1^*\psi_3(\lambda_1 - \lambda_3) & \psi_2^*\psi_3(\lambda_1 - \lambda_3) & \lambda_1|\psi_3|^2 + \lambda_3(|\psi_1|^2 + |\psi_2|^2) \end{pmatrix}, \tag{20}$$

Следовательно, можно записать ПД в терминах собственных функций ПЛ (7) и (8) как

$$\Gamma^{[1]} = \frac{1}{\Delta}\begin{pmatrix} n_{11}m_{11} - n_{12}m_{21} - n_{13}m_{31} & n_{11}m_{12} - n_{12}m_{22} - n_{13}m_{32} & n_{11}m_{13} - n_{12}m_{23} - n_{13}m_{33} \\ n_{21}m_{11} - n_{22}m_{21} - n_{23}m_{31} & n_{21}m_{12} - n_{22}m_{22} - n_{23}m_{32} & n_{21}m_{13} - n_{22}m_{23} - n_{23}m_{33} \\ n_{31}m_{11} - n_{32}m_{21} - n_{33}m_{31} & n_{31}m_{12} - n_{32}m_{22} - n_{33}m_{32} & n_{31}m_{13} - n_{32}m_{23} - n_{33}m_{33} \end{pmatrix}.$$

CC BY NC

Для построения 1-солитонного решения Γ -спиновой системы (13), рассмотрим нулевое решение

$$\Gamma^{[0]} = \Sigma. \qquad (21)$$

В этом случае собственные функции задаются как

$$\psi_1 = e^{-i\lambda^2 x - i\left(\lambda^2 - 1 + \frac{1}{4\lambda^2}\right)t + i\delta_1} = e^{-\theta + i\delta_1},$$

$$\psi_2 = e^{i\lambda^2 x + i\left(\lambda^2 - 1 + \frac{1}{4\lambda^2}\right)t + i\delta_2} = e^{\theta + i\delta_2},$$

$$\psi_3 = e^{i\lambda^2 x + i\left(\lambda^2 - 1 + \frac{1}{4\lambda^2}\right)t + i\delta_2} = e^{\theta + i\delta_3},$$

где δ_i комплексные постоянные и

$$\theta = \theta_1 + i\theta_2 = -i\lambda^2 x - i\left(\lambda^2 - 1 + \frac{1}{4\lambda^2}\right)t.$$

Тогда мы получаем

$$\Gamma^{[1]} = \begin{pmatrix} \Gamma_1^{[1]} & \Gamma_2^{[1]} & \Gamma_3^{[1]} \\ \Gamma_2^{[1]} & \Gamma_2^{[1]} & \Gamma_3^{[1]} \\ \Gamma_3^{[1]} & \Gamma_3^{[1]} & \Gamma_3^{[1]} \end{pmatrix},$$

где n_{ij} и m_{ij} задаются уравнениями (19), (20) и (21).

Таким образом, в ходе исследования получено двухслойное уравнение M-LXXII, которое является калибровочно эквивалентным двухкомпонентному уравнению ФЛ. Для этой модели построена пара Лакса, что подтверждает её интегрируемость. С помощью метода Дарбу разработано преобразование, позволяющее находить различные точные решения. В частности, представлена схема получения односолитонного решения. Полученные результаты демонстрируют эффективность применённого подхода для анализа и моделирования нелинейных процессов в сложных физических системах.

Заключение. В данной работе с помощью калибровочного преобразования было построено двухслойное уравнение, эквивалентное двухкомпонентному

уравнению ФЛ. Построение пары Лакса для полученного уравнения подтвердило его интегрируемость, что позволило далее сконструировать преобразование Дарбу, обеспечивающее механизм получения точных аналитических решений. В частности, представлена конструкция односолитонного решения, демонстрирующая возможность описания волновых структур в многослойных средах.

Таким образом, построенное двухслойное уравнение M-LXXII и соответствующие методы интегрирования открывают перспективы для дальнейших исследований в области нелинейной динамики и математической физики, особенно в контексте моделирования многослойных и многокомпонентных взаимодействий.

References

Bekova G., Myrzakulov R., Yesmakhanova K., & Zhassybayeva M. (2023) Integrable motions of curves of the induced Fokas-Lenells equation. Optik, 286. — P. 170979. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.170979 (in Eng.).

Belyaeva T.L., Hasegawa A., & Serkin V.N. (2007) Nonautonomous solitons in external potentials. Physical Review Letters, 98. — P. 074102. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.074102 (in Eng.).

Carretero-González R., Frantzeskakis D.J., & Kevrekidis P.G. (2008) Nonlinear waves in Bose-Einstein condensates: Physical relevance and mathematical techniques. Nonlinearity, 21. — P. R139-R202. https://doi.org/10.1088/0951-7715/21/4/R01 (in Eng.).

Chabchoub A., & Grimshaw R.H.J. (2016) The hydrodynamic nonlinear Schrödinger equation: Space and time. Fluids, 1(3). — P. 23. https://doi.org/10.3390/fluids1030023 (in Eng.).

Feng B.F., Ling L., & Zhu Z. (2018) General soliton solutions to a coupled Fokas-Lenells equation. Nonlinear Analysis: Real World Applications, 40, — P. 185—214. https://doi.org/10.1016/j.nonrwa.2017.09.012 (in Eng.).

Fokas A.S. (1995) On a class of physically important integrable equations. Physica D, 87. — P. 145—150. https://doi.org/10.1016/0167-2789(95)00126-X (in Eng.).

Geng X., Li Y., Wei J., & Zhai Y. (2021) Darboux transformation of a two-component generalized Sasa-Satsuma equation and explicit solutions. Mathematical Methods in the Applied Sciences, 44. — P. 12727—12745. https://doi.org/10.1002/mma.7219 (in Eng.).

Hu J., Kuppuswamy P., & Xu S. (2012) Rogue waves of the Fokas-Lenells equation. Journal of the Physical Society of Japan, 81(12), — P. 124007. https://doi.org/10.1143/JPSJ.81.124007 (in Eng.).

Huang N.N., & Xu B. (1989) Darboux transformation method for finding soliton solutions of the Landau-Lifshitz equation of a classical Heisenberg spin chain. Communications in Theoretical Physics, 12. — P. 121—126. (in Eng.).

Matsuno Y. (2012) A direct method of solution for the Fokas-Lenells derivative nonlinear Schrödinger equation II: Dark soliton solutions. Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 45(47). — P. 475204. https://doi.org/10.1088/1751-8113/45/47/475204 (in Eng.).

Matsuno Y. (2012) A direct method of solution for the Fokas-Lenells derivative nonlinear Schrödinger equation I: Bright soliton solutions. Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 45(23). — P. 235201. https://doi.org/10.1088/1751-8113/45/23/235201 (in Eng.).

Matveev V.B., & Salle M.A. (1991) Darboux transformations and solitons. Springer, Berlin. https://doi.org/10.1007/978-3-642-61630-2 (in Eng.).

Myrzakul Zh.R., & Zhadyranova A.A. (2019) Soliton surface associated with the WDVV equation for the n = 3 case. Journal of Physics: Conference Series, 1391(1). — P. 012105. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1391/1/012105 (in Eng.).

Myrzakulov K.R., Myrzakul Z.R., & Zhadyranova A.A. (2019) Soliton surface associated with the oriented associativity equation for the n = 3 case. International Journal of Mathematical Physics, 10(2). — P. 63—67. https://doi.org/10.18454/IJMP.2019.10207 (in Eng.).

Myrzakulov R., Nugmanova G., Yesmakhanova K., Yersultanova Z.S., & Zhassybayeva M. (2016) Integrable motion of curves in self-consistent potentials: Relation to spin systems and soliton equations. International Journal of Geometric Methods in Modern Physics, 13(1). — P. 1650004. https://doi.org/10.1142/S0219887816500049 (in Eng.).

Song C.Q., Xiao D.M., & Zhu Z.N. (2017) Soliton and rogue wave solutions of a two-component nonlinear Schrödinger equation coupled to the Boussinesq equation. Chinese Physics B, 26. — P. 100204. https://doi.org/10.1088/1674-1056/26/10/100204 (in Eng.).

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 38–51

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.382

UDC 538.9
SRSTI 44.41.35

©G.K. Beketova*, N.N. Zhanturina, Z.K. Aimaganbetova, 2025.
K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan.
E-mail: Diko_2006@mail.ru

$Cs_2AgBiBr_6$ DOUBLE HALIDE PEROVSKITES AS ADVANCED MATERIALS FOR HIGH-EFFICIENCY SOLAR CELLS

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;
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;
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.

Abstract. Among all double perovskites, $Cs_2AgBiBr_6$ has proven to be the most promising and commercially viable. The methods of obtaining of double halide perovskite, such slow crystallization method, solution deposition method, spin-coating method were considered. Results of band gap calculation are presented in the work. The range of it according to different studies includes from 1.6 eV to 2.25 eV depending on calculation method. Valuable review was done in the direction of efficiency, which is dependent on the architecture of solar cell and layers combination. Different solar cells based on $Cs_2AgBiBr_6$ were analysed. Optoelectronic properties — absorption, luminescence, photocurrent, luminescence kinetics were considered from different papers. Absorption coefficient of $Cs_2AgBiBr_6$ is 10^5, an absorption spectrum (350-610 nm), charge carrier mobility (1 $cm^2V^{-1}s^{-1}$), and charge carrier lifetime of 1.4 ms, which is an order of magnitude longer than that in lead-based perovskites. Additionally, they exhibit notable luminescent properties, with a luminescence spectrum in the range of 400-600 nm and decay times up to 600 ns. The performance of solar cells is influenced also by the values of photocurrent and voltage exhibited by the sample. The voltage considered in different works varied from 1.03 V to 1.07 V, and the photocurrent ranged from 0.78 to 1.78 $mA \cdot cm^{-2}$.

Keywords: $Cs_2AgBiBr_6$, solar cells, efficiency, band gap, absorption, photocurrent, luminescence, luminescence kinetics

CC BY NC

Acknowledgements. *This research was funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan by project № AP26195173 Optoelectronic properties of pure and transition/semiconducting metal ion-doped double halide perovskites.*

©Г.К. Бекетова*, Н.Н. Жантурина, З.К. Аймаганбетова, 2025.
Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе,
Қазақстан. E-mail: Diko_2006@mail.ru

$Cs_2AgBiBr_6$ ҚОС ГАЛОИДТЫ ПЕРОВСКИТТЕР: КҮН БАТАРЕЯЛАРЫНА АРНАЛҒАН ТИІМДІЛІГІ ЖОҒАРЫ ЖАҢА ОЗЫҚ МАТЕРИАЛДАРЫ

Бекетова Гульнара — «Физика» білім беру бағдарламасының PhD докторанты, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан,
E-mail: Diko_2006@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-9213-7586;
Жантурина Нургул — PhD, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, физика кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Ақтөбе, Қазақстан,
E-mail: nzhanturina@zhubanov.edu.kz; https://orcid.org/0000-0001-9540-6334;
Аймаганбетова Зухра — PhD, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, физика кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Ақтөбе, Қазақстан,
E-mail: zukhra.aimaganbetova@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-8765-516X.

Аннотация. Барлық қос перовскиттердің ішінде перспективті және коммерциялық тұрғыдан тиімді материалдардың бірі болып $Cs_2AgBiBr_6$ табылады. Соңғы жылдары бұл материал экологиялық қауіпсіздігімен, жоғары тұрақтылығымен және қолайлы оптоэлектрондық қасиеттерімен зерттеушілер назарын ерекше аударуда. Жұмыста қос галоидті перовскитті алу әдістері, мысалы, баяу кристалдану әдісі, ерітіндіні тұндыру әдісі және айналдыру (spin-coating) әдісі қарастырылады. Әрбір тәсіл кристалдардың сапасына, жұқа қабаттардың біртектілігіне және дайын күн элементтерінің сипаттамаларына өзіндік әсер береді. Мақалада жолақ аралығын есептеу нәтижелері ұсынылған. Әртүрлі зерттеулер бойынша оның диапазоны есептеу әдісіне байланысты 1.6 эВ-тен 2.25 эВ-қа дейінгі аралықты қамтиды. Сондай-ақ күн элементі құрылымының тиімділігі мен қабаттар комбинациясын талдауға арналған шолу жүргізілген. $Cs_2AgBiBr_6$ негізіндегі әртүрлі күн батареялары да таңдалған. Ғылыми басылымдар деректеріне сүйене отырып, материалдың негізгі оптоэлектрондық қасиеттері — жарықты жұту, люминесценция, фототок және люминесценция кинетикасы талданады. $Cs_2AgBiBr_6$ жұтылу коэффициенті 10^5, жұтылу спектрі 350-610нм аралығында орналасқан. Заряд тасымалдаушылардың қозғалтқыштығы шамамен $1см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$ және заряд тасымалдаушының қызмет ету мерзімі 1.4мс, бұл қорғасын негізіндегі перовскиттермен салыстырғанда үлкенірек болып келеді. Сонымен қатар, материал айқын люминесценттік қасиеттерге ие: олар 400-600 нм диапазонында люминесценция спектрі және сөну уақыты 600 нм дейін жетеді. Күн батареяларының жұмыс өнімділігіне фототок пен үлгінің кернеу мәндері де әсер

етеді. Әртүрлі зерттеулерде кернеу 1.03 В-тан 1.07 В-қа дейін жетеді, ал фототок 0.78- 1.78 мА·см$^{-2}$ аралығында болғаны көрсетілген. Бұл көрсеткіш $Cs_2AgBiBr_6$ материалын жоғары тиімді және экологиялық таза күн технологияларын дамыту үшін үлкен перспективті негіз ретінде көрсетеді.

Түйін сөздер: $Cs_2AgBiBr_6$, күн батареялары, тиімділік, жолақ аралығы, жұту, фототок, люминесценция, люминесценция кинетикасы

©Г.К. Бекетова*, Н.Н. Жантурина, З.К. Аймаганбетова, 2025.
Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова.
E-mail: Diko_2006@mail.ru

$Cs_2AgBiBr_6$: ДВОЙНЫЕ ГАЛОИДНЫЕ ПЕРОВСКИТЫ КАК ПЕРЕДОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Бекетова Гульнара — PhD докторант образовательной программы «Физика», Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Актобе, Казахстан,
E-mail: Diko_2006@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-9213-7586;
Жантурина Нургул — PhD, Ассоциированный профессор кафедры «Физика», Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Актобе, Казахстан,
E-mail: nzhanturina@zhubanov.edu.kz; https://orcid.org/0000-0001-9540-6334;
Аймаганбетова Зухра — PhD, Ассоциированный профессор кафедры «Физика», Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Актобе, Казахстан,
E-mail: zukhra.aimaganbetova@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-8765-516X.

Аннотация. Среди всех двойных перовскитов одним из наиболее перспективных и коммерчески жизнеспособных материалов признан $Cs_2AgBiBr_6$, который в последние годы привлекает особое внимание исследователей благодаря сочетанию экологической безопасности, стабильности и благоприятных оптоэлектронных характеристик. В работе рассмотрены основные методы получения двойных галоидных перовскитов, такие как метод медленной кристаллизации, осаждение из раствора и метод центрифугирования (spin-coating). Каждый из этих методов обладает своими преимуществами, влияющими на качество кристаллов, однородность плёнок и конечные параметры солнечных элементов. В статье приведены результаты расчётов ширины запрещённой зоны $Cs_2AgBiBr_6$. Согласно различным исследованиям, она варьируется от 1.6 до 2.25 эВ в зависимости от метода расчёта. Проведена обзорная работа по оценке эффективности структуры солнечного элемента и комбинации слоёв. Проанализированы различные солнечные элементы на основе $Cs_2AgBiBr_6$. По данным научных публикаций рассмотрены оптоэлектронные свойства материала: поглощение, люминесценция, фототок и кинетика люминесценции. Коэффициент поглощения $Cs_2AgBiBr_6$ составляет 10^5; диапазон спектра поглощения — 350- 610 нм; подвижность носителей заряда — около 1 см^2·В$^{-1}$·с$^{-1}$; время жизни носителей — до 1.4 мс, что на порядок выше, чем у свинцовых перовскитов. Материал также обладает выраженными люминесцентными свойствами: спектр

CC BY NC

люминесценции лежит в диапазоне 400-600 нм. На эффективность солнечных элементов дополнительно влияют значения фототока и напряжения: в различных исследованиях напряжение варьировалось от 1.07 до 1.30 В, а фототок — от 0.78 до 1.78 мА·см$^{-2}$. Эти показатели подтверждают перспективность $Cs_2AgBiBr_6$ в качестве основы для развития высокоэффективных и экологически безопасных солнечных технологий.

Ключевые слова: $Cs_2AgBiBr_6$, солнечные батареи, эффективность, ширина запрещенной зоны, поглощение, фототок, люминесценция, кинетика люминесценции

Introduction. As photovoltaic elements and materials for solar cells, materials are primarily evaluated based on their band gap properties, absorption coefficient, and stability. The band gap should correspond approximately to the solar spectrum, in the range of about 1.1 eV to 1.7 eV. The absorption coefficient must be sufficiently high to enable the use of extremely thin material layers. On average, this value ranges from 10^2 to 10^5 cm^{-1} (Robert L.Z. et al., 2018).

Double halide perovskites are promising candidates as materials for solar energy applications. They are called "double" because, whereas a simple perovskite has the formula ABX_3, a double perovskite follows the formula $A_2B_1B_2X_6$, where B_1 is a monovalent cation and B_2 is a trivalent cation. A 2×2×2 supercell is formed, in which combinations of cations can produce a material with unique physicochemical properties, a large band gap, high absorption coefficient, and long carrier lifetimes (Sirtl Maximilian T. et al., 2022)

For example, when time-resolved photoluminescence was measured, the charge carrier lifetimes in these materials exceeded 100 ns, which is an order of magnitude greater than the required minimum (Slavney A. H. et al., 2016). Another advantage of double perovskites is that they are lead-free and therefore less toxic.

Among all double perovskites, $Cs_2AgBiBr_6$ has proven to be the most promising and commercially viable. Substituting Cs^+ cations at the A-site increases the decomposition energy of the perovskite from − 0.111 eV (for $MAPbI_3$) to − 0.069 eV (for $CsPbI_3$), thereby improving material stability. Toxic lead is replaced with silver (Ag^+) and bismuth (Bi^{3+}) cations. This not only reduces toxicity but also enhances stability by increasing the Coulombic interaction energy (Alkhammash H. I. et al., 2023).

$Cs_2AgBiBr_6$ has an optimal crystal structure, long charge carrier lifetimes, and greater stability compared to lead-based analogues (Yang J. et al., 2018). Another notable feature is that Bi^{3+} shares the same electronic configuration as Pb^{2+}, which is crucial for light absorption and prolonged charge carrier lifetimes (Ji F. et al., 2023).

This review article discusses the structure, synthesis methods, and key optoelectronic properties of $Cs_2AgBiBr_6$, which make it a strong candidate for use in solar cell materials.

Materials and methods. The efficiency of a solar cell, the value of the band gap, and the charge carrier lifetime depend on the crystal growth method. Generally, solution deposition, slow crystallization from solution, and spin-coating methods are used.

In the slow crystallization method, the solution is first saturated with CsBr, AgBr,

CC BY NC

and $BiBr_3$ salts, then cooled to approximately 4°C, leading to crystal formation. The solvent is HBr or another acidic solution. This method is suitable for obtaining single crystals.

For obtaining the purest crystals with good optical properties, the solution deposition method is used. In this method, a mixture of precursors is first placed in solvents such as Isopropyl Alcohol (IPA), Hydroiodic Acid (HI), Dimethyl Sulfoxide (DMSO), or Chlorobenzene (CB) at high temperature. Then the solution is cooled, or the solvents are evaporated, leaving behind crystals.

For film formation, the spin-coating method is suitable. In this method, the dissolved $Cs_2AgBiBr_6$ powder in DMSO (0.5 mol/L) is applied to a substrate using spin-coating, then cured under low pressure (LPA).

Let us consider the various methods used in studies.

In study (Robert L.Z. et al., 2018), a $Cs_2AgBiBr_6$ crystal was grown by the slow crystallization method at low temperature from a saturated solution. The precursors CsBr, AgBr, and $BiBr_3$ were mixed in HBr. After stirring for one hour, the solution was slowly cooled and placed in a refrigerator at 4°C. Crystals grew over one week using vacuum filtration, followed by immersion in acetone.

In work (Yang J. et al., 2018), $Cs_2AgBiBr_6$ powder was dissolved in DMSO at a concentration of 0.5 mol/L, forming a clear light-yellow solution. A uniform $Cs_2AgBiBr_6$ film was obtained using an optimized LPA method, similar to methods used for the fabrication of organic—inorganic hybrid perovskite films under standard conditions. The solution was deposited onto a glass/ITO substrate using the spin-coating method, after which the film was transferred to a low-pressure chamber for further solidification. Compared to traditional thermal annealing (TA), the LPA method gave a film with higher uniformity and good crystallinity, as confirmed by microscopic images. The lattice constant of the crystal synthesized in this way was a = 11.2640(8) Å.

The most common method for obtaining crystals is the method of precipitation in solution. $BiBr_3$, CsBr, AgBr are dissolved in isopropanol (IPA, 99.5%), hydroiodic acid (HI, 57% in H_2O, 99.95%), dimethyl sulfoxide (DMSO, anhydrous, 99.8%) and chlorobenzene (CB, 99.8%). The composition of the mixture is thoroughly stirred at a temperature of 120 °C, until the solvents evaporate, leaving behind raspberry-colored crystals. The mixture is then gradually cooled at a rate of 5 °C per hour. The entire set of components is left to stand overnight. After precipitation, the crystals are separated by filtration and washed with ethanol, dried in a vacuum at 60 °C, resulting in $Cs_2AgBiBr_6$.

Results and discussion. *Structure.* Slavney et al. were the first to successfully synthesize the cubic $Fm\bar{3}m$ double perovskite $Cs_2AgBiBr_6$ with an indirect band gap of 1.95 eV (Li Z. et al., 2020), (Savory Ch.N. et al., 2016). The crystal structure is shown in Figure 1.

CC BY NC

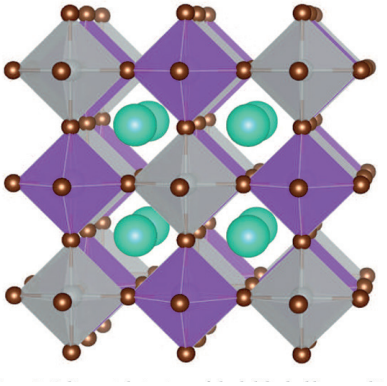


Figure 1. The structure of $Cs_2AgBiBr_6$

The green spheres represent Cs^+ ions, which occupy the large voids between the octahedra. The grey and violet atoms are Ag^+ and Bi^{3+}, respectively; they alternate within the octahedra formed by Br^- atoms. The brown Br^- spheres are located at the vertices of the octahedra, coordinating the silver and bismuth cations. In this structure, both Ag^+ and Bi^{3+} are surrounded by six Br^- anions.

The conduction band minimum of $Cs_2AgBiBr_6$ originates from antibonding Bi 6p—Br 4p orbitals at the L point, and the valence band maximum from Ag 4d—Br 4p at the X point (Ji F. et al., 2023).

The valence band consists of silver cations and bromide anions, while the conduction band includes silver and bismuth cations.

The band gap width plays an important role for a solar cell material, and it depends both on the method of crystal synthesis and on the method of measurement, whether theoretical or experimental.

In work (Yang J. et al., 2018), the band gap width of the crystal, calculated from the ultraviolet region of the absorption spectrum, is 2.05 eV.

According to HSE06+SOC calculations, the direct and indirect transition energies in the investigated material are 2.45 eV and 1.79 eV, respectively. The conduction band width is calculated to be 0.75 eV, and the Spectroscopic Limited Maximum Efficiency is at the level of 7.92% (Savory Ch.N. et al., 2016).

A range of values has also been obtained for the band gap width of the investigated material: 1.95 eV (Slavney A. H. et al., 2016), 2.19 eV — (Li Z. et al., 2020) 2.25 eV — (Yang J. et al., 2018), 1.95—2,19 eV (McClure E. T. et al., 2016), 1.91 eV (A.Ullah et al., 2024).

According to first-principles calculations, the band gap in the material is indirect and was found to be 1.654 eV. This value is lower than that of $Cs_2AgBiCl_6$ (2.77 eV) and $Cs_2AgInCl_6$ (3.23 eV). - (McClure E. T. et al., 2016).

Band gap engineering of $Cs_2AgBiBr_6$ has been achieved through the introduction of defects and doping with trivalent metals (Yang J. et al., 2018). In order to create a direct band gap material from $Cs_2AgBiBr_6$, it is necessary to introduce an impurity with valence s-electron states that can occupy the silver site. These can be In or Tl ions. For

example, the addition of 0.075% Tl(I) enabled the formation of a direct band gap of 1.57 eV for $Cs_2AgBiBr_6$ and 1.86 eV for $Cs_2Ag(Bi_{6\cdot625}Sb_{2\cdot375})Br_6$. However, according to studies, the decomposition energies of such structures were found to be negative, indicating their instability, whereas the decomposition energy of the base material with silver is 0.38 eV, and for $Cs_2AgBiCl_6$ it is 0.57 eV (Savory Ch.N. et al., 2016).

Hydrogenation technology is also applied to tune the band gap width and significantly improve the optoelectronic properties of perovskites. Before plasma treatment for hydrogenation, the $Cs_2AgBiBr_6$ samples were indirect semiconductors with a band gap of 2.18 eV. However, after treatment, a reduction in the band gap to 1.91 eV was observed (Alkhammash H. I. et al., 2023).

In principle, a direct band gap is not a strict requirement for solar cell materials; thicker layers can be selected to ensure effective optical absorption.

Nevertheless, despite the fact that this structure is lead-free and ideal for optoelectronic applications, the challenge in commercialization lies in the fabrication of thin films for use as solar cell components.

Efficiency improvements

The first solar cell based on $Cs_2AgBiBr_6$ had the following layer structure: FTO/ETL/PAL/HTL/Au. Instead of ETL — AZnO, CdZnS, LBSO, and Nb_2O_5; HTL — CZTSe, CdTe, PTAA, TiO_2:N, $NiCo_2O_4$, Sb_2S_3, nPB, GaAs, ZnTe, CNTS.

Among previous studies, Alkhammash et al. achieved the highest PCE (21.88%) using the structure FTO/ZnO/$Cs_2AgBiBr_6$/NiO/Au (Alkhammash H. I. et al., 2023).

At the same time, experimental works using the structures FTO/TiO_2/$Cs_2AgBiBr_6$/Spiro-OMeTAD/Au and FTO/TiO_2/$Cs_2AgBiBr_6$/Spiro-OMeTAD/MoO_3/Ag demonstrated PCEs of 1.66% (E. Greul et al., 2017) and 2,51% (Igbari F. et al., 2019), respectively, which do not meet the expectations of Greul E. et al., 2017, Igbari F. et al., 2019.

However, in the study main, by combining ten different HTLs and four ETLs, an outstanding efficiency of 23.50% was achieved for the proposed structure FTO/AZnO/$Cs_2AgBiBr_6$/CNTS/Au, which is an exceptional result.

In (Yang J. et al., 2018), the solar cell architecture with the base element was chosen as n-i-p type with ETL — SnO_2 and HTL — poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) (P3HT). However, this cell demonstrated an efficiency of 1.44% at an annealing temperature of 250 °C. According to experiments, poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) as a hole transport material showed significant instability. In contrast, the architecture without HTL exhibited greater stability.

In (Alkhammash H. I. et al., 2023), a hydrogenated sample of $Cs_2AgBiBr_6$ was used, and hydrogenation through the plasma method, depending on the duration of treatment, increased the degree of hydrogen penetration from the surface to the middle layer. Here, instead of the hole transport material, Spiro-OMeTAD was used, and SnO_2 served as the ETL. The highest achieved efficiency was 6.37%.

Despite the stability of perovskite solar cells, the exciton binding energy in $Cs_2AgBiBr_6$ is an order of magnitude higher than in the classical MAPbI□, which explains the relatively low efficiency of the former (Yang J. et al., 2018).

In recent years, several experiments have been conducted to improve the characteristics of $Cs_2AgBiBr_6$:

CC BY NC

• Greul and co-authors experimentally studied this material and achieved a PCE of 1.66% (Greul E. et al., 2017).

• Igabari and his team conducted further research and achieved a PCE of 2.51% (Igbari F. et al., 2019).

• Theoretical studies also played an important role. Zhang and Alanazi combined SnO_2 and Spiro-OMeTAD with $Cs_2AgBiBr_6$, achieving PCEs of 6.37% (Zhang Z. et al., 2022) and 14.29% (Alanazi T. I. et al., 2023), respectively.

• Islam and co-authors applied a combination of TiO_2 and Cu_2O, which resulted in a PCE of 7.25% (Islam M. T. et al., 2020).

• Alkhammash and his group used ZnO and NiO, achieving an impressive PCE of 21.88% (H. I. Alkhammash et al., 2023).

• Chabri and his team also studied $Cs_2AgBiBr_6$ and achieved a PCE of 7.16% (I. Chabri et al., 2023).

Thus, further research on $Cs_2AgBiBr_6$ is necessary to identify the best material combinations and further enhance its photovoltaic properties in order to unlock the full potential of this perovskite solar cell (PSC).

The benchmark HDP $Cs_2AgBiBr_6$ for solar cells was first introduced in 2017 (Greul E. et al., 2017).

The characteristics of solar cells based on $Cs_2AgBiBr_6$ with different layer combinations have been analyzed and are shown in Figure 2 (McClure E. T. et al., 2016).

PCE — the efficiency of the solar cell, V_{oc}, J_{sc}, FF — voltage, current density, and fill factor, i.e., the ratio of maximum power ($P_m = V_m \times I_m$) to the product of V_{oc} and J_{sc}.

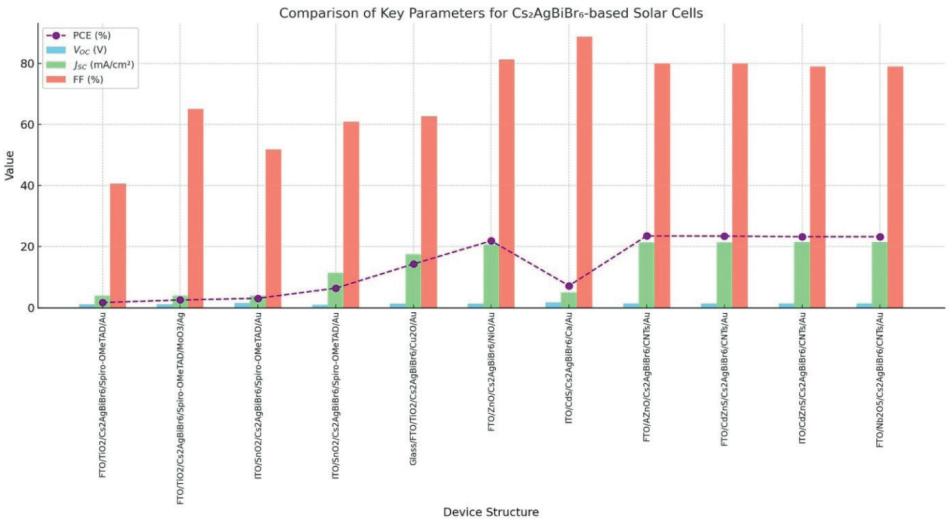


Figure 2. The characteristics of solar cells based on $Cs_2AgBiBr_6$

As can be seen from the figure, the voltage values, in principle, do not vary significantly, unlike the photocurrent density. The combination of layers has a significant effect on

CC BY NC

the latter. To provide specific values, for the structure in work 5, the voltage varied from 1.03 V to 1.07 V, and the photocurrent ranged from 0.78 to 1.78 mA·cm^{-2}. This was a cell with an n-i-p structure, where the film of the main material was applied to tin oxide (ETL), and poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) (HTL). Hydration improves the transport properties of the material; the hydrated material showed an initial photocurrent of 1.03 mA·cm^{-2} and 11.4 mA·cm^{-2} after treatment. The voltage increased from 0.88 V to 0.92 V (Alkhammash H. I. et al., 2023).

In work (Ullah A. et al., 2024), photocurrent values of 5.01 mA·cm^{-2} and voltage of 0.89 V were obtained. Here, TiO_2 was used as the ETL and Spiro-OMeTAD as the HTL.

The voltage values are directly influenced by the differences in the conduction band energies of the acceptor and the valence band of the donor.

Based on the values of the bandgap and the intensity of the absorption peaks, the photocurrent should lie in the range from 6 to 17 mA·cm^{-2}, and the above-shown results generally fall within this predicted range (Tress W. et al., 2022).

The next figure describes the efficiency of $Cs_2AgBiBr_6$ solar cells.

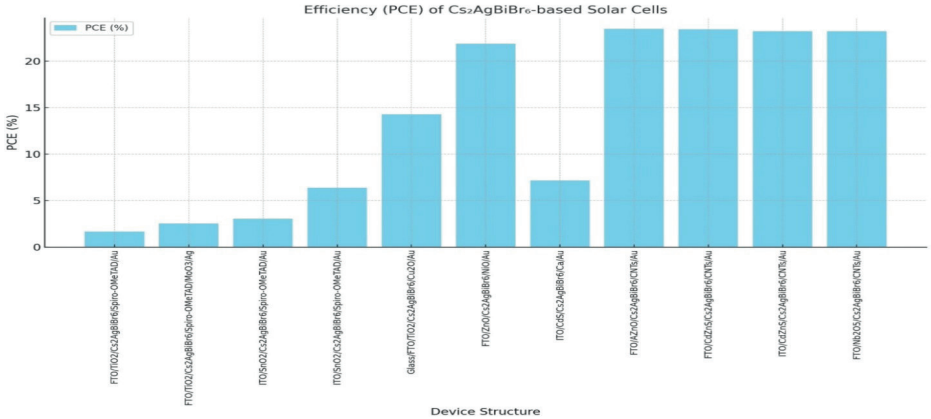


Figure 3. Efficiency of $Cs_2AgBiBr_6$ solar cells

Optoelectronic properties. *Absorption*

We have reviewed studies on absorption, luminescence parameters, and the obtained values of voltage and current density.

Calculations and measurements of absorption, dielectric function, refractive index, reflectivity, and conductivity play a major role in determining the optoelectronic properties of the samples. In work (Sirtl Maximilian T. et al., 2022), it was concluded that the real and imaginary parts of the dielectric permittivity are high at low photon energies and significantly decrease with increasing photon energy. This value provides information about the speed of light in a dense medium. Dielectric permittivity is more related to the excitation of electrons for intra-band transitions, with its maximum occurring at 6.5 eV. The real part of the refractive index has its maximum value at 2.5 eV, which fully satisfies the requirements for use as a component in solar cells. The value of the refractive index is 2.74 (Ullah A. et al., 2024).

CC BY NC

A typical absorption spectrum for $Cs_2AgBiBr_6$ samples is shown in Figure 4, and in many studies, this shape remains consistent, with the peak shift differing by only ±5 nm.

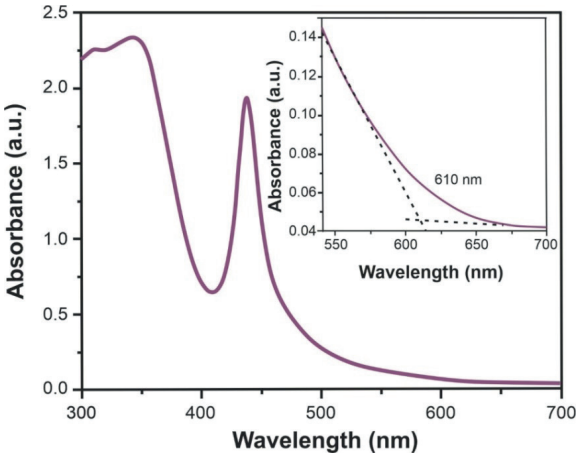


Figure 4. A typical absorption spectrum for $Cs_2AgBiBr_6$ samples (Ji F. et al., 2023)

The absorption consists of three parts. The first is a flat and broad absorption region at wavelengths below 350 nm, associated with absorption due to direct forbidden transitions. This range is close to the value of the bandgap. A characteristic and strong peak around 438-450 nm accounts for more than 20% of the total light absorption in $Cs_2AgBiBr_6$ films. This absorption is related to the optical transition from the ground state $1S_0$ to the excited state of the triplet $3P_1$ of the Bi^{3+} ion in $Cs_2AgBiBr_6$. The third region is a weak and broad absorption zone at higher wavelengths with an edge around 610 nm, which arises due to absorption from indirect forbidden transitions (Ji F.et al., 2023).

In study (Robert L.Z. et al., 2018), the absorption peak maximum for the crystal was located at 2 eV. The tails of the absorption spectrum are usually associated with a high degree of disorder, meaning the presence of defects due to silver ions or vacancies caused by cesium.

The maximum absorption intensity is observed at a temperature close to 100°C, and it decreases as the temperature continues to rise.

In work (Yang J. et.al., 2018), the absorption peak is at 438 nm with a weak tail at 610 nm, which corresponds to 2.8 eV and 2 eV, respectively. The first one is attributed to excitonic absorption. The 440 nm peak was also attributed to excitonic absorption in work, while peaks below 400 nm correspond to intra-band transitions.

Samples treated with plasma hydrogenation technology showed an increase in absorption intensity around 496 nm with increasing treatment time up to 1200 s (Alkhammash H. I. et al., 2023). As the degree of hydrogenation increased, the concentration, mobility, and lifetime of charge carriers also increased, which explains the enhanced absorption around 496 nm.

Results from transient absorption spectroscopy showed photoinduced absorption

centered at 2.14 eV. Photoinduced absorption in $Cs_2AgBiBr_6$ decayed with a similar time characteristic to the bleaching of the ground state, which further confirms the slow decay of photocharged particles on a microsecond timescale, as photoinduced absorption can only arise from states formed after excitation.

The absorption coefficient begins at 1.6 eV, and generally, for use in solar cells, a coefficient value at the level of 10^5 is sufficient. The maximum measured absorption coefficient is 22.5×10^5 at an energy of 14.65 eV. Conductivity in the material begins at 1.85 eV and peaks at 9.71 eV, which corresponds to the low-energy part of the spectrum. This is quite acceptable for optoelectronic applications.

Luminescence

Photoluminescence (PL) in $Cs_2AgBiBr_6$ exhibits intriguing features due to its electronic structure and defect states. The nature of luminescence in the material is evidently associated either with spatially localized centers of coloration or with intra-band transitions. According to various studies, the peaks are concentrated in the 600—700 nm range, which corresponds to an energy of around 2.0—2.1 eV. This peak is usually attributed to transitions associated with defect states in the material's forbidden band. The position of the peak depends on the method of material preparation, excitation technique, material treatment, and temperature conditions.

Additionally, a significant Stokes shift is observed between the absorption and emission peaks, indicating strong electron-phonon interaction and possible exciton self-localization. Temperature studies show that PL intensity increases as the temperature decreases, which is linked to the suppression of non-radiative recombination processes.

Material processing, such as doping or altering synthesis conditions, can significantly affect the spectral characteristics of PL, allowing for tuning the optical properties of $Cs_2AgBiBr_6$ for potential optoelectronic applications.

In work (Ji F. et al., 2023), thin films were found to have two main peaks: a broad one at 1.87 eV (663 nm) and a narrow one at 1.98 eV (627 nm) at 22,6 K. The forbidden band width for these samples was calculated to be between 1.95-2.19 eV.

In work (Tress W. et al, 2022), photoluminescence was observed at 545 nm. Notably, in these samples, the luminescence was red-shifted compared to the absorption. This large Stokes shift indicates significant electron-phonon interaction, leading to self-localized excitons or emission from coloration centers. While the luminescence between 500-600 nm is characteristic for thin films and single crystals, for nanocrystals, the emission peaks are centered around 460 nm.

In work (Alkhammash H. I. et al., 2023), photoluminescence was observed at 761 nm, and upon applying the hydrogenation technique, the intensity of PL at 761 nm tended to increase. The transitions responsible for PL may involve phonons or be localized at defects. With hydrogenation, due to changes in the band structure (e.g., compression or expansion of the forbidden band), a shift in the PL wavelength may be observed. Additionally, as the degree of hydrogenation increased, the concentration, mobility, and lifetime of charge carriers also increased.

Time-resolved spectroscopy experiments have revealed that luminescence appears after about 1 ns following excitation (Robert L.Z. et al., 2018). The method of time-

resolved absorption spectroscopy allowed for the recording of charge carrier dynamics and their radiative recombination. The carrier lifetime in thin films of the material was recorded at 1.4 ms, which is an order of magnitude longer than in lead-based perovskites. Similar acceptable transport properties were found in larger samples.

It was concluded that most recombinations are non-radiative, while radiative recombinations occur due to defects. To confirm this, Particle Size Distribution (PSD) calculations were made, indicating that the valence band is below the Fermi level, with its maximum at 1.5 eV, suggesting a p-type material. This is due to acceptor impurities, such as silver vacancies or cesium vacancies.

These experiments allowed for the calculation of charge carrier mobility, which was found to be 1 $cm^2 V^{-1} s^{-1}$, a relatively high value, contributing to the high quantum efficiency of solar cells based on $Cs_2AgBiBr_6$.

From time-resolved spectroscopy results in work (Yang J. et al., 2018), two photoluminescence quenching times were recorded: 1 ns and 30 ns. The first corresponds to the time of bimolecular recombination, where an electron from the conduction band recombines with a hole from the valence band. The second corresponds to the exciton lifetime.

In work (Ji F. et al., 2023), two luminescence decay times were also recorded: a rapid decay of 50—150 ns, which is emission from traps or temporary states, and a slower decay of up to 600 ns, which is emission from fundamental electron-hole recombination in the material.

According to theoretical predictions, in thin films, photoluminescence should decay relatively slowly, around 200 ns, while in single crystals, it should decay longer than 500 ns.

In work (Sirtl Maximilian T. et.al., 2022), results show that density functional theory calculations indicate a derivative nature of the band structure, suggesting low charge carrier mobility due to the relatively large effective mass of the charge carriers.

Photocurrent

The performance of solar cells is influenced not only by the bandgap width and charge carrier mobility but also by the values of photocurrent and voltage exhibited by the sample. For the structure in work (Yang J. et al., 2018), the voltage varied from 1.03 V to 1.07 V, and the photocurrent ranged from 0.78 to 1.78 $mA \cdot cm^{-2}$. Hydration improved the material's transport properties, and the hydrated material showed an initial photocurrent of 1.03 $mA \cdot cm^{-2}$, which increased to 11.4 $mA \cdot cm^{-2}$ after processing. The voltage increased from 0.88 V to 0.92 V (Alkhammash H. I. et al., 2023).

In work (Tress W. et al., 2022), photocurrent values of 5.01 $mA \cdot cm^{-2}$ and voltage of 0.89 V were obtained.

Voltage values are directly influenced by the differences in the conduction band energy of the acceptor and the valence band of the donor.

Based on the values of the bandgap width and absorption peak intensity, the photocurrent is expected to fall in the range of 6 to 17 $mA \cdot cm\text{-}^{2}$, and the reported results are within this predicted range.

Conclusion. Double halide perovskites $Cs_2AgBiBr_6$ represent a new generation of

CC BY NC

materials for solar cells due to their outstanding optoelectronic properties. Specifically, these include an optimal bandgap width (1.6 eV — 2.19 eV), an absorption coefficient of 10^5, an absorption spectrum (350 - 610 nm), charge carrier mobility (1 $cm^2V^{-1}s^{-1}$), and charge carrier lifetime of 1.4 ms, which is an order of magnitude longer than that in lead-based perovskites. Additionally, they exhibit notable luminescent properties, with a luminescence spectrum in the range of 400-600 nm and decay times up to 600 ns.

Of course, these parameters are strongly dependent on the sample preparation method and fabrication process. Solution crystallization, solution deposition, and spin-coating methods allow the production of high-purity $Cs_2AgBiBr_6$ samples. The bandgap width and its nature (direct or indirect) are influenced by the crystal defect structure and the use of additional technologies.

However, researchers continue to produce various samples and test their optoelectronic properties to improve the stability and efficiency of solar cells. The architecture and layer combinations also play a significant role. As of today, the highest efficiency achieved is 23.5% for the combination of FTO/AZnO/$Cs_2AgBiBr_6$/CNTS/Au.

References

Alanazi T.I. (2023) Design and Device Numerical Analysis of Lead-Free $Cs_2AgBiBr_6$ Double Perovskite Solar Cell. Crystals. 13(2):267. DOI: 10.3390/cryst13020267 (in Eng)

Alkhammash H. I., Mottakin M., Hossen Md. M., Akhtaruzzaman Md.. Rashid M. J. (2023) Design and defect study of $Cs_2AgBiBr_6$ double perovskite solar cell using suitable charge transport layers. Semiconductor Science and Technology. 38(1):015005. DOI: 10.1088.1361-6641/aca42b (in Eng.).

Greul E., Petrus M. L., Binek A., Docampo P., Bein T. (2017) Highly stable, phase pure $Cs_2AgBiBr_6$ double perovskite thin films for optoelectronic applications. Journal of Materials Chemistry A. 5:19972-19981 (in Eng.)

Igbari F., Wang R., Wang Z.-K., Ma X.-J., Wang Q., Wang K.-L., Zhang Y., Liao L.-S., Yang (2019) Composition Stoichiometry of $Cs_2AgBiBr_6$ Films for Highly Efficient Lead-Free Perovskite Solar Cells. Nano Letters.19:2066-2073. DOI:10.1021.acs.nanolett.9b00238 (in Eng.)

Ji F., Boschloo G., Wang F., Gao F. (2023) Challenges and Progress in Lead-Free Halide Double Perovskite Solar Cells. Solar RRL. 7:2201112. DOI: 10.1002/solr202201112 (in Eng.)

Li Z., Kavanagh S. R., Napari M., Palgrave R. G., Abdi-Jalebi M., Andaji-Garmaroudi Z., Davies D. W., Laitinen M., Julin J., Isaacs M. A., Friend R. H., Scanlon D. O., Walsh A., Robert L.Z. Hoye. (2020) Bandgap lowering in mixed alloys of $Cs_2Ag(Sb_xBi_{1-x})$ double perovskite thin films. Journal of Materials Chemistry A. 8:21780-21788 (in Eng.)

Maximilian Sirtl T., Hooijer R., Armer M., Firouzeh G. Ebadi, Mohammadi M., Maheu C., Weis A., Bas T. van Gorkom, Häringer S., Rene A.J. Janssen, Mayer T., Dyakonov V., Tress W., Bein T. (2022) 2D/3D Hybrid $Cs_2AgBiBr_6$ Double Perovskite Solar Cells: Improved Energy Level Alignment for Higher Contact — Selectivity and Large Open Circuit Voltage. Advanced Energy Materials,12:7. DOI: 10.1002/aenm.202103215 (in Eng.)

McClure E. T., Ball M. R., Windl W., Woodward P. M. (2016) Cs_2AgBiX_6 (X=Br,Cl): New Visible Light Absorbing, Lead-Free Halide Perovskite Semiconductors. Chemistry of Materials. 28:1348-1354. DOI:10.1021/acs.chemmater.5b04231 (in Eng.)

Robert L.Z. Hoye, Eyre L., Wei F., Brivio F., Sadhanala A., Sun S., Li W., Kelvin H.L. Zhang, L. MacManus-Driscoll Judith, Bristowe Paul D., Friend Richard H., Cheethan Anthony K., Deschler F. (2018) Fundamental Carrier Lifetime Exceeding 1 μs in $Cs_2AgBiBr_6$ Double Perovskite. Advanced Materials Interfaces, 5(15):198, DOI: 10.1002/admi.201800464 (in Eng.)

Savory Ch.N., Walsh A., Scanlon D.O. (2016) Can Pb-Free Halide Double Perovskites Support High-Efficiency Solar Cells? ACS Energy Letters.1:949-955. DOI: 10.1021/acsenergylett.6b00471 (in Eng)

Slavney A. H., Hu T., Lindenberg A. M., Karunadasa H.I.. Am J. (2016) A Bismuth — Halide Double

Perovskite with Long Carrier Recombination Lifetime for Photovoltaic Applications. Journal of the American Chemical Society. 138(7):2138. DOI: 10.1021/jacs.5b13294 (in Eng.)

Tress W., Sirtl M.T. (2022) $Cs_2AgBiBr_6$ Double Perovskites as Lead-Free Alternatives for Perovskite Solar Cells? Solar RRL. 6:2100770. DOI: 10.1002/solr202100770 (in Eng)

Ullah A., Khan M.I., Ihtisham-ul-haq, Almutairi B.S., AlResheedi D.B.N., Choi J.R. (2024) Bandgap Engineering and Enhancing Optoelectronic Performance of a Lead-Free Double Perovskite $Cs_2AgBiBr_6$ Solar Cell via Al Doping. ACS Omega. 9:18202-18211. DOI:10.1021/acsomega.3c10388 (in Eng.)

Yang J., Zhang P., Wei S.-H. (2018) Band Structure Engineering of $Cs_2AgBiBr_6$ Perovskite through Order — Disordered Transition: A First — Principle Study. Journal of Physical Chemistry Letters. 9:31-35. DOI: 10.1021/acs.jpclett.7b02992 (in Eng.)

Zhang Z., Sun Q., Lu Y., Lu F., Mu X., Wei S.H., Sui M. (2022) Hydrogenated $Cs_2AgBiBr_6$ for significantly improved efficiency of lead-free inorganic double perovskite solar cell. Nature Communications. 13:3397 (in Eng.)

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 52–65

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.383

UDC: 523.68; 523.682; 523.62-65; 523.62
IRSTI: 41.19.33

© L.I. Shestakova, R.R. Spassyuk, 2025.
V.G. Fesenkov Astrophysical Institute LLP, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: spassyuk@fai.kz

SPECTRAL STUDIES OF THE K–F CORONA INTERFACE AT 5000–6000 Å

Shestakova Lyubov — Ph.D. in Physics and Mathematics, head of the Laboratory of Physics of Stars and Nebulae, Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: shest1952@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2223-5332;
Spassyuk Ruslan — Bachelor in Nuclear physics, Engineer of the Laboratory of Physics of Stars and Nebulae, Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: spassyuk@fai.kz; ORCID:https://orcid.org/0000-0002-7780-2533.

Abstract. Studies of the inner regions of the Solar System remain limited, despite their importance for understanding interplanetary matter and the near-Sun environment. The region extending from the solar corona to Earth's orbit, including the zodiacal light and the inner Zodiacal Cloud, has been studied only fragmentarily, although it hosts key processes transforming cometary—asteroidal material into dust and gas. The aim of this work is to investigate near-Sun dust by determining its line-of-sight velocities in the transition region between the solar corona and the zodiacal light at heliocentric distances from 3R to 16R, with emphasis on dust dynamics and its relation to the electron corona.The proposed method is spectroscopic observations using a small space telescope equipped with a spectrograph operating in the wavelength range λ = 5000—6000 Å. This range enables analysis of key diagnostic lines: the Mg I triplet (λ5167—5184 Å) for dust velocity measurements; the Fe XIV green emission line (λ5303 Å) from the electron corona, also serving as a wavelength reference; and the Na I doublet (λ5890—5896 Å) for dust diagnostics and detection of atomic emissions from disrupted small bodies. The expected results include improved determination of dust particle sizes and the radial distribution of near-Sun dust concentration compared to the Parker Solar Probe experiment (Szalay et al., 2024). The practical significance lies in advancing remote spectral diagnostics of near-Sun dust and supporting future space experiments focused on the inner Solar System.

Keywords: F-corona, dust, Zodiacal Cloud, comets, radial velocities

Financing. *This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (programme no. BR24992759).*

©Л.И. Шестакова, Р.Р. Спасюк*, 2025.
«В.Г. Фесенков атындағы Астрофизикалық институт» ЖШС,
Алматы, Қазақстан.
E-mail: spassyuk@fai.kz

5000–6000 Å ДИАПАЗОНЫНДА K- ЖӘНЕ F-КОРОНАЛАР АРАСЫНДАҒЫ ӨТПЕЛІ АЙМАҚТЫ СПЕКТРЛІК ЗЕРТТЕУ

Шестакова Любовь — Физика-математика ғылымдарының PhD докторы, Жұлдыздар мен тұмандықтар физикасы зертханасының меңгерушісі, Фесенков атындағы Астрофизикалық институт, Алматы, Қазақстан,
Email: shest1952@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2223-5332;
Спасюк Руслан — Ядролық физика бакалавры, Жұлдыздар мен тұмандықтар физикасы зертханасының инженері, Фесенков атындағы Астрофизикалық институт, Алматы, Қазақстан,
Email:spassyuk@fai.kz; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7780-2533.

Аннотация. Күн жүйесінің ішкі аймақтарын зерттеу олардың планетааралық зат эволюциясын және околосолнечтік ортаны қалыптастыратын процестерді түсінудегі маңызды рөліне қарамастан әлі де жеткіліксіз. Күн коронасынан Жер орбитасына дейінгі кеңістік, яғни зодиактық жарық пен Зодиактық бұлттың ішкі бөлігі, бүгінгі күнге дейін тек фрагментарлы түрде зерттелген. Дәл осы аймақта кометалық-астероидтық текті заттың шаң және газ фазаларына ауысуы сияқты іргелі процестер жүреді, алайда олар бақылауға нашар қолжетімді және тек жекелеген эксперименттер аясында ғана тіркелген.Бұл жұмыстың мақсаты — Күн коронасы мен зодиактық жарық арасындағы өтпелі аймақта, Күннен 3R—16R аралығындағы гелиоцентрлік қашықтықтарда, околосолнечтік шаңның сәулелік жылдамдықтарын анықтау арқылы оның физикалық қасиеттерін зерттеу. Ерекше назар шаң компонентінің динамикасына және оның электрондық коронамен байланысына аударылады. Негізгі әдіс ретінде λ = 5000—6000 Å толқын ұзындықтары диапазонында жұмыс істейтін спектрографпен жабдықталған шағын ғарыштық телескопты қолданатын спектроскопиялық зерттеу ұсынылады. Бұл спектрлік диапазон бірнеше маңызды диагностикалық сызықтарды бір мезгілде талдауға мүмкіндік береді: Mg I триплеті (λ5167—5184 Å) шаң коронасының сәулелік жылдамдықтарын анықтау үшін, Fe XIV электрондық коронасының жасыл эмиссиялық сызығы (λ5303 Å) толқын ұзындығының тірек сызығы ретінде, сондай-ақ Na I дублеті (λ5890—5896 Å) шаңды диагностикалау және кіші денелердің ыдырауы нәтижесінде пайда болатын атомдық эмиссияларды іздеу үшін қолданылады.Күтілетін нәтижелерге Parker Solar Probe экспериментімен (Szalay et al., 2024) салыстырғанда шаң бөлшектерінің өлшемдерін және

околосолнечтік шаң концентрациясының радиалдық таралуын анағұрлым дәл анықтау жатады. Жұмыстың практикалық маңыздылығы околосолнечтік шаңды қашықтан спектрлік диагностикалау әдістерін дамытуда және Күн жүйесінің ішкі аймағын зерттеуге арналған болашақ ғарыштық эксперименттер үшін ғылыми негіз қалыптастыруда көрінеді.

Түйінді сөздер: F-тәж, шаң, Зодиактық бұлт, кометалар, сәулелік жылдамдықтар

©Л.И. Шестакова, Р.Р. Спасюк*, 2025.
ТОО «Астрофизический институт им.В.Г.Фесенкова»,
Алматы, Казахстан.
E-mail: spassyuk@fai.kz

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЛАСТИ ПЕРЕХОДА МЕЖДУ K И F КОРОНОЙ В ДИАПАЗОНЕ 5000–6000Å

Шестакова Любовь — Доктор физико-математических наук (Ph.D.), заведующая лабораторией физики звезд и туманностей, Астрофизический институт им. Фесенкова, Алматы, Казахстан,
Email: shest1952@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2223-5332;
Спасюк Руслан — бакалавр по ядерной физике, инженер лаборатории физики звезд и туманностей, Астрофизический институт им. Фесенкова, Алматы, Казахстан,
Email: spassyuk@fai.kz; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7780-2533.

Аннотация. Исследования внутренних областей Солнечной системы остаются крайне ограниченными, несмотря на их ключевую роль в понимании эволюции межпланетного вещества и процессов, формирующих околосолнечную среду. Пространственная область от солнечной короны до орбиты Земли, включающая зодиакальный свет и внутреннюю часть Зодиакального облака, до настоящего времени изучена фрагментарно. Именно в этой зоне происходят фундаментальные процессы трансформации вещества кометно-астероидного происхождения в пылевые и газовые компоненты, которые слабо доступны для наблюдений и известны лишь по отдельным экспериментам. Целью данной работы является исследование физических свойств околосолнечной пыли на основе определения её лучевых скоростей в переходной области между солнечной короной и зодиакальным светом на гелиоцентрических расстояниях 3R–16R. Особое внимание уделено динамике пылевой компоненты и её связи с электронной короной. Основным методом исследования предлагается спектроскопия с использованием небольшого космического телескопа, оснащённого спектрографом, работающим в диапазоне λ = 5000–6000 Å. Этот диапазон позволяет одновременно анализировать несколько диагностически значимых линий: триплет Mg I (λ5167—5184 Å) для определения лучевых скоростей пылевой короны, зелёную эмиссионную линию Fe XIV (λ5303 Å), применяемую также как опорную линию, и дублет Na I (λ5890–5896 Å), чувствительный к присутствию атомарных эмиссий, возникающих при разрушении малых тел. Ожидаемые результаты включают более точное

CC BY NC

определение размеров частиц и радиального распределения концентрации околосолнечной пыли, чем в эксперименте Parker Solar Probe (Szalay et al., 2024). Практическая значимость работы заключается в развитии методов дистанционной спектральной диагностики околосолнечной пыли и создании научной основы для будущих космических миссий, направленных на изучение внутренней области Солнечной системы.

Ключевые слова: F- корона, пыль, Зодиакальное облако, кометы, лучевые скорости

Introduction. The dust or Fraunhofer corona (F-corona) was discovered long ago, during the total solar eclipse of December 12, 1871. Dark absorption lines, or Fraunhofer lines, were visually detected by Pierre Janssen (Janssen, 1883) in the spectrum of the solar corona. During the 1883 eclipse, he succeeded in photographing the spectrum of the F-corona. Based on his observations, he concluded that dust particles reflecting sunlight were present in the solar corona. Later, Grotrian (1934) proposed a common origin for the F-corona and the zodiacal light. It is evident that as zodiacal dust approaches the Sun, it must sublimate at some critical distance.

Observations of the radial velocities of dust in the F-corona remain scarce due to the experimental challenges involved. Attempts to measure Doppler shifts of absorption lines using spectrographs were largely unsuccessful because of insufficient measurement precision.The short duration of eclipses and the absence of sensitivity-enhancing equipment made it impossible to conduct such experiments in the first half of the 20th century.

1) The first successful observations of dust radial velocities in the F-corona were carried out during the solar eclipse of June 30, 1973, at an elongation of $7.5R_{\odot}$ west of the Sun (Kozlov, 1974). A Fabry–Pérot spectrometer with pneumatic spectral scanning was used in the observations near the strong absorption line of Mg I at λ5184 Å.After accounting for the profile of the corresponding Fraunhofer line from the daylight sky, the measured radial velocity west of the Sun was found to be +50 km/s. This result implies that the interplanetary dust along the line of sight is orbiting the Sun in the same direction as the planets.

2) Later, during the solar eclipse on February 26, 1979, radial velocities were measured at distances of $3.2R_{\odot}$ and $4.3R_{\odot}$ west of the Sun using a radial velocity correlation spectrometer (Beavers et al., 1980). The correlation spectrometer enables simultaneous scanning of the profiles of multiple spectral lines within a selected wavelength interval. In practice, this yields a composite velocity profile based on the sum of all lines, each of which may be indistinguishable individually. The resulting data revealed a common feature in both velocity profiles–a negative velocity of –50 km/s. At the $4.3R_{\odot}$ distance, the velocity profile also exhibited an additional peak of +230 km/s. To interpret the findings, the authors proposed a simple two-component model of near-solar dust: one component consisting of dust moving along straight orbits beyond the region starting at $4R_{\odot}$, and a second component of dust falling toward the Sun with velocities ranging from –50 to –250 km/s.

Methods, materials and results. The task of observing not merely isolated points in the F-corona, but obtaining a two-dimensional map–i.e., a full field of radial velocities–was first formulated and implemented during the total solar eclipse of July 31, 1981 (Shcheglov et al., 1987). Observations of the dust radial velocity field in the outer solar corona at distances from 3 to 7.5$R_\odot$, based on the Doppler shift of absorption lines, were carried out under the supervision of Professor P.V. Shcheglov (Moscow State University (MSU)). The expedition team, which included scientists from both MSU and FAI, was stationed in the village of Shortandy, Akmola region, in northern Kazakhstan. The experimental setup included a coronagraph with an artificial Moon blocking the inner corona up to 2.5$R_\odot$, an interference filter (IF) with a half-width of 14 Å tuned to the Mg I λ5184 Å line, a Fabry–Pérot etalon placed in the exit pupil, a fast (f/1.5) camera lens with an image intensifier (IIT), and 103aG photographic film for registration.

At the time, such an experiment seemed nearly impossible. Given the short duration of totality (only 75 seconds), achieving a spectral resolution of ~0.5 Å for the dusty corona was considered unrealistic. The task required the development of a specialized spectral instrument–a spectrograph based on a Fabry–Pérot interferometer. The full field of view of the instrument reached 3.5 degrees.The results were obtained an interferogram as a concentric ring centered on the Sun, corresponding to Fraunhofer lines in the green region of the solar spectrum (around Mg I λ5184 Å), which contained information on the Doppler velocities of near-Sun dust. For the first time, a full velocity field was obtained rather than a few point measurements in the F-corona at distances from 3 to 7 $R_\odot$. Data analysis revealed that dust near the ecliptic plane was dominated by particles on direct Keplerian orbits. Additionally, retrograde-moving dust was detected–its origin was attributed to a retrograde comet that had fallen into the Sun about 10 days before the eclipse (Shcheglov et al., 1987). However, some features of the observed radial velocities remain unexplained, particularly the origin of the northern polar outflow with a radial velocity of approximately +150 km/s.

A second successful attempt to observe the radial velocity field in the F-corona was made during the total solar eclipse on July 11, 1991 (Aimanov et al., 1995), in Mexico. For this campaign, FAI developed two identical coronagraphs for the green (around Mg I λ5184 Å) and blue (around Ca II λ3933 Å) spectral regions. The field of view was expanded to 5 degrees. Unfortunately, the exposure time was insufficient to fully implement the plan; data were obtained only in the inner region up to 6 $R_\odot$ using the "blue" coronagraph. The new observations confirmed earlier results from the 1981 eclipse: the existence of a dust-free zone around the Sun at distances of 6–7 $R_\odot$ and the finding that dust particles near the Sun were approximately 0.5 μm in size–nearly two orders of magnitude smaller than the "average" zodiacal cloud particles (Leinert, 1975).

In addition to the FAI group, similar research was conducted by colleagues from the United States, W.I. Beavers and J.J. Eitter, who happened to be at the same observing site in Mexico as the FAI team. As in 1979, they employed Griffin's mask correlation technique. In 1979, they obtained radial velocity profiles at only two locations. In 1991, they acquired a series of 12 radial velocity measurements of the solar corona in the 400–

CC BY NC

440 nm spectral range, both west and east of the Sun, from 2.5$R_\odot$ to 5 $R_\odot$ along the celestial equator, and at three positions north of the Sun. Their findings were published only in 2009 (Beavers and Eitter, 2009). They concluded that the near-Sun component of the F-corona is relatively weak, contributing only 7–14% of the total volume. A stronger diffraction component from the near-Earth F-corona, with zero Doppler shift, dominated the line profiles. They also detected a high-velocity redshifted outflow at 330 km/s.

After a long break, successful observations of the dust radial velocity field in the F-corona were once again carried out in Kazakhstan under excellent weather conditions near the village of Mugalzhar, Aktobe region, during the total solar eclipse of March 29, 2006. These observations were repeated shortly thereafter due to the eclipse path on August 1, 2008, also passing close to the region. The second campaign was conducted near Barnaul, Russia, using nearly identical instrumentation. In both cases, interferometric observations of the radial velocity field of dust in the F-corona were conducted at distances from 3 to 11 $R_\odot$ using a coronagraph with a Fabry–Pérot etalon and an interference filter placed in the exit pupil. The region within 2.5$R_\odot$ was blocked by a mask placed on the field lens, whose flat surface was aligned with the primary image of the corona. The difference in the optical layout between the 2008 setup and the 2006 setup consisted solely of replacing the interference filter. In 2006, an interference filter with a half-width of 10 Å tuned to the Mg I λ 5172 Å line was used, while in 2008, an interference filter with a half-width of 20 Å and maximum transmission at λ 5202 Å was employed. An Apogee Alta-10 CCD camera with 14 μm pixel size was used for image capture. The Fabry–Pérot etalon produced concentric spectral rings, with the wavelength of each ring decreasing as its radius increased. By measuring the ring radius at each point in the field of view, one can determine the wavelength, and thus the integrated Doppler velocity of dust along the line of sight. A summary of the results from these two eclipses is presented in Shestakova and Demchenko (2016).

As an example, Figure 1 shows the original image of a working frame obtained during the 2006 eclipse, along with its transformations at two processing stages.

A comparison of the radial velocity observations of near-Sun dust up to 11$R_\odot$ during the total eclipses of March 29, 2006, and August 1, 2008, revealed that the dust varies in composition and is dynamically inhomogeneous from year to year. During the 2006 eclipse, it was found that there was virtually no dynamical connection with the ZC (Figure 2). The dust motion on March 29, 2006, was directed opposite to planetary motion and had a significant inclination to the ecliptic plane. These results suggest a genetic link between the observed dust orbital motion and Kreutz-group comets observed near the Sun around the eclipse date. In contrast, the 2008 eclipse revealed classical zodiacal dust concentrated near the ecliptic plane (Figure 3).

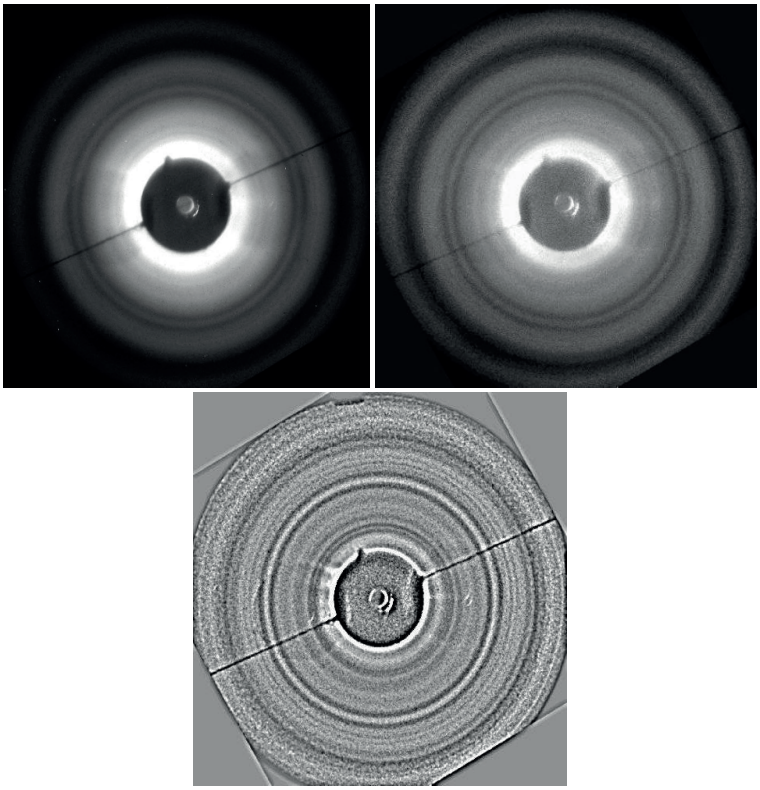


Figure 1. 130-second interferogram of the near-Sun region from March 29, 2006, shown at different processing stages: the raw frame, the frame corrected for the field function, and the fully corrected frame after mathematical processing.

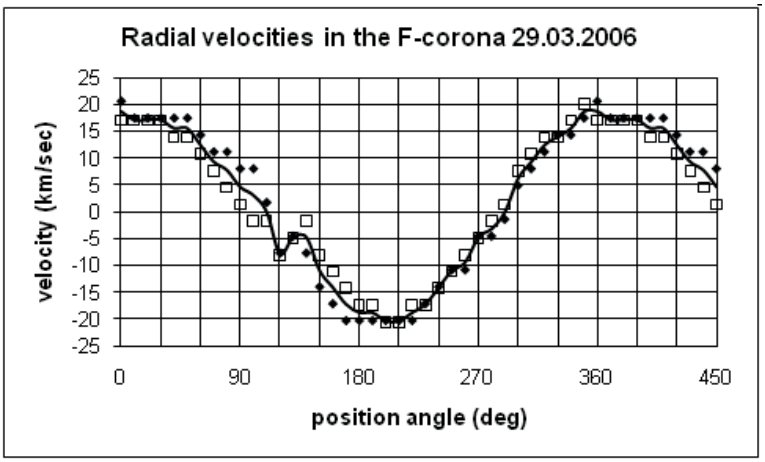


Figure 2. Radial velocities of dust in the F-corona on March 29, 2006. N corresponds to 0°, E to 90°, S to 180°, and W to 270°. The range from 360° to 450° represents a repetition of the initial 0°—90° segment. Open squares and filled diamonds indicate two different processing methods using images of the daytime sky taken before and after the eclipse.
The solid line represents the average between the two methods.

CC BY NC

Zodiacal dust moving along classical orbits in the direction of planetary rotation is expected to exhibit positive radial velocities west of the Sun (270°) and negative velocities to the east (90°), as shown in the eclipse observations from August 1, 2008, in Figure 3. In contrast, Figure 2 presents the results from the March 29, 2006, eclipse, where cometary dust dominates the near-Sun region, moving across the ecliptic plane. The influence of zodiacal dust appears only as a slight negative deviation on the eastern side (around 120°) and a more pronounced rise on the western side between 270° and 300°. Bsol

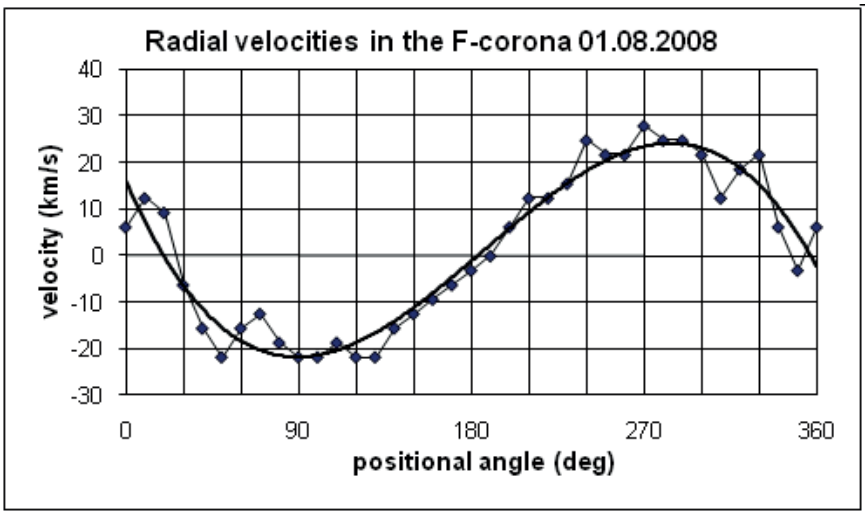


Figure 3. Radial velocities of dust in the F-corona on August 1, 2008. 0° corresponds to the north ecliptic pole; E = 90°, S = 180°, W = 270°. The bold curve represents a fourth-order polynomial fit to the data.

To date, due to the exceptional difficulty of such experiments, no new observational data on dust dynamics in the near-Sun region have been obtained. The most recent results worth mentioning come from the Parker Solar Probe space mission (Szalay et al., 2024), which traversed the innermost regions of the ZC. Contrary to previous expectations, the mission revealed that most of the dust mass is concentrated in very fine particles with radii of approximately 0.6–1.4 μm, rather than 10–100 μm as previously assumed (Leinert, 1975).In our own eclipse experiments following the 1981 campaign, we determined particle radii of approximately 0.4–0.5 μm and a power-law exponent of the dust concentration variation with distance of $\alpha = 1.1$ (Shcheglov et al., 1987). Based on the 2008 eclipse data, we derived an average particle radius of 1.15 μm and an exponent of $\alpha = 1.08$ (Shestakova and Demchenko, 2016), which closely agrees with the Parker Solar Probe findings (Szalay et al., 2024). Only in 2006, when the near-Sun region was filled with cometary dust, did the power-law exponent α appear significantly steeper at $\alpha = 2.2$, while the particle radii remained in a similar range of about 0.9 μm.

Discussion. Existing knowledge of the dust corona brightness is largely based on observational syntheses and eclipse measurements. The study by Kimura and Mann

(1998) presents a composite graph of the brightness of the solar corona and the zodiacal light, compiled from observations by various authors (Figure 4), providing a unified view of brightness variations across the near-Sun region. Complementary results were obtained from observations of sky brightness conducted by specialists of the Fesenkov Astrophysical Institute during total solar eclipses, as well as in the periods immediately before and after the eclipses (Shestakova and Demchenko, 2010). These measurements offer valuable constraints on the spatial distribution and brightness of the dust corona and its contribution relative to other coronal components.

Table 1. Sky brightness during the total solar eclipse on March 29, 2006, and of the daytime sky before and after the eclipse.

File/elongation	$4.0R_\odot$	$4.4R_\odot$	$10R_\odot$	$10R_\odot$
Eclipse	4.92×10^{-9} $B_\odot$	4.70×10^{-9} $B_\odot$	2.85×10^{-9} $B_\odot$	2.86×10^{-9} $B_\odot$
Day sky 1 (before)	4.58×10^{-5} $B_\odot$	3.62×10^{-5} $B_\odot$	3.41×10^{-5} $B_\odot$	2.61×10^{-5} $B_\odot$
Day sky 2 (after)	1.82×10^{-5} $B_\odot$	2.16×10^{-5} $B_\odot$	1.47×10^{-5} $B_\odot$	1.43×10^{-5} $B_\odot$
Day sky 1/eclipse	0.93×10^4	0.77×10^4	1.20×10^4	0.91×10^4
Day sky 2/eclipse	0.37×10^4	0.46×10^4	0.52×10^4	0.50×10^4

The observations of the March 29, 2006, eclipse were conducted under excellent weather conditions. The brightness measurement errors at the edge of the field of view ($10R_\odot$) for the eclipse image reached up to 30%, while the errors for the remaining measurements remained within 5–10%.

As seen from Table 1, at a distance of approximately $4R_\odot$, the coronal brightness exceeds the background sky brightness far from the Sun (at 10 $R_\odot$) by a factor of about 1.7. Moreover, at the field edges (10 $R_\odot$), the background sky in both the western and eastern parts remains constant during the eclipse: B(eclipse) $\approx 2.9 \times 10^{-9}$ $B_\odot$. This value closely matches the eclipse sky line in Figure 4, where B(eclipse) $\approx 1 \times 10^{-9}$ $B_\odot$. The last two rows of Table 1 allow us to estimate the difference between daytime and eclipse sky brightness. The brightness ratios B (day sky / eclipse) are within the range 0.37×10^4 to 1.20×10^4. These estimates may be valuable for ground-based testing of instruments intended for space-based observations. Also of interest are the data in Tables 2 and 3, which present the results of sky brightness measurements during the total solar eclipse of August 1, 2008 (Table 2), and comparative results from both eclipses on March 29, 2006, and August 1, 2008 (Table 3).

CC BY NC

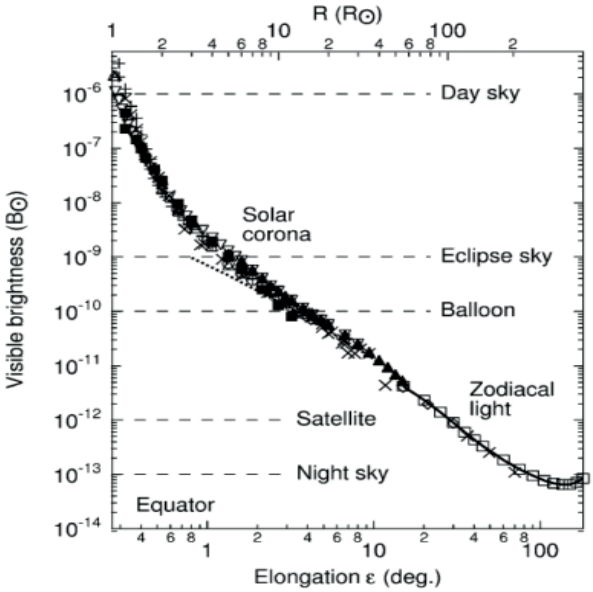


Figure 4. The visible brightness of the solar corona in the equatorial plane of the Sun as a function of elongation, expressed in units of the solar disk brightness.

Table 2. Sky brightness during the total solar eclipse on August 1, 2008, and of the daytime sky after the eclipse.

File/elongation	4.9 $R_\odot$	4.1 $R_\odot$	10 $R_\odot$	10 $R_\odot$
Eclipse	$1.32 \cdot 10^{-8}$ $B_\odot$	$1.26 \cdot 10^{-8}$ $B_\odot$	$0.90 \cdot 10^{-8}$ $B_\odot$	$1.24 \cdot 10^{-8}$ $B_\odot$
Day sky	$6.54 \cdot 10^{-5}$ $B_\odot$	$5.70 \cdot 10^{-5}$ $B_\odot$	$4.60 \cdot 10^{-5}$ $B_\odot$	$5.21 \cdot 10^{-5}$ $B_\odot$
Day sky /eclipse	$0.50 \cdot 10^4$	$0.45 \cdot 10^4$	$0.51 \cdot 10^4$	$0.42 \cdot 10^4$

Table 3. Ratio of sky brightness values for the solar eclipses: $B_\odot$ (2008) / $B_\odot$ (2006)

File/elongation	4.9 R/4.0 R(E)	4.1 $R_\odot$	10 $R_\odot$	10$R_\odot$
Eclipse2008/eclipse2006	2.68	2.68	3.16	4.33
Sky(2008)/ Sky2 (2006)	3.59	2.64	3.13	3.64
(Day sky /eclipse)2008/ (Day sky /eclipse)2006	1.34	0.99	0.99	0.84

The observation of the August 1, 2008, eclipse was carried out about an hour after cloud cover had passed. The sky was noticeably brighter than during the 2006 eclipse. As seen in Table 3, the sky brightness during the 2008 eclipse was approximately B(eclipse) $\approx 10^{-8}$ $B_\odot$, which is about five times higher than during the 2006 eclipse and an order of magnitude greater than the eclipse sky brightness shown in Figure 4. Particular attention should be given to the Day sky / Eclipse ratio in the last row of Table 3. Despite the differences in weather conditions between the two eclipse events, the ratio B (Day sky / eclipse)2008/ B (Day sky /eclipse)2006 ≈ 1. This result is important, for example, when planning and preparing future total solar eclipse observations. *Auxiliary Tasks:*

1) Observation of the Green Coronal Line Fe XIV at λ5303 Å.

In addition to the above-discussed observations of radial velocities during solar eclipses using the Mg I absorption triplet (λ5167–5184 Å), it is worth noting an emission line that appeared in the final frame taken 20 seconds before the end of totality. In both 2006 and 2008, a bright emission line was observed in the form of three rings corresponding to three interference orders. This bright line, seen in the scattered light of the eclipse sky, is likely associated with the strongest emission line of thirteen-times-ionized iron, Fe XIV, from the electron corona at λ 5303 Å. This emission was used as a reference line for radial velocity measurements. Thus, the green coronal line, in addition to being an indicator of coronal activity, can serve as a wavelength reference line.

2) Observation of the Sodium Doublet Na I, λ5890 — 5896 Å.

As for the Na I doublet at λ5890—5896 Å, FAI specialists have experience observing its emission during the NASA experiment known as the DART mission (Shestakova et al., 2023). At the moment of impact between the spacecraft and the asteroid Dimorphos, spectral observations of the Didymos—Dimorphos asteroid pair were conducted using the AZT-20 telescope at the Assy-Turgen Observatory. During and immediately after the collision, emission lines of alkali metals—Na, K, and Li—were detected in the spectra. Thus, observations of the sodium doublet can be used both for determining dust radial velocities and for detecting atomic emissions resulting from the disruption of small bodies.

3) Search for Oxygen Emission at λ5577Å in Earth's Atmosphere as Earthquake Precursors.

Solving the problem of earthquake forecasting is of paramount importance and requires no justification of its significance. Observing the Earth's nighttime hemisphere from space in the oxygen O I emission line at a wavelength of λ5577 Å offers a way to test the hypothesis that fluctuations in the nightglow of Earth's atmosphere at this wavelength may serve as precursors to earthquakes.To carry out such observations, a small-aperture telescope equipped with a spectrograph capable of recording the λ5000—6000 Å range in a single frame can be used to scan the nighttime hemisphere of Earth. A spectrograph slit length of 20—30 arcminutes would be sufficient to cover the entire visible disk of the Earth. *Capabilities of Space-Based Observations and Instrument Selection.* Based on the observational experience described above in the λ5000—6000 Å spectral region, we propose a program of comprehensive spectral studies at the interface between the electron and dust components of the corona (the K- and F-corona).

The background zodiacal light brightness in the ecliptic plane at a distance of 50 $R_\odot$ (12.5° elongation) from the Sun is about 10^{-11} $B_\odot$ (see Figure 1), which is two orders of magnitude fainter than the sky brightness during a solar eclipse. Ideally, spectral observations in the λ5000—6000 Å range should be conducted starting from 4$R_\odot$ and extending as far as the instrument sensitivity allows. The region up to 16 $R_\odot$ corresponds to the sublimation zone for dust of various chemical compositions. Using slit-based observations with a spectrograph, the entire radial range from 4 $R_\odot$ to 16 $R_\odot$ can be covered with a field of view of approximately 30 arcminutes when the slit is oriented radially with respect to the Sun. Since zodiacal dust extends to much greater distances,

CC BY NC

observations could also be extended along the ecliptic plane and toward the ecliptic poles, up to $50R_\odot$ (12.5°). According to Makarova et al. (1994), the brightness of the Sun in the selected spectral region is about $B_\odot \approx 2.8 \times 10^7$ J/(s·m²·μm·sr). The zodiacal dust brightness at 50 $R_\odot$ (from Figure 4) is estimated as: 10^{-11} $B_\odot \approx 2.8 \times 10^{-4}$ J/(s·m²·μm·sr). The minimum ZL brightness may reach two orders of magnitude lower: 10^{-13} $B_\odot \approx 2.8 \times 10^{-6}$ J/(s·m²·μm·sr) (per Figure 1). In a study by Kuznechik et al. (2007), the radiance of major night-sky components was measured near the galactic pole and zenith at wavelengths 0.53 and 0.69 μm in Minsk and surrounding areas. Estimates were given for lunar scattered light, the Milky Way, zodiacal light, airglow, and artificial light pollution. The zodiacal light brightness in the direction of the galactic pole (in the absence of the Moon) was: $B_{zo} = 1.533 \times 10^{-5}$ J/(s·m²·μm·sr). The estimated sky brightness under full Moon conditions at 0.5 μm wavelength was: $B_{moon} \approx 5{,}25 \times 10^{-4}$ W·m^{-2}·sr^{-1}·μm^{-1}, though the authors suggest this value is likely overestimated and should be about one order of magnitude lower. Interestingly, our estimate of the zodiacal light brightness at $50R_\odot$ is only about 2 times lower than the full Moon sky brightness, indicating that testing the spectrograph's sensitivity for such tasks can be performed even during full Moon nights. *Required Equipment:* A small telescope with an aperture of 30—40 cm, equipped with a spectrograph capable of recording spectra in the λ 5000—6000 Å range in a single frame with a dispersion of 0.175 Å/pixel. In this spectral region, the Doppler velocity scale is approximately 60 km/s per Å, which allows for a radial velocity measurement accuracy of 4—6 km/s. The 30-arcminute-long slit of the spectrograph should be oriented radially with respect to the Sun, covering the range from 4 to 16 $R_\odot$ is about 1/10,000 of the daytime sky brightness, whereas at an elongation of $50R_\odot$, the difference between the zodiacal light and the daytime sky brightness reaches a factor of 10^6. The main challenge lies in pointing the telescope at the near-Sun region from multiple positional angles around the Sun, ideally with a 30° step. If close solar pointing is not feasible, observations may be limited to scanning more distant regions using the spectrograph slit–either along the ecliptic plane or toward its poles.

Conclusion. Scanning the inner region of the Solar System using a telescope equipped with a long-slit spectrograph for measuring dust radial velocities, detecting emission clouds, and identifying atomic emissions provides a unique opportunity to study the dynamics of these phenomena and investigate their origins. Space-based astronomical observations are typically oriented toward the anti-solar direction to study galactic and extragalactic objects, leaving nearby regions of space significantly underexplored. For instance, SOHO mission data indicate that approximately 200 comets fall into the Sun each year. It is evident that as they approach the Sun, they release significant amounts of dust and gas. The lack of observational data in the near-Sun region is largely due to the challenges posed by the Sun's intense brightness. Even with solar shielding, slight pointing errors can damage highly sensitive instruments. Due to the exceptional complexity of such experiments, no new observational data on dust dynamics in the near-Sun region have been obtained to date. The most noteworthy recent results come from the Parker Solar Probe mission (Szalay et al., 2024), which flew through the innermost

regions of the zodiacal cloud. According to the cited study, most of the dust mass is concentrated in extremely fine particles with radii of approximately 0.6–1.4 μm, rather than in larger particles with radii around 30 μm, as previously believed (Leinert, 1975). In addition, they estimated the power-law exponent describing how dust concentration changes with distance to be $\alpha = 1.1 \pm 0.3$, over the range 0.1 to 0.25 AU. Based on observations from the 2008 solar eclipse conducted by FAI researchers, the average particle radius was found to be 1.15 μm (Shestakova and Demchenko, 2016). The same study also determined the power-law exponent for dust concentration with distance to be $\alpha = 1.08$, closely matching the Parker Solar Probe results.t is also worth noting the results from the March 29, 2006 eclipse, which turned out to be unexpected. The exponent was significantly steeper: $\alpha = 2.2$, while the average particle radius remained within a similar range of about 0.9 μm (Shestakova and Demchenko, 2016). The reason for this discrepancy was that the near-Sun region had been filled with cometary dust released by Kreutz group comets that passed near the Sun one day before the eclipse. The accuracy of our experiments, even though they were carried out from the ground, demonstrates the high efficiency of the method for measuring the radial velocities of near-Sun dust. Given that many active processes take place in the inner Solar System - including the destruction of small bodies, comets, and meteoroid streams - it is necessary to intensify research efforts in this region. The processes occurring there may have a significant influence, including on conditions affecting life on Earth.

References

Aimanov A.K., Aimanova G.K., & Shestakova L.I. (1995) Radial velocities in the F-corona on July 11, 1991. Astronomy Letters, 21(2). —P. 196—198. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1995AstL...21..196A (in Eng.).

Beavers W.I., & Eitter J.J. (2009) Radial velocity discriminated coronal photometric measurements at the July 11, 1991 total eclipse. Planetary and Space Science. 57, — P. 332—343. https://doi.org/10.1016/j.pss.2008.12.010 (in Eng.).

Beavers W.I., Eitter J.J., Carr P.H., & Cook B.C. (1980) Radial velocities in the solar corona. The Astrophysical Journal. — P. 238, 349. https://doi.org/10.1086/157991 (in Eng.).

Grotrian W. (1934) Über das Fraunhofersche Spektrum der Sonnenkorona [On the Fraunhofer spectrum of the solar corona]. Zeitschrift für Astrophysik, 8. — P. 124—146. NASA ADS: 1934ZA. .8..124G. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1934ZA.....8..124G (in Ger.).

Janssen P.J.C. (1883) Recherches sur le spectre solaire [Research on the solar spectrum]. Comptes rendus de l'Académie des sciences, 97, 586. https://lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/HY/HY.pdf (in Fr.).

Kimura H., & Mann I. (1998) Brightness of the solar F-corona. Earth, Planets and Space, 50. — P. 493—499. https://doi.org/10.1186/BF03352140 (in Eng.).

Kozlov Yu.A., Novikov S.B., & Shcheglov P.V. (1974) Shift and profile of the Mg I 5184 Å line in the F-corona during the solar eclipse of 1973, June 30. Astronomicheskii Tsirkulyar. — No. 808. — P. 1. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1974ATsir.808....1K (in Eng.).

Kuznechik O.P., Gorenkov V.N., & Kuznechik O.O. (2007) Astroclimate of Minsk [Astroklimat Minska]. Informatika. — No. 3. — P. 114—123. https://inf.grid.by/jour/article/view/650 (in Rus.).

Leinert Ch. (1975) Zodiacal light — a measure of the interplanetary environment. Space Science Reviews, 18. — P. 281—339. https://doi.org/10.1007/BF00212910 (in Eng.).

Makarova E.A., Kazachevskaya T.V., & Kharitonov A.V. (1994) On the variability of some characteristics of solar radiative flux. Solar Physics, 152. — P. 195—200. https://doi.org/10.1007/BF01473204 (in Eng.).

Shcheglov P.V., Shestakova L.I., & Ajmanov A.K. (1987) Results of interferometric observations of the

F-corona radial velocity field between 3 and 7 solar radii. Astronomy & Astrophysics, 173. — P. 383—388. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1987A%26A...173..383S (in Eng.).

Shestakova L., Serebryanskiy A., & Aimanova G. (2023) Observations of alkaline emissions Na I, K I and Li I during first minutes after DART probe impact on Dimorphos. Icarus, 400. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2023.115595 (in Eng.).

Shestakova L.I., & Demchenko B.I. (2010) Sky brightness during the solar eclipses of 29 March 2006 and 1 August 2008 [Yarkost' neba vo vremya solnechnykh zatmenii 29.03.2006 i 01.08.2008]. Izvestiya NAN RK. Physical-Mathematical Series. — No. 4. — P. 87—92. http://nblib.library.kz/elib/library.kz/journal/Shestakova2.pdf (in Rus.).

Shestakova L.I., & Demchenko B.I. (2016) Results of observations of the dust distribution in the F-corona of the Sun. Solar System Research, 50. — P. 143—160. https://doi.org/10.1134/S0038094616020040 (in Eng.).

Szalay J.R., Pokorný P., & Malaspina D.M. (2024) Size distribution of small grains in the inner Zodiacal Cloud. The Planetary Science Journal, 5. — P. 266—277. https://doi.org/10.3847/PSJ/ad8b27 (in Eng.).

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 66–76

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.384

UDC 621.311.22

©A. Khazhidinova[1*], A. Khazhidinov[2], 2025.
[1]Shakarim University, Semey, Kazakhstan;
[2]Center of Nuclear Medicine and Oncology, Semey, Kazakhstan.
E-mail: khazhidinova1991@mail.ru

ON THE ISSUE OF FUEL CONSUMPTION OF A THERMAL POWER PLANT

Khazhidinova Akbota — PhD, Acting Associate Professor, Department of Technical Physics and Thermal Power Engineering, Shakarim University, Semey, Kazakhstan,
E-mail: khazhidinova1991@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8802-1559;
Khazhidinov Azamat — Master of Physics, Cyclotron Engineer, Center of Nuclear Medicine and Oncology, Semey, Kazakhstan,
E-mail: khazhidinov@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9900-4111.

Abstract. The article addresses the problem of rational fuel use at Thermal Power Plant No. 1 in Semey, which is essential for ensuring reliable and efficient heat and power supply. The relevance of the study is determined by the need to analyze the annual fuel consumption structure for planning supplies and optimizing boiler operation. The methodology is based on data from the automated fuel supply control system. Annual consumption volumes were calculated for three steam boilers of type E-90-3.9-440 and two hot-water boilers of type KV-TK-116.3-150. The results showed that coal is the plant's dominant fuel: annual consumption reached 162,678 tons, accounting for more than 99% of the balance. The highest value was recorded for steam boiler No. 6 — 42,577.4 tons. The other steam boilers consumed 31,903.7 and 34,687.7 tons. Hot-water boilers used 22,467.4 and 31,041.8 tons, and their combined consumption exceeded 53,000 tons, which is comparable to the steam boilers and confirms their significant role in covering the heat load. Fuel oil use was relatively low and limited to startup and combustion stabilization, with a total of 778 tons per year. The maximum value was observed in steam boiler No. 7 — 198.5 tons. The findings confirm a balanced load distribution, stability of the fuel scheme, and efficiency of the plant's operation. The results can be applied to fuel supply planning, optimization of combustion regimes, and improving the reliability of heat supply in Semey.

Keywords: fuel consumption, steam boiler, hot-water boiler, coal, fuel oil, automated control system

CC BY NC

©А. Хажидинова[1]*, А. Хажидинов[2], 2025.
[1]Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан;
[2]Ядролық медицина және онкология орталығы, Семей, Қазақстан.
E-mail: khazhidinova1991@mail.ru

ЖЫЛУ ЭЛЕКТР СТАНЦИЯСЫНЫҢ ОТЫН ТҰТЫНУ МӘСЕЛЕСІ

Хажидинова Акбота — PhD, қауымдастырылған профессор м.а., Техникалық физика және жылу энергетика кафедрасы, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан,
E-mail: khazhidinova1991@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8802-1559;
Хажидинов Азамат — физика магистрі, циклотрон инженері, Ядролық медицина және онкология орталығы, Семей, Қазақстан,
E-mail: khazhidinov@mail.ru; ORCID:https://orcid.org/0009-0008-9900-4111.

Аннотация. Мақалада Семей қаласындағы №1 жылу электр орталығында отынды ұтымды пайдалану мәселесі қарастырылады. Бұл мәселе аймақ тұрғындарын жылу және электр энергиясымен сенімді әрі тиімді қамтамасыз ету үшін ерекше маңызға ие. Қазақстан энергетикасында көмірдің үлесі жоғары болғандықтан, нақты кәсіпорындардағы отын құрылымын талдау ғылыми және тәжірибелік тұрғыдан өзекті болып табылады. Зерттеудің өзектілігі — жылдық отын тұтыну көлемін анықтау арқылы отын жеткізуді жоспарлау, қазандық жұмысының режимдерін оңтайландыру және жалпы жүйенің тұрақтылығын бағалау қажеттілігімен түсіндіріледі. Әдістеме автоматтандырылған отын беру басқару жүйесінің нақты деректерін пайдалануға негізделді. Жылдық тұтыну көлемдері үш Е-90-3,9-440 бу қазандығы және екі КВ-ТК-116,3-150 су қыздыру қазандығы үшін есептеліп, олардың салыстырмалы жүктемесі анықталды. Нәтижелер көмірдің негізгі отын екенін көрсетті: жалпы шығыны 162 678 тонна болып, құрылымның 99%-дан астамын құрайды. Ең жоғары тұтыну №6 бу қазанында тіркелді — 42 577,4 тонна. Басқа бу қазандықтары тиісінше 31 903,7 және 34 687,7 тонна жұмсады. Су қыздыру қазандықтары аздау тұтынғанымен (22 467,4 және 31 041,8 тонна), олардың жиынтық көлемі 53 000 тоннадан асып, бу қазандықтарымен салыстырмалы деңгейге жетті және жылу жүктемесін жабудағы маңызды рөлін айқындады. Мазут шығыны шамалы болды және негізінен қазандықтарды іске қосу мен жануды тұрақтандыру үшін қолданылды. Жылдық көлемі 778 тоннаны құрады, оның ішінде ең жоғарысы №7 бу қазанында — 198,5 тонна. Алынған нәтижелер жүктеменің теңгерімді бөлінуін, отын схемасының тұрақтылығын және станция жұмысының тиімділігін растайды. Қорытындылар болашақта отын жеткізуді жоспарлауда, жану режимдерін жетілдіруде және Семей қаласының жылу жабдығының сенімділігін арттыруда қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: отын тұтыну, бу қазандығы, су қазандығы, көмір, мазут, автоматтандырылған басқару жүйесі

©А. Хажидинова[1]*, А. Хажидинов[2], 2025.
[1]Шәкәрім университет, Семей, Казахстан;
[2]Центр ядерной медицины и онкологии, Семей, Казахстан.
E-mail: khazhidinova1991@mail.ru

К ВОПРОСУ О РАСХОДЕ ТОПЛИВА НА ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Хажидинова Акбота — PhD, и.о. ассоциированного профессора, кафедра «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Семей, Казахстан,
E-mail: khazhidinova1991@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8802-1559;
Хажидинов Азамат — магистр физики, инженер циклотрона, Центр ядерной медицины и онкологии, Семей, Казахстан,
E-mail: khazhidinov@mail.ru; ORCID:https://orcid.org/0009-0008-9900-4111.

Аннотация. В статье рассматривается проблема рационального использования топлива на теплоэлектроцентрали № 1 города Семей, что имеет важное значение для обеспечения надёжности и эффективности тепло- и энергоснабжения. Актуальность исследования определяется необходимостью анализа структуры годового топливопотребления для планирования поставок и оптимизации режимов работы котельного оборудования. Методика основана на использовании данных автоматизированной системы управления подачей топлива. Проведён расчёт годовых объёмов потребления для трёх паровых котлов типа Е-90-3,9-440 и двух водогрейных котлов типа КВ-ТК-116,3-150. Результаты показали, что уголь является основным топливом станции: его годовой расход составил 162 678 тонн, что превышает 99% в структуре потребления. Наибольшая нагрузка приходится на паровой котёл № 6 — 42 577,4 тонн. Для двух других паровых агрегатов расход составил 31 903,7 и 34 687,7 тонн. Водогрейные котлы потребляют меньше — 22 467,4 и 31 041,8 тонн соответственно, однако их суммарный расход превышает 53 000 тонн, что сопоставимо с показателями паровых котлов и подтверждает их важную роль в покрытии тепловой нагрузки. Расход мазута невелик и ограничивается функциями розжига и стабилизации горения. Годовой объём составил 778 тонн, наибольшее значение зафиксировано у парового котла № 7 — 198,5 тонн. Сделанные выводы свидетельствуют о сбалансированном распределении нагрузки, устойчивости топливной схемы и эффективности эксплуатации станции. Результаты могут быть использованы при планировании топливоснабжения, совершенствовании режимов горения и повышении надёжности теплоснабжения города Семей. Ключевые слова: потребление топлива, паровой котёл, водогрейный котёл, уголь, мазут, автоматизированная система управления.

Ключевые слова: потребление топлива, паровой котёл, водогрейный котёл, уголь, мазут, автоматизированная система управления

CC BY NC

Introduction. Energy supply for industrial and residential consumers in modern cities is predominantly provided by combined heat and power plants (CHPs), which play a key role in the cogeneration of thermal and electrical energy (Lepiksaar et al., 2023; Ogbuabia et al., 2023; Smagulova et al., 2023; Chen, 2022; Safari et al., 2025).

Amid the global intensification of the greenhouse effect, rising atmospheric pollution, and increasingly stringent environmental requirements, the reliability and operational efficiency of coal-fired CHP plants have become critically important (Li et al., 2025; Wang P. et al., 2025). Maintaining stable and efficient plant operation is essential not only for ensuring uninterrupted energy supply but also for reducing pollutant emissions, optimizing fuel consumption, and improving overall energy efficiency, thereby supporting sustainable and environmentally responsible power generation (Wang C. et al., 2023).

Recent advances in intelligent coal-fired power technologies have significantly improved the reliability and operational efficiency of CHP plants (Liu et al., 2025).

CHP-1 in the city of Semey is the only thermal power plant in the city and has been in operation since 1931, supplying thermal energy and steam to both residential and municipal facilities as well as industrial enterprises. The heat consumers are located on the left bank of Semey and include residential buildings, administrative institutions, and industrial sites (BAQ.KZ, 2023). Figure 1 presents the thermal schematic of the steam circuit of CHP-1 in Semey, illustrating one of the two main pathways of heat generation at the plant.

The main source of thermal energy in the presented scheme is the steam boiler unit (1) of type E–90–3.9–440, designed to produce high-pressure water steam (Serikkazinov et al., 2025). CHP-1 operates three such steam boilers. The generated steam is directed to the steam turbine (2), where it is converted into mechanical rotational energy that drives the electric generator (3) to produce electricity. The installed electric capacity of the plant is 18 MW. The generated electricity is used primarily for internal needs.

After exiting the turbine, the exhaust steam enters the condenser (4), where it transitions to the liquid phase. The condensate pump (5) transfers the condensate to the feedwater tank (6), from which water is returned to the boiler using the feedwater pump (9). To compensate for losses, chemically treated water is supplied to the circuit via pipeline (10).

Thermal energy for district heating is extracted from the turbine system and delivered to heat consumers (7), while circulation in the heating network is maintained by the district heating pump (8).

It is worth noting that, in addition to steam boilers, CHP-1 also operates two hot-water boilers of the KV-TK-116.3-150 type, which are used to produce thermal energy depending on district heating demand (Khazhidinova et al., 2023). The thermal capacity of CHP-1 reaches 413 Gcal/h, which enables coverage of a significant portion of the annual thermal load.

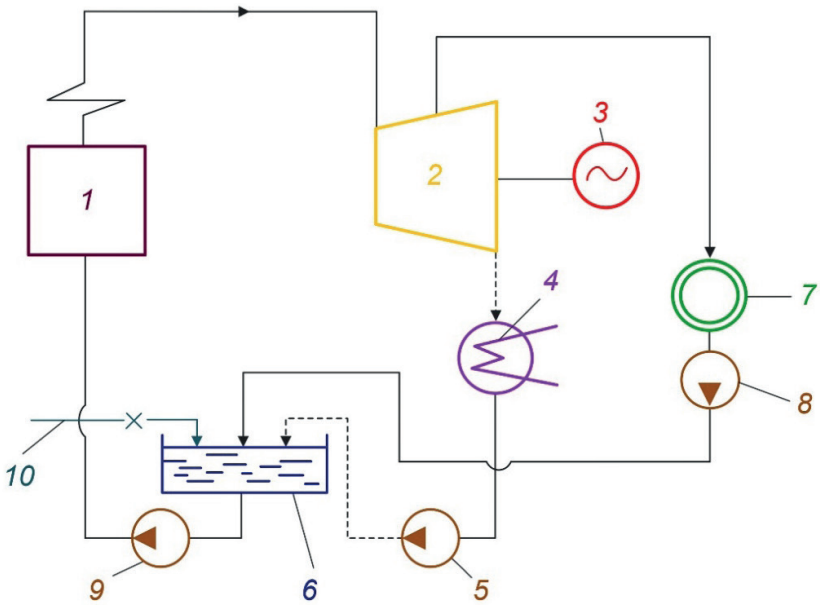


Figure 1. Thermal schematic of the steam circuit of CHP-1 in Semey: 1 — boiler unit E-90-3.9-440; 2 — steam turbine; 3 — electric generator; 4 — condenser; 5 — condensate pump; 6 — feedwater tank; 7 — heat consumers; 8 — district heating pump; 9 — feedwater pump; 10 — pipeline supplying chemically treated water

The city's district heating system is a complex and dynamic mechanism, whose efficiency largely depends on the rational use of fuel. The primary fuel used at CHP-1 is Karazhyra coal, delivered by rail and stored in an open yard. For boiler startup and combustion stabilization, fuel oil grade M-100 is used, delivered in rail tankers and stored in dedicated reservoirs (Stepanova et al., 2024). The main factors affecting fuel consumption are presented in Figure 2.

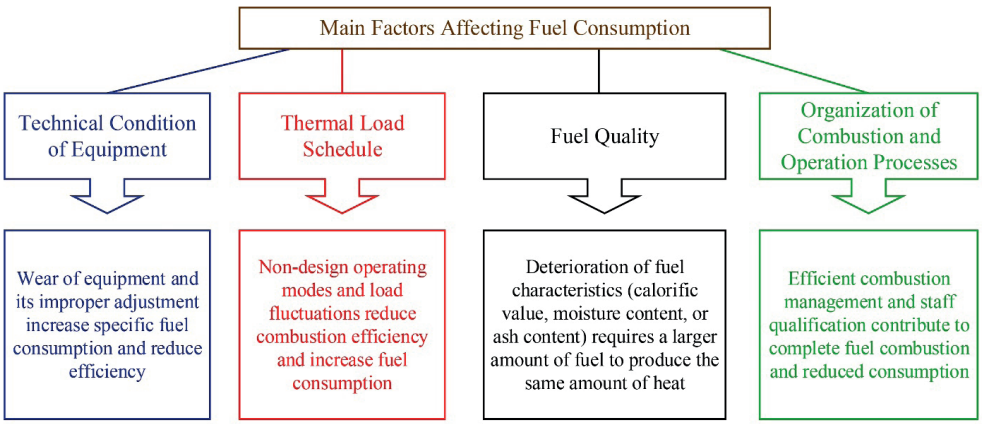


Figure 2. Main Factors Affecting Fuel Consumption

CC BY NC

The equipment and boiler units of the CHP plant are relatively new — installed after 2015, which ensures stable operation and compliance with modern technical requirements.

The use of two types of fuel provides flexibility in the operation of boiler units, depending on production conditions and seasonal fluctuations in heat demand.

To ensure that the fuel meets established technical requirements and to support the efficient operation of the boiler equipment, fuel quality analysis is carried out in the laboratory at the CHP plant.

To ensure reliable and efficient operation of the fuel supply system, an automated control system (ACS) for fuel supply has been implemented at the CHP. The main function of this system is to monitor and regulate the fuel delivery processes from the storage yard to the boiler units in accordance with the current thermal load (Serikkazinov et al., 2025; Khazhidinova et al., 2023; Stepanova et al., 2024).

The automated control system (ACS) provides:

- automatic control of main and auxiliary fuel supply mechanisms (belt and scraper conveyors, crushers, feeders);
- monitoring of process parameters (fuel consumption, bunker levels, operation of actuators);
- equipment protection from emergency situations through the implementation of interlock and alarm algorithms;
- collection, storage, and real-time display of information on equipment status and process parameters.

The system is equipped with specialized software. The use of the automated control system (ACS) significantly improves control accuracy, reduces fuel losses, minimizes the human factor, and enhances the overall reliability of the fuel supply process. Additional advantages of the ACS include faster decision-making, stable equipment operation under variable loads, reduced risk of overloads and fuel delivery failures, and simplified maintenance through a built-in diagnostics and parameter archiving system (Janta-Lipińska et al., 2024; Lee et al., 2025).

The aim of this study is to analyze the structure of fuel consumption at CHP-1, determine the annual volumes of coal and fuel oil usage, and identify the operational characteristics of the boiler equipment. The results make it possible to assess the current efficiency of fuel resource utilization.

Material and methods. The object of this study is the fuel supply system of CHP-1 in the city of Semey, which includes steam and hot-water boilers operating on solid and liquid fuels. The aim of the research is to conduct a quantitative and qualitative analysis of the annual fuel consumption at the plant, taking into account the specifics of operating different types of boiler equipment.

The analysis is based on actual operational data on annual fuel consumption for the 2024 - 2025 heating period. These data were obtained from operator workstation readings and from the interface of the automated fuel supply control system (ACS). The 2024 — 2025 heating period represents the most recent fully completed reporting period at the time of the study.

The analysis was based on actual data on annual fuel consumption for a defined reporting period. Data were obtained from readings displayed on operator station monitors and in the ACS interface, ensuring high accuracy and real-time data collection. Coal and fuel oil consumption for each boiler was recorded separately, allowing for a comparative assessment of thermal load levels and operating intensity.

To visualize and interpret the data, a diagram of annual fuel consumption was compiled, with coal consumption presented as bars and fuel oil as a line chart. The visual representation made it possible to identify both absolute consumption values and the share of each fuel type in the overall consumption structure. Particular attention was given to the ratio between steam and hot-water boilers. Since hot-water boilers are operated on par with steam boilers, the fuel distribution analysis was carried out without a preliminary division into base and peak units.

Thus, the applied research method represents a systematic technical analysis with elements of statistical processing of operational data. This approach makes it possible to reasonably assess the effectiveness of the current fuel supply structure at CHP-1 and identify key trends and features in the operation of thermal equipment.

Results and discussion. Figure 3 shows the annual fuel consumption by boiler units.

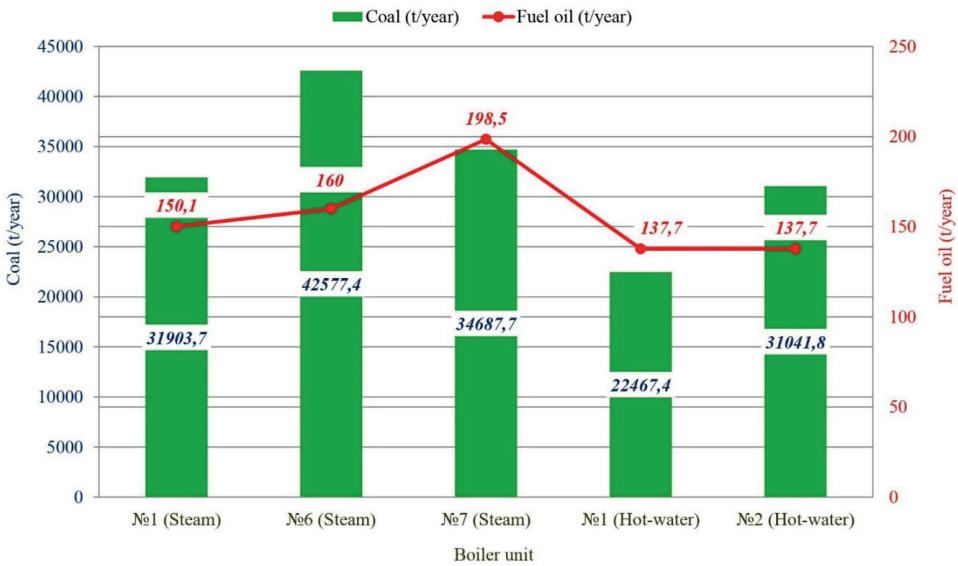


Figure 3. Annual fuel consumption by boiler units

The highest coal consumption is recorded for steam boiler No. 6 of type E-90-3.9-440 and amounts to 42,577.4 tons per year, indicating a high thermal load and intensive operation. For the other steam boilers, this indicator is 31,903.7 and 34,687.7 tons per year, respectively. Hot-water boilers show lower coal consumption volumes — 22,467.4 and 31,041.8 tons per year, which corresponds to their operational purpose.

Fuel oil consumption is significantly lower compared to coal. The highest consumption of fuel oil is observed for steam boiler No. 7 — 198.5 tons per year, likely due to more

CC BY NC

frequent startups and the need to stabilize combustion. For steam boilers No. 1 and No. 6, fuel oil consumption is 150.1 and 160.0 tons per year, respectively. Hot-water boilers No. 1 and No. 2 consume equal amounts of fuel oil — 137.7 tons per year each, which indicates stable operating conditions and a standardized ignition approach.

The total annual coal consumption amounts to approximately 162,678 tons per year, while the total annual fuel oil consumption is 778 tons per year. This confirms that coal is the main fuel used at CHP-1 for all boiler types. Fuel oil is primarily used as startup and auxiliary fuel, as evidenced by its minor share in total consumption and the distribution pattern across boiler types.

The analysis of annual fuel consumption at CHP-1 in Semey provides a comprehensive understanding of the operational balance between steam and hot-water boilers. The results obtained in this study generally confirm the well-documented trends in the literature, according to which coal remains the predominant fuel for combined heat and power plants in Kazakhstan and other Central Asian countries (Ogbuabia et al., 2023; Smagulova et al., BAQ.KZ, 2023). The calculated annual coal consumption of more than 162,000 tons, representing over 99% of the total fuel balance, is consistent with previous studies emphasizing the critical role of coal-fired boilers in ensuring regional energy stability (Li et al., 2025; Wang C. et al., 2023; Stepanova et al., 2024).

Compared with earlier works that mainly focused on combustion efficiency of non-design or low-grade Karazhyra coal (Serikkazinov et al., 2025; Khazhidinova et al., 2023; Stepanova et al., 2024), this study expands the scope by analyzing not only combustion aspects but also the overall fuel consumption structure at the plant level. This comprehensive approach highlights the operational significance of hot-water boilers, whose total annual coal consumption (over 53,000 tons) is comparable to steam boilers. Previous studies tended to describe hot-water boilers as auxiliary or peak-load equipment (Wang P. et al., 2025; Wang C. et al., 2023); however, our findings demonstrate their permanent contribution to covering base thermal loads, which represents a distinctive feature of Semey CHP-1.

The relatively small share of fuel oil consumption (778 tons per year, less than 1% of the balance) confirms its strictly auxiliary role. This is consistent with international practice, where liquid fuels are primarily used for boiler startup and flame stabilization (Chen M., 2022; Li et al., 2025). At the same time, the observed differences in fuel oil consumption across boilers (e.g., higher use in steam boiler No. 7) suggest possible differences in startup frequency or operational regimes, which require additional investigation.

The strength of this study lies in the use of actual operational data from the automated control system, which ensures accuracy and minimizes subjective interpretation. Such an approach corresponds to modern research practices in the field of intelligent coal-fired power plant monitoring (Liu et al., 2025). Nevertheless, the study also has limitations. It covers only one reporting period and does not analyze seasonal variations in fuel consumption, which may affect the overall balance. In addition, the environmental dimension — such as emissions of SO□, NO_x, and particulate matter — was not included in the present analysis, although this factor is becoming increasingly relevant

in the context of sustainable power generation (Li et al., 2025; Janta-Lipińska et al., 2024).

Future research should therefore focus on a more detailed assessment of seasonal consumption patterns, efficiency of individual boilers under varying loads, and the integration of advanced combustion optimization technologies, including artificial intelligence-driven control systems (Safari et al., 2025; Lee et al., 2025). In addition, linking fuel consumption data with environmental performance indicators would provide a more holistic evaluation of the plant's operation.

In summary, this study contributes to the understanding of fuel consumption patterns at CHP-1 in Semey, confirms the predominance of coal as the primary energy resource, and emphasizes the significant role of hot-water boilers in ensuring the reliability of district heating. The findings provide a useful basis for practical applications in fuel supply planning, optimization of combustion regimes, and enhancement of energy security in the region.

Conclusion. The analysis of the annual fuel consumption at CHP-1 in the city of Semey made it possible to determine the fuel consumption structure and identify operational features of the boiler equipment. Coal from the Karazhyra deposit is the primary fuel for all types of boilers – both steam and hot-water. Its share in total consumption constitutes an overwhelming majority – more than 99%, with a total annual consumption of approximately 162,678 tons.

Fuel oil grade M-100, with an annual consumption of 778 tons, serves a strictly limited auxiliary function. Its use is mainly associated with boiler startup and combustion stabilization during initial operating modes, which is particularly relevant during start-up and unstable operating conditions.

It is important to note that the hot-water boilers at CHP-1 do not operate as peak-load or standby units, but function alongside the steam boilers, providing a significant share of the thermal load. This is reflected in the high coal consumption — over 53,000 tons per year for the two hot-water boilers, which is comparable to that of the steam units.

The joint operation of steam and hot-water boilers at CHP-1 allows for flexible response to varying loads and ensures the supply of both electricity and heat in accordance with current demand. Thus, the fuel consumption structure of CHP-1 demonstrates stability and efficiency, as evidenced by the balanced load distribution among boiler units.

The scientific novelty of the study lies in the comprehensive assessment of fuel consumption for both steam and hot-water boilers, taking into account their joint operation, which makes it possible to more objectively characterize the load structure and the efficiency of energy resource utilization.

The practical significance of the work consists in the possibility of using the obtained results to optimize fuel regimes, improve the planning of coal and fuel oil supplies, increase combustion efficiency, as well as to develop measures for energy saving and enhancing the reliability of the city's heat supply system.

CC BY NC

Литература

BAQ.KZ (2023). ТЭЦ за 1 млрд долларов: как россияне будут строить самый дорогой энергообъект Семея. https://rus.baq.kz/tets-za-1-mlrd-dollarov-ot-rossiyan-v-semee-mozhet-stat-samym-dorogim-proektom-regiona_170094 дата обращения 30 июля, 2025).

Chen M. (2022). Whether it is economical to use combined heat and power (CHP) system for the efficient utilization of associated petroleum gas in oil extraction sites in China: A cost-benefit analysis considering environmental benefits. Frontiers in Environmental Science, 10, Article 984872. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.984872.

Janta-Lipińska S., Shkarovskiy A., Chrobak Ł. (2024). Improving the fuel combustion quality control system in medium power boilers. Energies, 17(12), 3055. https://doi.org/10.3390/en17123055.

Lee K.J., Choi S.W., Lee E.B. (2025). Artificial intelligence-driven approach to optimizing boiler power generation efficiency: The advanced boiler combustion control model. Energies, 18(4), 820. https://doi.org/10.3390/en18040820.

Lepiksaar K., Mašatin V., Krupenski I., Volkova A. (2023). Effects of coupling combined heat and power production with district cooling. Energies, 16(12), 4552. https://doi.org/10.3390/en16124552.

Li J., Fang F., Chen Y., Yu S., Liu J., Du Y., Du M., Zhang Y., Wang Q., Niu Y. (2025). Properly positioning coal power in decarbonizing the global power systems. Engineering. https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.06.019.

Liu J., Du Z., Wang Q., Jiang K., Gao D. (2025). Critical review of intelligent coal-fired power technologies and applications. Engineering. https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.07.036.

Ogbuabia T.B., Guney M., Baimatova N., Ulusoy I., Karaca F. (2023). Assessing the impact of combined heat and power plants (CHPPs) in Central Asia: A case study in Almaty for PM2.5 simulations using WRF-AERMOD and ground-level verification. Atmosphere, 14(10), 1554. https://doi.org/10.3390/atmos14101554.

Safari A., Oshnoei A. (2025). An overview of recent AI applications in combined heat and power systems. Energies, 18(11), 2891. https://doi.org/10.3390/en18112891.

Smagulova Sh., Yermukhanbetova A., Nurgaliyeva K., Baimykhanova S., Baimukasheva Zh., Manap A., Koyshinova G., Akimbekova Ch. (2023). The impact of energy production on the introduction of ICT and the growth of AIC in Kazakhstan. International Journal of Energy Economics and Policy. — V. 13(5). — P. 477-488. https://doi.org/10.32479/ijeep.13765.

Stepanova O.A., Kasengaliev M.K., Umyrzhan T.N., Khazhidinova A.R. (2024). Research combustion efficiency of unprojected coal. Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences — V. 2(14) — P. 364-370.

Wang C., Song J. (2023). Performance assessment of the novel coal-fired combined heat and power plant integrating with flexibility renovations. Energy, 263(C), 125886. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125886.

Wang P., Tian X., Sun K., Huang Y., Wang Z., Sun L. (2025). Power system reliability assessment considering coal-fired unit peaking characteristics. Algorithms, 18(4), 197. https://doi.org/10.3390/a18040197.

Серикказинов Ш.Т., Степанова О.А., Склярова Е.А. (2025). Исследование процессов сжигания газообразного топлива на ТЭЦ-1 города Семей. Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. — Т. 2(18). — С. 405-410. https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2(18)-50.

Хажидинова А.Р., Степанова О.А., Ермоленко М.В., Хажидинов А.С. (2023). К вопросу эффективного сжигания непроектного топлива угля разреза Каражыра. Вестник НЯЦ РК. — Т. 2. — С. 58-65. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-2-58-65.

References

BAQ.KZ (2023). TEC za 1 mlrd dollarov: kak rossiyane budut stroit' samyj dorogoj energoob"ekt Semeya [A $1 billion thermal power plant: How Russia will build Semey's most expensive energy facility]. https://rus.baq.kz/tets-za-1-mlrd-dollarov-от-rossiyan-v-semee-mozhet-stat-samym-dorogim-proektom-regiona_170094 (accessed July 30, 2025) (in Rus.).

Chen M. (2022). Whether it is economical to use combined heat and power (CHP) system for the

efficient utilization of associated petroleum gas in oil extraction sites in China: A cost-benefit analysis considering environmental benefits. Frontiers in Environmental Science, 10, Article 984872. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.984872 (in Eng.).

Janta-Lipińska S., Shkarovskiy A., Chrobak Ł. (2024). Improving the fuel combustion quality control system in medium power boilers. Energies, 17(12), 3055. https://doi.org/10.3390/en17123055 (in Eng.).

Khazhidinova A.R., Stepanova O.A., Yermolenko M.V., Khazhidinov A.S. (2023). K voprosu effektivnogo szhiganija neproektnogo topliva uglja razreza Karazhyra [On the issue of efficient combustion of non-design coal Karazhyra]. NNC RK Bulletin. — V. 2. —P. 58-65. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-2-58-65 (in Rus.).

Lee K.J., Choi S.W., Lee E.B. (2025). Artificial intelligence-driven approach to optimizing boiler power generation efficiency: The advanced boiler combustion control model. Energies, 18(4), 820. https://doi.org/10.3390/en18040820 (in Eng.).

Lepiksaar K., Mašatin V., Krupenski I., Volkova A. (2023). Effects of coupling combined heat and power production with district cooling. Energies, 16(12), 4552. https://doi.org/10.3390/en16124552 (in Eng.).

Li J., Fang F., Chen Y., Yu S., Liu J., Du Y., Du M., Zhang Y., Wang Q., Niu Y. (2025). Properly positioning coal power in decarbonizing the global power systems. Engineering. https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.06.019 (in Eng.).

Liu J., Du Z., Wang Q., Jiang K., Gao D. (2025). Critical review of intelligent coal-fired power technologies and applications. Engineering. https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.07.036 (in Eng.).

Ogbuabia T.B., Guney M., Baimatova N., Ulusoy I., Karaca F. (2023). Assessing the impact of combined heat and power plants (CHPPs) in Central Asia: A case study in Almaty for PM2.5 simulations using WRF-AERMOD and ground-level verification. Atmosphere, 14(10), 1554. https://doi.org/10.3390/atmos14101554 (in Eng.).

Safari A., Oshnoei A. (2025). An overview of recent AI applications in combined heat and power systems. Energies, 18(11), 2891. https://doi.org/10.3390/en18112891 (in Eng.).

Serikkazinov Sh.T., Stepanova O.A., Sklyarova E.A. (2025). Issledovanie processov szhiganija gazoobraznogo topliva na TEC-1 v gorode Semej [Study of gaseous fuel combustion processes at CHP-1 in Semey city]. Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences. — V. 2(18). — P. 405-410. https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2(18)-50 (in Rus.).

Smagulova Sh., Yermukhanbetova A., Nurgaliyeva K., Baimykhanova S., Baimukasheva Zh., Manap A., Koyshinova G., Akimbekova Ch. (2023). The impact of energy production on the introduction of ICT and the growth of AIC in Kazakhstan. International Journal of Energy Economics and Policy. — V. 13(5). — P. 477-488. https://doi.org/10.32479/ijeep.13765 (in Eng.).

Stepanova O.A., Kasengaliev M.K., Umyrzhan T.N., Khazhidinova A.R. (2024). Research combustion efficiency of unprojected coal. Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences — V. 2(14) — P. 364-370. (in Eng.).

Wang C., Song J. (2023). Performance assessment of the novel coal-fired combined heat and power plant integrating with flexibility renovations. Energy, 263(C), 125886. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125886 (in Eng.).

Wang P., Tian X., Sun K., Huang Y., Wang Z., Sun L. (2025). Power system reliability assessment considering coal-fired unit peaking characteristics. Algorithms, 18(4), 197. https://doi.org/10.3390/a18040197 (in Eng.).

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 77–90

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.385

UDC 538.94
МРНТИ 29.17.21

©T.B. Koshtybayev[1], K.K. Zhantleuov[2], M.E. Aliyeva[2], 2025.
[1]Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan;
[2]Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: moldir-2008@mail.ru

GREENS FUNCTION IN THE THEORY OF QUANTUM FLUIDS

Koshtybayev Talgat — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics of the Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: koshtybayev70@mail.ru; ORCID:https://orcid.org/0009-0004-7344-6801;
Zhantleuov Kenzhebek — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics and Mathematical Modelling of the Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: Kzhantleuov@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0009–0001–6658–1165;
Alieva Moldir — Master of Sciences, Senior lecturer of the Physics Department of the Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: moldir-2008@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0440-6211.

Abstract. This article is devoted to the theoretical investigation of processes in macroscopic systems based on the corpuscular–wave dualism and quantum statistical distributions using the Green's function method. In particular, it provides a detailed description of the characteristics and properties of the Green's function for an ideal Fermi liquid, single- and two-particle Green's functions, as well as Green's functions for extreme temperatures and the Dirac and Schrödinger equations. The work analyzes aspects of applying the Green's function method to processes in many-particle quantum systems and to solutions of equations describing the particles that constitute such systems. For a given operator and boundary conditions, the Green's function can be defined, and the solution to the corresponding equation describing the fluid can be written in integral form using this function. A distinctive feature of this method lies in the application of mathematical physics tools – such as Fourier methods, integral transforms, special functions, and mathematical analysis – to solve problems in quantum macrophysics that are governed by the principles of quantum and statistical mechanics. The relevance of this study stems from the application of the Green's function method to quantum phenomena. This approach is considered one of the most effective methods for solving partial differential equations that describe various processes. It requires transforming

the original differential equation into an equivalent integral equation involving Green's functions, which is then solved. The transformation involves moving to momentum representation and applying Fourier transforms via complex variables.

Keywords: Fermi liquid, Fourier transform, momentum representation, macroscopic system, Green's function, quantum system

©Т.Б. Қоштыбаев[1], К.Қ. Жантлеуов[2], М.Е. Алиева[2], 2025.
[1]Қазақ ұлттық педагогикалық қыздар университеті, Алматы, Қазақстан;
[2]Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан.
E-mail: moldir-2008@mail.ru

КВАНТТЫҚ СҰЙЫҚТАР ТЕОРИЯСЫНДАҒЫ ГРИН ФУНКЦИЯЛАРЫ

Қоштыбаев Талғат — Физика—математика ғылымдарының кандидаты, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университетінің доценті, Алматы, Қазақстан,
E-mail: koshtybayev70@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7344-6801;
Жантлеуов Кенжебек — Физика—математика ғылымдарының кандидаты, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университетінің доценті, Алматы, Қазақстан,
E-mail: Kzhantleuov@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0009–0001–6658–1165;
Алиева Мөлдір — Жаратылыстану ғылымдарының магистрі, Абай атындағы Казақ ұлттық педагогикалық университетінің аға оқытушысы, Алматы, Қазақстан,
E-mail: moldir-2008@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0440-6211.

Аннотация. Мақала корпускула–толқындық екіжақтылық және кванттық статистикалық үлестірімдерге негізделген макроскопиялық жүйелердегі процестерді Грин функциялары тәсілімен теориялық тұрғыда зерттеуге арналған. Нақты айтқанда, идеал ферми–сұйықтың Грин функциялары, бір және екі бөлшектік Грин функциялары, шекті температураға және Дирак, Шредингер теңдеулеріне арналған Грин функцияларының ерекшеліктері мен қасиеттері талданып көрсетілген. Көпбөлшекті кванттық жүйелерде өтетін процестер мен сондағы бөлшектерге арналған теңдеулерді шешуде Грин функциялары әдісін қолданудың тиімді тұстары сараланған. Нақтылы бір оператор мен шекаралық шарттар үшін Грин функциясын анықтап, осы функцияның көмегімен сұйықты сипаттайтын теңдеудің шешімін интеграл түрінде жазуға болады. Бұл әдістің өзіндік бір ерекшелігі кванттық механика мен статистикалық механика заңдылықтарына жүгінетін кванттық макрофизиканың осы тектес есептерін шығару барысында математикалық физикадағы Фурье әдісі, интегралдық түрлендірулер әдісі мен арнайы функциялар, математикалық талдаудың әдістері қолданылады. Тақырыптың өзектілігі кванттық құбылыстарға Грин функцияларын қолдану тәсілімен байланысты екендігін айтып өттік. Себебі, бұл тәсіл түрлі процестерге сәйкес келетін дербес туындылы дифференциялдық теңдеулерді шешудің ең бір қолайлы тәсілдерінің біріне саналады, яғни құбылысты сипаттайтын дифференциялдық теңдеуден соған эквивалентті түрдегі интегралдық теңдеуге өтіп, Грин функциясы қатысатын осы теңдеуді шешу қажет болады. Дифференциялдық теңдеуден интегралдық теңдеуге өту барысында импульстік

CC BY NC

көрініске ауысу, комплекстік айнымалылыр арқылы Фурье түрлендірулері жасалынады. Нөлдік және бірінші жуықтау шарттары бойынша интегралдық өрнектерге қол жеткізіліп, құбылыстың ерекшеліктеріне қарай интеграл шектері бойынша интегралдауды орындау арқылы нақты шешімдер алынатын болады. Қарастырылған макроскопиялық жүйелер толқындық функциялары тұрақты, ал физикалық шамаларға сәйкес қойылатын операторлары уақытқа тәуелді болатын гейзенбергтік ұстанымға сәйкестендірілді. Есептеулер сыртқы өрістің әсері ескерілген және ескерілмеген жағдайлар үшін жүргізілді, сонымен бірге нөлінші және бірінші жуықтау шарттарына сәйкес келетін нәтижелер келтірілді.

Түйін сөздер: ферми–сұйық, Фурье–түрлендіру, импульстік көрініс, макроскопиялық жүйе, Грин функциясы, кванттық жүйе

©Т.Б. Коштыбаев[1], К.К. Жантлеуов[2], М.Е. Алиева[2], 2025.
[1]Казахский национальный женский педагогический университет,
Алматы, Казахстан;
[2]Казахский национальный педагогический университет имени Абая,
Алматы, Казахстан.
E-mail: moldir-2008@mail.ru

ФУНКЦИИ ГРИНА В ТЕОРИИ КВАНТОВЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Коштыбаев Талгат — кандидат физико-математических наук, доцент, Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан,
E-mail: koshtybayev70@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7344-6801;
Жантлеуов Кенжебек — кандидат физико-математических наук, доцент, Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Алматы,
E-mail: Kzhantleuov@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0009–0001–6658–1165;
Алиева Молдир — магистр естественных наук, старший преподаватель, Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Алматы, Казахстан,
E-mail: moldir-2008@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0440-6211.

Аннотация. Статья посвящена теоретическому изучению процессов в макроскопических системах на основе корпускулярно-волнового дуализма и квантовых статистических распределений с использованием метода функций Грина. Подробно описаны особенности и свойства функции Грина идеальной ферми-жидкости, одно- и двухчастичных функций Грина, а также функций Грина для предельных температур и для уравнений Дирака и Шредингера. Проанализированы аспекты применения метода функций Грина к процессам, протекающим в многочастичных квантовых системах, и к решению уравнений, предназначенных для частиц, образующих такие системы. Для заданного оператора и граничных условий можно определить функцию Грина и через неё представить решение уравнения, описывающего жидкость, в виде интеграла. Отличительная особенность метода заключается в том, что при решении задач квантовой макрофизики, основанных на законах квантовой механики и статистической физики, используются методы математической физики:

преобразования Фурье, интегральные преобразования и специальные функции. Актуальность исследования связана с применением метода функций Грина к квантовым явлениям. Такой подход является одним из наиболее эффективных способов решения уравнений в частных производных, описывающих различные физические процессы. Переход от дифференциального уравнения к эквивалентному интегральному, учитывающему функцию Грина, включает переход к импульсному представлению и применение преобразований Фурье с использованием комплексных переменных. В нулевом и первом приближениях получаются интегральные выражения, а конкретные решения зависят от выполнения интегрирования по соответствующим пределам, определяемым физической природой явления. Рассматриваемые макроскопические системы соответствуют гейзенберговскому представлению, в котором волновые функции постоянны, а операторы, соответствующие физическим величинам, зависят от времени.

Ключевые слова: ферми-жидкость, преобразование Фурье, импульсное представление, макроскопическая система, функция Грина, квантовая система

Кіріспе. 1938 жылы П. Капица мен Д. Аллен ашқан кванттық сұйықтар–кванттық эффекттерге (мысалы, энергияның кванталуына, бөлшектердің корпускула–толқындық екіжақтылығына және кванттық статистикалық үлестірімдерге) негізделген макроскопиялық жүйе. Кванттық механикада жекелеген бөлшектердің жай–күйін, олардың өзара әсерлесулерін сиапаттауға мүмкүндік бар, ал кванттық сұйықтағы саны көп бөлшектерді жеке–дара алып қарастыру мүмкін емес. Олардың ұжымдастығына негізделген процестер кезінде ғана кванттық қасиеттер байқалады. Төменгі температуралардағы фермиондардан құрылған асқынаққыш гелий–4 пен ферми–сұйық гидродинамиканың негізгі зерттеу нысаны болып табылады және бұлардың табиғаты кванттық сұйық талаптарын толығымен қанағаттандырады. Бұл орталарда негізінен кванттық макроскопиялық құбылыстар өтеді (Матухин и др. 2018:55). Металдар мен жартылай өткізгіштердегі электрондар, диэлектриктердегі экситондар және атом ядросындағы нуклондар кванттық сұйық қатарына қосыла алады.

1830 жылы британдық математик Джордж Грин электростатика мен жылу өткізгіштікке қатысты біртексіз шекті есептерді шешу барысында өзінің атымен аталатын функцияларды енгізіп, олардың теориялық құрылымының негізін жасап шыққан болатын. Математикалық физикадағы негізгі математикалық ұғым немесе құралы болып табылатын осы функциялар XX ғасыр бойы жетіле (дами) отырып электродинамикадағы, өрістің кванттық теориясындағы, шашыраулар теориясындағы шекаралық шарттары бар сызықтық біртексіз дифференциялдық теңдеулерді шешуді анағұрлым жеңілдетіп берді. Нақтылай айтсақ, өрістердің кванттық теориясында Грин функциялары кеңістік–уақыттың бір нүктесінен басқа бір нүктесіне өту ықтималдылығын сипаттаса, шашыраулар теорясында бұлар бөлшектердің әртүрлі нысандардан шашырауын сипаттап беруге қауқарлы болды. Сонымен бірге, ауытқулар теориясында да Грин функциялары әртүрлі

CC BY NC

кванттық процестерге арналған Фейнмандық диаграммаларды тұрғызуға септігін тигізді.

Кванттық сұйыққа арналған Грин функциясы көп денелі жүйелердің қасиеттерін сипаттауға арналған математикалық құрыл (аппарат, инструмент) есебінде қолданылатыны айтылды. Ол сыртқы әсерлердің жүйеге жасайтын ықпалын, жүйенің осы ықпалға қатысты іс–әрекетін және жүйенің термодинамикалық және динамикалық қасиеттерін бағалауға мүмкіндік береді, яғни ол жүйенің тепе–теңділік пен тепе–теңсіздік күйлердегі жағдайларынан хабардар етуге қауқарлы. Сонымен бірге, Грин функцияларын тығыздықты, корреляциялық функцияларды, квазибөлшектер спектрін және т.б. маңызды шамаларды есептеуге жемісті түрде қолданылып келеді. Ферми–сұйықтың температурасына қатысты есептер жылулық эффекттерді ескеретін температуралық Грин функциялары арқылы шешіледі (Малышев, 2022:435). Ал, жеке дара бөлшектің басқа бөлшектер арасындағы қозғалысына қатысты мәселер бір бөлшектік Грин функциялары бойынша шешілсе, екі бөлшектік Грин функциялары екі бөлшек арасындағы корреляцияны анықтап бере алады.

Ұсынылып отырған мақалада жоғарыда келтірілген теориялық мәселелердің бірқатарына есептеулер жүргізіліп, олар жүйеленіп, ықшамды түрлерде көрсетілетін болады. Атап айтқанда, макроскопиялық жүйелер мен идеал ферми–сұйықтың Грин функциялары, екі бөлшектік және шекті температуралық Грин функциялары, Дирак, Шредингер теңдеулеріне арналған Грин функциялары қарастырылатын болады. Алынған нәтижелер салыстырмалы бағаланатын болады.

Зерттеу материалдары. Төменгі температуралардағы сұйық гелийді кванттық сұйық ретінде қарастыра отырып оны Грин функциялары арқылы зерттеу кезіндегі материал ретінде әсерлесуші кванттық жүйелердің термодинамикасы мен динамикасын сипаттаудағы теориялық принциптер мен олардың қолданылу жағдайларын алуға болады. Мұндай көзқарас арқылы бір бөлшекті және көп бөлшекті корреляциялық функцияларды есептеуге, термодинамикалық шамалардың спектрлерін, микроскоптық әсерлесулердің макроқасиеттермен байланыстырын анықтауға мүмкіндік береді. Негізгі материалдарға қасиеттері кванттық эффекттерге негізделген кванттық сұйықтар жатады. Сонымен бірге, зерттеу материалдары кезінде мына мәселелердің қамтылуы қажетті: көп бөлшекті кванттық жүйелер, кванттық сұйықтар ұғымы, нейтралды ферми—сұйық және оның тепе—теңділік қасиеттері және ферми—сұйықтыңквазибөлшектеріне арналған кинетикалық теңдеулер.

Зерттеу әдістері. Грин функцияларына негізделген әдіс бойынша кванттық сұйықты зерттеу кезінде сұйық бөлшектерінің өзара әсерлесулерін ескеруге мүмкіндік туындайды (b Kalmenov et. al., 2008:180; Балагуров и др, 2019:475). Бұл әдіс нақтылы бір оператор мен шекаралық шарттарға сәйкес келетін Грин функциясын анықтап, осы функцияның көмегімен сұйықты сипаттайтын теңдеудің шешімін интеграл түрінде жазуға жағдай жасайды. Кванттық механика мен статистикалық механика заңдылықтарына жүгінетін кванттық

макрофизиканың осы тектес есептерін шығару барысында математикалық физикадағы Фурье әдісі, интегралдық түрлендірулер әдісі мен арнайы функциялар, математикалық талдаудың әдістері қолданылады. Осылармен бірге, мына тізімдегі математикалық физиканың математикалық аппараттары қолданылады: дербес туындылы дифференциялдық теңдеулер, математикалық интегралдық теңдеулер, функцияналдық талдау және ықтималдылықтар теориясы. Физикалық жүйенің стационар күйлерін табуға жағдай жасайтын вариациялық есептеулер де зерттеу барысында маңызды рөл атқарады.

Нәтижелер. Кванттық макрофизика теориялық физиканың дербес бір бөлімі ретінде қалыптасып, қатты және сұйық фазалардағы құбылыстарды бөлшектердің ансамблі негізінде кванттық механика, статистикалық механика және электродинамика заңдылықтары бойынша зерттей алады. Олардың табиғатын белгілі бір математикалық модельдер арқылы зерттей алады. Мысалы, металдардың қасиеттерін тереңірек зерттеу үшін ондағы электрондарды ферми–сұйық деп алу қажеттілігі туындайды. Электрондық сұйықтың теориясын жасауға кристалдық тор көп қиындық келтіретін болғандықтан, алдымен біртекті және изотроптық жағдайларға арналған заңдылықтарды бекітіп алу керек болды. Дәл осылайша металдардың асқын өткізгіштігін электрондық сұйықтың асқын аққыштығына арналған қарапайым изотроптық модель арқылы түсіндіруге болады.

Сұйықтағы атомдардың жылулық қозғалыстарына жауапты де бройльдік толқын ұзындық атомдар аралық өлшемдермен бірдей болатын төменгі температураларда (1–2 К) сұйықтағы макроскопиялық құбылыстар кванттық заңдылықтарға бағынатын болады. Классикалық көзқарастар бойынша абсолют ноль температурада барлық заттар қатты күйге айналып кетулері тиіс болатын. Алайда, гелийдің сұйық He^3 және He^4 изотоптары атомдарының өзара әлсіз әсерлесулері салдарынан абсолют ноль температура маңайында кванттық құбылыстар байқалатын сұйық күйде қала береді. Осы жағдайдан соң олар үшін қатты күй аса маңызды емес.

Жарты спинді бөлшектерден тұратын макроскопиялық жүйені толқындық функциялары тұрақты, ал физикалық шамаларға сәйкес қойылатын f операторлары уақытқа тәуелді болатын гейзенбергтік ұстанымда қарастырар болсақ, онда (a Kalmenov et. al., 2008:426; Mamchuev 2023:38)

$$f_a(t,\vec{r}) = f_a(\vec{r})\exp\left(iHt\right)\exp\left(-iHt\right)$$
$$f_a^*(t,\vec{r}) = f_a^*(\vec{r})\exp\left(iHt\right)\exp\left(-iHt\right)$$

Жүйенің *бір бөлшектік Грин функциясы* үшін төмендегі өрнекті жазуға болады:

$$G_{ab}(Z_1,Z_2) = -i\overline{Nf_a(Z_1)f_b^*(Z_2)}$$

CC BY NC

Мұнда (1)–гі $t,\vec{r}$ айнымалылары $t_1,\vec{r}$ және $t_2,\vec{r}$ болып өзгеріп, олар сәйкесінше Z_1,Z_2 арқылы белгіленді; $N-$хронологиялық көбейту символы; төбелік жалпы сызық жүйенің негізгі күйі бойынша орташалау дегенді білдіріп тұр. Грин функциясының сыртқы өріс болмаған кездегі спиндік тәуелділігі екінші ранктегі δ_{ab} спинор арқылы мына түрде анықталады:

$$G_{ab}(Z_1,Z_2)=\delta_{ab}G(Z_1,Z_2)$$

Жүйедегі бөлшектер тығыздығының координаталық матрицасы

$$\rho_{ab}(\vec{r}_1,\vec{r}_2)=n^{-1}\overline{f_b^*(t,\vec{r}_2)f_a(t,\vec{r}_1)} \qquad (1)$$

Бұл өрнек арқылы жеке бөлшекке қатысты кез–келген физикалық шаманың орташа мәнін анықтауға болады. (4)–ті Грин функциясы арқылы да жазайық:

$$\rho_{ab}(\vec{r}_1,\vec{r}_2)=in^{-1}G_{ab}(t_1,\vec{r}_1;t_1\to 0,\vec{r}_2)$$

Осы функцияның Фурье–жіктелуі бөлшектердің импульстер бойынша үлестірімін анықтауға мүмкіндік береді (Andreev et. al., 2019:1046; Кукушкин и др, 2015:774):

$$n(\vec{p})=n\int\rho(\vec{r}_1,\vec{r}_2)\exp\{-i\vec{p}(\vec{r}_1-\vec{r}_2)\}\,d^3(x_2-x_1)=$$

$$=-i\int G(t,\vec{r})\exp\{-i\vec{p}\vec{r}\}\,d^3x \qquad (2)$$

Бұл өрнек импульс мәндері $\dfrac{d^3p}{(2\pi)^3}$ аралығында болатын шынайы (квази емес) бөлшектердің концентрациясы екенін байқау қиын емес. (2)–ні квазибөлшектердің үлестірім функциясымен шатастырып алмау қажет. Егер де біз (2)–гі импульстік бейнедегі Грин функциясының

$$G(t,\vec{r})=\int G(\omega,\vec{p})\exp\{i(\vec{p}\vec{r}-\omega t)\}\frac{d\omega d^3p}{(2\pi)^4}$$

түрде жазылған үлгісін қолданар болсақ, (2)–өрнектің жазылуы төмендегіше болады:

$$n(\vec{p}) = -i \lim_{t \to 0} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega, \vec{p}) \exp\{-i\omega t)\} \frac{d\omega}{2\pi}$$

мұндағы ω –комплексті айнымалы; ал

$$G(\omega, \vec{p}) = \int G(t, \vec{r}) \exp\{-i(\vec{p}\vec{r} - \omega t)\} dt d^3 x \qquad (3)$$

$G(t, \vec{r})$ функциясының үзілістілік қасиетін ескере отырып (3)–өрнектегі dt бойынша орындалатын интегралдауды шектері –∞ тен 0–ге дейін және 0–ден ∞ дейін болатын екі итегралға бөліп, матрицаларды көбейту ережесін қолданатын болсақ, нәтижеде *a* сортты бөлшектің *m* күйлеріне арналған мына теңдікті аламыз (Коган, 2004:102; Дикарева, 2015:65):

$$G(t, \vec{r}) = -\frac{i}{2} \sum_m \overline{|f_a(Z_1)| m \cdot m |f_a^*(Z_2)|}$$

Бұл жерде қосындылау амалы жүйедегі барлық кванттық күйлер бойынша жүргізіледі.

Еркін бөлшектер жүйесіне арналған гейзенбергтік *f* оператор төмендегі теңдеуді қанағаттандырады:

$$i \frac{\partial f_a}{\partial t} = -\frac{1}{2m} \Delta f_a - \mu f_a$$

Жоғарыда келтірілген тұжырымдар мен қатынастарды ескеретін болсақ, онда бұл теңдеудің Грин функциясы арқылы жазылған түріне қол жеткізе аламыз:

$$\left(i \frac{\partial}{\partial t} = -\frac{\Delta}{2m} + \mu \right) G(t, \vec{r}) = \delta(t) \delta(\vec{r})$$

Мұндағы μ–сұйықтың химиялық потенциялы. Осы теңдеуді Фурье бойынша түрлендірсек, онда

$$\left(\omega - \frac{\vec{p}^2}{2m} + \mu \right) G_0(\omega, \vec{p}) = 1$$

Бұл өрнектегі G_0 –бөлшектер арасында әсерлесулер болмаған жағдайға сәйкес келетін Грин функциясы (Деминов и др, 2018:70; Ирхин, 2011:459):

CC BY NC

$$G_0\left(\omega,\vec{p}\right)=[\omega-\frac{\vec{p}^{\,2}}{2m_0}+\mu+isign\omega]^{-1}$$

Негізгі N күй бойынша төрт гейзенбергтік f операторлардың төмендегі көбейтіндісін *екі бөлшектік Грин функциясы* деп атайды:

$$Q_{34,12}=\overline{Nf_3f_4f_1^*f_2^*} \qquad (4)$$

Бұл функцияны біртекті жүйе үшін импульстік бейнеде (көрініс те) қарастырған ыңғайлы, яғни ол үш ғана аргументтер айырмасына тәуелді болады:

$$Z_3-Z_2,\ Z_4-Z_2,\ Z_1-Z_2$$

Себебі, барлық Z_1, Z_2 , Z_3 , Z_4 айнымалылар бойынша жүргізілетін Фурье жіктеулерінің компонентіне (құрушысына) δ–функция кіретін болады:

$$\int Q_{34,12}\exp\left\{i\left(p_3Z_3+p_4Z_4-p_1Z_1-p_2Z_2\right)\right\}d^4Z_1d^4Z_2d^4Z_3d^4Z_4=$$
$$=\left(2\pi\right)^4\delta^{(4)}\left(p_3+p_3-p_1-p_2\right)Q_{\delta,ab}\left(p_3,p_4,p_1,p_2\right)$$

Грин функциясының аргументтері үшін $p_1+p_2=p_3+p_4$ теңдігі орындалады. Нольдік жуықтаудағы бұл функция бір бөлшекті Грин функцияларының айырымы арқылы төмендегідей түрде жазылады:

$$Q^0{}_{\delta,ab}\left(p_3,p_4,p_1,p_2\right)=\left(2\pi\right)^4\left[\delta^{(4)}\left(p_1-p_3\right)G^0{}_a\left(p_1\right)G^0{}_b\left(p_2\right)-\delta^{(4)}\left(p_1-p_4\right)G^0{}_b\left(p_2\right)G^0{}_a\left(p_1\right)\right]$$

Келесі жуықтауларда Грин функциясына енбей қалған қосымша мүшелер пайда болады:

$$Q^0{}_{A_3A_4,A_1A_2}=\left(2\pi\right)^4\left[\delta^{(4)}\left(p_1-p_3\right)G^0{}_{A_3A_1}\left(p_1\right)G^0{}_{A_4A_2}\left(p_2\right)-\delta^{(4)}\left(p_1-p_4\right)G^0{}_{A_3A_2}\left(p_2\right)G^0{}_{A_4A_1}\left(p_1\right)\right]+$$

$$+G_{A_3B_3}\left(p_3\right)G_{A_4B_4}\left(p_4\right)iR_{B_3B_4,B_1B_2}\left(p_3,p_4,p_1,p_2\right)G_{B_1A_1}\left(p_1\right)G_{B_2A_2}\left(p_2\right)$$

Бұл жерде жүйедегі бөлшектердің ab компоненттері AB белгілеулеріне ауыстырылды. Соңғы жазылған өрнектегі *R–шыңдық функция* деп аталады және оның импульстік бейнедегі жазылу түрі төмендегідей:

$$R_{\delta a,ab}\left(p_3,p_4,p_1,p_2\right)=-R_{\delta b,ab}\left(p_4,p_3,p_1,p_2\right)=-R_{\delta b,ba}\left(p_3,p_4,p_2,p_1\right)$$

Макроскопиялық жүйенің нөлдік емес температурадағы Грин функциясын табу үшін тұйық жүйенің негізгі күйі бойынша орташалаудан Гибсс үлестірімі бойынша орташалауға ($\langle\ \rangle$) ауысу керек. Шекті температуралардағы Грин функциясының аналитикалық қасиеттерін қарастыруда *кідірісті* және *ілгерілегіш Грин функцияларын* қолданған маңызды. Кідірісті Грин функциясының жазылу түрі төмендегідей:

$$iG_{ab}{}^{\alpha}\left(Z_1,Z_2\right)=\left\langle f_a\left(Z_1\right)f_b^*\left(Z_2\right)+f_b^*\left(Z_2\right)f_a\left(Z_1\right)\right\rangle$$

Сыртқы өріс жоқ кезде бұл функция тек $Z=Z_1-Z_2$ айырмасына ғана тәуелді болатын төмендегі скаляр функцияға айналады:

$$G_{ab}{}^{\alpha}\left(Z_1,Z_2\right)=\delta_{ab}\frac{1}{2}G_{aa}{}^{\alpha}$$

$t<0$ шартында $G^{\alpha}\left(t,\vec{r}\right)=0$ болғандықтан жоғарыда келтірілген функцияның импульстік бейнесі

$$G^{\alpha}\left(\omega,\vec{p}\right)=\int\int_0^{\infty}\exp i\left(\omega t-\vec{p}\vec{r}\right)G^{\alpha}\left(t,\vec{r}\right)dtd^3z$$

Ілгерілегіш G^{β} Грин функциясын дәл осындай жолдармен шығарып алуға болады. Температураны сипаттағыш Грин функциясы

$$G\left(\omega,\vec{p}\right)=-\frac{\left(2\pi\right)^3}{2}\sum_{n,m}\omega_n A_{mn}\delta\left(\vec{p}-\vec{k}_{nm}\right)\left\{\frac{1}{\omega_{nm}-\omega}\left(1+e^{-\frac{\omega_{nm}}{T}}\right)\right\}$$

Стандартты модельдегі процестерді есептеу үшін математикалық физика тәсілдері мен арнайы функциялар теориясын қолдану қажеттілігі туындайды. Өйткені, скаляр, векторлық және спиндік бөлшектерге арналған теңдеулер әртүрлі ретті дифференциялдық теңдеулер болып табылады. Осы айтылған жағдайға мысал ретінде электромагниттік өрістегі электронға арналған төменде келтірілетін Дирак теңдеуін Грин функциясы тәсілімен шешуді қарастырамыз:

$$\left(i\sigma^{\alpha}\partial_{\alpha}-m\right)\varphi\left(x\right)=-e\sigma^{\alpha}E_{\alpha}\left(x\right)\varphi\left(x\right) \qquad (5)$$

мұндағы $\sigma^{\alpha}=\left\{\sigma^0,\sigma^1,\sigma^2,\sigma^3\right\}-$ Дирак матрицалары; *e*–электронның заряды. (5)–теңдеуді шешу үшін төмендегі қосымша есепті шешіп алу керек болады:

$$\left(i\sigma^{\alpha}\partial_{\alpha}-m\right)G\left(x,x^{0}\right)=\delta^{(4)}\left(x-x^{0}\right)$$

Сонда, (5)–тің шешімі (Defenu et al., 2024:52; Nussinov, 2020):

$$\varphi\left(x\right)=-e\int G\left(x,x^{0}\right)\sigma^{\alpha}E_{\alpha}\left(x^{0}\right)\varphi\left(x^{0}\right)dx^{0}$$

Осындағы Грин функциясының импульстік бейнесі:

$$G\left(x,x^{0}\right)=\frac{1}{\left(2\pi\right)^{4}}\int S\left(p\right)\exp\left\{-ip\left(x-x^{0}\right)\right\}d^{4}p \qquad (6)$$

Мұндағы $S\left(p\right)-$Фурье бейнедегі Грин функциясы. Дирактың дельта–функциясының

$$\delta^{(4)}\left(x-x^{0}\right)=\frac{1}{\left(2\pi\right)^{4}}\int\exp\left\{-ip\left(x-x^{0}\right)\right\}d^{4}p$$

өрнегін, $\sigma^{\alpha}p_{\alpha}=\tilde{p}$ белгілеуімен Дирак матрицаларының $\sigma^{\alpha}\sigma^{\beta}+\sigma^{\beta}\sigma^{\alpha}=2\theta^{\alpha\beta}$ орын ауыстырымдылық қасиетін қолдансақ, онда Фурье бейнедегі Грин функциясы мен Дирак теңдеуіне сәйкес келетін Грин функциясының өрнектері мынадай болады:

$$S\left(p\right)=\frac{\tilde{p}+m}{p^{2}-m^{2}}$$

$$G\left(x,x^{0}\right)=\frac{1}{\left(2\pi\right)^{4}}\int\frac{\tilde{p}+m}{p^{2}-m^{2}+i\varepsilon}\exp\left\{-ip\left(x-x^{0}\right)\right\}d^{4}p$$

Талқылау. Кванттық жүйелердегі сыртқы өрістегі бөлшек Шредингер теңдеуімен сипатталатыны белгілі:

$$\left(\hat{H}-E\right)\psi\left(\vec{r}\right)=-\hat{F}\psi\left(\vec{r}\right) \qquad (7)$$

мұндағы $\hat{F}-$ әсерлесуге жауапты оператор, $\hat{H}-$ гамильтониан,

$$\psi\left(\vec{r}\right)=\exp\left(i\vec{k}\vec{r}\right) \qquad (8)$$

CC BY NC

(7)–теңдеуді Грин функциясы тәсілімен шешу үшін осы дифференциялдық теңдеуден эквивалентті интегралдық теңдеуге ауысу қажет ((8)–түрдегі толқындық функцияға Грин функциясы енетін интегралдық мүше қосылатын болады) (Beekman et al., 2017:82):

$$\psi\left(\vec{r}\right)=\exp\left(i\vec{k}\vec{r}\right)+\int G\left(E,\vec{r},\vec{r}^{/}\right)F\left(\vec{r}\right)\psi\left(\vec{r}^{/}\right)d\vec{r}^{/}$$

Мұндағы $G\left(E,\vec{r},\vec{r}^{/}\right)$ – гамильтон операторына сәйкес келетін және Дирактың дельта–функциясы ($\delta\left(\vec{r}-\vec{r}^{/}\right)$) бар төмендегі $\left(E-\hat{H}\right)G\left(E,\vec{r},\vec{r}^{/}\right)=\delta\left(\vec{r}-\vec{r}^{/}\right)$ теңдеуін қанағаттандыратын Грин функциясы. Оның спектрлік көрінісі

$$G\left(E,\vec{r},\vec{r}^{/}\right)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\psi_n\left(\vec{r}\right)\psi^{*}{}_n\left(\vec{r}^{/}\right)}{E_0-E_n}$$

Үзіліссіз спектр жағдайында

$$G\left(E,\vec{r},\vec{r}^{/}\right)=\int\frac{\psi_n\left(\vec{r}\right)\psi^{*}{}_n\left(\vec{r}^{/}\right)}{E_0-E_n}\frac{d\vec{k}}{\left(2\pi\right)^3}$$

Көріп отырғанымыздай, эквивалентті интегралдық теңдеулерге кіретін Гриндік функциялардың импульстік, спектральдық бейнелерде және Фурье түрлендірулері бойынша жазылуы қойылған есептердегі процестердің кеңістіктік фазадағы анықталу аймақтарын дәл бағалап отыруға мүмкіндік берсе, екінші жағынан комплексті айнымалы функциялар теориясымен ұштаса отырып процестің өту тездігін бағалауды оңтайландырады. Алынған нәтижелерді шашырау теориясына құрылған есептерді шешуде және спиндік бөлшектердің кванттық-өрістік амплитудаларын есептеп шығаруда қолдануға болады.

Қорытынды. Мақаланың тақырыбында қамтылған идеяларға сәйкес макроскопиялық жүйелер мен идеал ферми–сұйықтың Грин функциялары, екі бөлшектік және шекті температуралық Грин функциялары, Дирак теңдеуінің Грин функциясы қарастырылды. Тақырыптың өзектілігі кванттық құбылыстарға Грин функцияларын қолдану тәсілімен байланысты екендігін айтып өту қажет. Себебі, бұл тәсіл түрлі процестерге сәйкес келетін дербес туындылы дифференциялдық теңдеулерді шешудің ең бір қолайлы тәсілдерінің біріне саналады, яғни құбылысқа берілген тікелей теңдеуді шешу барысында операторлық көріністегі Грин функциясы қатысатын қосымша қарапайым дербес туындылы теңдеу шешіледі. Әрі қарай импульстік көрініске ауыса отырып комплекстік айнымалылыр арқылы Фурье түрлендірулері жасалады. Нөлдік және бірінші жуықтау шарттары бойынша интегралдық өрнектерге қол жеткізіліп, құбылыстың ерекшеліктеріне қарай интеграл шектері бойынша нақты шешімдер алынатын болады. Мұндай модельде математикалық физиканың басқа да тәсілдері мен

CC BY NC

арнайы функцияларының алатын орны ерекше екендігі ауқымды есептеулерді жүргізген кезде айқын байқалады. Мақала мазмұнында келтірілген нәтижелердің математикалық есептеулері ықшамды түрде ғана ұсынылып отырды. Басты бағыт-макроскопиялық жүйелердегі кванттық эффекттерге сәйкес келетін теңдеулерді шешуде Грин функцияларын қолданудың ерекшеліктерін көрсету болды.

Әдебиеттер

a) Kalmenov T.Sh., Koshanov B.D. Representation for the Green's function of the Dirichlet problem for the polyharmonic equations in a ball. Siberian Mathematical Journal. — 2008. — Т. 49, № 3. — С. 423—428. — DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s11202-008-0042-8

Andreev A. F., Zakharov V. E., Kolokolov I. V., Lebedev V.V., Mineev V.P., Novikov S.P., Pitaevskii L.P., Pokrovskii V.L., Starobinskii A.A., Feigel'man M.V., Fomin I.A., Eliashberg G.M. Isaak Markovich Khalatnikov (on his 100th birthday). Успехи физических наук (Phys. Usp.). — 2019. — Т. 62. — С. 1046—1047. — DOI: 10.3367/UFNe.2019.08.038651

b) Kalmenov T.Sh., Koshanov B.D., Nemchenko M.Y. Green function representation for the Dirichlet problem of the polyharmonic equation in a sphere. Complex Variables and Elliptic Equations. — 2008. — Т. 53, № 2. — С. 177—183. — DOI: http://dx.doi.org/10.1080/17476930701671726

Beekman A.J., Nissinen J., Wu K., Liu K., Slager R.-J., Nussinov Z., Cvetković V., Zaanen J. Dual gauge field theory of quantum liquid crystals in two dimensions. Physics Reports. — 2017. — Т. 683. — С. 1—110. — DOI: https://doi.org/10.1016/j.physrep.2017.03.004

Defenu N., Lerose A., Pappalardi S. Out-of-equilibrium dynamics of quantum many-body systems with long-range interactions. Physics Reports. — 2024. — Т. 1074. — С. 1—92. — DOI: https://doi.org/10.1016/j.physrep.2024.04.005

Mamchuev M.O. Green's function of the problem with local displacement for the fractional telegraph equation. Adyghe international scientific journal. — 2023. — Т. 23, № 4. — С. 34—42. — DOI: http://dx.doi.org/10.47928/1726-9946-2023-23-4-34-42

Nussinov Z. Macroscopic length correlations in non-equilibrium systems and their possible realizations. Nuclear Physics B. — 2020. — Т. 953. — 114 948. — DOI: https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2020.114948

Балагуров Б.Я. Функция Грина уравнения Шредингера в методе квантования потенциала. ЖЭТФ. — 2019. — Т. 155, № 3. — С. 472—480. — DOI: 10.1134/S004445101903009X

Деминов Р.Г., Кочелаев Б.И., Тагиров Л.Р. Методы квантовой теории поля в физике конденсированного состояния: конспект лекций. — Казань: Казан. ун-т, 2018. — 92 с.

Дикарева Е. В. Метод функций Грина в математических моделях для двухточечных краевых задач. Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. — 2015. — № 3. — С. 62—67. — DOI: https://doi.org/10.20914/2310-1202-2015-3-62-67

Ирхин В.Ю. Метод двухвременных функций Грина в теории магнетизма металлов с сильными корреляциями. Теоретическая и математическая физика. — 2011. — Т. 168, № 3. — С. 453—466. — DOI: https://doi.org/10.4213/tmf6693

Коган Вадим Романович. Метод квазиклассической функции Грина в мезоскопической физике: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.02. — Москва, 2004. — 159 с.

Кукушкин И. В., Шмульт С. Ферми-жидкостные эффекты и перенормировка массы квазичастиц в системе двумерных электронов с сильным взаимодействием. Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2015. — Т. 101, № 10. — С. 770—776. — DOI: https://doi.org/10.7868/S0370274X15100082

Малышев К.Ю. Представление функций Грина волнового уравнения на отрезке в конечном виде. Известия Саратовского университета. — 2022. — Т. 22, № 4. — С. 430—446. — DOI: https://doi.org/10.18500/1816-9791-2022-22

Матухин В.Л., Шмидт Е.В. Основы статистической физики. — Казань: Казан. гос. ун-т, 2018. — 84 с.

References

Andreev A.F., Zakharov V.E., Kolokolov I.V., Lebedev V.V., Mineev V.P., Novikov S.P., Pitaevskii L.P., Pokrovskii V.L., Starobinskii A.A., Feigel'man M.V., Fomin I.A., Eliashberg G.M. (2019) Isaak Markovich Khalatnikov (on his 100th birthday). Physics — Uspekhi, 62. — P. 1046—1047. https://doi.org/10.3367/UFNe.2019.08.038651

Balagurov B. Ya. (2019) Funktsiya Grina uravneniya Shredingera v metode kvantovaniya potensiala [Green's function of the Schrödinger equation in the method of potential quantization]. Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP), 155(3). — P. 472—480. https://doi.org/10.1134/S004445101903009X (in Russian)

Beekman A.J., Nissinen J., Wu K., Liu K., Slager R.-J., Nussinov Z., Cvetković V., Zaanen J. (2017) Dual gauge field theory of quantum liquid crystals in two dimensions. Physics Reports, 683. — P. 1—110. https://doi.org/10.1016/j.physrep.2017.03.004

Defenu N., Lerose A., Pappalardi S. (2024) Out-of-equilibrium dynamics of quantum many-body systems with long-range interactions. Physics Reports, 1074. — P. 1—92. https://doi.org/10.1016/j.physrep.2024.04.005

Deminov R.G., Kochelaev B.I., Tagirov L.R. (2018) Metody kvantovoy teorii polya v fizike kondensirovannogo sostoyaniya: konspekt lektsiy [Methods of quantum field theory in condensed matter physics: lecture notes]. Kazan: Kazan University. 92 p. (in Russian)

Dikareva E.V. (2015) Metod funktsii Grina v matematicheskikh modelyakh dlya dvukhtochechnykh kraevykh zadach [Method of Green's functions in mathematical models for two-point boundary value problems]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii (Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies), (3). — P. 62—67. https://doi.org/10.20914/2310-1202-2015-3-62-67 (in Russian)

Irkhin V.Yu. (2011) Metod dvukhvremennykh funktsiy Grina v teorii magnetizma metallov s sil'nymi korrelyatsiyami [The method of two-time Green's functions in the theory of magnetism of strongly correlated metals]. Theoretical and Mathematical Physics, 168(3). — P. 453—466. https://doi.org/10.4213/tmf6693 (in Russian)

Kalmenov T. Sh., Koshanov B. D., Nemchenko M.Y. (2008) Green function representation for the Dirichlet problem of the polyharmonic equation in a sphere. Complex Variables and Elliptic Equations, 53(2). — P. 177—183. https://doi.org/10.1080/17476930701671726

Kalmenov T.Sh., Koshanov B.D. (2008) Representation for the Green's function of the Dirichlet problem for the polyharmonic equations in a ball. Siberian Mathematical Journal, 49(3). — P. 423—428. https://doi.org/10.1007/s11202-008-0042-8

Kogan V.R. (2004) Metod kvaziklassicheskoy funktsii Grina v mezoskopicheskoy fizike [The method of quasiclassical Green's function in mesoscopic physics]. Cand. Phys.-Math. Sci. Diss., 01.04.02. Moscow. — P. 159. (in Russian)

Kukushkin I.V., Schmult S. (2015) Fermi-liquid effects and quasiparticle mass renormalization in a strongly interacting two-dimensional electron system. JETP Letters, 101(10). — P. 770—776. https://doi.org/10.7868/S0370274X15100082 (in Russian)

Malyshev K.Yu. (2022) Predstavlenie funktsii Grina volnovogo uravneniya na otrezke v konechnom vide [Representation of Green's functions of the wave equation on a segment in closed form]. Izvestiya of Saratov University, 22(4). — P. 430—446. https://doi.org/10.18500/1816-9791-2022-22 (in Russian)

Mamchuev M.O. (2023) Green's function of the problem with local displacement for the fractional telegraph equation. Adyghe International Scientific Journal, 23(4). — P. 34—42. https://doi.org/10.47928/1726-9946-2023-23-4-34-42

Matukhin V. L., Schmidt E.V. (2018) Osnovy statisticheskoi fiziki [Fundamentals of Statistical Physics]. Kazan: Kazan. gos. un-t. — P. 84. (in Russian)

Nussinov Z. (2020) Macroscopic length correlations in non-equilibrium systems and their possible realizations. Nuclear Physics B, 953, 114948. https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2020.114948

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 91–104

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.386

UDC 629.78.075.001.14; 629.78:001.891
ГРНТИ 89.17.15

©A.V. Serebryanskiy[1]*, Ch.B. Akniyazov[1,2], Ch.T. Omarov[1], S. Sittykova[1], D. Kadyrova[1], 2025.
[1]Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, 050020, Kazakhstan;
[2]Te Punaha Atea - Space Institute, University of Auckland,
Auckland, New Zealand.
E-mail: aserebryanskiy@gmail.com

ANALYSIS OF LUNAR IMPACT FLASHES STATISTICS

Serebryanskiy Alexander — PhD, Head of the Observational Astrophysics Department Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: serebryanskiy@fai.kz; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4313-7416;
Akniyazov Chingiz — PhD student. Acting Head of the Satellite Observations and Information Systems Laboratory, Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan, Te Punaha Atea - Space Institute, University of Auckland, Auckland, New Zealand,
E-mail:akniyazov@yahoo.com, cakn210@aucklanduni.ac.nz; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6325-0213;
Omarov Chgis — Professor, PhD. Fesenkov Astrophysical Institute, 050020, Almaty, Kazakhstan, Email: chingis.omarov@fai.kz; ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1672-894X;
Sittykova Sofiya — B.Sr, Engineer in the Department of Observational Astrophysics, Fesenkov Astrophysical Institute. Almaty, Kazakhstan,
E-mail: sofiasittykova@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0006-4505-432X;
Kadyrova Daiana — BSc, Engineer at the Laboratory of Observations of Artificial Earth Satellites. Almaty, Kazakhstan,
E-mail: kadyrova@fai.kz; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3821-742X.

Abstract. This paper analyzes research on the frequency and characteristics of meteoroid impacts on the lunar surface. These impact events provide data on the velocities, timing, and distribution of meteoroids, which can be used to refine meteoroid population models, validate existing lunar impact models, support lunar seismology research, and inform safety measures for future lunar missions. The study proposes using a high-power camera or a two-channel reflector telescope in lunar orbit to detect impact flashes. The telescope would utilize CCD photometry in the visible range and infrared observations for a more comprehensive analysis. The dual-channel system would enhance accuracy by filtering out false signals. The parameters of the telescope and the requirements for the system as a whole are described. Such studies complement and simultaneously expand the capabilities of projects such as LUMIO

and studies of a population of small-sized (about 1 mm or less) meteoroids conducted by ground-based observations. The larger aperture and infrared capabilities will allow for the detection of smaller meteoroids and the study of post-impact processes. This research would significantly contribute to our understanding of the lunar meteoroid environment and cislunar situational awareness within the framework of the concept of the Kazakhstan cislunar telescope being developed, and enhance preparedness for future lunar exploration.

Keywords: meteoroids, meteoroid observations, cislunar orbit, CCD photometry, infrared observations

Funding. *Работа выполняется в рамках Программы № BR24992759 "Разработка концепции первого казахстанского орбитального окололунного телескопа - Этап I", финансируемого МНВО РК.*

©А.В. Серебрянский[1]*, Ч.Б. Акниязов[1,2], Ч.Т. Омаров[1], С. Ситтыкова[1], Д. Кадырова[1], 2025.

[1]В.Г. Фесенков атындағы астрофизикалық институты, Алматы, Қазақстан;
[2]Te Punaha Atea - Ғарыш институты, Окленд университеті, Окленд, Жаңа Зеландия.
E-mail: aserebryanskiy@gmail.com

АЙДЫҢ БЕТКІ ҚАБАТЫНА МЕТЕОРИДТАРДЫҢ СОҚТЫҒЫСУЫН СТАТИСТИКАЛЫҚ ТҰРҒЫДА ЗЕРТТЕУ

Серебрянский Александр — PhD, Астрофизика бақылау бөлімінің бастығы, В.Г. Фесенков атындағы Астрофизикалық институты, Алматы, Қазақстан,
E-mail: serebryanskiy@fai.kz; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4313-7416;
Ақниязов Чингиз — PhD докторанты, Жасанды Жер серіктерін және ақпараттық жүйелерді бақылау зертханасының меңгеруші міндетін атқарушы, В.Г. Фесенков атындағы астрофизикалық институты, Алматы, Қазақстан, Te Punaha Atea - Ғарыш институты, Окленд университеті, Окленд, Жаңа Зеландия,
E-mail: akniyazov@yahoo.com, cakn210@aucklanduni.ac.nz; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6325-0213;
Омаров Шыңғыс — профессор, PhD, В.Г. Фесенков атындағы астрофизикалық институты, Алматы, Қазақстан,
E-maill: chingis.omarov@fai.kz; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1672-894X;
Ситтыкова София — B.Sr, Инженер В.Г. Фесенков атындағы астрофизикалық институты, Алматы, Қазақстан,
E-mail: sofiasittykova@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0006-4505-432X;
Қадырова Дайана — BSc, Инженер В.Г. Фесенков атындағы астрофизикалық институты, Алматы, Қазақстан,
E-mail: kadyrova@fai.kz; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3821-742X.

Аннотация. Айдың беткі қабатына метеоридтардың соқтығысу статистикасы бойында зерттеулерге талдау жүргізілді. Ай бетіндегі соқтығысу оқиғаларын бақылау метеороидтардың жылдамдығы, уақыттық және кеңістіктегі таралуы

CC BY NC

туралы ақпарат береді. Бұл ақпараттар метероидтардың популяция модельдерінің сенімділігін арттыру, Аймен соқтығысудың қолданыстағы модельдерін тексеру, ай сейсмологиясын зерттеуге және оның ішкі аймақтарын модельдеуге ықпал ету және болашақтағы. Ай миссиялары үшін ай ғарыштық жағдайлардан хабардар ету бағдарламасын бастау үшін пайдалануға болады. Жұмыста метероидтардың Айдың беткі қабатына әсер етуінен жарқылдарды анықтау үшін ай орбитасында зерттеу жүргізу мүмкіндігі қарастырылады, ол дихроикалық (екі түрлі толқын ұзындығында шағылысу немесе өту) айнамен бөлінген екі арнасы бар жылдам камераны немесе жылдам рефлекторлы телескопты пайдаланады. Арналардың біріне көрінетін диапазондағы ЗБА-фотометриясы (зарядталған байланыс аспабы, ЗБА) үшін, екіншісі — ИҚдиапазонындағы бақылаулар үшін ерекшеленеді. Екі арна ғарыштық сәулелер мен басқа да кездейсоқ оқиғалардан туындаған жалған сигналдарды жою кезінде сәйкестік жүйесін енгізуді қамтамасыз етеді. Телескоптың параметрлері және жалпы жүйеге қойылатын талаптар сипатталған. Мұндай зерттеулер белгілі бір мағынада LUMIO және жердегі бақылаулар жүргізетін шағын өлшемді (шамамен 1 мм және одан аз) метероидтардың популяциясын зерттеу сияқты жобалардың мүмкіндіктерін толықтыру және кеңейту болып табылады. Камераның (телескоптың) апертурасын ұлғайту және ИҚ арнасының болуы соқтығысудың тіркелген оқиғаларының энергетикалық диапазонын ұсақ бөлшектерге қарай айтарлықтай кеңейтуге, сондай-ақ соқтығысудан кейінгі процестерге зерттеулер жүргізуге мүмкіндік береді. Бұл зерттеулерді орындау қазақстандық Айға жақын орбттадағы телескоптың әзірленіп жатқан тұжырымдамасы шеңберінде Айға жақын жағдайдан хабардар ету үшін бақылаулар бойынша жоспарланған міндетке айтарлықтай қосымша болады.

Түйін сөздер: метероиды, наблюдение метероидов, окололунные орбиты, CCD-фотометрия, инфракрасные наблюдения

©А.В. Серебрянский[1]*, Ч.Б. Акниязов[1,2], Ч.Т. Омаров[1], С. Ситтыкова[1], Д. Кадырова[1], 2025.

[1]Астрофизический институт имени В.Г. Фесенкова. Алматы, Казахстан;
[2]Te Punaha Atea — Космический институт, Окленд, Новая Зеландия.
E-mail: aserebryanskiy@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИКИ УДАРОВ МЕТЕОРОИДОВ О ПОВЕРХНОСТЬ ЛУНЫ

Серебрянский Александр — PhD, Начальник отдела наблюдательной астрофизики. Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан;
E-mail: serebryanskiy@fai.kz; ORICD: https://orcid.org/0000-0002-4313-7416;
Акниязов Чингиз — Докторант PhD. и.о. заведующего лабораторией наблюдений ИСЗ и информационных систем, Астрофизический институт имени В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан, Te Punaha Atea - Космический институт Оклендского университета, Окленд, Новая Зеландия,
E-mail: akniyazov@yahoo.com, cakn210@aucklanduni.ac.nz; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6325-0213;

Омаров Чингис — профессор, PhD, Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан,
E-mail: chingis.omarov@fai.kz; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1672-894X;
Ситтыкова София — B.Sr, Инженер, Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан,
E-mail: sofiasittykova@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0006-4505-432X;
Кадырова Дайана — BSc, Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан,
E-mail: kadyrova@fai.kz; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3821-742X.

Аннотация. Проведён анализ существующих исследований, посвящённых статистике ударов метеороидов о поверхность Луны. Наблюдения вспышек, возникающих при столкновениях с лунной поверхностью, позволяют получать сведения о скоростях, пространственном и временном распределении метеороидов. Эта информация важна для уточнения моделей метеороидных популяций, проверки существующих моделей взаимодействия с поверхностью Луны, для задач лунной сейсмологии и моделирования внутренних областей Луны, а также для формирования системы ситуационной осведомлённости для будущих лунных миссий. В работе рассматривается возможность проведения исследований на окололунной орбите, направленных на обнаружение вспышек от ударов метеороидов с использованием светосильной камеры или телескопа-рефлектора с двумя каналами, разделёнными дихроичным зеркалом. Один канал предназначается для ПЗС-фотометрии в видимом диапазоне, второй – для наблюдений в инфракрасном диапазоне. Два канала обеспечивают систему совпадений, позволяющую эффективно отсекать ложные сигналы, вызванные космическими лучами и случайными шумами. Описаны основные параметры телескопа и требования к системе. Предлагаемые исследования являются дополнением и расширением возможностей проектов, таких как LUMIO, а также наземных наблюдений малых метеороидов размером порядка 1 мм и меньше. Увеличение апертуры и наличие ИК-канала существенно расширяют диапазон регистрируемых энергий столкновений, позволяя фиксировать более мелкие частицы и изучать послеударные процессы. Реализация предложенной программы будет важным вкладом в развитие системы окололунной ситуационной осведомлённости в рамках концепции казахстанского окололунного телескопа.

Ключевые слова: метеороиды, наблюдение метеороидов, окололунные орбиты, CCD-фотометрия, инфракрасные наблюдения

Введение. Модели появления и развития газопылевого и в последующем протопланетного диска являются основополагающими в теории эволюции Солнечной системы. Подтверждение или опровержение этих моделей строится на наблюдениях современного состояния газопылевой составляющей Солнечной системы, а также на анализе распределения и динамики астероидов, комет и метеороидов, что также представляет интерес с точки зрения прогнозирования и оценки их влияния на аппараты в околоземном космическом пространстве (ОКП). С ростом числа аппаратов в ОКП появляется все больше подтверждений

CC BY NC

существенности такого воздействия (повреждения солнечных панелей МКС, воздействие микро-метеороидов на JWST). Такое воздействие ожидаемо возрастает во много раз при прохождении Земли через метеорные потоки. Интерес к данной проблеме также возрос с появлением новых программ освоения Луны, таких, например, как Artemis. Однако этот интерес не ограничивается только окололунным и околоземным пространством, но простирается до Луны и Марса. Поверхности этих тел подвержены постоянным бомбардировкам метеороидами всех размеров, поскольку они не обладают плотными атмосферами, а, следовательно, не способны защитить людей и жизненно важные элементы будущей инфраструктуры. Насколько критичным является такое воздействие можно представить если вспомнить, что такие метеороиды имеют скорости до нескольких десятков километров в секунду! Выделяемая энергия при ударе метеороида метрового размера о поверхность Луны, эквивалентна нескольким сотням килограмм в тротиловом эквиваленте. Даже метеороид размером в несколько сантиметров может представлять смертельную угрозу, при этом количество таких тел растет обратно пропорционально их размеру, что предсказывается теорией эволюции Солнечной системы. Однако, как и любая другая теория, она нуждается в экспериментальных проверках и как было показано в работах (Brown и др., 2002; Suggs и др., 2014) наших знаний о плотностях потоков крупных метеороидов и малых астероидов для этого все еще недостаточно.

Поскольку источниками метеороидов являются астероиды и кометы, то анализ роста их числа в ОКП может быть предвестником приближения более крупного тела. Модели распределения метеороидов могут являться дополнительной информацией при построении моделей распределения астероидов и крупных метеороидов в системе Земля-Луна, что само по себе имеет большое значение для безопасности окололунных миссий, число которых растет в последнее время из-за возрастающего интереса к освоению Луны и окололунного пространства со стороны ведущих космических агентств (CNSA, ESA, ISRO, JAXA, NASA, Роскосмос, SpaceIL) (Liakos и др., 2020).

Методы исследований. Традиционно методами анализа распределения популяций метеороидов по размерам и изучения их химического состава являются фотометрический и спектральный анализ результатов вхождения метеоров в атмосферу Земли. Такие наблюдения проводятся уже на протяжении как минимум 50 лет. Однако такие методы имеют определенные трудности. Одной из них является ограниченность площади мониторинга из отдельной взятой обсерватории, что при высоте атмосферы порядка 80 км, составляет около 35×10^3 км^2. Это значительно ограничивает статистику наблюдаемых событий (Liakos и др., 2020). Другой трудностью является совокупный эффект неблагоприятных погодных условий и паразитной засветки. Для решения перечисленных трудностей было предложено наблюдать поверхность Луны на предмет обнаружения признаков столкновения метеороидов о ее поверхность. Площадь поверхности Луны, обращенной к Земле, составляет 19×10^6 км^2, что почти в 500 раз больше той площади, что доступна при наблюдениях вспышек в атмосфере. Другими словами, предлагается использовать

Луну в качестве своеобразного экрана-мишени, на котором мы в принципе можем наблюдать более полную статистику столкновений метеороидов. При этом логично предположить, что количество ударов метеороидов о лунную поверхность на единицу поверхности аналогично числу столкновений с поверхностью Земли той же площади.

Наблюдение за событиями столкновения с поверхностью Луны дает информацию о скоростях, временном и пространственном распределении метеороидов. Эта информация может быть использована для повышения достоверности моделей популяции метеороидов, проверки существующих моделей столкновений с Луной, содействия в исследованиях лунной сейсмологии и моделированию ее внутренних областей, а также для инициирования программы осведомленности об окололунной обстановки для будущих миссий (LUMIO, 2023).

О наблюдениях так называемых транзиентных лунных явлений сообщалось неоднократно, а Уинифред Кэмерон каталогизировала 1468 таких событий (Chilton, 1969). Некоторые из этих событий наблюдались двумя и более наблюдателями, находящимися в одном и том же географическом месте. Но еще ранее Ассоциация Наблюдателей Планет и Луны[1] (LMIS) на протяжении более 20 лет с 1940-х до 1960-х годов организовывала мониторинг Луны с целью обнаружения событий метеоритных столкновений с ее поверхностью. Однако, ни один из многих кандидатов таких столкновений так и получил независимого подтверждения. Но уже в начале 90-х годов 20-го столетия с использованием фотометров и с появлением первых ПЗС приемников к этой задаче вернулись вновь. Сначала Melosh и др. (1993) (Melosh и др., 1993) провели теоретическую оценку обнаружения вспышек от удара метеороида о поверхность Луны с помощью фотометров. Ими было показано, что при ударе о поверхность Луны метеороида размером более одного метра, вспышка от такого события может быть обнаружена фотометрическим методом телескопом метрового класса. (Ortiz и др., 1999) проанализировали 4.3 часа наблюдений Лунной поверхности и не обнаружили соударений с энергией более 5×10^6 Дж. Однако сам метод прямой ПЗС-визуализации был протестирован и заявлен как потенциально новый инструмент для оценки популяции метеороидов в ОКП, массы и скорости которых таковы, что излучаемая энергия при столкновении превышает 5×10^6 Дж. Возможность проверить метод в деле была предоставлена уже в том же году, наблюдая удары метеороидов во время пролета потока Леонид 18 ноября 1999 года. Впервые было получено независимые подтверждения вспышек (Ortiz и др., 2000; Dunham и др., 2000). Это послужило толчком к организации новых скоординированных кампаний систематических поисков таких событий и началу проведения полноценных научных исследований в этом направлении. Уже в 2000 году (Bellot и др., 2000) провели наблюдения Луны на телескопе с апертурой 20 см, оснащенного видеокамерой с полем зрения 8’×6’, а также представили методику оценки яркости событий с учетом преобразования кинетической энергии в излучение.

В работе (Ortiz и др., 2002), используя параметр эффективности преобразования

[1] Association of Lunar and Planetary Observers

CC BY NC

энергии в световой поток по результатам наблюдения Леонид в 1999 году, равного 2×10^{-3}, пришли к выводу, что наблюдения могут быть использованы для оценки плотности потока метеороидов. Их наблюдения согласуются с потоком метеороидов 18 ноября, 2001 в 18:15 UT 0,1 метеороидов с массой более 2×10^{-8} кг км$^{-2}$ ч$^{-1}$.

Lunar Meteoritic Impact Search (LMIS) организовало наблюдения за Луной во время шести событий в 2000 и 2001 годах. Затем в 2006 году программа NASA MEO (Meteoroid Environment Office) начала мониторинг столкновений с Луной и обнаружила 399 вспышек в течение 2005—2016 годов. Параллельно (Yanagisawa и др., 2008) обнаружили столкновения с Геминидами и определили массу частиц, продолжительность вспышек и под каким углом эти столкновения происходили.

В 2014 году (Suggs и др., 2014) определили кинетическую энергию и распределение массы 126 обнаруженных столкновений по данным NASA ALaMO (Automated Lunar and Meteor Observatory). Ими получено, что для Луны поток для предельной энергии $2,5 \times 10^{-6}$ кТ в тротиловом эквиваленте или $1,05 \times 10^{7}$ Дж составляет $1,03 \times 10^{-7}$ км$^{-2}$ ч$^{-1}$, а поток для предельной массы 30 г составляет $6,14 \times 10^{-10}$ м$^{-2}$ год$^{-1}$.

В 2015 году в Национальной обсерватории Афин (NOA) начал свое развитие амбициозный проект NELIOTA (NEO Lunar Impact and Optical TrAnsients), финансируемый Европейским космическим агентством (ESA)[2] по мониторингу Луны с целью обнаружения столкновений с ней небольших метеороидов. Наблюдения проводятся с помощью 1.2-метрового телескопа и двух видеокамер. Краткосрочной целью проекта является обнаружение лунных ударных вспышек и оценка физических параметров метеороидов (например, массы, размера), а также параметров ударов (например, температуры, размеров кратеров на поверхности). Среднесрочной целью является получение статистических данных о частоте и размерах метеороидов и малых ОСЗ, которые будут использоваться космической промышленностью в качестве важной информации для защиты космических аппаратов. На данный момент (октябрь 2024 года) завершен второй этап наблюдений. За 6,5 лет непрерывного мониторинга Луны было обнаружено 187 ударных вспышек (Liakos и др., 2020); Bonanos и др., 2018; Xilouris и др., 2018; Liakos и др., 2024). По результатам этого проекта была получена очень важная информация по статистике событий, приведенная в Таблице 1 из работы (Xilouris и др., 2018). Частота ударов о поверхность Луны составляет примерно 7 ударов в час для случайных процессов и в два раза больше ударов при пролете метеорных потоков. Плотность потоков при этом порядка 2×10^{-7} в час на квадратный километр и 4×10^{-7} в час на квадратный километр, соответственно.

[2] https://neliota.astro.noa.gr/About/Project

CC BY NC

Таблица 1 - Показатели обнаружения NELIOTA, основанные на проверенных вспышках и частотах появления метеороидов на Луне (на всей поверхности) и вокруг системы Земля-Луна внутри метеороидного потока

	Detection rate (meteoroid h^{-1} km^{-2})	Impact frequency on Moon (meteoroid h^{-1})	Appearance frequency around Earth (meteoroid h^{-1})			
			90 km	1600 km	20000 km	36000 km
Sporadic	$1.93*10^{-7}$	7.3	101	154	1683	4344
Stream	$3.79*10^{-7}$	14.4	199	303	3312	8550

Эти результаты позволили получить статистику потоков метеороидов для разных высот в околоземном пространстве (Рисунок 1), когда система Земля-Луна находится (красная линия) или не находится (зеленая линия) внутри метеороидного потока. Также указаны диапазоны низкой околоземной орбиты (LEO), средней околоземной орбиты (MEO) и геостационарной орбиты (GEO) (Liakos и др., 2020; Bonanos и др., 2018; Xilouris и др., 2018; Liakos и др., 2024; Yanagisawa и др., 2002).

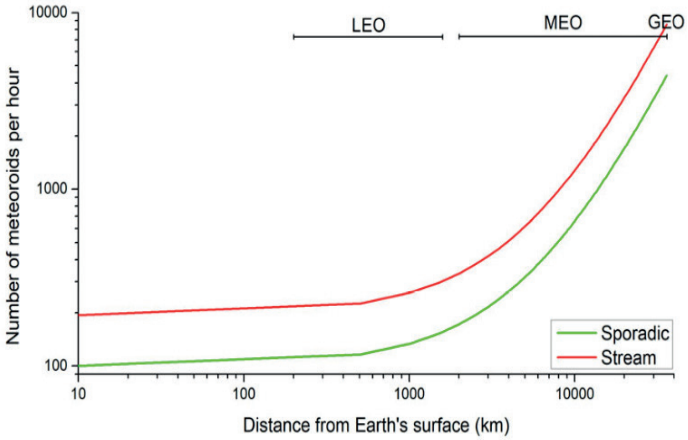


Рисунок 1 - Частота появления метеороидов вокруг Земли

Помимо проекта NELIOTA на сегодняшний день существуют еще две группы, осуществляющие систематический мониторинг поверхности Луны с целью обнаружения ударных вспышек. Первая группа — это команда MIDAS[3] , вторая — это Управление НАСА[4] по метеороидной среде.

Задачу анализа статистики распределения и динамики малоразмерных метеороидов можно было бы решить, наблюдая теневую сторону Земли с орбиты, но это оказалось невозможным из-за значительного светового загрязнения. Наблюдение же теневой стороны Луны с поверхности Земли и околоземных орбит тоже сопряжено с определенными трудностями. Во-первых, из-за наличия большого числа искусственных аппаратов и фрагментом космического мусора между Землей и Луной, при наблюдениях все чаще регистрируются отблески от

[3] MIDAS - Moon Impact Detection and Analysis System

[4] Meteoroid Environment Office - NASA

CC BY NC

этих объектов, часть из которых проецируется на диск Луны и может привести к ошибочным оценкам количества реальных столкновений. Во-вторых, из-за удаления Луны вспышки от ударов малоразмерных фрагментов зарегистрировать будет довольно сложно, поскольку это потребует использование инструментов с большой апертурой. В-третьих, с поверхности Земли и с низких околоземных орбит приходится полагаться на сеть телескопов или флотилию аппаратов для непрерывного или достаточно продолжительного наблюдения Лунной поверхности, учитывая статистику таких событий. Но, конечно, наибольшую сложность для наземных наблюдений представляет атмосфера Земли. Плохая погода или плохие условия видимости не позволяют уверенно обнаруживать слабые быстрые вспышки и негативно влияют на наблюдения более длительных ярких событий. Другой причиной, влияющей на наблюдения, является блик от дневной стороны Луны, который не позволяет наблюдать Луну, когда ее фаза больше ~45%. Вышеперечисленные трудности можно преодолеть с помощью космических телескопов на окололунной орбите Луне (LUMIO, 2023) или на таких орбитах, при которых аппарат будет достаточно продолжительно находится относительно близко от Луны.

Таковым проектом является LUMIO. В рамках развития проекта окололунного телескопа в Казахстане предлагается часть времени посвятить задаче обнаружения ударов о лунную поверхность метеороидов. Предлагаемый проект будет является существенным дополнением усилиям LUMIO и отчасти продолжателем этих исследований, поскольку предполагается проводить такие наблюдения в ИК диапазоне (инструмент LUMIO будет их проводить в видимом диапазоне), а сам инструмент предполагается большей апертуры, что даст возможность расширить анализ на более мелкие метеороиды.

Выбор ИК диапазона продиктован следующим фактом. При столкновении метеороида с поверхностью Луны, происходит взрывное выделение энергии в момент самого удара и последующим остыванием области Луны, куда пришелся удар, с выделением тепловой энергии в ИК диапазоне. Время охлаждения зависит от энергии, поглощенной материалом Луны на единицу площади поверхности, и/или от того сколько энергии было передано области непосредственно под облаком разогретого газа из-за взрыва, а также остыванием фрагментов самого метеороида, оставшихся после удара. Продолжительность вспышки в результате удара, по некоторым оценкам длится порядка 10^{-3} мс. При этом, наблюдавшиеся с Земли вспышки на Луне в видимом диапазоне длились около 30 мс, что скорее всего является следствием охлаждения места удара. Отчасти, продолжительное свечение (более 50 мс) после удара можно объяснить медленным остыванием фрагментов самого тела (Madiedo и др., 2018).

Скоротечность процессов, связанных с ударами, предъявляет дополнительные требования к системе в целом и алгоритму анализа получаемых данных в частности. Для построения кривой блеска события наблюдение этого события должно происходить при частоте порядка 100 кадров в секунду. Из-за большого объема данных и времени считывания сигнала нужен такой детектор, который

позволяет на этапе считывания сигнала выделять и считывать отдельный патч (участок) с зарегистрированным событием из всего изображения. Поскольку планируется, что мониторинг лунной поверхности будет осуществляться с частотой порядка 30 кадров в секунду, то с такой же частотой должен срабатывать алгоритм детектирования события. Как только событие обнаруживается, должна подаваться команда сканирования с частотой 100 кадров в секунду с сохранением патчей кадров, на которых это событие регистрируется.

Для оценки энергетики процесса, помимо его продолжительности, необходимо иметь оценку его температуры, что можно сделать по цветовой характеристике события (Liakos и др., 2024) (Рисунок 2).

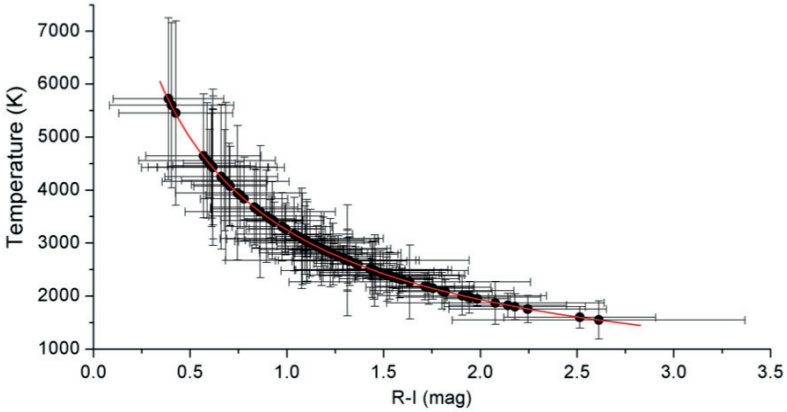


Рисунок 2 — Зависимость показателя цвета (R-I) от температуры (из работы (Liakos и др., 2024).

Кроме того, было обнаружено, что скорости теплового излучения областей вспышки не одинаковы, что вероятно, связано с разным типом материала метеороидов и лунного грунта и таким образом тоже является предметом исследования. К настоящему моменту не много событий было зарегистрировано сразу в нескольких фильтрах. Например в фильтрах V и I было снято одно событие в 2015 году (Madiedo и др., 2019) и в трех фильтрах R,V и B событие в 2019 году (Topputo и др., 2017). Поэтому в рамках развития концепции казахстанского окололунного телескопа изначально предполагается возможность наличия двух фотометрических каналов (в том числе для реализации схемы совпадения для отсеивания ложного срабатывания). Один из каналов предлагается выделить под фотометрические наблюдения в ИК диапазоне, а во втором канале в полосе фильтра V Джонсона.

Однако, при расчетах энергетики событий, следует учитывать потерю информации во время считывания сигнала с ПЗС приемника (Liakos и др., 2024). Этот факт должен учитываться как при выборе датчиков (ПЗС камер), так при разработке или оптимизации программного обеспечения.

Что касается оптимизации работы телескопа для решения рассматриваемой

CC BY NC

задачи, а также выбора соответствующих орбит, то необходимо учесть известную на данный момент статистику событий вспышек от ударов метеороидов о лунную поверхность. По понятным причинам, статистика ударов обнаруженных с окололунных орбит в предполагаемом диапазоне длин волн нам в настоящее время достоверно неизвестна, но некоторые предположения можно сделать на основе полученных данных от других экспериментов. В работе (Liakos и др., 2024) приведена статистика обнаружение ударов метеороидов (Таблица 2) в зависимости от расположения регистрирующего оборудования (аппарата). Поскольку разрабатываемая концепция окололунного телескопа не подразумевает точных дат ее реализации, нас будет интересовать частота спорадических событий (когда нет метеорных потоков) (Spo), наблюдаемых с окололунной орбиты (Moon, Orbit). Частота событий была получена из предположения об изотропии распределения метеороидов в окололунном и околоземном пространстве. Для получения консервативной оценки мы возьмём за основу статистику только для подтверждённых событий (Validated). Из статистики следует, что вероятное число ударов метеороидов о поверхность Луны порядка 8 событий в час. При наблюдениях теневой стороны Луны мы имеем порядка 4 событий в час, и следовательно минимальная продолжительность сессии наблюдений должна быть не менее ~15 минут для регистрации хотя бы одного события. Этот факт необходимо учитывать при выборе оптимальных орбит и планирования научной программы телескопа в целом.

Таблица 2 - Частота появления метеороидов на Луне и Земле и вокруг них (Liakos и др., 2024).

		Moon		Earth		
		Sur	Orbit	MS	LEO	GEO
Distance (km)			70	90	2000	36000
Validated (meteoroids h^{-1})	Spo	7.8	8.4	108	181	3338
	Str	14.8	16.0	205	344	6356
	Total	8.7	9.4	121	202	3742
Validated and suspected (meteoroids h^{-1})	Spo	9.9	10.8	138	231	4268
	Str	24.7	26.7	341	573	10594
	Total	11.9	12.9	165	277	5117

В приборном оснащении для задачи обнаружения вспышек от ударов метеороидов о поверхность Луны можно использовать светосильную камеру или светосильный телескоп-рефлектор с двумя каналами, разделенными дихроичным зеркалом. Один из каналов выделяется под ПЗС-фотометрию в видимом диапазоне (V-фильтр Джонсона или без фильтра), второй — под наблюдения в ИК диапазоне с использованием фильтра в диапазоне 5-6 мкм. Два канала обеспечат реализацию системы совпадения при отсеивании ложных сигналов, вызванными космическими лучами и другими случайными событиями. Для ИК канала в настоящее время доступны HgCdTe ПЗС камеры размером 1024 × 1024 пикселей (зависит от выбора целевой орбиты и физического размера пикселя), обеспечивающими поле зрения ~3° × 3° (при выборе орбиты HALO L2). Размер поля ПЗС-кадра в зависимости

от параметров оптической системы продиктован необходимостью наблюдать весь диск теневой стороны Луны. Одним из возможных решений может быть HAWAII 2RG или HAWAII 4RG компании TELEDYNE[5,6].

Для подавления термального шума от узлов телескопа, собственных шумов регистрирующей аппаратуры и фокальной плоскости, необходимо поддерживать температуру на уровне ниже 65 Кельвинов. Для этого нужен многоуровневый радиатор, который включает в себя защитные экраны от тепла, которое идет от солнечных панелей и самого аппарата, необходимость бленды на входное отверстие телескопа, для экранирования паразитного света от Луны и Солнца и охладитель. Учитывая решение работать в ИК диапазоне (5-6 мкм) и, следовательно, наличие криогенной установки для охлаждения инструмента и детектора, а также необходимое наличие двух фотометрических каналов, габариты возможного аппарата будут больше максимально допустимого размера КубСатов в 16U.

Некоторые решения, которые могут быть адаптированы под разрабатываемый инструмент, были представлены в эксперименте LUMIO на конференции iCubeSat (Topputo и др., 2017).

Обсуждение и выводы. Предлагаемая научная задача, по поиску событий ударов метеороидов о поверхность Луны, является в некотором смысле дополнением и одновременно расширением возможностей таких проектов как LUMIO и исследований популяции малоразмерных (порядка 1 мм и меньше) метеороидов, проводимых наземными наблюдениями. Решение этой задачи с использованием наземных наблюдений сильно ограничено из-за невозможности мониторинга больших площадей и, следовательно малоэффективны для полноценного статистического анализа. Кроме того, такие наблюдения отягощены погодными условиями, наличием паразитной засветки и перерывами в наблюдениях, связанных с суточным вращением Земли. В то же время, было показано, что, обладая довольно скромными возможностями бортового инструмента, аппарат на окололунной орбите способен обнаружить столкновения метеороидов размером менее одного миллиметра (LUMIO, 2023). Увеличение апертуры камеры (телескопа) и наличие ИК-канала позволит значительно расширить диапазон энергетики регистрируемых событий столкновений в сторону все более мелких частиц, а также проводить исследования постстолкновительных процессов. Выполнение этой задачи будет являться существенным дополнением к запланированной задаче по наблюдениям в рамках развития окололунной ситуационной осведомленности.

Учитывая большой интерес к изучению Луны и окололунного пространства, предлагаемая научная задача по изучению событий столкновений метеороидов с поверхностью Луны, в сочетании с функционирующими сейчас проектами и планируемым космическим миссиям, а также планируемым исследованиям падения метеоров в атмосфере Земли на широкоугольных оптических комплексах обсерватории Ассы-Тургень, помогут уточнить диапазон размеров малых тел в околоземном космическом пространстве.

[5] HAWAII-2RG | Teledyne Imaging
[6] HAWAII-4RG | Teledyne Imaging

CC BY NC

Наличие двух фотометрических каналов, предварительно V и J (K), позволит получить температурную характеристику события и наряду с кривой блеска даст возможность получить полную картину событий и, в частности, начальные условия столкновений, определить тип метеороида (Ernst C.M. и др. (2003)). Полученные новые знания в результате этих наблюдений, будут представлять интерес для исследователей Луны, специалистов, занимающихся вопросами безопасности космических аппаратов.

Литература

Bellot Rubio L. R., Ortiz J. L., Sada P. V. (2000). Luminous Efficiency in Hypervelocity Impacts from the 1999 Lunar Leonids.The Astrophysical Journal, 542, L65-L68. - DOI: https://doi.org/10.1086/312914

Bonanos A. Z., Avdellidou C., Liakos A., Xilouris E. M., Dapergolas A., Koschny D., Bellas-Velidis I., Boumis P., Charmandaris V., Fytsilis A., Maroussis A. (2018). NELIOTA: First temperature measurement of lunar impact flashes. Astronomy and Astrophysics, 612, A76. - DOI: https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732109;

Brown, P., Spalding, R. E., ReVelle, D. O., et al. (2002), The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth. Nature, 420, 294 URL:https://www.nature.com/articles/nature01238;

Chilton K. E. (1969) Transient Lunar PhenomenaJournal of the Royal Astronomical Society of Canada, 63, 203. - https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1969JRASC..63..203C; Cameron, W.S. Lunar transient phenomena catalog,1978., url: https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1978ltpc.book.....C

Dunham D. W., Cudnik B., Palmer D. M., Sada P. V., Melosh J., Frankenberger M. B. R., Pellerin L., Venable R., Asher D., Sterner R., Gotwols B., Wun B., Stockbauer D. (2000). The First Confirmed Video Recordings of Lunar Meteor Impacts. Lunar and Planetary Science Conference, 1547. — url: https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000LPI....31.1547D

Ernst C. M., Schultz P. H. (2003). Effect of Initial Conditions on Impact Flash Decay. Lunar and Planetary Science Conference. 1, 2020, url: https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003LPI....34.2020E

F. Topputo, M. Massari, J. Biggs, P. Di Lizia, K. Mani, D. Dei Tos, S. Ceccherini, V. Franzese, A. Cervone, P. Sundaramoorthy, R. Noomen, S. Mestry, S. Speretta, A. Cipriano, A. Ivanov, D. Labate, A. Jochemsen, R. Furfaro, V. Reddy, R. Walker, J. Vennekens (2017). LUMIO: Lunar Meteoroid Impact Observer. iCubeSat workshop, Cambridge, UK, 30 May 2017 © 2017 Politecnico di Milano, TU Delft, EPFL, S[&]T, Leonardo, University of Arizona. All rights reserved. URL:https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2018/EPSC2018-320.pdf

Liakos A., Bonanos A. Z., Xilouris E. M., Koschny D., Bellas-Velidis I., Boumis P., Charmandaris V., Dapergolas A., Fytsilis A., Maroussis A., Moissl R. (2020). NELIOTA: Methods, statistics, and results for meteoroids impacting the Moon. // Astronomy and Astrophysics, 633. A112 - DOI: https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936709

Liakos A., Bonanos A. Z., Xilouris E. M., Koschny D., Bellas-Velidis I., Boumis P., Maroussis A., Moissl R. (2024). NELIOTA: New results and updated statistics after 6.5 years of lunar impact flashes monitoring. Astronomy and Astrophysics, 687, A14. - DOI: https://doi.org/10.1051/0004-6361/202449542

LUMIO (Lunar Meteoroid Impacts Observer) (2023), Call for Membership in the Scientific, Working Groups, 13/02/2023, 1, URL:https://dart.polimi.it/wp-content/resources/attachments/_LUMIO__Call_for_Membership_in_the_SWGs.pdf

Madiedo J. M., Ortiz J. L., Morales N. (2018). The first observations to determine the temperature of a lunar impact flash and its evolution. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 480, 5010-5016. - DOI: https://doi.org/10.1093/mnras/sty1862

Madiedo J. M., Ortiz J. L., Morales N., Santos-Sanz P. (2019). Multiwavelength observations of a bright impact flash during the 2019 January total lunar eclipse. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 486, 3380-3387 - DOI: https://doi.org/10.1093/mnras/stz932

Melosh H.J., Artemjeva N.A., Golub A.P., Nemchinov I.V., Shuvalov V.V., Trubetskaya I.A. (1993). Remote Visual Detection of Impacts on the Lunar Surface. Lunar and Planetary Science Conference,1,975. — url: https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1993LPI....24..975M

Ortiz J. L., Aceituno F. J., Aceituno J. (1999). A search for meteoritic flashes on the Moon. Astronomy and Astrophysics, 343, L57-L60. — url: https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1999A&A...343L..57O

Ortiz J. L., Quesada J. A., Aceituno J., Aceituno F. J., Bellot Rubio L. R. (2002). Observation and Interpretation of Leonid Impact Flashes on the Moon in 2001. The Astrophysical Journal, 576, 567-573. - DOI: https://doi.org/10.1086/341625

Ortiz J. L., Sada P. V., Bellot Rubio L. R., Aceituno F. J., Aceituno J., Gutiérrez P. J., Thiele U. (2000). Optical detection of meteoroidal impacts on the Moon. Nature, 405, 921-923. - DOI: https://doi.org/10.1038/35016015;

Suggs R. M., Moser D. E., Cooke W. J., Suggs R. J. (2014). The flux of kilogram-sized meteoroids from lunar impact monitoring. Icarus, 238, 23-36. - DOI: https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.04.032

Suggs, R. M., Moser, D. E., Cooke, W. J. & Suggs, R. J. (2014). The flux of kilogram-sized meteoroids from lunar impact monitoring. Icarus, 238, 23-36. DOI: https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.04.032

Xilouris E. M., Bonanos A. Z., Bellas-Velidis I., Boumis P., Dapergolas A., Maroussis A., Liakos A., Alikakos I., Charmandaris V., Dimou G., Fytsilis A., Kelley M., Koschny D., Navarro V., Tsiganis K., Tsinganos K. (2018). NELIOTA: The wide-field, high-cadence, lunar monitoring system at the prime focus of the Kryoneri telescope. Astronomy and Astrophysics, 619, A141. - DOI: https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833499;

Yanagisawa M., Kisaichi N. (2002). Lightcurves of 1999 Leonid Impact Flashes on the Moon. Icarus. — 2002, 159, 31-38. - DOI: https://doi.org/10.1006/icar.2002.6931

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 105–112

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.387

UDC 521.1

©G.T. Omarova*, Zh.T. Omarova, 2025.
Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan.
Email: gulnara.omarova@fai.kz

THE LAGRANGE – JACOBI EQUATION AND ITS APPLICATION TO THE N - BODY PROBLEM

Omarova Gulnara — PhD in Physics and Mathematics, Senior Scientific Researcher, Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: Gulnara.omarova@fai.kz; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-4782-8545;
Omarova Zhuldyz — Engineer, Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan, DAAD Fellowship in Max Plank Institute, Heidelberg, Germany,
E-mail: zhuldyzomarova77@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-4825-0178.

Abstract. The Lagrange–Jacobi Equation plays a very important role in astronomy and astrophysics in study of the long-term behavior of astrophysical objects. This work presents an application of the Lagrange-Jacobi Equation for celestial mechanics and dynamics of large-scale structures of Universe. In this paper we consider a non-stationary N -body Problem, as a model which is describing the dynamics of large-scale gravitational systems. The classical solution of this problem assumes that the gravitational constant is a constant. However, several cosmological models allowed for the possibility of changing over time of the gravitational constant, which leads to a significant complication of the problem. The main aim of the present work is to demonstrate that the Lagrange – Jacobi equation can be used for the qualitative analysis of the N - body problem that helps to understand the variety of the astrophysical populations. Using the Lagrange–Jacobi Equation, with the help of the method of integration of the differential equation, we obtained an energy quasi-integral that is conserved during the slow evolution of the gravitational constant. In result, we demonstrated a possible analytical approach for the ability to understand some new dynamical aspects of the N - body Problem with a variable gravitational constant on the basis of the Lagrange-Jacobi Equation, what is important for understanding the global evolution of the astrophysical environment.

Keywords: Lagrange-Jacobi Equation, N-body Problem, Gravitational constant, Quasi - Integral

Funding. *The work is carried out within the framework of the Project No. BR24992759 Development of the concept for the first Kazakhstani orbital lunar telescope - Phase I", financed by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan).*

©Г.Т. Омарова*, Ж.Т. Омарова, 2025.
В.Г. Фесенков атындағы Астрофизика институты, Алматы, Қазақстан.
E-mail gulnara.omarova@fai.kz

ЛАГРАНЖ – ЯКОБИ ТУҢДЕУІ ЖӘНЕ ОНЫ N -ДЕНЕЛІ ЕСЕПКЕ ҚОЛДАНУ

Омарова Гулнара Төкеқызы — PhD (Физика және Математика), аға ғылыми қызметкер, Фесенков атындағы Астрофизикалық институты, Алматы, Қазақстан,
E-mail: Gulnara.omarova@fai.kz; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-4782-8545;
Омарова Жұлдыз Төкенқызы — Инженер, Фесенков атындағы Астрофизикалық институты, Алматы, Қазақстан, Max Plank Институтының DAAD Стипендиаты, Гейделберг, Германия,
E-mail: zhuldyzomarova77@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-4825-0178.

Аннотация. Лагранж-Якоби теңдеуі астрономия мен астрофизикада астрофизикалық нысандардың ұзақ мерзімді мінез-құлқын зерттеуде шешуші рөл атқарады. Бұл мақалада Лагранж-Якоби теңдеуінің аспан механикасына және Әлемдегі ірі масштабты құрылымдардың динамикасына қолданылуы ұсынылған. Бұл мақалада біз N - денелер уақытқа тәуелді мәселесін ірі масштабты гравитациялық жүйелердің динамикасын сипаттайтын модель ретінде қарастырамыз. Бұл мәселенің классикалық шешімі гравитациялық тұрақтының тұрақты екенін болжайды. Дегенмен, бірқатар космологиялық модельдер гравитациялық тұрақтының уақыт өте келе өзгеруі мүмкіндігін қарастырады, бұл мәселені айтарлықтай қиындатады. Бұл мақаланың негізгі мақсаты – Лагранж-Якоби теңдеуін N - денелер мәселесін сапалы талдау үшін пайдалануға болатынын көрсету, бұл астрофизикалық популяциялардың әртүрлілігін түсінуге көмектеседі. Лагранж-Якоби теңдеуін және дифференциалдық теңдеуді интеграциялау әдісін қолдана отырып, біз гравитациялық тұрақтының баяу эволюциясы кезінде сақталатын энергияның квази-интегралын алдық. Нәтижесінде, біз мәселенің кейбір жаңа динамикалық аспектілерін – астрофизикалық ортаның жаһандық эволюциясын түсіну үшін маңызды Лагранж-Якоби теңдеуіне негізделген айнымалы гравитациялық тұрақтысы бар денелерді түсінуге аналитикалық тәсілді көрсеттік.

Түйін сөздер: Лагранж-Якоби теңдеуі, N - денелер мәселесі, гравитациялық тұрақты, квази-интеграл

CC BY NC

©Г.Т. Омарова*, Ж.Т. Омарова, 2025.
Астрофизический институт им. В.Г.Фесенкова, Алматы, Казахстан.
E-mail gulnara.omarova@fai.kz

УРАВНЕНИЕ ЛАГРАНЖА – ЯКОБИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ К ЗАДАЧЕ N -ТЕЛ

Омарова Гульнара Тукеновна — PhD (кандидат физико-матерматических наук), старший научный струдник, Астрофизический институ им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан,
E-mail: Gulnara.omarova@fai.kz; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-4782-8545;
Омарова Жулдыз Тукеновна — Инженер, Астрофизический институ им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан, DAAD Стипендиат в Институте Max Plank, Гейдельберг, Германия,
E-mail: zhuldyzomarova77@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-4825-0178.

Аннотация. Уравнение Лагранжа–Якоби играет важную роль в астрономии и астрофизике, поскольку используется для анализа долгопериодического поведения гравитационных систем. В данной работе рассматривается применение уравнения Лагранжа–Якоби к небесной механике и динамике крупномасштабных структур Вселенной. Особое внимание уделено нестационарной задаче N-тел с переменной гравитационной постоянной. Классическая формулировка задачи N-тел предполагает неизменность гравитационной постоянной, однако ряд космологических моделей допускают её медленную эволюцию во времени, что приводит к усложнению динамических уравнений. Целью работы является демонстрация возможностей применения уравнения Лагранжа–Якоби для качественного анализа таких систем. Используя уравнение Лагранжа–Якоби и методы интегрирования дифференциальных уравнений, получен квазиинтеграл энергии, сохраняющийся при медленном изменении гравитационной постоянной. Показано, что данный подход позволяет выявить новые динамические особенности задачи N-тел с переменной гравитационной постоянной, что важно для понимания глобальной эволюции астрофизических систем.

Ключевые слова: уравнение Лагранжа-Якоби, задача N - тел, гравитационная постоянная, квази-интеграл

Introduction. The N - body problem, a cornerstone of classical celestial mechanics and astrophysics, in its most straightforward form, assumes that the gravitational force between bodies is governed by a constant gravitational constant G, as it is prescribed by Newton's law of gravitation (Duboshin, 1963). However, a fundamental constant of gravity, may not be constant over time and this assumption is quite reasonable in the context of modern astrophysics and cosmology.

For example, for the Near-field cosmology that explores the structure, dynamics, and evolution of the Universe on relatively small scales within the redshifts $z < 0.1$, for which some advanced tools are performed in this domain providing detailed examinations of the density field, the local matter power spectrum, and proofs of cosmological models

and alternative theories of gravity (Binney J. et al, 2008; Kilinch, 2004; Courtois H. et al, 2025; Piedipalumbo E. et al. 2012).

The gravitational constant G being fundamentally constant parameter, in several cosmological models, can vary with time. In particular, we should remind Jordan's work on N - body Problem (Jordan, 1967), in Universe with weakening gravity and Dirac's concept of a time - dependent gravitational constant (Dirac, 1972).

In this paper we show, that one of the crucial analytical tools for the analysis of such many bodies systems is the Lagrange-Jacobi Equation. This equation relating dynamical variables with energy of the system, opens perspective to describe its evolution. In context of the N - body with variable gravitational constant, the Lagrange-Jacobi Equation provides qualitative approach for study of its dynamical properties (Omarov, 1975).

The Lagrange—Jacobi equation thus forms the basis for the theoretical analysis of the global evolution of many bodies in the astrophysical environment.

Research materials and method. We consider the N - body problem

$$m\frac{d^2\vec{r}_i}{dt^2} = -grad_{\vec{r}_i}W, \quad (i = 1,2,...,n), \qquad (1)$$

$$W = -G(t)\sum_{i\neq j}\frac{m_i m_j}{r_j} \qquad (2)$$

where W is a potential energy of the system, G(t) — is the gravitational constant as a varying function of time t.

Multiplying Eq. (1) by $d\vec{r}_i/dt$ scalarly and making summation over i, we obtain

$$\sum_i m_i \frac{d\vec{r}_i}{dt}\frac{d^2\vec{r}_i}{dt^2} = -\left(\frac{dW}{dt} - \frac{\partial W}{\partial t}\right) \qquad (3)$$

which can be written as

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{1}{2}\sum_i m_i\left(\frac{d\vec{r}_i}{dt}\right)^2 + W\right] = \frac{\dot{G}}{G}W \qquad (4)$$

or

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\dot{G}}{G}W, \qquad (5)$$

where h is the total energy of the system, namely

CC BY NC

$$h = \frac{1}{2}\sum_i m_i \left(\frac{d\vec{r}_i}{dt}\right)^2 + W \qquad (6)$$

It is interesting to note here, that according to Brans-Dicke theory (Brans C. et al, 1965; Paliathanasis, 2023; Peebles 2017; Pinki, 2023; Pinki K. et al, 2022), the behavior

$$\frac{\dot{G}}{G} = -\frac{\alpha}{t}, \qquad (7)$$

where α is the constant coefficient.

In case of $\alpha = 1$ we have Dirac's law (Dirac, 1972) under which the following relation

$$-\frac{\dot{G}_0}{G_0} = 10^{-11}\,\text{год}^{-1}$$

is valid for the dynamical condition for gravitational systems of present-day.

For the problem (1) the Lagrange - Jacobi equation can be written in the form

$$\frac{1}{2}\frac{d^2 J}{dt^2} = -W + 2h \qquad (7,1)$$

where J is the momentum of inertia of the system:

$$J = \sum_i m_i r_i^2 \qquad (8)$$

From Eq. (5) and (7) we obtain

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\dot{G}}{G}\left(2h - \frac{1}{2}\frac{d^2 J}{dt^2}\right) \qquad (9)$$

Results. Thus, the synthesis of equations for energy evolution (5) and the Lagrange — Jacobi E (7) results in the following quasi-integral for the N - body problem (1) with variable gravitational constant:

$$h = \frac{G^2}{G_0^2} h_0 - \frac{1}{2G_0^2}\int_{t_0}^{t} G \cdot \dot{G}\frac{d^2 J}{dt^2}\,dt \qquad (10)$$

CC BY NC

or

$$h+\frac{1}{2G_0^2}\int_{t_0}^{t} G\cdot\dot{G}\frac{d^2J}{dt^2}dt=\frac{G^2}{G_0^2}h_0 \qquad (11)$$

where G_0 and h_0 are the values of G and h in some initial epoch t_0.

If in Universe with variable gravitational constant the N - body system is evolving so slowly that the virial theorem is applicable to its each instant state and therefore

$$\frac{d^2J}{dt^2}=0 \qquad (12)$$

Then the magnitude of h is evolving in accordance with the law:

$$h=\frac{G^2}{G_0^2}h_0 \qquad (13)$$

It is important to note as well, that under

$$G\cdot\dot{G}=const \qquad (14)$$

the above quasi- integral (11) becomes the following first integral of the gravitating system (1):

$$h-G\cdot\dot{G}\sum_i \vec{r}_i\frac{d\vec{r}_i}{dt}=\frac{G^2}{G_0^2}h_0+G\cdot\dot{G}\left(\sum_i \vec{r}_i\frac{d\vec{r}_i}{dt}\right)_0. \qquad (15)$$

The main result of the present work is to demonstrate LJE another one application and in some way this stands for a straightforward extension of our earlier paper where The Lagrange - Jacobi equation used for the qualitative analysis of the N -body problem (Omarov Ch. et al, 2023) that helps to understand the variety of the astrophysical populations (Ferraiuolo S. et al. 2025).

Conclusions and discussions. Thus, we received the quasi- integral (15) for the N - body problem (1) with gravitational constant varying in time.

Taking into account that

CC BY NC

$$G \cdot \dot{G} = G_0 \cdot \dot{G}_0 \tag{16}$$

we have

$$h - G \cdot \dot{G} \sum_i r_i \frac{d\vec{r}_i}{dt} = \frac{G^2}{G_0^2}\left(h_0 - \frac{G_0^3}{G^2} \cdot \dot{G}_0 \left(\sum_i \vec{r}_i \frac{d\vec{r}_i}{dt} \right)_0 \right) \tag{17}$$

Let the term

$$h_0 - \frac{G_0^3}{G^2} \cdot \dot{G}_0 \sum \vec{r}_{i0} \dot{\vec{r}}_{i0} = \frac{1}{2} \sum_i m_i \left(\frac{d\vec{\rho}_i}{d\tau} \right)^2 + \Omega(\rho_i, \tau) \tag{18}$$

is the energy integral of some autonomous system of the Eq.

$$m_i \frac{d^2 \vec{\rho}_i}{d\tau^2} = -grad_{\rho_i} \Omega \qquad (i = 1,2,...,n) \tag{19}$$

to which the system of equations (1) is transformed under space-time transformation of the form

$$\vec{r}_i = \varphi(t)\vec{\rho}_i \ , \quad \tau = \tau(t)$$

From (6) and (18) it follows that

$$h = h_0 - \frac{G_0^3}{G^2} \dot{G}_0 \cdot \sum_i \left(\varphi(\tau) \cdot \dot{\varphi}(\tau) \vec{\rho}_{i0}^2 + \varphi^2(\tau) \vec{\rho}_{i0} \dot{\vec{\rho}}_{i0} \right). \tag{20}$$

We obtained the energy integral (20) for the autonomous Eq. (19) after making space-time transformation of the quasi-integral (17), as an analytical result of the application of the Lagrange-Jacobi Equation to the N - body problem (1) with variable gravitational constant.

In conclusion, this work has achieved significant advancement through use of the Lagrange - Jacobi Equation as an effective and fruitful analytical tool and method to understand some dynamical aspects of the N - body problem with a time-variable gravitational constant. The main result of this paper is the quasi-integral for the N - body problem with variable gravitational constant that helps to get more comprehensive understanding of the Universe's structure and evolution.

References

Binney J., Tremaine S. (2008) Galactic Dynamics. Second edition. Princeton University Press. Princeton. US. 885p. (in English)

Brans C.H., Dicke R.H. (1965) Phys. Rev. — Vol. 124. — P. 925. (in English)

Courtois H.M., Mould J., Hollinger A.M., Dupuy A., and Zhang C.P. (2025) In search of the Local Universe dynamical homogeneity scale with CF4++ pecular velocities. Astronomy and Astrophysics. — Vol.701. — 8p. DOI: https://doi.org/10.1051/0004-6361/202555124 (in English)

Dicke R.H. (1968) Astrophys. J. — Vol.152. — P.1. (in English)

Dirac P.A.M. (1972) Cosmology. Fusion and other Matters. Boulder. Colo. — P.56. (in English)

Duboshin G. N. (1963). Nebesnaya Mekhanika. Osnovnye zadachi i metody. [Celestial Mechanics. Basic problems and methods] Physmatgiz. — Moscow. — 586 p. (in Russian)

Ferraiuolo S., Mastrogiovanni S., Escoffier S., and Fajfasz E. (2025) Inferring astrophysics and cosmology with individual compact binary coalescences and their gravitational-wave stochastic background. Astronomy & Astrophysics. — Vol.701. — 13 p. DOI: https://doi.org/10.105/6361/202553677 (in English)

Jordan P. (1967) Zeitschrift fur phys. — Vol. 201. — N. 4. — P. 394. (in English)

Kilinch, Can Battal (2004) Cosmological model with variable and Astrophysics and Space Science. — VOL 289. — P.103-109. DOI: https://doi.org/10.1023/B:APSS.0000012239.12328.f9 (in English)

Kumar P., Beesham A. (2022) Reconsidering holographic dark energy in Brans–Dicke theory. The European Physical Journal C. — Vol. 82. — P. 143. DOI: https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-100930-7 (in English)

Kumar P., Singh C.P. (2023) New agegraphic dark energy in Brans–Dicke theory with sign changeable interaction for flat universe. General Relativity and Quantum Cosmology. — Vol.5. — P. 46. DOI: https://doi.org/10.1007/s10509-017-3032-0 (in English)

Omarov Ch.T., Omarova G.T. (2023) Modification of the Lagrange - Jacobi Equation and Its Application. World Journal of Mechanics. — Vol.13. — P. 127-134. DOI: https://doi.org/10.4236/wjm2023.136007 (in English)

Omarov T. B. (1975) Dynamica Gravitiruyuschikh System Metagalaktiki. [Dynamics of Gravitating Systems of the Metagalaxy]. — Nauka. — Alma-Ata. — 144 p. (in Russian)

Paliathanasis A. (2023) Dynamical equivalence of the varying G and Λ cosmology with the Brans–Dicke theory. The European Physical Journal C. — Vol.83. — P. 478. DOI: https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-023-11670-0 (in English)

Peebles P.J. (2017) Robert Dicke and the naissance of experimental gravity physics, 1957–1967. The European Physical Journal H. — Vol. 42. — P. 177-259. DOI: https:doi.org/10.1140/epjh/e2016-70034-0 (in English)

Piedipalumbo E., Scudellaro P., Esposito G., and Rubano C. (2012) A matter-dominated cosmological model with variable G and Λ and its confrontation with observational data. Astrophysics. Cosmology and Nongalactic Astrophysics. — Vol.1. — 31 p. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1104.3029 (in English)

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 113–126

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.388

UDC 524.354.4-327

©Zh. Muratkhan[1,2]*, M. Khassanov[1] , 2025.
[1]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;
[2]Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: muratkhan_zhantay1@live.kaznu.kz

METHODS FOR ESTIMATION OF STELLAR WIND PARAMETERS IN HIGH-MASS X-RAY BINARY SYSTEMS WITH NEUTRON STARS

Muratkhan Zhantay — PhD student, Department of Theoretical physics, Faculty of Physics and Technics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, Lecturer, Department of Physics, Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: muratkhan_zhantay1@live.kaznu.kz; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-7186-0273;
Khassanov Manas — PhD, senior researcher, Department of Theoretical physics, Faculty of Physics and Technics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: khassanov.manas@kaznu.kz; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-9857-0658.

Abstract. The article discusses a new approach to studying the parameters of the stellar wind from hot stars in massive binary X-ray systems with a neutron star (NS), which manifest themselves as accreting X-ray pulsars. The proposed technique is based on the analysis of the observed characteristics of neutron stars in these systems. In particular, it is shown that the rotational evolution of the NS can be used to determine the stellar wind velocity of the massive companion at the orbital radius of the compact source. This approach relies on the fact that the transfer of angular momentum during wind accretion is directly linked to the local properties of the stellar wind, such as its velocity and density structure. The relevance of the problem is due to the insufficient study of the stellar wind parameters of hot stars, since traditional spectroscopic methods do not always allow us to reliably detect wind components in the spectra of sources, especially in systems with strong X-ray irradiation or complex wind geometry. In such cases, the wind structure may be significantly modified by the presence of the compact object, leading to deviations from standard theoretical wind models. The proposed method provides an independent and complementary diagnostic tool, allowing wind parameters to be constrained through X-ray timing observations rather than optical or ultraviolet spectroscopy. This significantly expands the range of systems for which wind properties can be investigated.

Keywords: stellar wind, X-ray pulsars, massive binary systems, wind accretion, neutron stars

Financing. *The research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant No. AP23489541), titled "methods for estimation of stellar wind parameters in high-mass x-ray binary systems with neutron stars".*

©Мұратхан Ж.[1,2]*, Хасанов М.[1], 2025.
[1]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан;
[2]Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан.
E-mail: muratkhan_zhantay1@live.kaznu.kz

НЕЙТРОН ЖҰЛДЫЗДАРЫ БАР МАССИВТІ РЕНТГЕНДІК ЕКІЛІК ЖҮЙЕЛЕРДЕГІ ЖҰЛДЫЗДЫҚ ЖЕЛ ПАРАМЕТРЛЕРІН БАҒАЛАУ ӘДІСТЕРІ

Мұратхан Жантай — PhD, докторант, әл-фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан,
E-mail: muratkhan_zhantay1@live.kaznu.kz, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-7186-0273.
Хасанов Манас — PhD, әл-фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті физика-техникалық факультетінің аға ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан.
E-mail: khassanov.manas@kaznu.kz; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-9857-0658.

Аннотация. Бұл мақалада нейтрон жұлдызы (НЖ) бар массивті рентгендік қос жүйелердегі ыстық жұлдыздардың жұлдыздық жел параметрлерін зерттеудің жаңа тәсілі қарастырылады. Мұндай жүйелер аккрекцияланатын рентгендік пульсарлар ретінде байқалады. Ұсынылған әдіс осы жүйелердегі нейтрон жұлдыздарының бақыланатын сипаттамаларын талдауға негізделген. Атап айтқанда, нейтрон жұлдызының айналу эволюциясын пайдалану арқылы ықшам объектінің орбиталық радиусындағы массивті серіктес жұлдыздың жұлдыздық жел жылдамдығын анықтауға болатыны көрсетіледі. Бұл тәсіл жел арқылы аккрекция кезінде бұрыштық импульстің берілуі жұлдыздық желдің жергілікті қасиеттерімен, атап айтқанда оның жылдамдығы мен тығыздық құрылымымен, тікелей байланысты екеніне негізделген. Мәселенің өзектілігі ыстық жұлдыздардың жұлдыздық жел параметрлерінің жеткілікті дәрежеде зерттелмеуімен түсіндіріледі, себебі дәстүрлі спектроскопиялық әдістер барлық жағдайда көздердің спектрлерінен жел компоненттерін сенімді түрде анықтауға мүмкіндік бере бермейді. Бұл әсіресе күшті рентгендік сәулеленуі бар немесе жел геометриясы күрделі жүйелерге тән. Мұндай жағдайларда ықшам объектінің әсерінен жұлдыздық жел құрылымы айтарлықтай өзгеріп, стандартты теориялық жел модельдерінен ауытқуларға әкелуі мүмкін. Ұсынылған әдіс жұлдыздық жел параметрлерін оптикалық немесе ультракүлгін спектроскопия арқылы емес, рентгендік таймингтік бақылаулар көмегімен шектеуге мүмкіндік беретін тәуелсіз әрі толықтырушы диагностикалық құрал болып табылады. Бұл жұлдыздық жел қасиеттерін зерттеуге болатын жүйелер ауқымын едәуір кеңейтеді. Осылайша, аталған тәсіл массивті рентгендік қос жүйелердегі жел сипаттамаларын зерттеуге

CC BY NC

маңызды үлес қосып, аккрекция процестерін, бұрыштық импульстің берілуін және нейтрон жұлдыздарының ұзақ мерзімді айналу эволюциясын тереңірек түсінуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: жұлдыздық жел, рентгендік пульсарлар, массивті екілік жүйелер, жел арқылы аккрекция, нейтрон жұлдыздары

©Муратхан Ж.[1,2]*, Хасанов М.[1], 2025.
[1]Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан;
[2]Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан.
E-mail: muratkhan_zhantay1@live.kaznu.kz

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ЗВЕЗДНОГО ВЕТРА В МАССИВНЫХ ДВОЙНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ СИСТЕМАХ С НЕЙТРОННЫМИ ЗВЕЗДАМИ

Муратхан Жантай — PhD докторант, Физико-технического факультета Казахского национального университета им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан; Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан,
E-mail: muratkhan_zhantay1@live.kaznu.kz; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-7186-0273;
Хасанов Манас — старший научный сотрудник Физико-технического факультета Казахского национального университета им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,
E-mail: khassanov.manas@kaznu.kz; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-9857-0658.

Аннотация. В статье рассматривается новый подход к исследованию параметров звёздного ветра в массивных рентгеновских двойных системах с нейтронной звездой (НЗ), проявляющей себя как аккрецирующий рентгеновский пульсар. Предлагаемая методика основана на анализе наблюдаемых характеристик нейтронной звезды, что позволяет использовать эволюцию её вращения для определения скорости звёздного ветра массивного компаньона на орбитальном расстоянии компактного объекта. Метод опирается на то, что перенос углового момента при ветровой аккреции напрямую связан с локальными свойствами звёздного ветра — его скоростью и профилем плотности. Актуальность исследования обусловлена тем, что параметры ветра горячих массивных звёзд изучены недостаточно: традиционные спектроскопические методы часто не позволяют надёжно выделить ветровые компоненты, особенно в системах с сильным рентгеновским излучением или сложной геометрией ветра. В подобных условиях структура ветра может существенно искажаться под воздействием компактного объекта, что приводит к отклонениям от стандартных теоретических моделей. Предлагаемый метод является независимым и дополняющим диагностическим инструментом, позволяющим накладывать ограничения на свойства звёздного ветра на основе рентгеновских таймингoвых наблюдений, без необходимости использования оптической или ультрафиолетовой спектроскопии. Это расширяет спектр систем, для которых возможно исследование параметров

звёздного ветра. Таким образом, представленная методика является важным дополнением в изучении ветровых характеристик массивных рентгеновских двойных систем и способствует более глубокому пониманию механизмов аккреции, переноса углового момента и эволюции спина нейтронных звёзд.

Ключевые слова: звездный ветер, рентгеновские пульсары, массивные двойные системы, ветровая аккреция, нейтронные звёзды

Введение. Рентгеновские пульсары в массивных двойных системах являются замагниченными нейтронными звездами (НЗ), компаньонами которых являются массивные невырожденные звезды ранних спектральных классов. Основным механизмом генерации рентгеновского излучения для данных источников является процесс аккреции. Захваченное вещество, взаимодействуя с магнитосферой нейтронной звезды, движется вдоль силовых линий в окрестность магнитных полюсов. Несовпадение осей вращения и магнитного диполя НЗ создает эффект пульсирующего излучения для внешнего наблюдателя (Potekhin, 2010).

В HMXB-системах массивный компаньон как правило, не заполняет свою полость Роша, и перенос массы происходит через захват плотного звёздного ветра (режим ветровой аккреции). Среди известных HMXB-пульсаров наблюдаются как квазистационарные источники, рентгеновский поток от которых претерпевает плавные вариации без явной вспышечной активности, так и транзиентные объекты, демонстрирующие резкие изменения в наблюдаемом потоке более чем на порядок, что отражает различия в режимах аккреции и типах компаньонов (Kim, 2023). Структура аккреционного потока в таких системах может существенно различаться в зависимости от условий: рассматриваются различные сценарии аккреции: квазисферическая аккреция, аккреция из кеплеровского диска, а также аккреция из магнитно-левитационного диска при захвате вещества из замагниченного ветра (Ikhsanov, 2015). Обмен угловым моментом между аккрецируемым потоком и нейтронной звездой влияет на ротационную эволюцию НЗ. В процессе данной эволюции нейтронная звезда стремится к так называемому равновесному периоду, когда ускоряющие и замедляющие моменты сил взаимно компенсируются (Lipunov, 1992).

Процесс ротационной эволюции НЗ существенным образом зависит от характеристик звездного ветра (скорость, плотность, параметры неоднородности ветра, наличие собственного магнитного поля) (Ikhsanov, 2015). Однако, указанные ветровые параметры остаются недостаточно изучены из-за сложности идентификации традиционными (спектральными) методами. Более того, установлено, что ветровой поток горячих звёзд не является однородным и сферически-симметричным по своей структуре (Kudritzki, 2000).

На текущий момент, основным методом изучения ветровых характеристик массивных компонентов HMXB-систем является оптическая спектроскопия, где источниками информации о ветре горячих звезд ранних спектральных классов являются резонансные линии (NV, SiIV, CIV и пр.) в ультрафиолетовой области. Благодаря этому методу удалось изучить быстрые компоненты звездного

CC BY NC

ветра массивных звезд, а также оценить их темп истечения в приближении модели однородного сферически-симметричного ветра. По результатам этих исследований, горячие звезды в резонансных линиях ультрафиолета демонстрировали относительно большую скорость эжектируемого вещества, порядка $\upsilon_w \sim 1500$—2000 км/с, с характерным темпом истечения $\sim 10^{-6}$—10^{-9} $M_\odot$/год (Kudritzki, 2000).

Несмотря на большое количество проведенных спектральных исследований, до сих пор остаются малоизученными вопросы о степени неоднородности звездного ветра (Oskinova, 2013). Также существуют некоторые трудности в изучении ветровых характеристик традиционными (спектральными) методами. В частности, далеко не у всех звезд, и тем более входящие в рентгеновские двойные системы можно наблюдать, вносимые эжектируемым веществом резонансные линии поглощения в спектре, а только в случае непрозрачного (с достаточной оптической толщиной) звездного ветра (Kudritzki, 2000). Таким образом, несмотря на высокую надежность традиционные методы оптической спектроскопии не всегда позволяют получить оценки ветровых характеристик. В данной работе мы предлагаем альтернативную методику определения параметров ветра, где основным источником данных является нейтронная звезда, проявляющая себя как рентгеновский пульсар. Ее наблюдаемые характеристики могут быть использованы для получения косвенных оценок ветровых характеристик ее массивного компаньона.

Материалы и основные методы. Аккреция из звёздного ветра и взаимодействие с магнитосферой нейтронной звезды. Рассмотрим процесс ветровой аккреции в HMXB системе с нейтронной звездой. Когда НЗ движется по орбите сквозь плотный звездный ветер своего массивного компаньона, она гравитационно захватывает часть вещества. Процесс переноса массы в данном случае можно разделить на несколько стадий (Davidson, 1973):

Захват вещества на радиусе Бонди. На расстоянии порядка радиуса гравитационного захвата r_G, определяемого условием равенства энергетики ветра и гравитации, происходит захват материала. Радиус Бонди задаётся формулой:

$$r_G = \frac{2G\,M_{ns}}{\upsilon_{rel}^2} \qquad (1)$$

где M_{ns} — масса нейтронной звезды, υ_{rel} — её относительная скорость, G — гравитационная постоянная.

1. Формирование квазисферического аккреционного потока. Захваченное вещество направляется в сторону НЗ, формируя изначально квазисферический поток. Этот поток обладает угловым моментом вследствие орбитального движения системы, а также может обладать собственным магнитным полем. Структура потока зависит от множества параметров и описывается в рамках разных аккреционных структур (квазисферического, дискового и др.), однако в данной работе рассматривается квазисферический случай, когда захваченный поток не образует устойчивого Кеплеровского диска (Shakura, 2013).

CC BY NC

2. Взаимодействие с магнитосферой. На границе магнитосферы ($r \sim r_m$) движение аккреционного потока тормозится давлением магнитного поля НЗ. Дальнейшее проникновение вещества происходит преимущественно за счёт диффузии или плазменных неустойчивостей в магнитопаузе (Lipunov, 1992).

3. Аккреция на поверхность НЗ. При попадании внутрь магнитосферы плазма движется вдоль силовых линий магнитного поля по направлению к магнитным полюсам НЗ, формируя область горячих пятен, где и происходит генерация рентгеновского излучения за счет ударного нагрева (Lipunov, 1992).

В процессе аккреции устанавливается баланс между ускоряющими и тормозящими моментами сил приложенных со стороны аккреционного потока к нейтронной звезде, в этом случае ротационная эволюция НЗ описывается следующим уравнением:

$$I \frac{d\omega_s}{dt} = K_{su} - K_{sd} \qquad (2)$$

где I — момент инерции НЗ, $\omega_s = 2\pi/P_s$ — угловая скорость осевого вращения, K_{su} и K_{sd} — ускоряющие и замедляющие моменты сил соответственно. Аккрецирующая нейтронная звезда в процессе свой ротационной эволюции будет стремиться к так-называемому равновесному периоду, когда ускоряющие и тормозящие моменты сил взаимно компенсируют друг друга, таким образом левая часть уравнения (2) обращается в нуль.

В случае стационарной аккреции (темп захвата вещества не меняется на масштабе времени) при достижении нейтронной звездой своего равновесного периода темп изменения осевого вращения обращается в нуль $\dot{\omega} = 0$, вследствие взаимной компенсации ускоряющих и тормозящих моментов сил. Но в действительности аккрецирующие рентгеновские пульсары в двойных системах демонстрируют хаотические чередующиеся вариации ускорения и торможения осевого вращения, длящиеся на масштабах времени от нескольких дней до нескольких месяцев и даже лет (Kim, 2023). Этот факт указывает на то, что нейтронные звезды в данных системах достигли своего усредненного равновесного периода, но следствие небольших изменений в темпе аккреции, связанных с неоднородностями звездного ветра, проявляются регулярные незначительные колебания величины P_{eq} вблизи среднего значения.

Условие взаимной компенсации моментов сил ($K_{su}=K_{sd}$), приложенных к НЗ, позволяет оценить величину P_{eq}. В случае ветровой аккреции, максимально возможный захватываемый нейтронной звездой угловой момент в единицу времени оценивается как (Davidson, 1973):

$$\left|K^{(w)}\right| = \dot{M}\, \Omega_{orb}\, r_G^2 \qquad (3)$$

где $\dot{M}$ - темп захвата вещества, $\Omega_{orb}=2\pi/P_{orb}$ — орбитальная угловая скорость НЗ, а r_G — радиус Бонди.

CC BY NC

По мере продвижения аккреционного потока к нейтронной звезде часть углового момента диссипирует. Ускоряющий момент сил, приложенный к нейтронной звезде со стороны аккреционного потока с учетом диссипации:

$$K_{su}^{(w)} = \xi \dot{M} \Omega_{orb} r_G^2 \quad (4)$$

В свою очередь тормозящий момент сил, приложенный со стороны аккреционного потока к границе магнитосферы НЗ, выражается как (Ikhsanov, 2014):

$$K_{sd}^{(qsp)} = k_t \dot{M} \omega_s r_m^2 \simeq k_t \dot{M} \omega_s r_A^2 \quad (5)$$

где r_m — радиус магнитосферы НЗ, а k_t — безразмерный коэффициент эффективности передачи углового момента. В рамках квазисферической аккреции радиус магнитосферы полагается равным Альвеновскому радиусу $r_m \approx r_A$, на котором давление динамического потока сравнивается с давлением магнитного поля НЗ (Ikhsanov, 2014):

$$r_A = \left(\frac{\mu_{ns}^2}{\dot{M}\sqrt{2G M_{ns}}}\right)^{2/7} \quad (6)$$

Здесь μ_{ns} — дипольный магнитный момент нейтронной звезды, $\dot{M}$ — темп аккреции вещества, G — гравитационная постоянная, M_{ns} — масса нейтронной звезды. Данная формула позволяет оценить область, в которой магнитосфера начинает существенно влиять на аккреционный поток.

При выполнении условия равновесия $K_{su}=K_{sd}$ и с учетом выражения (1) получаем важную оценку относительной скорости нейтронной звезды:

$$v_{rel} = \left(\frac{P_{eq}\xi}{k_t P_{orb}}\right)^{1/4} \left(\frac{\dot{M}^2[2G M_{ns}]^8}{\mu_{ns}^4}\right)^{1/14} \quad (7)$$

Здесь P_s — период осевого вращения НЗ, а P_{orb} — орбитальный период. Предполагается, что звездный ветер, захватываемый нейтронной звездой, обладает угловой скоростью порядка орбитальной: $\Omega_0 \approx \xi\Omega_{orb} = \xi 2\pi/P_{orb}$, а $0<\xi\leq 1$ — параметр диссипации углового момента.

Рассматриваемые источники.

CenX-3

Cen X-3 был открыт в 1967 году с помощью космической обсерватории Uhuru, как точечный рентгеновский источник. Дальнейшие наблюдения выявили регулярные пульсации в его рентгеновском излучении с периодом 4.876±0.0154, что позволило отождествить данный источник с рентгеновским пульсаром (Giacconi, 1971). А обнаружение синусоидальных амплитудных вариаций с периодом ~2.087 сут. позволили сделать вывод о том, что Cen X-3 является затменной двойной системой

CC BY NC

с массивным компаньоном. Оптические наблюдения в области локализации Cen X-3 с помощью различных телескопов обсерваторий ESO и Las-Campanas в период 1973—1974 гг. позволили идентифицировать оптический компонент системы как звезду раннего спектрального класса 09—09.5 V или B0 I—III. Таким образом, Cen X-3 стал первым объектом, отождествленным как рентгеновский пульсар в массивной двойной системе. Дальнейшие исследования источника в оптическом диапазоне позволили уточнить спектральный класс нормального компонента как O6.5 II—III, массой ~20.2 $M_\odot$ (Ash, 1999), располагающуюся на расстоянии $d_0 \simeq 5.7 \pm 1.5$ кпк. Эксцентриситет орбиты компактного источника характеризуется предельно малой величиной $e \simeq 0.00021$, близкой к идеальной круговой орбите.

OAO1657-415

OAO 1657-415, исходно открытый в 1978 году как затменный рентгеновский источник , спустя год был отождествлен с аккрецирующим рентгеновским пульсаром, период которого на тот момент составлял 38.22 с. Рентгеновская светимость источника на протяжении наблюдений 2002-2016 гг. в диапазоне 18—50 кэВ плавно варьировалась в диапазоне $L_x \simeq 0.1 - 2 \times 10^{37}\ (d/d_0)^2$ эрг/с (Sidoli, 2018). OAO 1657-415 расположен на расстоянии $d_0 = 6.4 \pm 1.5$ кпк и отождествлен с массивной рентгеновской двойной системой, имеющей орбитальный период $P_{orb} \simeq 10.44$ сут (Fortin, 2023). Эксцентриситет орбиты $e \simeq 0.104$. Компонентами системы является нейтронная звезда и массивный сверхгигант спектрального класса Ofpe. Нейтронная звезда в настоящую эпоху вращается с периодом $P_s \simeq 37.024$ с и обладает магнитным полем, величина которого на ее поверхности, измеренная из анализа циклотронной линии, наблюдаемой в рентгеновском спектре источника, составляет $B_{ns} = (3.1 \pm 0.2) \times 10^{12}$ Гс.

VelaX-1

Vela X-1 так же, как и Cen X-3 исходно открыт космической обсерваторией Uhuru на заре становления рентгеновской астрономии в 1967 году. В последствие также отождествлен с рентгеновским пульсаром в массивной двойной системе. Период осевого вращения компактного источника составляет $P_s \sim 283.43$ сек . Орбита обладает малым значением эксцентриситета, близким к круговому $e \sim 0.088$, что характерно для квазистационарных пульсаров. Орбитальный период составляет $P_{orb} \sim 8.96$ сут (Fortin, 2023). Компаньоном нейтронной звезды является звезда-сверхгигант HD 77581, расположенной на расстоянии $d_0 = 1.9 \pm 0.2$ кпк, принадлежащая спектральному классу B0.5 Ia, с оценкой массы $M_* \sim 26\, M_\odot$ (Fortin, 2023). На основании спектральных исследований в видимом и ультрафиолетовом диапазонах, приведенных в работах приведены оценки терминальной скорости ветра в интервале $\upsilon_\infty = 600-1700$ км/с и темпа потери массы $\dot{M} \sim 4 \times 10^{-6}\ M_\odot$/год (Sander, 2018).

4U1538-52

CC BY NC

4U 1538—52 был открыт в 1976 году с помощью космической обсерватории OSO-8 как затменный рентгеновский источник в двойной системе. Дальнейшие исследования в рамках космической миссии Ariel-5 позволили обнаружить пульсации в рентгеновском потоке с периодом ~528.93 с, связанных с осевым вращением нейтронной звезды. На текущую эпоху осевой период 4U 1538—52 составляет $P_s \simeq 526.23$ с, орбитальный период $P_{orb} \simeq 3.728$ сут (Fortin, 2023). Спектральные наблюдения в оптическом диапазоне на 3.9-м телескопе в обсерватории Сайдинг-Спринг (Австралия) позволили отождествить нормального компаньона системы (QV Nor), как звезду-сверхгигант раннего спектрального класса B0.2 Ia с темпом потери массы $\sim 10^{-6}$ $M_\odot$/год (Parkes, 1978). Расстояние до источника оценивается в d≃5±0.5 кпк.

GX301-2

GX 301—2 уникальный объект среди популяции квазистационарных рентгеновских пульсаров в массивных системах, обладающий орбитой со значительной величиной эксцентриситета e≃0.46, что более характерно для транзиентных рентгеновских пульсаров, так как в подавляющем большинстве случаев для квазистационарных пульсаров эта величина не превосходит 0.2. Оценка расстояния до источника составляет 3.5±0.5 кпк. Нормальным компонентом системы является звезда-сверхгигант BP Cru (Wray 977) раннего спектрального класса B1.5 Ia с массой $M_* \sim 48$ $M_\odot$ (Fortin, 2023), наибольшей по величине среди всей галактической популяции рентгеновских пульсаров в МРДС. Спектральные исследования оптического компонента на 3.6-м телескопе ESO (Чили) выявили наличие P Cyg профиля, позволившего провести оценки темпа истечения вещества $\dot{M} \sim 5 \times 10^{-6} - 10^{-5}$ $M_\odot$/год с терминальной скоростью ветра $\upsilon_\infty \sim 400$ км/с.

XPer

Источник X Per был изначально известен как пекулярная звезда BS 1209 (HD 24534) раннего спектрального класса, которая затем была отождествлена, как массивный компаньон рентгеновского источника 2ASE 0352+30, открытого космической обсерваторией Uhuru. Дальнейшие наблюдения X Per с помощью рентгеновских телескопов Коперник и Ариэль-5 в период 1972—1975 гг. выявили наличие модуляций в потоке его рентгеновского излучения с периодом ~13.93 мин. Значение периода осевого вращения пульсара в настоящую эпоху составляет $P_s \sim 835.29$ с. X Per является рентгеновским источником низкой светимости, в период 2002-2016 гг. его значение плавно варьировалось в интервале $L_x \sim 1.2 - 6.3 \times 10^{34}\,(d/d_0)^2$ эрг/с в диапазоне измерений 18—50 кэВ (Sidoli, 2018). Массивный компаньон HD 24534 представлен звездой спектрального класса B0 Ve, масса которого оценивается порядка ~15.5 $M_\odot$ (Fortin, 2023). Относительная близость системы $d_0 \sim 0.8$ кпк позволила провести детальные исследования оптического компонента, в частности анализ спектральных резонансных линий CIV и SiIV в ультрафиолетовой области оценить терминальную скорость ветра $\upsilon_\infty \sim 650$ км/с, что подразумевает темп потери

массы порядка $\dot{M}_{out} \sim 5 \times 10^{-9}\, M_{\odot}/год$. Орбита компактного источника X Per имеет незначительную величину эксцентриситета e~0.1, характерную для квазистационарных пульсаров. Однако существенным является орбитальный период $P_{orb} \sim 250.3$ сут, что говорит о достаточно широкой орбите, по сравнению с другими квазистационарными пульсарами. Пекулярной особенностью данной системы является большое удаление относительно плоскости Галактики |b|~17.1 град, для остальных объектов из галактической популяции HMXB пульсаров эта величина не превосходит 4.1 градуса.

RXJ0146.9+6121

RX J0146.9+6121 открыт в 1991 году с помощью космической рентгеновской обсерватории ROSAT и в последствие отождествлен как долгопериодический рентгеновский пульсар в массивной двойной системе. На текущую эпоху его период осевого вращения составляет $P_s \sim 1396.14$ с. Параметры орбиты и точная величина орбитального периода остаются открытым вопросом, на текущую эпоху известна лишь косвенная оценка $P_{orb} \sim 330$ сут орбитального периода, полученная на предположении о периодическом изменении рентгеновского потока, связанного при движении компактного источника от апоастра к периастру. Нормальным компаньоном компактного источника является звезда главной последовательности V831 Cas спектрального класса B1 Ve, масса которой составляет $M_* \sim 11\, M_{\odot}$ (Fortin, 2023), располагающаяся на расстоянии 2.3±0.5 кпк. Светимость рентгеновского источника в диапазоне 18—50 кэВ не претерпевала существенных изменений, варьируясь в интервале $L_x \sim 1 - 1.1 \times 10^{37}\, (d/d_0)^2$ эрг/с на промежутке времени наблюдений 2002—2016 гг. (Sidoli, 2018).

2S0114+650

2S 0114+650 был открыт в 1977 году при обзоре неба с помощью космической рентгеновской обсерватории SAS-3. Спустя несколько месяцев после идентификации было обнаружено, что этот компактный источник входит в двойную систему и его компаньоном является массивная звезда LSI +65 010 (V662 Cas). По своим характеристикам 2S 0114+650 является квазистационарным пульсаром, период осевого вращения которого составляет $P_s \sim 9475$ s. По величине осевого периода 2S 0114+650 является вторым среди галактической популяции HMXB пульсаров. С момента открытия 2S 0114+650 демонстрирует глобальный тренд раскрутки с темпом ~10^{-6} с/с. Причина его сверхдолгого периода осевого вращения до сих пор неизвестна. Орбитальный период на текущую эпоху составляет $P_{orb} \simeq 11.591$ сут. Массивным компаньоном нейтронной звезды является сверхгигант V662 Cas, принадлежащий спектральному классу B1 Ia (Fortin, 2023). Детальные исследования V662 Cas в оптическом диапазоне, выполненные на 2.5-м телескопе Исаак Ньютон обсерватории Ла-Пальма, позволили провести оценку терминальной скорости ветра $\upsilon_{\infty} \simeq 1200 \pm 300$ км/с и темпа истечения вещества $\dot{M} \sim 3 \times 10^{-6}\, M_{\odot}/год$ (Reig, 1996).

CC BY NC

Результаты. Оценка скорости звёздного ветра из условия равновесия моментов сил. В условии баланса моментов сил, приложенных к НЗ, ее осевой период соответствует равновесному значению $P_s = P_{eq}$. В свою очередь, это условие позволяет оценить скорость звездного ветра на радиусе орбиты нейтронной звезды. В этом случае относительная скорость НЗ υ_{rel} определяется вкладом звёздного ветра массивного компаньона и орбитального движения самой НЗ как векторная сумма: $\upsilon_{rel}^2 = \upsilon_w^2 + \upsilon_{orb}^2$ (см. Рис. 1).

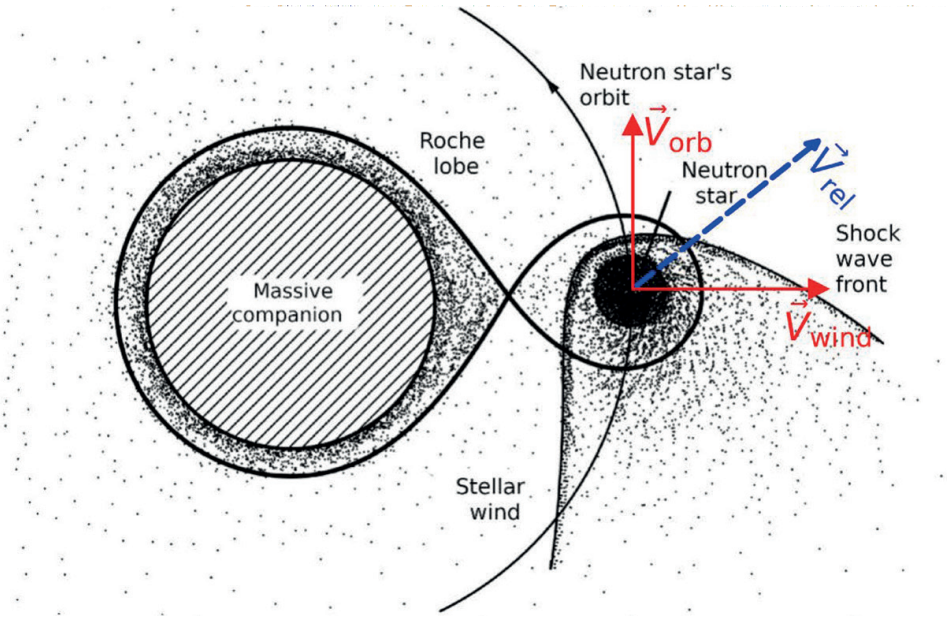


Рисунок 1. — Схема взаимодействия звездного ветра массивного компаньона и нейтронной звезды в HMXB системе.

Таким образом получаем выражение для оценки скорости звездного ветра на радиусе орбиты НЗ:

$$\upsilon_w^{qsp} = \sqrt{\frac{(P_s\,\xi)^{1/2}\,(\dot{M})^{2/7}\,(2GM_{ns})^{8/7}}{(k_t\,P_{orb})^{1/2}\,\mu_{ns}^{4/7}} - \upsilon_{orb}^2}$$

Вышеописанные расчёты равновесного периода и скорости ветра были проведены для ряда конкретных рентгеновских пульсаров, описанных в разделе Рассматриваемые источники. В таблицах 1 и 2 приведены наблюдаемые параметры систем и рассчитанные на их основе характеристики звездного ветра.

CC BY NC

Таблица 1. Астрофизические параметры звёзд-компаньонов в HMXB. Параметры рентгеновских пульсаров в HMXB-системах.

Название	$P_s(c)$	P_{orb}(сут)	$M_{opt}\ (M_\odot)$	Опт.комп.	$a\ (a.e.)$	$\dot{M}$ $(M_\odot$/год)	v_∞ (км/сек)
Cen X−3	4.80	2.09	20.5	O6II(f)	0.062	1×10^{-6}	2000
OAO 1657—415	37.02	10.45	14	Ofpe/WN9	1.96	3×10^{-6}	неизвестно
Vela X-1	283.43	8.96	26	B0.5 Ia	0.33	4×10^{-6}	600
4U 1538—52	526.4	3.73	19	B0I	0.04	3×10^{-7}	600
GX 301—2	672.5	41.5	43	B1Ia +	1.51	1×10^{-6}	400
X Per	835.3	250.3	15	O9.5IIIe	5.5	5×10^{-8}	650
2S 0114+650	9475	11.6	17	B1Ia	2.19	5×10^{-7}	1200

Таблица 2. Астрофизические параметры некоторых высокомассивных рентгеновских пульсаров (HMXB) и расчётные равновесные периоды для режима квазисферической аккреции.

Название	L_x (эрг/с)	$B_{ns}\ (10^{12}$Гс)	$\dot{M}$ (г/с)	$\mu_{ns}\ (10^{30}$Гс см^3)	v_{rel} (км/с)
Cen X−3	4.0×10^{36}	3.0	2.15×10^{16}	1.50	379
OAO 1657—415	5.8×10^{36}	3.3	3.12×10^{16}	1.65	431
Vela X-1	1.3×10^{36}	2.6	7.0×10^{15}	1.30	644
4U 1538—52	9.2×10^{35}	2.3	4.95×10^{15}	1.15	790
GX 301—2	2.8×10^{36}	4.2	1.51×10^{16}	2.10	530
X Per	2.5×10^{34}	5.6	1.35×10^{14}	2.80	200
2S 0114+650	2.1×10^{36}	2.5	1.13×10^{16}	1.25	1572

Таблица 3. Оценочные скорости звёздного ветра массивных компонентов для выбранных HMXB-пульсаров.

Название	$P_s^{(obs)}\ c$	v_{orb} (км/с)	$v_w^{(qsp)}$ (км/с)
Cen X−3	4.80	482	500
OAO 1657—415	37.02	240	360
Vela X-1	283.4	315	560
4U 1538—52	526.4	380	700
GX 301—2	672.5	217	480
X Per	835.3	87	180
2S 0114+650	9475	244.1	1550

Обсуждение. В данной работе приведена новая методика определения скорости ветра массивных компаньонов рентгеновских пульсаров в HMXB системах по наблюдаемым характеристикам нейтронной звезды в режиме квазисферической аккреции. Практическое применение данного подхода продемонстрировано в виде численных оценок на примере нескольких известных квазистационарных

CC BY NC

рентгеновских пульсаров. Показано, что модель квазисферической аккреции и учет равновесных периодов позволяет объяснить наличие медленно вращающихся пульсаров в HMXB системах, тогда как модель дисковой аккреции предсказывает значительно более быстрые осевые вращения НЗ.

Рассмотренная методика может быть полезна для косвенного определения эффективных скоростей звёздного ветра в HMXB системах, где традиционные методы, основанные на спектральном анализе, не способны провести оценки. В перспективе сочетание наблюдений ротационной эволюции пульсаров с подобным теоретическим моделированием может дать ограничения на параметры звёздного ветра (плотность, скорость, неоднородности) и эффективность обмена угловым моментом в аккреционных потоках. Кроме того, развитая модель равновесного состояния важна для прогнозирования поведения пульсаров при изменениях аккреционного режима: например, при переходе транзиентных систем из режима пропеллера в режим аккреции и наоборот. Дальнейшее развитие модели может включать более точный учёт неоднородностей звёздного ветра (Oskinova, 2012) и сопоставление с результатами МГД-моделирования аккреции (Manousakis, 2015).

Выводы. Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие заключения. Полученные оценки скорости ветра массивных компаньонов на радиусе орбиты НЗ хорошо согласуется с теоретическими моделями, показанными в работе (Kudritzki, 2000). Величины $v_w^{(qsp)}$ могут быть значительно меньше терминальных скоростей ветра ($\upsilon_w/\upsilon_\infty \ll 1$). Это связано с тем, что нейтронные звезды с массивными компаньонами образуют тесные пары с малыми значениями больших полуосей орбит. Соответственно на радиусе орбиты НЗ ветер еще не успевает достичь максимальной величины — терминальной скорости. Для случая Cen X-3 и 4U 1538—52 в рамках нашего подхода величина $v_w^{(qsp)}$ соответствует 500 и 700 км/с. Такая оценка на радиусе орбит НЗ (a=0.06 а.е. и a=0.04 а.е.) является достаточно большой, таким образом, подтверждая гипотезу, что данные источники не являются ветровыми аккреторами. В случае Cen X-3 и 4U 1538—52 массивные компаньоны заполняют свою полость Роша и теряют вещество через внутреннюю точку Лагранжа с последующим втеканием в полость Роша нейтронной звезды.

Литература

Ash T.D.C., Reynolds A.P., Roche P., Norton A.J., Still M.D., and Morales-Rueda L. (1999) The mass of the neutron star in Centaurus X-3. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — Vol. 307. — P.357-364. DOI: https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1999.02605.x

Davidson K. and Ostriker J.P. (1973) Neutron-Star Accretion in a Stellar Wind: Model for a Pulsed X-Ray Source. The Astrophysical Journal. — Vol. 179. — P.585-598, DOI: https://doi.org/10.1086/151897

Ikhsanov N.R. and Mereghetti S. (2015) On the magnetic fields of Be/X-ray pulsars in the Small Magellanic Cloud. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — Vol. 454. — P.3760-3765. DOI: https://doi.org/10.1093/mnras/stv2108

Ikhsanov N.R., Likh Y.S., and Beskrovnaya N.G. (2014) Spin evolution of long-period X-ray pulsars. Astronomy Reports, Vol. 58. — P.376-385. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063772914050035

Fortin F., García F., Simaz Bunzel A., and Chaty S. (2023) A catalogue of high-mass X-ray binaries in the Galaxy: from the INTEGRAL to the Gaia era. Astronomy and Astrophysics. — Vol. 671. — P.A149. DOI: https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245236

Giacconi R., Gursky H., Kellogg E., Schreier E., and Tananbaum H. (1971) Discovery of Periodic X-Ray Pulsations in Centaurus X-3 from UHURU. The Astrophysical Journal, Vol. 167. — P.L67. DOI: https://doi.org/10.1086/180762

Kim V., Izmailova I., and Aimuratov Y. (2023) Catalog of the Galactic Population of X-Ray Pulsars in High-mass X-Ray Binary Systems. The Astrophysical Journal Supplement Series, Vol. 268. — P.21. DOI: https://doi.org/10.3847/1538-4365/ace68f

Kudritzki R.-P. and Puls J. (2000) Winds from Hot Stars. Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — Vol. 38. — P.613-666, DOI: https://doi.org/10.1146/annurev.astro.38.1.613

Lipunov V.M. (1992) Astrophysics of Neutron Stars. Springer publisher, ISBN 978-3-642-76352-6

Manousakis A. and Walter R. (2015) The stellar wind velocity field of HD 77581. Astronomy and Astrophysics. — Vol. 584. — P.A25. DOI: https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526893

Oskinova L.M., Feldmeier A., and Kretschmar P. (2012) Clumped stellar winds in supergiant high-mass X-ray binaries: X-ray variability and photoionization. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — Vol. 421. — P.2820-2831. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20507.x

Parkes G.E., Murdin P.G., and Mason K.O. (1978) The optical counterpart of the binary X-ray pulsar 4U 1538-52. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — Vol. 184. — P.73P-77. DOI: https://doi.org/10.1093/mnras/184.1.73P

Potekhin A. (2010) The physics of neutron stars. Physics Uspekhi, — Vol. 53. — P.1235-1256. DOI: https://doi.org/10.3367/UFNe.0180.201012c.1279

Reig P., Chakrabarty D., Coe M.J., Fabregat J., Negueruela I., Prince T.A., Roche P., and Steele I.A. (1996) Astrophysical parameters of the massive X-ray binary 2S 0114+650. Astronomy and Astrophysics. — Vol. 311. — P.879-888. DOI: no doi

Sander A.C., Fürst F., Kretschmar P., Oskinova L.M., Todt H., Hainich R., Shenar T., and Hamann W.-R. (2018) Coupling hydrodynamics with comoving frame radiative transfer. II. Stellar wind stratification in the high-mass X-ray binary Vela X-1. Astronomy and Astrophysics. —Vol. 610. — P.A60. DOI: https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731575

Sidoli L. and Paizis A. (2018) An INTEGRAL overview of High-Mass X-ray Binaries: classes or transitions?. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — Vol. 481. — P.2779-2803. DOI: https://doi.org/10.1093/mnras/sty2428

Shakura N.I., Postnov K.A., Kochetkova A.Y., and Hjalmarsdotter L. (2013) Quasispherical subsonic accretion in X-ray pulsars. Physics Uspekhi. — Vol. 56. — P.321-346. DOI: https://doi.org/10.3367/UFNe.0183.201304a.0337

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 127–139

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.389

ҒТМР 30.17.35
ӘОЖ 533.15:536.25

©V. Mukamedenkyzy*, A. Izbasar, A. Aqikat, 2025.
Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.
Mukamedenkyzy.venera@gmail.com

INVESTIGATION OF STRUCTURED FLOWS INDUCED BY CONCENTRATION-DRIVEN CONVECTION IN TERNARY GASES SYSTEMS

Mukamedenkyzy Venera — Cand. Phys.-Math. Sci., Associate Professor of the Faculty of Physics and Technology, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: Mukamedenkyzy.venera@gmail.com, http://orcid.org/0000-0003-3921-2812;
Izbasar Aysara — Master's student in Technical Physics, Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: aisara.izbasar@mail.ru, http://orcid.org/0009-0009-4373-944X;
Aqyqat Ayagoz — Master's student in Technical Physics, Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: Ayakozakikat123@gmail.com, http://orcid.org/0009-0006-1835-014X.

Abstract. Diffusion in multicomponent gases is characterized by a number of specific phenomena that are not observed in binary diffusion. An analysis of previous studies shows that in certain systems with significantly different diffusion coefficients, convective instability may arise under specific geometric and thermophysical conditions. Stability analysis makes it possible to identify parameter regions in which a transition from the diffusion regime to the convective regime can occur; however, this approach does not fully describe the mechanisms responsible for the formation of convective structures and their temporal evolution. In this regard, the present work employs numerical modeling methods to investigate the conditions for the onset of concentration-driven gravitational convection in ternary gas systems, the formation of convective flows and their evolution over time, as well as the influence of the initial mixture composition on the instability characteristics of the system. A mathematical model based on a classification scheme of physical parameters is proposed, allowing the processes occurring in the transition region between the "diffusion—concentration convection" regimes to be described. As a result of numerical calculations, concentration fields of the gas component with the highest molecular mass were obtained at various time instants. The analysis shows that the isoconcentration lines undergo significant deformation over time and acquire a

nonlinear character. This phenomenon is closely associated with the loss of mechanical equilibrium stability of the system and with differences in the mutual diffusion coefficients of the components. It is also established that the degree of distortion of the isoconcentration lines depends on the initial concentrations of the mixture components. The results demonstrate that, for certain mixture compositions, large-scale structured convective flows are formed, whereas in other cases a purely diffusive regime is preserved. The obtained data are in good agreement with experimental observations and contribute to a deeper understanding of the physical mechanisms of mass transfer in multicomponent gas mixtures.

Keywords: concentration, diffusion, density, mixtures, quasi-stationary mixing, numerical calculation

©В. Мукамеденкызы*, А. Ізбасар, А. Ақиқат, 2025.
Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан.
Mukamedenkyzy.venera@gmail.com

ҮШКОМПОНЕНТТІ ГАЗ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕГІ КОНЦЕНТРАЦИЯЛЫҚ КОНВЕКЦИЯНЫҢ ӘСЕРІНЕН ҚҰРЫЛЫМДЫҚ АҒЫНДАРДЫҢ ПАЙДА БОЛУЫН ЗЕРТТЕУ

Мукамеденқызы Венера — ф.-м.ғ.к., әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің физика-техникалық факультетінің доценті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: Mukamedenkyzy.venera@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-3921-2812;
Ізбасар Айсара — «Техникалық физика» мамандығы бойынша магистрант, Қазақ Ұлттық университеті, физика-тезникалық факультет, Алматы, Қазақстан,
E-mail: aisara.izbasar@mail.ru; ORCID ID: http://orcid.org/0009-0009-4373-944X;
Ақиқат Аягөз — «Техникалық физика» мамандығы бойынша магистрант, Қазақ Ұлттық университеті, физика-тезникалық факультет, Алматы, Қазақстан,

E-mail: Ayakozakikat123@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0009-0006-1835-014X.

Аннотация. Көпкомпонентті газдардағы диффузия бинарлы диффузия кезінде байқалмайтынбірқатаререкшеқұбылыстарменсипатталады.Зерттеулергежасалған талдау көрсеткендей, диффузия коэффициенттері айтарлықтай айырмашылығы бар кейбір жүйелерде белгілі бір геометриялық және жылуфизикалық параметрлер кезінде конвективтік орнықсыздық пайда болуы мүмкін. Орнықтылыққа жасалған талдау диффузиялық күйден конвективтік күйге өтуі мүмкін параметрлер аймақтарын анықтауға мүмкіндік береді, алайда бұл тәсіл конвективтік түзілімдердің пайда болу механизмі мен олардың уақыт бойынша дамуын толық сипаттай алмайды. Осыған байланысты жұмыс барысында үшкомпонентті газ жүйелеріндегі концентрациялық гравитациялық конвекцияның пайда болу шарттары, конвективтік ағындардың қалыптасуы мен олардың эволюциясы, сондай-ақ бастапқы қоспа құрамының жүйенің орнықсыздық сипаттарына әсері сандық модельдеу әдістері арқылы зерттеледі. Физикалық параметрлер бойынша жіктеу сызбасына негізделген математикалық модель ұсынылып, ол

CC BY NC

«диффузия — концентрациялық конвекция» режимдерінің ауысу аймағында жүретін үрдістерді сипаттауға мүмкіндік береді. Сандық есептеулер нәтижесінде әртүрлі уақыт мезеттерінде молекулалық массасы ең үлкен газ компонентінің концентрация өрістері алынған. Алынған деректер изоконцентрациялық сызықтардың уақыт бойынша айтарлықтай деформацияланатынын және олардың бейсызық сипатқа ие болатынын көрсетеді. Бұл құбылыс жүйедегі механикалық тепе-теңдіктің орнықсыздығымен және компоненттердің өзара диффузия коэффициенттерінің айырмашылығымен тығыз байланысты. Сонымен қатар, изоконцентрациялық сызықтардың қисаю дәрежесінің қоспа компоненттерінің бастапқы концентрацияларына тәуелді екендігі анықталды. Жүргізілген зерттеу нәтижелері белгілі бір құрамдық қатынастарда ірі масштабты құрылымданған конвективтік ағындардың қалыптасатынын, ал кейбір жағдайларда жүйеде таза диффузиялық режимнің сақталатынын көрсетті. Алынған нәтижелер тәжірибелік бақылаулармен жақсы үйлесіп, көпкомпонентті газ қоспаларындағы массаалмасу үрдістерінің физикалық механизмдерін тереңірек түсінуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: концентрация, диффузия, тығыздық, қоспа, квазистационарлық араластыру, сандық есептеу

©В. Мукамеденкызы*, А. Избасар, А. Акикат, 2025.
Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан.
Mukamedenkyzy.venera@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ТЕЧЕНИЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИЕЙ В ТРЁХКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ СИСТЕМАХ

Мукамеденкызы Венера — к.ф-м.н., доцент, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Физико-технический факультет, Алматы, Қазахстан,
E-mail: Mukamedenkyzy.venera@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-3921-2812;
Избасар Айсара — магистрант по специальности «Техническая физика», Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, Физико-технический факультет, Алматы, Қазахстан,
E-mail: aisara.izbasar@mail.ru; ORCID ID: http://orcid.org/0009-0009-4373-944X;
Акикат Аягөз — магистрант по специальности «Техническая физика», Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, Физико-технический факультет, Алматы, Қазахстан,
E-mail: Ayakozakikat123@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0009-0006-1835-014X.

Аннотация. Диффузия в многокомпонентных газовых системах характеризуется рядом специфических явлений, отсутствующих при бинарной диффузии. Анализ исследований показывает, что в некоторых системах с существенно различающимися коэффициентами диффузии при определённых геометрических и теплофизических параметрах может возникать конвективная неустойчивость. Методы линейного анализа устойчивости позволяют определить области параметров, при которых возможен переход от диффузионного режима к конвективному, однако такой подход не даёт полного представления о механизме формирования конвективных структур и их временной эволюции. В связи

с этим в работе с использованием численного моделирования исследуются условия возникновения концентрационной гравитационной конвекции в трёхкомпонентных газовых системах, процесс формирования конвективных течений и их динамика во времени, а также влияние начального состава смеси на характеристики неустойчивости. Предложена математическая модель, основанная на классификационной схеме по физическим параметрам, позволяющая описывать процессы в области перехода между режимами «диффузия — концентрационная конвекция». В результате численных расчётов получены поля концентрации газового компонента с наибольшей молекулярной массой в различные моменты времени. Анализ показал, что изоконцентрационные линии со временем значительно деформируются и приобретают нелинейный характер. Это связано с потерей устойчивости механического равновесия системы и различиями коэффициентов взаимной диффузии компонентов. Установлено, что степень искривления изоконцентрационных линий зависит от начальных концентраций смеси. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при определённых соотношениях компонент формируются крупномасштабные структурированные конвективные течения, тогда как в других случаях система остаётся в чисто диффузионном режиме. Представленные данные хорошо согласуются с экспериментальными наблюдениями и расширяют понимание механизмов массопереноса в многокомпонентных газовых смесях.

Ключевые слова: концентрация, диффузия, плотность, смеси, квазистационарное смешение, численный расчет

Кіріспе. Біртекті емес температуралық өрістегі гравитациялық конвекцияның пайда болуын зерттеу нәтижелері зерттелетін заттың қасиеттерімен байланысты жылу және массатасымалы үрдістерінің негізгі параметрлерін анықтау бойынша ұсынымдар әзірлеуге мүмкіндік берді. Бұл ұсынымдар нақты жағдайларда араласу режимдерін болжауға жол ашады.

Сонымен қатар, механикалық тепе-теңдіктің орнықсыздығының пайда болуы және одан әрі конвективтік түзілімдердің дамуы тығыздық градиенттері мен ауырлық күшінің бағытына тәуелді (Kossov, 2025; Nield, 2006; Bejan, 2004). Тиісті градиенттердің бағыттары сәйкес келмеген жағдайда конвективтік ауытқулардың пайда болуы мен олардың әрі қарай дамуы байқалады. Ал керісінше жағдайда ортада тұрақты стратификация орнайды және конвективтік қозғалыс орын алмайды.

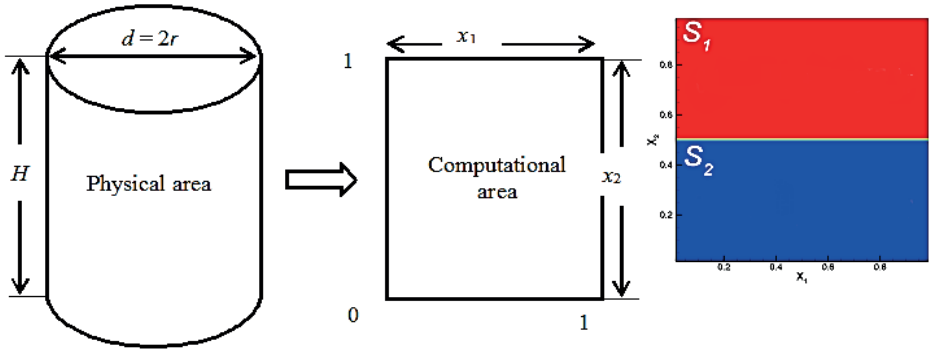
Конвективтік орнықсыздықтың пайда болуы мен гидродинамикалық ауытқулардың одан әрі дамуының физикалық интерпретациясы (Nield, 2006; Bejan, 2004) еңбектерінде сипатталған. Алайда, бастапқыда тұрақты стратификация жағдайында жүретін изотермдік көпкомпонентті араласуды сипаттау үшін Рэлейдің жылулық есебінің формализмін қолдану (Kossov, 2014; Косов, 2004) жұмыстарында көрсетілгендей, бірнеше парциалдық концентрация градиенттерінің әсерін ескеруді талап етеді. Мұндай түзетудің маңыздылығы (Kossov, 2017; Bird, 2002) еңбектерінде дәлелденген, онда әртүрлі молекулалық

CC BY NC

массалар мен диффузия коэффициенттері бар үшкомпонентті жүйелерде конвективтік ұйытқулардың бәсеңдейтін және күшейетін аймақтарының бар екендігі анықталған. Бұл көпкомпонентті диффузия кезінде құрылымдық ағындардың пайда болуына себеп болуы мүмкін. (Косов, 2004; Kossov, 2017) еңбектерінде дамытылған тәсіл тек берілген жылуфизикалық және геометриялық параметрлер аймағында «диффузия — конвекция» режимдерінің ауысу шекарасын ғана анықтайды. Құрылымды конвективтік ағындардың пайда болу процесі мен олардың әрі қарайғы эволюциясы қарастырылмаған. Сондай-ақ, көпкомпонентті газ жүйелеріндегі диффузия және орнықсыздық процестері бірқатар жұмыстарда (Ruev, 2009; Levintal, 2019; Shen, 2011; Arekhov, 2023; Bogatyrev, 2013; Bogatyrev, 2014) кеңінен зерттелген.

Осыған байланысты изотермиялық көпкомпонентті араласу жағдайында «диффузия — конвекция» режимдерінің ауысу шекарасында құрылымдық түзілімдердің пайда болу динамикасын зерттеу өзекті мәселе болып табылады. Жұмыста бастапқы құрамдарға ие үшкомпонентті газ қоспаларының диффузиялық арналары арқылы араласуын зерттеуге арналған сандық зерттеу нәтижелері ұсынылған.

Материалдар мен әдістері. Жұмыста цилиндрлік арнада үшкомпонентті газ қоспасының диффузиялық тасымалы зерттеледі. Есептің қойылуы 1-суретте көрсетілген.



a) b)

Сурет 1 - Көпкомпонентті массаалмасу моделі: а) Араласу аймағы; б) Көпкомпонентті қоспалардың диффузиялық ұяшықтарда орналасуы

Каналдың жоғарғы бөлігі S_1 молекулалық массалары M_1 және M_3 болатын газ қоспасынан тұрады, бұл қоспа арнаның төменгі бөлігінде орналасқан S_2. молекулалық массасы M_2 болатын газға диффундирленеді. Осы кезде келесі болжамдар қабылданады:

1. Компоненттердің молекулалық массалары үшін M_i мына шарт орындалады:

$$M_3 > M_2 > M_1.$$

2. Тәуелсіз диффузия шарты мына түрде қарастырылады:

$$\sum_{i=1}^{3} j_i = 0 \text{ және } \sum_{i=1}^{3} c_i = 1$$

«Диффузия — конвекция» режимдерінің ауысу шекарасына жақын аймақта үшкомпонентті газ қоспасының көпкомпонентті араласу процесін сипаттау үшін Буссинеск жуықтауы (Kossov, 2019) негізінде жазылған шамаларға арналған гидродинамикалық теңдеулер жүйесі қолданылады:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u}\nabla)\mathbf{u} = -\frac{1}{\rho_0}\nabla p + \nu\nabla^2\mathbf{u} + g(\beta_1 c_1 + \beta_2 c_2)\boldsymbol{\gamma},$$

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} + \mathbf{v}\nabla\langle c_1\rangle = D_{11}^*\nabla^2 c_1 + D_{12}^*\nabla^2 c_2, \tag{1}$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial t} + \mathbf{v}\nabla\langle c_2\rangle = D_{21}^*\nabla^2 c_1 + D_{22}^*\nabla^2 c_2,$$

$$div\,\mathbf{v} = 0,$$

мұндағы $\langle c_i \rangle$ — санаудың бастауы ретінде алынған концентрацияның тұрақты орташа мәні, γ' — бірлік вектор, ν — кинематикалық тұтқырлық коэффициенті, ρ_0 — қоспаның тығыздығының орташа мәні.

Қоспаның концентрацияға тығыздығы мына қатынаспен анықталады:

$$\beta_i = \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial \rho}{\partial c_i}\right)_{p,T,c_j},$$

$$\rho = \rho_0(1 - \beta_1 c_1^{/} - \beta_2 c_2^{/}),$$

Орташа массалық және орташа сандық жылдамдықтардың ауытқулары бірдей ретте болғандықтан, келесі қатынастардағы шамаларды v орнына u қолдануға болады (Косов, 2004). Өлшеудің сипаттамалық масштабтарын былай таңдаймыз: H — каналдың сызықтық өлшемі, H^2/ν – уақыт, D_{22}^*/H – жылдамдық,

CC BY NC

$A_i H$ – концентрация, $\rho_0 \nu D_{22}^* / H^2$ – қысым.

(1) теңдеулер жүйесі өлшемсіз шамалар арқылы келесі түрге түрлендіріледі:

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} + \frac{1}{\mathrm{Pr}_{22}} \mathbf{u} \nabla c_1 = \frac{1}{\mathrm{Pr}_{11}} \Delta c_1 + \frac{1}{\mathrm{Pr}_{22}} \tau_{12} \Delta c_2,$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial t} + \frac{1}{\mathrm{Pr}_{22}} \mathbf{v} \nabla c_2 = \frac{A_1}{A_2} \frac{1}{\mathrm{Pr}_{22}} \tau_{21} \Delta c_1 + \frac{1}{\mathrm{Pr}_{22}} \Delta c_2, \qquad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{1}{\mathrm{Pr}_{22}} \nabla \left(\tilde{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \Delta \mathbf{u} + \left(\mathrm{Ra}_1 \tau_{11} c_1 + \mathrm{Ra}_2 c_2 \right) \ ,$$

$$\mathrm{div}\, \mathbf{u} = 0,$$

мұндағы $\mathrm{Pr}_{ii} = \nu / D_{ii}^*$ —Прандтльдің диффузиялық саны, $\mathrm{Ra}_i = g \beta_i A_i H^4 / D_{22}^* \nu$ — Рэлейдің диффузиялық саны, мұндағы A_i — берілген өлшемсіз градиент.

Әрі қарай (Kossov, 2019) еңбекте ұсынылған алгоритмді қолданамыз. (2) теңдеулер жүйесін физикалық параметрлер бойынша жіктеу схемасы арқылы сандық жолмен шешеміз (Navon, 1987).

Цилиндрлік аймақтың қимасы декарттық координаттар жүйесінде екіөлшемді $H \times d$ облыс ретінде қарастырылады (1а-сурет). Есептеулер өлшемсіз торда, 128×128 өлшемдерінде жүргізілді.

Есептеудің бірінші кезеңінде қозғалыс мөлшерінің тасымалы тек конвекция мен диффузия есебінен жүзеге асады. Аралық жылдамдық өрісі Адамс—Бэшфорт және Кранк—Николсон схемалары бойынша анықталады (Kossov, 2019):

$$\frac{\hat{\mathbf{u}}^n - \mathbf{u}^n}{\Delta t} = -\frac{1}{2}\left(3H^n - H^{n-1}\right) + \frac{1}{2}\Delta\left(\hat{\mathbf{u}}^n + \mathbf{u}^n\right) + \left(\mathrm{Ra}_1 \tau_{11} c_1 + \mathrm{Ra}_2 c_2\right) \ , \qquad (3)$$

мұндағы $H^n = -\nabla\left(\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}\right)^n$ — конвективті мүшелер, $\hat{\mathbf{u}}$ — аралық жылдамдық өрісі, Δt — уақыт бойынша қадам, n — t^n мезеттегі итерация нөмері .

Есептеудің екінші кезеңі қысымның жылдамдық мәнімен байланысын анықтайды:

$$\Delta p = \frac{\nabla \cdot \hat{\mathbf{u}}^n}{\Delta t}. \qquad (4)$$

CC BY NC

Үшінші кезең жылдамдық өрісін тек қысымның төмендеуіне байланысты қайта есептеуді қамтиды:

$$\frac{\mathbf{u}^{n+1}-\hat{\mathbf{u}}^{n}}{\Delta t}=-\nabla p. \tag{5}$$

Төртінші кезеңде концентрацияның компоненттері анықталады:

$$\begin{gathered}\frac{c_1^{n+1}-c_1^{n}}{\Delta t}=\frac{1}{2}\left(F^{n+1}-F^{n}\right)+\frac{1}{\mathrm{Pr}_{11}}\Delta c_1^{n}+\frac{1}{\mathrm{Pr}_{12}}\Delta c_2^{n},\\ \frac{c_2^{n+1}-c_2^{n}}{\Delta t}=\frac{1}{2}\left(F^{n+1}-F^{n}\right)+\frac{1}{\mathrm{Pr}_{21}}\Delta c_1^{n}+\frac{1}{\mathrm{Pr}_{22}}\Delta c_2^{n},\\ c_3^{n+1}=1-c_1^{n+1}-c_2^{n+1},\end{gathered} \tag{6}$$

мұндағы $F^{n}=-\nabla\left(\mathbf{u}^{\mathbf{n+1}}\cdot\mathbf{c}^{\mathbf{n}}\right)$ - конвективті мүшелері.

Ал, шекаралық шарттар мына түрде көрсетіледі:

$$\mathbf{u}(\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{B}},\tau)=0,\ \frac{\partial c_i}{\partial \boldsymbol{n}}=0,\ \ i=1-3 \tag{7}$$

мұндағы $n=\left(n_1,n_2\right)-$ есептеу аймағының шекарасындағы сыртқы нормаль. Бастапқы шарттар осы түрде көрсетіледі:

$$\begin{gathered}\mathbf{u}(\boldsymbol{x},\tau)=0\ ,\\ c_1\left(\boldsymbol{x},\tau=0\right)\Big|_{\boldsymbol{x}\in S_1}=X_1,\ \ c_1\left(\boldsymbol{x},\tau=0\right)\Big|_{\boldsymbol{x}\in S_2}=0,\\ c_2\left(\boldsymbol{x},\tau=0\right)\Big|_{\boldsymbol{x}\in S_1}=X_2,\ \ c_2\left(\boldsymbol{x},\tau=0\right)\Big|_{\boldsymbol{x}\in S_2}=0,\\ c_3\left(\boldsymbol{x},\tau=0\right)\Big|_{\boldsymbol{x}\in S_1}=0,\ \ c_3\left(\boldsymbol{x},\tau=0\right)\Big|_{\boldsymbol{x}\in S_2}=X_3.\end{gathered} \tag{8}$$

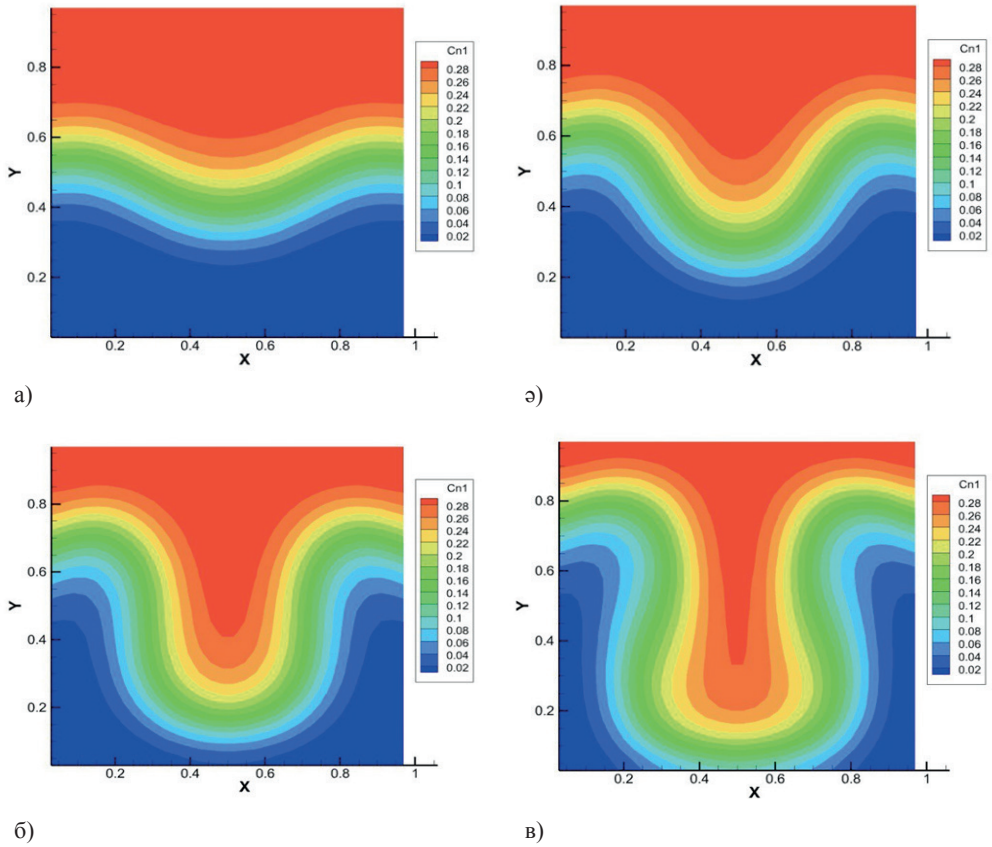
мұндағы X_i – жоғарғы компоненттердің концентрациясы S_1 және төменгі S_2 аймақтағы концентрация.

Нәтижелер мен талқылау. Зерттеу жұмысы $0{,}3CH_4+0{,}7Ar-N_2$ газ қоспасы үшін жүзеге асырылды. Есептеулер қысым *p=1атм,* ал температура *T=295,0 K* жағдайлары кезінде, ал уақыт бойынша есептік қадамы 0,005 деп алынып, уақыт бойынша өзгерісі: *а) t = 1,22 с; ә) t = 1,63 с; б) t = 1,83 с; в) t = 2,24 с*-қа тең. Каналдың ұзындығы мен радиусы $L = 165\cdot10^{-2}$, $r = 10^{-2}$ *м* мәндеріне тең болды. Берілген жүйе үшін қоспаның механикалық тепе-теңдігінің тұрақтылығын жоғалту уақыты шамамен бірнеше секундты құрайды. Осыдан кейін конвективтік ағындардың жылдам дамуы байқалады. Конвективтік ағындар ірі масштабты

CC BY NC

құрылымдар түрінде жүзеге асады. Конвекция құрылымдарының пайда болу процесі периодтық сипатқа ие болуы мүмкін, ал мұндай араласу түрінде басым тасымалдаушы ретінде молекулалық массасы ең үлкен компонент әрекет етеді.

Сандық модельдеу нәтижелерін талдау барысында изоконцентрациялық сызықтардың уақыт өте келе айтарлықтай және жылдам деформацияланып, өзгеретіндігі, соның салдарынан күрделі құрылымдық ағын аймағы қалыптасатыны анықталды. Массаалмасу үрдісіндегі көпқұрылымды динамиканың бар екендігі 2 суретте келтірілген нәтижелер арқылы да расталды.

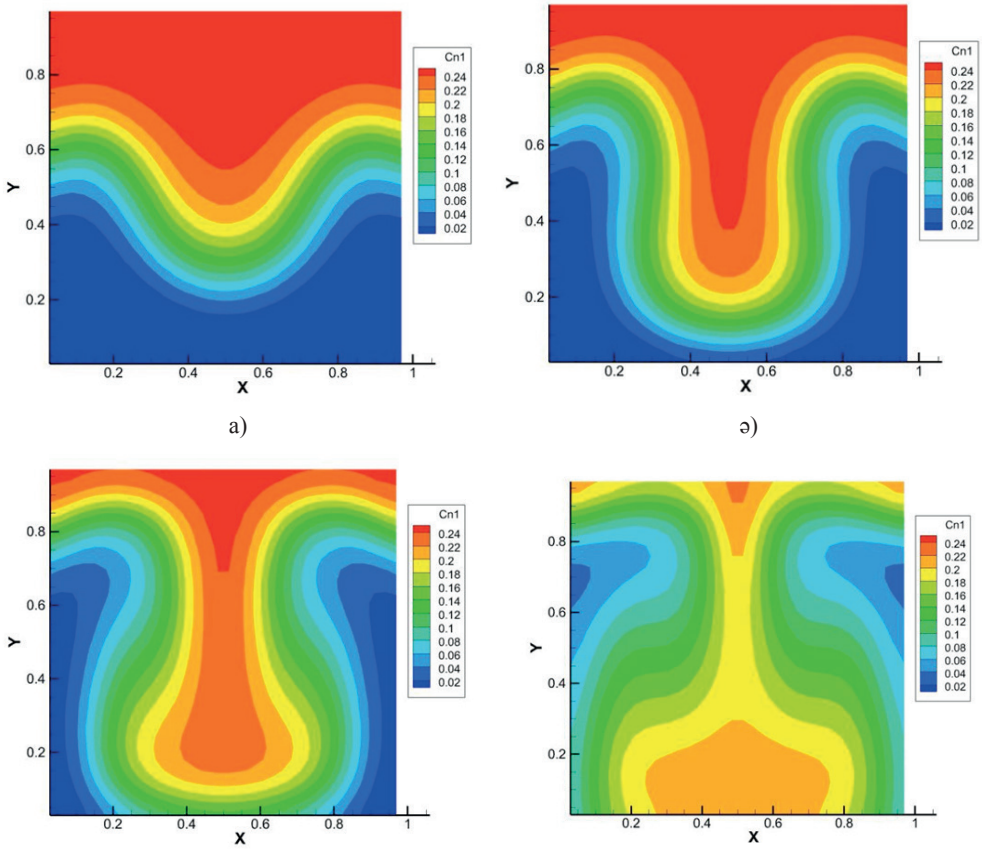


Сурет 2 - Изоконцентрациялық өрістердің уақыт бойынша өзгеруі:
а) бастапқы кезеңдегі концентрация таралуы; ә) бастапқы ұйытқулардың пайда болуы; б) концентрациялық конвекцияның айқын дамуы және құрылымданған ағыс түзілуі; в) толық қалыптасқан көпқұрылымды конвективті құрылымдар.

Келесі кезекте, дәл осы жүйе қарастырылып, бірақ концентрация мәні өзгертілді. Қысым p=1атм, температура T=295,0 K, уақыт бойынша қадамы 0,005 деп алынды. Есептеулер $0,25CH_4 + 0,75Ar - N_2$ жүйесі үшін жүргізілді.

Демек, зерттеліп отырған барлық жүйелерде диффузиялық орнықсыздықтың

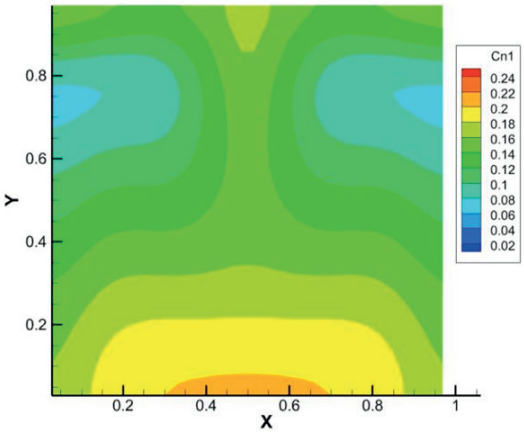
байқалатыны анықталды. Диффузиялық режимнен конвективті режимге ауысудың негізгі көрсеткіштерінің бірі өзара диффузия коэффициенттерінің едәуір айырмашылығына байланысты изоконцентрациялық сызықтардың бейсызық түрге енуі болып табылады. Сонымен қатар, қысымның жоғарылауымен изоконцентрациялық аймақта конвективті құрылымдардың түзіле бастайтыны байқалады. Берілген нәтижелер қоспаның араласу кезеңдерін сипаттап, изоконцентрациялық сызықтардың қисаюы уақыт өткен сайын айтарлықтай жылдам өсіп, нәтижесінде күрделі құрылымдармен сипатталатын ағындардың пайда болуына әкелетіні көрсетеді. Ағын түзілуі барысында оның шекарасы аумағында диффузиялық таралу айқын әрі нақты байқалады. Метан, азот және аргон компоненттерінің өзара әрекеттесуі нәтижесінде концентрацияның төмендейтіні де көрінеді.



а) ә)

б) в)

CC BY NC



г)

Сурет 3 - *p=1 атм, T=295,0 K,* $L = 165 \times 10^{-2}$ *м,* $r = 10^{-2}$ *м* мәндері үшін жүйесіндегі метан изоконцентрациялық сызығының динамикасы

Қорытынды. Ұсынылған математикалық модель үшкомпонентті газ қоспасының әртүрлі құрамдық мәндері үшін конвективтік құрылымның түзілу процесін сипаттауға мүмкіндік береді. Конвективтік орнықсыздықтың пайда болуы диффузия кезінде байқалмайтын изоконцентрациялық таралулардың айтарлықтай қисаюымен байланысты болуы мүмкін. Концентрациялық таралулардың қисаю дәрежесі жүйедегі молекулалық массасы ең үлкен компоненттің мөлшеріне тәуелді. Белгілі бір құрамдарда бұл қисаю жойылып, жүйеде таза диффузия процесі жүзеге асады.

Осылайша, сандық есептеу нәтижелері қолданылған модель мен есептеу әдісінің «диффузия — концентрациялық конвекция» режимдерінің ауысу параметрлерін анықтауға және сенімді деректер алуға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Әдебиеттер

Arekhov V., Zhainaakov T., Clemens T., Wegner J. (2023) Measurement of effective hydrogen—methane gas diffusion coefficients in reservoir rocks, SPE Reservoir Evaluation & Engineering. — Vol. 26, № 4. — P. 1242—1257.

Bejan A. (2004) Convection Heat Transfer. — New York: Wiley. — 696 p.

Bird B.R., Stewart W.E., Lightfoot E.V. (2002) Transport Phenomena. — New York: John Wiley and Sons. — 914 p.

Bogatyrev A.F., Makeenkova O.A., Nezovitina M.A. (2013) Experimental study of gas diffusion in multicomponent gaseous systems, International Journal of Thermophysics. — Vol. 36, № 4. — P. 633—647.

Bogatyrev A.F., Makeenkova O.A., Nezovitina M.A. (2014) Temperature and concentration dependences of thermal-diffusion separation in ternary gas systems, Journal of Engineering Physics and Thermophysics. — Vol. 87, № 5. — P. 1255—1265.

Kosov V.N., Fedorenko O.V., Zhavrin Y.I., Mukamedenkyzy V. (2014) Instability of mechanical equilibrium during diffusion in a three-component gas mixture in a vertical cylinder with a circular cross section, Technical Physics. — Vol. 59, № 4. — P. 482—486.

Kossov V., Krasikov S., Fedorenko O. (2017) Diffusion and convective instability in multicomponent

gas mixtures at different pressures, European Physical Journal Special Topics. — Vol. 226. — P. 1177—1187.

Kossov V.N., Fedorenko O.V., Zhakebaev D.B., Kizbaev A.P. (2019) Peculiarities of the rise of structured formations at the boundary of the change of the regimes "Diffusion — Concentration convection" at an isothermal mixing of a binary mixture equally diluted by the third component, Thermophysics and Aeromechanics. — Vol. 26, № 1. — P. 31—40.

Kossov V.N., Mukamedenkyzy V., Tolepbergen A., Altenbach H. (2025) Peculiarities of combined mixing caused by instability of mechanical equilibrium of isothermal ternary gas mixture at diffusion, International Journal of Chemical Engineering. — Vol. 2025, Issue 1. — 10 p.

Levintal E., Dragila M.I., Kamai T., Weisbrod N. (2019) Measurement of gas diffusion coefficient in highly permeable porous media, Vadose Zone Journal. — Vol. 18. — P. 180—196.

Navon M. (1987) Pent: a periodic penta-diagonal systems solver, Communications in Applied Numerical Methods. — Vol. 3, № 1. — P. 63—69.

Nield D.A., Bejan A. (2006) Convection in Porous. — New York: Springer. — 654 p.

Ruev G.A., Fedorov A.V., Fomin V.M. (2009) Description of the anomalous Rayleigh—Taylor instability on the basis of the model of dynamics of a three-velocity three-temperature mixture, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. — Vol. 50, № 1. — P. 49—57.

Shen J., Zhou J., Nelson G.C. et al. (2011) Measurement of effective gas diffusion coefficients of catalyst layers of PEM fuel cells with a Loschmidt diffusion cell, Journal of Power Sources. — Vol. 196, № 2. — P. 674—678.

Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. (1972) Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. — М.: Наука. — 392 с.

References

Arekhov V., Zhainaakov T., Clemens T., Wegner J. (2023) Measurement of effective hydrogen—methane gas diffusion coefficients in reservoir rocks, SPE Reservoir Evaluation & Engineering. — Vol. 26, № 4. — P. 1242—1257. (in English)

Bejan A. (2004) Convection Heat Transfer. — New York: Wiley. — 696 p. (in English)

Bird B.R., Stewart W.E., Lightfoot E.V. (2002) Transport Phenomena. — New York: John Wiley and Sons. — 914 p. (in English)

Bogatyrev A.F., Makeenkova O.A., Nezovitina M.A. (2013) Experimental study of gas diffusion in multicomponent gaseous systems, International Journal of Thermophysics. — Vol. 36, № 4. — P. 633—647. (in English)

Bogatyrev A.F., Makeenkova O.A., Nezovitina M.A. (2014) Temperature and concentration dependences of thermal-diffusion separation in ternary gas systems, Journal of Engineering Physics and Thermophysics. — Vol. 87, № 5. — P. 1255—1265. (in English)

Gershuni G.Z. Zhukhovitskii E.M. (1972) Konvektivnaya ustojchivost neszhimaemoj zhidkosti [Convective stability of incompressible fluid]. Moscow Nauka 392 p. (in Russian)

Kosov V.N., Fedorenko O.V., Zhavrin Y.I., Mukamedenkyzy V. (2014) Instability of mechanical equilibrium during diffusion in a three-component gas mixture in a vertical cylinder with a circular cross section, Technical Physics. — Vol. 59, № 4. — P. 482—486. (in English)

Kossov V., Krasikov S., Fedorenko O. (2017) Diffusion and convective instability in multicomponent gas mixtures at different pressures, European Physical Journal Special Topics. — Vol. 226. — P. 1177—1187. (in English)

Kossov V.N., Fedorenko O.V., Zhakebaev D.B., Kizbaev A.P. (2019) Peculiarities of the rise of structured formations at the boundary of the change of the regimes "Diffusion — Concentration convection" at an isothermal mixing of a binary mixture equally diluted by the third component, Thermophysics and Aeromechanics. — Vol. 26, № 1. — P. 31—40. (in English)

Kossov V.N., Mukamedenkyzy V., Tolepbergen A., Altenbach H. (2025) Peculiarities of combined mixing caused by instability of mechanical equilibrium of isothermal ternary gas mixture at diffusion, International Journal of Chemical Engineering. — Vol. 2025, Issue 1. — 10 p. (in English)

Levintal E., Dragila M.I., Kamai T., Weisbrod N. (2019) Measurement of gas diffusion coefficient in highly permeable porous media, Vadose Zone Journal. — Vol. 18. — P. 180—196. (in English)

Navon M. (1987) Pent: a periodic penta-diagonal systems solver, Communications in Applied Numerical Methods. — Vol. 3, № 1. — P. 63—69. (in English)

Nield D.A., Bejan A. (2006) Convection in Porous. — New York: Springer. — 654 p. (in English)

Ruev G.A., Fedorov A.V., Fomin V.M. (2009) Description of the anomalous Rayleigh—Taylor instability on the basis of the model of dynamics of a three-velocity three-temperature mixture, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. — Vol. 50, № 1. — P. 49—57. (in English)

Shen J., Zhou J., Nelson G.C. et al. (2011) Measurement of effective gas diffusion coefficients of catalyst layers of PEM fuel cells with a Loschmidt diffusion cell, Journal of Power Sources. — Vol. 196, № 2. — P. 674—678. (in English)

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 140–156

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.390

UDC 629.78(075.8)

©K. Saurova[1*], S. Nysanbaeva[1], G. Turlybekova[2], 2025.
[1]Almaty University of Energy and Communications named after. G. Daukeev, Almaty, Kazakhstan;
[2]Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbayev, Almaty. Kazakhstan. E-mail: k.saurova@aues.kz

MODELING OF THE OPTICAL SYSTEM OF A STAR TRACKER FOR ACCURATE SPACECRAFT ATTITUDE DETERMINATION

Saurova Kamila — Master, Art. Lecturer at the Department of Space Engineering, Almaty University of Energy and Communications named after. G. Daukeev, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: k.saurova@aues.kz; ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7960-8106;
Nyssanbaeva Saltanat — PhD, Associate Professor of the Department of Space Engineering, Almaty University of Energy and Communications named after. G. Daukeev, Almaty, Kazakhstan, E-mail: s.nysanbaeva@aues.kz; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9254-3819;
Turlybekova Gulzhan — candidate of technical sciences, associate professor. Kazakh National Technical University named after K.I. Satbayev, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: g.turlybekova@satbayev.university; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5522-4931.

Annotation. Modern space technologies impose increasing requirements on the accuracy, reliability, and autonomy of spacecraft control systems. One of the key challenges is the high-precision determination of the spatial orientation of platforms, which ensures the correct operation of onboard systems, accurate targeting of payloads, execution of flight programs, and successful mission management. Insufficient orientation accuracy reduces the effectiveness of scientific observations, navigation operations, and equipment utilization, making the development of high-precision orientation systems a priority scientific and technical task.

Star trackers are leading orientation instruments due to their high angular accuracy, resistance to interference, and autonomy from ground-based infrastructure. Their performance is determined by the parameters of the optical system, including light-gathering power, resolution, level of aberrations, quality of the photosensitive matrix, and resistance to external factors such as vibrations, radiation, and temperature fluctuations. Optical distortions, noise, or stray illumination can significantly reduce measurement accuracy, emphasizing the critical importance of optimizing the optical system.

Modeling the optical system of a star tracker at the design stage allows predicting the influence of structural and physical factors on orientation accuracy, investigating

CC BY NC

aberrations, diffraction effects, and sensor noise, as well as evaluating the efficiency of image processing algorithms. The use of modeling methods enables optimization of system parameters, improvement of tracker accuracy and reliability, and reduction of costs associated with experimental testing.

Therefore, the research and modeling of the optical system of a star tracker is a highly relevant scientific and technical task, crucial for the development of modern and advanced spacecraft, including astrophysical observations, Earth remote sensing, and autonomous navigation.

Keywords: spacecraft, star tracker, orientation detection system, a way to increase accuracy, optics, error models, range, adaptive signal filtering, the centroid algorithm, the direction of the sensor to the starry sky, flight simulation

©К. Саурова[1*], С. Нысанбаева[1], Г. Турлыбекова[2], 2025.

[1]Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан;

[2]Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: k.saurova@aues.kz

ҒАРЫШ АППАРАТТАРЫНЫҢ ОРИЕНТАЦИЯСЫН НАҚТЫ АНЫҚТАУ ҮШІН ЖҰЛДЫЗ СЕНСОРЫНЫҢ ОПТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕСІН МОДЕЛЬДЕУ

Саурова Камила — магистр, аға оқытушы «Ғарыштық инженерия» кафедрасы, Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан,
E-mail: k.saurova@aues.kz; ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7960-8106;
Нысанбаева Салтанат — PhD, доцент, «Ғарыштық инженерия» кафедрасы, Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан,
E-mail: s.nysanbaeva@aues.kz; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9254-3819;
Турлыбекова Гулжан — техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор. Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан,
E-mail: g.turlybekova@satbayev.university; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5522-4931.

Аннотация. Қазіргі космостық технологиялардың дамуы ғарыш аппараттарын басқару жүйелерінің дәлдігі, сенімділігі және автономдылығына қойылатын талаптардың артуымен сипатталады. Негізгі міндеттердің бірі — ғарыштық платформалардың кеңістіктегі орналасуын жоғары дәлдікпен анықтау, себебі ол борттық жүйелердің дұрыс жұмыс істеуін, жүк аппаратурасын дәл бағыттауды, ұшу бағдарламаларын орындауды және миссияны тиімді басқаруды қамтамасыз етеді. Ориентацияның жеткіліксіз дәлдігі ғылыми бақылаулардың, навигациялық операциялардың және аппараттық құралдардың тиімділігін төмендетуі мүмкін, сондықтан жоғары дәлдікті ориентациялық жүйелерді әзірлеу маңызды ғылыми-техникалық міндет болып табылады.

Жұлдызды датчиктер жоғары бұрыштық дәлдігі, кедергілерге төзімділігі

және жердегі инфрақұрылымға тәуелсіз автономды жұмыс мүмкіндігі арқасында ориентация құралдары арасында жетекші орын алады. Олардың тиімділігі оптикалық жүйенің параметрлеріне, соның ішінде жарық жинау қабілетіне, аберрациялар деңгейіне, фотожеткізгіш матрицаның сапасына және сыртқы әсерлерге (дірілдер, радиация және температуралық ауытқулар) төзімділігіне тәуелді. Кез келген оптикалық бұрмаланулар, шудың болуы немесе паразиттік жарық өлшеулердің дәлдігін айтарлықтай төмендетуі мүмкін, бұл оптикалық жүйені оңтайландырудың аса маңызды екенін көрсетеді.

Жұлдызды датчиктің оптикалық жүйесін жобалау кезінде модельдеу конструкциялық және физикалық факторлардың ориентация дәлдігіне әсерін болжауға, аберрацияларды, дифракциялық эффектілерді және фотожеткізгіш матрицаның шударын зерттеуге, сондай-ақ бейне өңдеу алгоритмдерінің тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді. Модельдеу әдістерін қолдану жүйенің параметрлерін оңтайландыруға, датчиктің дәлдігі мен сенімділігін арттыруға және эксперименттік сынақтарға кететін шығындарды азайтуға мүмкіндік береді.

Осыған байланысты жұлдызды датчиктің оптикалық жүйесін зерттеу және модельдеу қазіргі заманғы және перспективалық ғарыш аппараттарын, оның ішінде астрономиялық бақылаулар, Жерді қашықтықтан зондтау және автономды навигация міндеттерін жасау үшін маңызды ғылыми-техникалық міндет болып табылады.

Түйін сөздер: ғарыш кемесі, жұлдыз сенсоры, бағдарлауды анықтау жүйесі, дәлдікті арттыру әдісі, оптика, қателік модельдері, ауқымы, адаптивті сигналды сүзу, центроид алгоритмі, сенсордың жұлдызды аспанға бағыты, ұшуды модельдеу

©К. Саурова[1*], С. Нысанбаева[1], Г. Турлыбекова[2], 2025.
[1]Алматинский университет энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева, Алматы, Казахстан;
[2]Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан.
E-mail: k.saurova@aues.kz

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЗВЁЗДНОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ТОЧНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Саурова Камила — магистр, старший преподаватель кафедры космической техники, Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, Алматы, Казахстан,
E-mail: k.saurova@aues.kz; ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7960-8106;
Нысанбаева Салтанат — PhD, доцент кафедры космической техники, Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, Алматы, Казахстан,
E-mail: s.nysanbaeva@aues.kz; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9254-3819;
Турлыбекова Гулжан — кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан,
E-mail: g.turlybekova@satbayev.university; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5522-4931.

Аннотация. Современные космические технологии предъявляют повышенные требования к точности, надёжности и автономности систем управления космическими аппаратами. Одним из ключевых аспектов является высокоточное определение пространственной ориентации платформ, обеспечивающее корректное функционирование бортовых систем, точное наведение полезной нагрузки, выполнение программ полёта и успешное управление миссией. Недостаточная точность ориентации снижает эффективность научных наблюдений, навигационных операций и эксплуатации аппаратуры, что делает разработку высокоточных систем ориентации приоритетной научно-технической задачей.

Звёздные датчики являются ведущими средствами ориентации благодаря высокой угловой точности, помехоустойчивости и автономности от наземной инфраструктуры. Их эффективность определяется параметрами оптической системы, включая светосилу, разрешающую способность, уровень аберраций, качество фотоприёмной матрицы и устойчивость к внешним воздействиям, таким как вибрации, радиация и температурные колебания. Оптические искажения, шумы или паразитное освещение могут существенно снижать точность измерений, что подчёркивает необходимость оптимизации оптической системы.

Моделирование оптической системы звёздного датчика на этапе проектирования позволяет прогнозировать влияние конструктивных и физических факторов на точность ориентации, исследовать аберрации, дифракционные эффекты и шумы фотоприёмной матрицы, а также оценивать эффективность алгоритмов обработки изображений. Применение методов моделирования обеспечивает оптимизацию параметров системы, повышение точности и надёжности работы датчика, а также сокращение затрат на экспериментальные испытания.

Таким образом, исследование и моделирование оптической системы звёздного датчика является актуальной научно-технической задачей, критически важной для разработки современных и перспективных космических аппаратов, включая астрофизические наблюдения, дистанционное зондирование Земли и автономную навигацию.

Ключевые слова: космический аппарат, звёздный датчик, система определения ориентации, способ повышения точности, оптика, модели погрешности, диапазон, адаптивная фильтрация сигнала, алгоритм центроида, направление датчика на звёздное небо, моделирование полёта

Введение. В последние десятилетия задача ориентации космических аппаратов (КА) получила широкое освещение в научной и технической литературе. Она охватывает как аппаратные средства (гироскопы, акселерометры, звездные и магнитные датчики), так и алгоритмическую базу, включая классические и интеллектуальные методы обработки данных. Одним из ключевых аспектов функционирования космических аппаратов является их ориентация в пространстве. Правильное определение ориентации аппарата критически важно для обеспечения его работоспособности, выполнения научных задач и успешного взаимодействия с другими объектами в космосе. В условиях постоянного роста числа спутников и

исследовательских миссий, а также увеличения сложности задач, стоящих перед космическими аппаратами, необходимость в эффективных и надежных методах определения ориентации становится особенно актуальной. Благодаря многолетним исследовательским достижениям разработчики получили глубокое понимание ошибок звездных датчиков. Таким образом, можно еще больше повысить точность измерений звездных датчиков.

Звёздный датчик, как устройство для абсолютного измерения ориентации, получил широкое применение в космических аппаратах, спутниках, баллистических ракетах и навигационных системах на морском транспорте благодаря своей точности на уровне долей угловой секунды (C.C. Liebe, 1995; J.L. Joergensen, et al, 2005; C. Liu, et al, 2010; L. Ma, et al, 2018). Работая на основе получения изображений звёзд с помощью оптических датчиков (за исключением Солнца), он выполняет последовательные процедуры, включая предварительную обработку изображения звёзд, определение центроидов звёзд, идентификацию звёзд и определение ориентации, чтобы установить пространственную ориентацию относительно инерциальной небесной системы координат на основе системы координат корпуса.

Звездные датчики (англ. *star trackers*) — это оптические сенсоры, предназначенные для определения ориентации космического аппарата по положению звёзд. Они являются одними из наиболее точных систем ориентации, особенно востребованных в научных и астрономических миссиях. Принцип работы основан на сопоставлении наблюдаемого изображения звёзд с эталонным звездным каталогом, что позволяет точно рассчитать ориентацию аппарата в пространстве.

Оптические системы наблюдения для космических аппаратов играют ключевую роль в выполнении множества задач: от мониторинга поверхности Земли до изучения глубокого космоса. Эти системы должны обеспечивать высокую точность и минимальные искажения при передаче данных. Разработка такой системы включает определение основных параметров оптического тракта, моделирование углового разрешения и поля зрения, а также анализ влияния типичных оптических искажений.

Таким образом, целью данной работы является разработка и моделирование оптической системы звёздного датчика для космического аппарата с обеспечением высокой точности определения ориентации, надёжности и устойчивости к внешним воздействиям.

Задачи работы:

1. Провести расчет основных характеристик оптического тракта звёздного датчика, включая относительное отверстие и дифракционный предел.

2. Определить угловое разрешение системы и поле зрения, обеспечивающее необходимую точность ориентации космического аппарата.

3. Смоделировать и проанализировать оптические аберрации, в том числе бочкообразное искажение и кому, и оценить их влияние на формирование изображения.

4. Оценить качество оптической системы с использованием модуляционной передачи контраста (MTF) для количественной характеристики разрешающей способности.

CC BY NC

Материалы и методы. Современные звёздные датчики обеспечивают одну из самых высоких точностей в системах ориентации, однако для малых КА важно не только качество, но и надёжность в условиях ограниченных вычислительных и энергетических ресурсов. Разные авторы предлагают различные методы повышения точности звёздных сенсоров — от аппаратных улучшений до алгоритмической оптимизации. Основными вызовами в их разработке являются устойчивость к космическому излучению, минимизация влияния паразитного света и обеспечение высокой точности при ограниченных габаритах.

Космическая среда характеризуется высоким уровнем радиации, что может негативно сказаться на функциональности оптической системы: под воздействием ионизирующего излучения оптические материалы, включая линзы и покрытия, теряют прозрачность, что снижает эффективность передачи света; радиация может вызывать накопление шумов в фотоматрицах (CCD, CMOS), ухудшая качество изображения; кроме того, радиация способна нагревать оптические компоненты, вызывая их термическую деформацию. В динамических условиях длина размытого изображения звезды может составлять десятки пикселей, значительно превышая статическую функцию рассеяния точки (PSF) (C.C. Liebe, 2002).

В разработке звездных датчиков посвящено много исследований, в которых решены вопросы влияющих на эффективность и точность движения по орбите и исполнения маневров, а также задачи повышения точности определения ориентации по звездам. Например, в работе (M.Moldabekov et al, 2014) описаны основные этапы проектирования оптической системы, включая разработку требований, выбор оптической системы путем анализа с помощью САПР, проектирование бленда с помощью моделирования, а также основные этапы изготовления ее компонентов (линз) и контроля качества изготовления оптической системы. В работе (D. Akhmedov, 2016) представлены результаты тестирования программного и математического обеспечения с помощью комплекса программного моделирования с использованием различных конфигураций дефектов, включая шумы датчика изображения, моделирование функции разброса точек, искажения оптической системы до 2%. Анализ результатов испытаний показал, что точность определения ориентации звездного трекера находится в допустимом диапазоне. В статье (K.L. Alipbayev et al, 2021) исследованы и рассмотрены первичные разработки математического и программного имитирования звездного датчика, а также математический модель звездного датчика и описаны как один из инструментов ориентации космического аппарата. В работе (Zbrutskii, A.V., et al, 2016) разработана нелинейная математическая модель, позволяющая значительно повысить точность вычислений и уменьшить их объем при автоматизированном анализе движения динамически перестраиваемых гироскопов. В модели используются усредненные уравнения движения динамически настраиваемых гироскопов, полученные из уравнений движения, записанных в системе координат, вращающейся вместе с гироскопами в терминах углов кручения. Для систем управления с привязкой рекомендуется использовать динамически настраиваемый гироскоп с одним кольцом на эластичной подвеске. В статье В.И. (И.М. Заварзин,

2023) рассмотрена актуальность создания малогабаритных оптических систем высокого разрешения для малых космических аппаратов. Приведено описание текущего состояния отечественных и зарубежных средств дистанционного зондирования Земли формата CubeSat, подтвердившее необходимость разработки отечественных многосоставных спутниковых группировок.

Для повышения точности звёздного датчика важно не только улучшать аппаратную часть, но и разрабатывать умные программные методы, учитывать реальную среду космоса и выстраивать комплексную систему ориентации. Объединение современных технологий и междисциплинарного подхода открывает широкие перспективы для будущих космических. В работе (K.L. Alipbayev, 2022) исследуется повышения точности измерения параметров ориентации космического аппарата звездными датчиками. Применен метод вычислений, использующий алгоритм точной оценки центроида, восстанавливающий функцию разброса точек по записанным астрономическим изображениям. Предложена минимизация эффектов турбулентности атмосферы и шумов системы на изображениях с длительной экспозицией, полученных наземным телескопом.

На точность звездного датчика влияют различные факторы. Одним из наиболее значимых факторов является шум. Шум может быть вызван датчиком камеры, электроникой и алгоритмами обработки. Рассеянный свет - еще один фактор, который может повлиять на точность звездного датчика. Рассеянный свет — это свет, попадающий в камеру из источников, отличных от звезд, таких как Солнце, Луна или атмосфера Земли. Ошибки калибровки также являются существенным источником ошибок в звездчатом датчике. Ошибки калибровки могут быть вызваны с плохим освещением (затуманиванием) камеры, колеса фильтра или процессора. В статье (К.А. Алипбаев et al., 2025) рассматривается разработка и моделирование алгоритма для звездных датчиков, который использует уникальный подход без необходимости перебора всех возможных конфигураций звезд. Значимость этой работы подчеркивается острым запросом на улучшение технологий навигации космических аппаратов, особенно в условиях увеличивающегося количества космических миссий, как государственных, так и коммерческих. Предлагаемый метод, основанный на использовании разреженного признакового пространства, позволяет значительно сократить время обработки данных за счет более эффективного поиска и сопоставления звездных паттернов. В работе (Carmeli, 2023) исследованы потребности в надёжных, недорогих и высокопроизводительных звёздных трекерах, способных точно распознавать звёздные узоры на снимках неба с вероятностью успеха около 98% за 870 микросекунд. Методы фильтрации и оценки ориентации, включая фильтр Калмана, рассматриваются в ряде работ (J.L. Crassidis, 2011; M.L. Psiaki, 2001). В работе (J.L. Crassidis, 2011) проводят классификацию и сравнение различных оценочных алгоритмов (KF, EKF, UKF), применяемых в условиях гауссовского и негауссовского шума. Работа (M.L. Psiaki, 2001) отдельно выделяет проблему определения ориентации с помощью EKF и адаптивных методов на борту малых спутников.

Кроме того, точность определения положения звезды относится к числу

CC BY NC

основных характеристик функционирования звёздного датчика и во многом определяется уровнем аберраций оптической системы, тогда как погрешность измерения координат звезды является критическим фактором, формирующим суммарную ошибку и подлежащим минимизации на стадии проектирования. Ошибки положения звёзд, обусловленные аберрациями, рассчитываются в рамках модели оптической системы звёздного датчика и учитываются при анализе точностных характеристик. Одной из приоритетных задач разработки является обеспечение высокой точности работы системы при жёстких ограничениях по массе и габаритам, что достигается за счёт применения асферических линз, позволяющих сократить число оптических элементов без ухудшения качества изображения, использования адаптивных элементов для компенсации аберраций и термических деформаций, внедрения конструкций из алюминия или углепластиков для снижения массы, а также применения компактных оптических модулей, включая микрообъективы, что способствует уменьшению размеров и конструктивной сложности системы. В статье (Kamila Saurova, et al., 2025) исследованы методы повышения точности звездного датчика и проанализированы требования к качеству изображения, получаемого с помощью объектива звездного датчика. Для детального моделирования и анализа оптической системы звездного датчика использовалось программное обеспечение OSLO. Были оценены различные варианты конструкции оптической системы звездного датчика, включая параметры оптических компонентов объектива и характеристики приемника оптического излучения, которые влияют на точность датчика, а также были рассмотрены функциональные возможности этих компонентов. В статье также исследуются стратегии повышения точности датчика, в результате чего была разработана модель оптической системы звездного датчика.

Важным этапом в процессе разработки модели погрешностей звездного датчика является проведение испытаний для оценки качества работы звездного датчика и устранению погрешностей. Следующим не менее важным этапом является отработка звездного датчика в условиях космоса или получение летной истории. Одним из возможных вариантов является использование звездного датчика в качестве полезной нагрузки на микроспутнике. Погрешность ориентации многих современных звёздных датчиков определяется систематическими ошибками. В работе (Maksim Tuchin et al., 2013) рассматривается влияние случайных и различных систематических ошибок датчиков на точность ориентации звёздных датчиков. Обсуждаются результаты моделирования основных систематических ошибок, прежде всего, обусловленных недооценкой неоднородности темнового тока. Предложены методы учёта основных систематических ошибок и снижения их влияния на точность ориентации звёздных датчиков. В статье (Gian Paolo Candini et al., 2012) описаны основные характеристики разработанной системы и результаты испытаний. В работе описывается миниатюрная система управления ориентацией, подходящая для наноспутников, разработанная исключительно с использованием коммерческих компонентов. Система может работать как система маневрирования в реальном времени, выполняя команды,

передаваемые с Земли, или как автономная система управления ориентацией, получающая данные о состоянии солнечной батареи от спутника-хозяина и эфемериды спутника, передаваемые с наземной станции.

В статье (Клебанов и др., 2017) рассматривается методика компенсаций аберраций волнового фронта в телескопе космического аппарата. В соответствии с предлагаемой методикой сначала выполняется расчет функции рассеяния точки для диапазона параметров температурного поля и положений зеркал. Затем выбирается наиболее близкое к измеренному расчетное значение функции рассеяния точки, которое принимается за исходное для процедуры оптимизации, в соответствии с которой определяется набор параметров, наиболее точно аппроксимирующих измеренную функцию рассеяния точки. В работе (Bo Sun et al., 2025) представлен метод коррекции низкочастотных ошибок в звездных датчиках путем выявления и компенсации изменений во внутренних элементах ориентации датчика. В исследовании используется алгоритм наименьших квадратов с фиксированной памятью и улучшенный кубатурный фильтр Калмана с квадратным корнем для решения таких проблем, как расхождение фильтров и ковариация ошибок с неопределенной положительной величиной. В конечном счете этот подход направлен на повышение точности и надежности измерений звездных датчиков за счет уменьшения низкочастотных ошибок, вызванных такими факторами, как термоупругая деформация.

Важным аспектом работы звездных датчиков является их калибровка. Калибровка позволяет устранить систематические ошибки, которые могут возникать из-за несовершенства оптики, характеристик сенсоров и других факторов. Калибровка включает в себя как статические процедуры, так и динамические тесты, которые проводятся в различных условиях. Современные звездные датчики могут быть оснащены специальными системами для автоматической калибровки, что позволяет значительно упростить процесс их настройки и повысить надежность работы. В статье (Wenfeng Tan, et al., 2018) предлагается комплексный метод калибровки интегрированной системы звёздного датчика и гироскопических блоков с точки зрения глобальной перспективы. Интеграция звёздного датчика и гироскопических блоков позволяет в полной мере использовать преимущества каждого из них и обеспечивать непрерывную и точную информацию об ориентации с высокой частотой обновления. В статье (Hao Zhang et al., 2017) предлагается новый метод калибровки для орбитальных звёздных датчиков без априорной информации. Результаты моделирования и экспериментов показывают, что калибровка проста в эксплуатации, отличается высокой точностью и надежностью. Предлагаемый метод обладает преимуществами самоинициализации и не требует определения ориентации или предустановленных параметров датчика.

Результаты и обсуждения. Современные звёздные датчики сталкиваются с рядом ограничений, связанных с массой, габаритами и устойчивостью к внешним воздействиям, что оказывает существенное влияние на точность определения положения звёзд. Существующие методы повышения точности, несмотря на их эффективность, не всегда позволяют одновременно минимизировать оптические

CC BY NC

аберрации и обеспечить компактность и надёжность системы. В связи с этим в работе предложен комплексный метод исследования, направленный на оптимизацию оптической конструкции и алгоритмов обработки сигналов с целью повышения точности работы звёздного датчика.

Предлагаемый метод основан на использовании асферических линз, позволяющих сократить количество оптических элементов без снижения качества изображения, а также на внедрении адаптивных оптических элементов, компенсирующих аберрации и термические деформации. Для количественной оценки эффективности метода разрабатывается математическая модель оптической системы звёздного датчика, включающая учёт аберраций, фотонного и электронного шумов, дискретизации изображения и особенностей алгоритмов центроидирования. На её основе проводится расчёт погрешностей измерения положения звёзд и определяется оптимальная конфигурация элементов системы.

Методика исследования включает последовательность действий: моделирование оптической системы, анализ влияния аберраций и шумов на точность, внедрение адаптивных и корректирующих элементов, а также оценка точностных характеристик с последующим сравнительным анализом с существующими подходами. Применение предложенного метода позволяет достичь снижения ошибок определения положения звёзд, уменьшения массы и габаритов системы, повышения устойчивости к внешним воздействиям и температурным колебаниям, а также обеспечивает возможность интеграции в современные космические аппараты с жёсткими ограничениями по параметрам.

Изложение результатов. Звездный датчик — это оптическое устройство, которое определяет ориентацию КА относительно направление звезд в полученном изображении на приемнике оптического излучения звездного датчика.

Звездный датчик с точностью менее 1″ попадает в разряд высокоточных звездных датчиков. Большое значение имеет разработка сверхточных звездных датчиков для задач наблюдения Земли и астрономических наблюдений с высоким разрешением.

Рис. 1 - Состав звездного датчика

Для обеспечения максимально высоких характеристик звездного датчика требования формируются исходя из необходимости одновременно обеспечить детектирование звезды, идентификацию её блеска и определение углового положения с максимальной точностью.

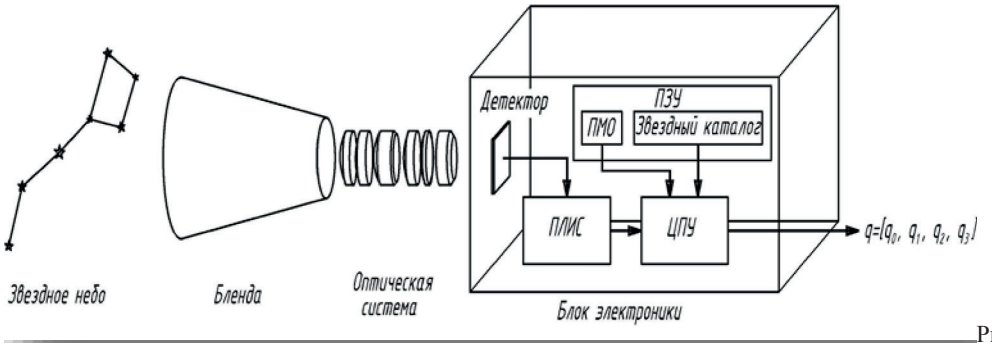


Рис. 2 - Принцип работы звездного датчика

Оптический тракт системы определяется её геометрическими параметрами: фокусным расстоянием, диаметром апертуры и длиной волны света. Эти параметры влияют на светосилу и разрешающую способность системы.

Дифракционный предел показывает теоретическую границу разрешения оптической системы. Он рассчитывается по формуле (1):

$$\theta = 1.22\frac{\lambda}{D} \quad (1)$$

где λ— длина волны, D — диаметр апертуры.

Угловое разрешение — минимальный угол, под которым система может различить два объекта. Оно определяется через размер пикселя и фокусное расстояние.

Поле зрения (FOV) — область, наблюдаемая системой, зависит от размеров сенсора и фокусного расстояния.

Оптические искажения (бочкообразное искажение, кома) — это отклонения изображения от идеального из-за несовершенства системы.

Модуляционная передача контраста (MTF) характеризует способность системы передавать контраст на различных пространственных частотах.

Функция рассеяния точки (PSF) — распределение интенсивности света от точечного источника, отражающее разрешающую способность системы.

Для выполнения поставленных задач использовалась программная среда MATLAB. Были выполнены следующие этапы:

1. Расчёт основных параметров оптического тракта (относительное отверстие, дифракционный предел).
2. Определение углового разрешения и поля зрения системы.

CC BY NC

3. Моделирование геометрических искажений (бочкообразных и комы).
4. Построение графиков MTF и PSF для оценки качества системы.

Результаты расчётов в командном окне. Относительное отверстие (F/#): 10**:** Отношение фокусного расстояния к диаметру апертуры, указывающее на светосилу системы.

– Дифракционный предел: 2.7681 угл. сек: максимально достижимая угловая разрешающая способность оптической системы.

– Угловое разрешение на пиксель: 0.99007 угл. сек: Способность различать минимальные детали в изображении при заданном размере пикселя.

– Поле зрения: 4.1235 × 2.7497 градусов: Угол пространства, который охватывает система наблюдения.

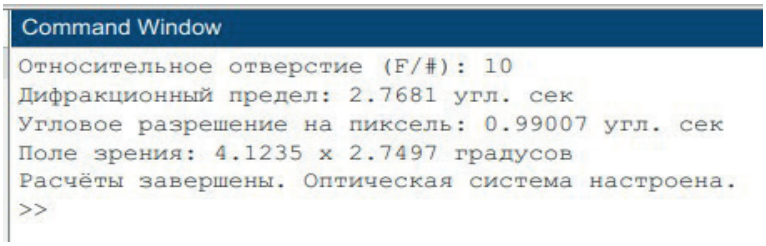


Рис. 3 - Результаты расчётов

Моделирование оптических искажений. Исходное изображение моделируется в виде Гауссового пятна, которое представляет собой идеальный объект наблюдения с равномерной яркостью и симметричной интенсивностью по центру. Такое изображение служит эталоном для оценки влияния оптических искажений на формирование изображения в системе звёздного датчика.

Искажённое изображение демонстрирует эффект бочкообразного искажения, при котором происходит растяжение краевых областей изображения относительно центра. В данном моделировании бочкообразное искажение с коэффициентом -0.5 вызвало заметное искривление изображения по краям, что характерно для широкоугольных оптических систем. Помимо визуального искривления, бочкообразное искажение приводит к изменению углового размера объектов, что может снижать точность определения положения звёзд и центроидов светил на фотоприёмном устройстве.

Для количественной оценки влияния искажений на качество изображения дополнительно построены функции распределения точки (PSF) и модуляционная передача контраста (MTF). Анализ PSF показывает размывание краевых участков пятна и увеличение размера точки, а графики MTF демонстрируют снижение контрастной передачи на высоких пространственных частотах. Это позволяет выявить критические области, где искажения наиболее значимы, и определить необходимость применения корректирующих элементов оптической системы, таких как асферические линзы или адаптивные элементы.

Рис. 4 - Искажённое изображение

Аберрации. Кома проявляется как вытянутые световые пятна на изображении, ухудшая точность передачи деталей. Кома с коэффициентом 0.3 привела к вытяжению световых пятен, особенно заметному на периферии изображения.

Рис. 5 — Изображение с комой

Функция рассеяния точки (psf). Изображение центрального максимума показывает, что система способна фокусировать свет с минимальным рассеянием, сохраняя высокую разрешающую способность. Центральный дифракционный максимум узкий, что подтверждает высокую разрешающую способность системы. Дифракционные кольца слабы, что минимизирует потери света и искажения.

В ходе данной работы была проведена оценка эффективности работы целевой аппаратуры космического аппарата. На основе смоделированных данных было выполнено:

1) Оценка разрешения системы, которая показала минимальное разрешение на уровне 0.20 градусов.

2) Анализ объема данных за один кадр и общего объема передаваемых данных за секунду, который выявил превышение пропускной способности системы.

3) Оценка эффективности работы системы, которая составила всего 3.90%.

На основании полученных результатов было выявлено, что пропускная способность системы недостаточна для передачи всех данных с заданной частотой съемки и углом обзора.

CC BY NC

Для повышения эффективности целевой аппаратуры предложены следующие рекомендации:

1) Уменьшить частоту съемки или разрешение системы для сокращения объема передаваемых данных.

2) Рассмотреть возможность увеличения пропускной способности передачи данных, что позволит сохранять высокое качество съёмки и детализированность данных.

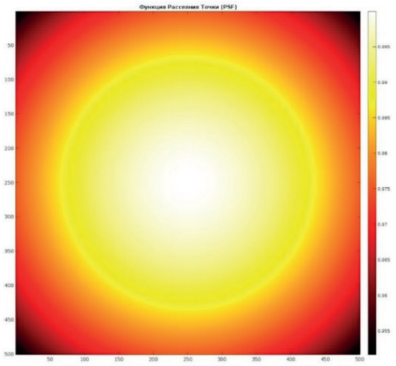


Рис. 6 — Функция рассеяния точки

В ходе работы проведена комплексная оценка эффективности работы целевой аппаратуры космического аппарата на основе смоделированных данных. Анализ показал, что минимальное разрешение системы составляет 0,20 градусов, что соответствует заявленным требованиям к точности определения положения объектов. Одновременно проведённый анализ объёма данных выявил превышение пропускной способности системы, что ограничивает возможность передачи всех данных с заданной частотой съёмки и углом обзора. Эффективность работы системы в текущей конфигурации составила всего 3,90%, что свидетельствует о необходимости оптимизации её параметров.

Проведённое моделирование оптической системы звёздного датчика позволило комплексно оценить влияние основных параметров оптического тракта на точность определения ориентации космических аппаратов. Полученные данные подтверждают, что угловое разрешение и поле зрения системы являются ключевыми характеристиками, определяющими качество формирования звёздного изображения и точность вычислений положения аппарата. Анализ геометрических аберраций, включая бочкообразные и кома, показал, что даже незначительные искажения приводят к смещению центров световых пятен на фотоприёмной матрице, что непосредственно сказывается на точности измерений.

Построенные графики MTF и PSF обеспечили количественную оценку влияния оптических искажений и шумов фотоприёмного устройства на качество изображения. Результаты выявили, что дискретизация изображения и ограниченная пропускная способность канала передачи данных могут существенно ограничивать

CC BY NC

эффективность системы, даже при оптимальных оптических характеристиках. Это подчёркивает необходимость комплексного подхода к проектированию, учитывающего как оптические, так и цифровые компоненты обработки сигнала.

Предложенные меры по повышению точности, включая использование асферических и адаптивных оптических элементов, применение лёгких и устойчивых конструктивных материалов, оптимизацию частоты съёмки и разрешения системы, направлены на минимизацию аберраций и повышение помехоустойчивости. Их реализация позволит снизить массу и габариты датчика, увеличить пропускную способность канала передачи информации и обеспечить стабильное функционирование в условиях космической эксплуатации.

Таким образом, результаты моделирования подтверждают значимость системного подхода к проектированию оптической системы звёздного датчика и демонстрируют возможности её оптимизации для обеспечения высокой точности и надёжности определения ориентации космических аппаратов.

Вывод. В рамках выполненной работы проведено моделирование оптической системы звёздного датчика с целью обеспечения высокой точности определения ориентации космических аппаратов. Были рассчитаны основные параметры оптического тракта, включая относительное отверстие и дифракционный предел, выполнено определение углового разрешения и поля зрения системы, а также проведено моделирование геометрических аберраций, таких как бочкообразные и кома. Дополнительно построены графики MTF и PSF для оценки качества изображения и анализа влияния оптических искажений на точность измерений.

На основании результатов моделирования выявлены ключевые факторы, влияющие на точность определения положения звёзд, включая аберрации оптической системы, шумы фотоприёмного устройства и дискретизацию изображения. Оценка эффективности работы системы показала, что существующие параметры требуют оптимизации для достижения необходимого уровня точности и рационального использования пропускной способности передачи данных.

Предложены меры по повышению точности и эффективности работы звёздного датчика, включая использование асферических и адаптивных оптических элементов, применение лёгких и устойчивых конструктивных материалов, оптимизацию частоты съёмки и разрешения системы, а также увеличение пропускной способности канала передачи информации. Реализация этих подходов позволит обеспечить надёжное и точное определение ориентации космических аппаратов, уменьшить массу и габариты системы и повысить её эксплуатационные характеристики в условиях космической эксплуатации.

Литература

Akhmedov D., Yelubayev S., Ten V., Bopeyev T., Alipbayev K., Sukhenko A. (2016) Proceedings of the SPIE. The International Society for Optical Engineering, Software and mathematical support of Kazakhstani star tracker.

Alipbayev K., Saurova K., (2022) Method of increasing the accuracy of the star sensor. Mechanics Of Gyroscopic Systems. DOI: https://doi.org/10.20535/0203-3771412021269247

Alipbayev K., Saurova K., Demesinova S., Sydykov R., Balbayev G. (2021) Mathematical Modeling of

a Star Sensor. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/1248102020

Bo Sun, Liu Zhang, He Liu, Yang Xiao, Guowei Fan. (2025) Star sensor low-frequency error correction method based on identification and compensation of interior orientation elements. Measurement. — Volume 246. — P. 116746 https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4935521

C. Liu, G. Liu, X. Wang, A. Li. (2010) Star Sensor Principle and Application Strapped on Missile, National Defense Industry Press. Beijing. DOI: 10.4236/opj.2013.32B027

C.C. Liebe. (2002) Accuracy performance of star trackers — a tutorial, IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. — 38 (2). — P. 587-599. DOI: 10.1109/TAES.2002.1008988.

Carmeli & Ben-Moshe. (2023) AI-Based Real-Time Star Tracker. Electronics. — 12 (9). https://doi.org/10.3390/electronics12092084

Crassidis, J. L., & Junkins, J. L. (2011). Optimal estimation of dynamic systems. CRC Press. https://doi.org/10.1201/b11154

Gian Paolo Candini [a], Fabrizio Piergentili [b], Fabio Santoni [c]. (2012) Miniaturized attitude control system for nanosatellites. Acta Astronautica. — Volume 81. — P. 325-334. https://www.researchgate.net/publication/256935238_Miniaturized_attitude_control_system_for_nanosatellites

Hao Zhang, Yanxiong Niu, Jiazhen Lu, Chengfen Zhang and Yanqiang Yang. (2017) On-orbit calibration for star sensors without priori information. Optics Express. — Vol. 25. — P. 18393-18409

J.L. Joergensen, T. Denver, M. Betto, P. Van den Braembussche. (2005) The PROBA satellite star tracker performance. Acta Astronaut. — 56 (1). — P. 153-159.

Kamila Saurova, Alexandr Shamro, Kuanysh Alipbayev, Saltanat Nysanbaeva, Beibit Karibayev, Bakyt Khaniyev, Nursultan Uzbekov, Sabyrzhan Orynbassar, Zhanzira Geroyeva and Nursultan Meirambekuly. (2025) Research of Methods to Improve the Accuracy of the Star Sensor for Global Navigation Satellite System Technology. Engineered Science. — Volume 33, DOI:10.30919/es1351

L. Ma, D. Zhu, C. Sun, D. Dai, S. Qin. (2018) Three-axis attitude accuracy of better than 5 arcseconds obtained for the star sensor in a long-term on-ship dynamic experiment, Appl. Opt. — 57 (32). — P. 9589-9595 https://doi.org/10.1364/AO.57.009589

Maksim Tuchin, A. Biryukov, M. G. Nickiforov, Mikhail Prokhorov. (2013) On Random and Systematic Errors of a Star Tracker. Conference on Small Satellite. January https://www.researchgate.net/publication/275660620_On_Random_and_Systematic_Errors_of_a_Star_Tracker

Moldabekov M., Akhmedov D., Yelubayev S., Ten V., Bopeyev T., Alipbayev K., Sukhenko A. (2014) Proceedings of the SPIE. The International Society for Optical Engineering. Amsterdam. https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9241/924122/Features-of-design-and-development-of-the-optical-head-of/10.1117/12.2067050.short

Psiaki, M. L. (2001). Attitude-determination filtering via extended Kalman filtering. Journal of Guidance. Control and Dynamics. — 23(2) DOI: 10.2514/2.4540

Wenfeng Tan, Dongkai Dai, Wei Wu, Xingshu Wang, Shiqiao Qin. (2018) A Comprehensive Calibration Method for a Star Tracker and Gyroscope Units Integrated System. Sensors. https://doi.org/10.3390/s18093106

Zbrutskii A. V.; Maresh V. R.; Balabanova T. V. (2016) Polarization studies of the Earth stratospheric layer by means of picosatellite. 5th International conference "Aerospace technologies for sustainable development and security". Mekhanika Giroskopicheskikh Sistem. Kyiv, Ukraine. — October 10—14. — P. 69-71

Алипбаев К.А., Саурова К.С., et al. (2025) Методы повышения точности звездного датчика. БАҒДАР ОРИЕНТИР. — № 2. — P. 249-57

В.И. Заварзин, И.М. Зайцев, С.В. Якубовский. (2023) Оптическая система для малогабаритного космического аппарата дистанционного зондирования земли формата cubesat. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. № 3 DOI: 10.18698/0236-3933-2023-3-18-32

References

Akhmedov D., Elubaev S., Ten V., Bopeev T., Alipbaev K., Sukhenko A. (2016) Proceedings of SPIE. International Society for Optical Engineering, Software and Mathematical Support of the Kazakhstan star Tracker.

Alipbaev K.A., Saurova K.S. et al. (2025) Methods for improving the accuracy of the star sensor. DIETARY SUPPLEMENT ORIENT. — N 2. — P. 249-57

Alipbayev K., Saurova K., (2022) A way to improve the accuracy of the star sensor. Mechanics of gyroscopic systems. DOI: https://doi.org/10.20535/0203-3771412021269247

Alipbayev K., Saurova K., Demesinova S., Sydykov R., Balbaev G.. (2021) Mathematical modeling of the Star sensor. International Journal of New Trends in Engineering Research. https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/1248102020

Bo Song, Liu Zhang, He Liu, Yang Xiao, Gouei Fan. (2025) A method for correcting low-frequency errors of a star sensor based on the identification and compensation of internal orientation elements. Measurement. — Volume 246. — P. 116746 https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4935521

Carmeli and Ben Moshe. (2023) Real-time tracking of stars based on artificial intelligence. Electronics. — 12(9). https://doi.org/10.3390/electronics12092084

Crassidis, J. L., & Junkins, J. L. (2011). Optimal estimation of dynamic systems. CRC Press. https://doi.org/10.1201/b11154

Gian Paolo Candini, Fabrizio Piergentili, Fabio Santoni (2012). A miniature nanosatellite orientation system. Acta Astronautica. — Volume 81. — P. 325-334 https://www.researchgate.net/publication/256935238_Miniaturized_attitude_control_system_for_nanosatellites

Hao Zhang, Yanxiong Niu, Jiazhen Lu, Chengfen Zhang, and Yanqiang Yang. (2017) Calibration of stellar sensors in orbit without prior information. Optics Express. — Volume 25. — P. 18393-18409

J.L. Jorgensen, T. Denver, M. Betto, P. Van den Brambusche. (2005) The effectiveness of satellite tracking of stars PROBA. Acta astronaut. — 56 (1). — P. 153-159.

Kamila Saurova, Alexander Shamro, Kuanysh Alipbayev, Saltanat Nysanbayeva, Beibit Karibayev, Bakyt Khaniev, Nursultan Uzbekov, Sabyrzhan Orynbasar, Zhanzira Geroeva and Nursultan Meirambekuly. (2025) Investigation of methods to improve the accuracy of the star sensor for the technology of the global navigation satellite system. Engineering science. — Volume 33. DOI: 10.30919/es1351

L. Ma, D. Zhu, K. Song, D. Dai, S. Qin. (2018) The accuracy of determining the position along three axes, exceeding 5 arc seconds, obtained for the star sensor during a long-term dynamic experiment on the ship, appendix. — No. 57 (32). — P. 9589-9595 https://doi.org/10.1364/AO.57.009589

Maksim Tuchin, A. Biryukov, M. G. Nickiforov, Mikhail Prokhorov. (2013) On Random and Systematic Errors of a Star Tracker. Conference on Small Satellite. — January https://www.researchgate.net/publication/275660620_On_Random_and_Systematic_Errors_of_a_Star_Tracker

Moldabekov M., Akhmedov D., Elubaev S., Ten V., Bopeev T., Alipbaev K., Sukhenko A. (2014) Proceedings of SPIE. —International Society of Optical Engineering, Amsterdam. https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9241/924122/Features-of-design-and-development-of-the-optical-head-of/10.1117/12.2067050.short

Psiaki, M. L. (2001). Filtering to determine the relationship using advanced Kalman filtering. Management magazine. Control and dynamics. — 23(2). DOI: 10.2514/2.4540

S. Liu, G. Liu, H. Wang, A. Li. (2010) The principle of operation of the star sensor and its application on a rocket, National Press of the Defense Industry. Beijing. DOI: 10.4236/opj.2013.32B027

S.S. Liebe. (2002) Accuracy indicators of star trackers - a textbook, IEEE Trans. Arespace Electron. Sistema. — 38 (2). — P. 587-599. DOI: 10.1109/TAES.2002.1008988.

Tang Wenfeng, Dongkai Dai, Wei Wu, Xingshu Wang, Shiqiao Qin. (2018) Comprehensive calibration method for an integrated star tracker system and gyroscopic devices. — Sensors. https://doi.org/10.3390/s18093106

V.I. Zavarzin, I.M. Zaitsev, S.V. Yakubovskiy. (2023) Optical system for small-sized space operator earth sensing by cubesat satellite. — Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Instrument engineering. — № 3. DOI: 10.18698/0236-3933-2023-3-18-32

Zbrutsky A.V., Maresh V. R., Balabanova T. V. (2016) Polarizing studies of the stratosphere of the Earth using a picosatellite. 5th International Conference "Aerospace Technologies for Sustainable Development and Safety". Mechanics of Gyroscopic Systems. Kiev, Ukraine. — October 10-14. — P. 69-71.

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 157–171

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.391

МРНТИ 31.15.33
УДК 544.522.1

©B.S. Serikbayeva*, M.S. Satayev, N.K. Sarypbekova, 2025.
M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan.
*E-mail: sbagdash@bk.ru

STUDY OF THE ELECTROPLATING PROCESS ON POLYPROPYLENE USING A CONDUCTIVE LAYER

Serikbayeva Bagdagul — PhD, Senior Lecturer M. Auezov South Kazakhstan university, Shymkent, Kazakhstan, E-mail: sbagdash@bk.ru; ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4408-7967;
Satayev Malik — Doctor of Technical Sciences, Professor M. Auezov South Kazakhstan university, Shymkent, Kazakhstan,
E-mail: malik_1943@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3456-7083;
Sarypbekova Nursulu — Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Mukhtar Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan,

E-mail: Nurislam_kar@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1200-3244.

Abstract. The paper presents the results of research on the process of forming copper and nickel electroplated coatings on a polypropylene substrate using an innovative method of photochemical surface activation. The scientific novelty of the research lies in the development of a comprehensive approach that combines preliminary chemical modification of the polymer surface with the subsequent formation of an electrically conductive nanocomposite sublayer based on a copper-silver system. A key element of the developed technology is an original activation stage, which consists of treating the surface with a $CuCl_2$ solution, leading to the formation of associated catalytic centres containing CuCl phases and partially reduced metallic copper. These centres serve as the basis for the deposition of a thin sorption film from solutions of silver nitrate and ascorbic acid, which is subsequently subjected to photochemical reduction under the action of visible radiation (flux density 700—1100 W/m²). As a result, a continuous, highly adhesive and electrically conductive layer is formed within 15—20 minutes. It has been experimentally confirmed that the resulting conductive sublayer provides high adhesion to the polymer matrix and allows uniform, non-porous electroplated copper and nickel coatings to be obtained. The practical significance of the work lies in the creation of a resource-efficient and scalable technology for the metallisation of chemically inert polyolefins, which opens up prospects for its application in high-tech industries such as the electronics industry (production of flexible printed circuits, shielding coatings),

automotive industry (creation of wear-resistant and decorative elements) and production of functional composite materials.

Keywords: polymer metallization, electroplating, silver, copper, nickel

©Б.С. Серикбаева*, М.С. Сатаев, Н.К. Сарыпбекова, 2025.
М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан.
*E-mail: sbagdash@bk.ru

ЭЛЕКТРӨТКІЗГІШ ҚАБАТТЫ ҚОЛДАНЫП, ПОЛИПРОПИЛЕНГЕ ГАЛЬВАНИКАЛЫҚ ҚАПТАМА АЛУ ПРОЦЕСІН ЗЕРТТЕУ

Серикбаева Багдагуль — PhD доктор, аға оқытушы, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан,
E-mail: sbagdash@bk.ru; ORCID:https://orcid.org/0009-0001-4408-7967;
Сатаев Малик — техника ғылымдарының докторы, профессор, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан,
E-mail: malik_1943@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3456-7083;
Сарыпбекова Нурсулу — химия ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор Мұхтар Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан,
E-mail: Nurislam_kar@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1200-3244.

Аннотация. Мақалада инновациялық фотохимиялық беттік белсендіру әдісі арқылы полипропилен субстратында мыс пен никель электролитикалық қаптамаларын алу процесінің зерттеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеудің ғылыми жаңалығы – полимер бетін алдын ала химиялық-механикалық модификациялауды және кейінгі мыс-күміс жүйесіне негізделген электр өткізгіш нанокомпозиттік қабат түзуді біріктіретін кешенді тәсілді әзірлеуде. Дамытылған технологияның негізгі элементі – бетті $CuCl_2$ ерітіндісімен өңдеуден тұратын бастапқы белсендіру кезеңі, ол CuCl фазалары мен жартылай өткізгіш металлдық мыс қамтитын байланысқан каталитикалық орталықтардың түзілуіне әкеледі. Бұл орталықтар күміс нитраты мен аскорбин қышқылы ерітінділерінен жұқа сорбциялық қабат түзілуінің негізін құрайды, ол тығыздығы 700—1100 Вт/м² жарық сәуленің әсерінен фотохимиялық реакцияға ұшырайды. Жұқа сорбциялық қабат сәуленің тиімді енуін қамтамасыз етеді яғни CuCl/Cu белсенді орталықтарында күмістің фотохимиялық тотықсыздану және аскорбин қышқылының қоздырылған күйге өтуі нәтижесінде химиялық тотықсыздануы. Нәтижесінде 15–20 минут ішінде үздіксіз, жоғары адгезияға ие электр өткізгіш қабат түзіледі. Эксперименттік түрде расталғандай, алынған өткізгіш қабат полимер матрицасына жоғары адгезияны қамтамасыз етіп, мыс пен никельдің біркелкі, гальваникалық қаптамаларын алуға мүмкіндік береді. Жұмыстың практикалық маңызы – химиялық бейтарап полиолефиндерді металлдауға арналған ресурс үнемді және масштабталатын технологияны әзірлеу, бұл электроника (икемді басылған схемалар, экрандау қабаттарды өндіру) автомобиль өнеркәсібі (тозуға төзімді және декоративті элементтер жасау) және функционалды композитті материалдар өндірісі сияқты жоғары технологиялық салаларда қолдануға мүмкіндік береді.

CC BY NC

Түйін сөздер: полимерді металдандыру, гальваникалық қаптамалар, күміс, мыс, никель

©Б.С. Серикбаева, М.С.Сатаев, Н.К. Сарыпбекова, 2025.
Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан.
*E-mail: sbagdash@bk.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГАЛЬВАНОПОКРЫТИЯ НА ПОЛИПРОПИЛЕНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОГО СЛОЯ

Серикбаева Багдагуль — PhD, старший преподаватель кафедры «Технология неорганических и нефтехимических производств», Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан,
E-mail: sbagdash@bk.ru; ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4408-7967;
Сатаев Малик — доктор технических наук, профессор кафедры «Технология неорганических и нефтехимических производств», Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан,
E-mail: malik_1943@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3456-7083;
Сарыпбекова Нурсулу — кандидат химических наук, ассоциированный профессор, Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан,
E-mail: Nurislam_kar@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1200-3244.

Аннотация. В работе представлены результаты исследования процесса формирования гальванических покрытий меди и никеля на подложке из полипропилена с использованием инновационного метода фотохимической активации поверхности. Научная новизна исследования заключается в разработке комплексного подхода, сочетающего предварительную химико-механическую модификацию полимерной поверхности с последующим формированием электропроводящего нанокомпозитного подслоя на основе системы медь–серебро. Ключевым элементом технологии является оригинальный этап активации, заключающийся в обработке поверхности раствором CuCl□, что приводит к образованию каталитически активных центров, содержащих фазы CuCl и частично восстановленную металлическую медь. Эти центры служат основой для осаждения тонкой сорбционной плёнки из растворов нитрата серебра и аскорбиновой кислоты, которая далее подвергается фотохимическому восстановлению под воздействием видимого излучения (плотность потока 700–1100 Вт/м²). Небольшая толщина плёнки обеспечивает глубокое проникновение излучения и инициирует сопряжённые процессы: фотохимическое восстановление серебра на центрах CuCl/Cu и химическое восстановление в объёме плёнки за счёт перехода аскорбиновой кислоты в возбуждённое состояние. В результате в течение 15–20 минут формируется сплошной высокоадгезионный электропроводящий слой. Экспериментально подтверждено, что полученный проводящий подслой обеспечивает высокую адгезию к полимерной матрице и позволяет получать равномерные, беспористые гальванические покрытия меди и никеля.

Практическая значимость работы заключается в разработке ресурсоэффективной и масштабируемой технологии металлизации химически инертных полиолефинов, открывающей перспективы применения в высокотехнологичных отраслях: электронной промышленности (гибкие печатные схемы, экранирующие покрытия); автомобилестроении (декоративные и износостойкие элементы); производстве функциональных композитов.

Ключевые слова: металлизация полимера, гальвонопокрытия, серебро, медь, никель

Финансирование: *Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, грант № AP25793971 «Разработка многослойных металлизированных покрытий на полимерах для создания защитных экранов различного назначения от электромагнитных излучений».*

Введение. Полипропилен, будучи универсальным термопластом, широко применяется в промышленности благодаря благоприятному сочетанию физико-механических свойств и технологичности переработки. Однако его использование в ряде технических областей ограничивается присущими недостатками: низкой ударной вязкостью, повышенной хрупкостью при низких температурах и значительной усадкой при формовании. Эффективным методом модификации, позволяющим преодолеть эти ограничения, является нанесение металлических покрытий. В результате формируются композитные системы, сочетающие преимущества полимерной основы (малая плотность, коррозионная стойкость, экономия металла) и металлического слоя, который обеспечивает повышенную износостойкость, термостабильность, химическую резистентность, улучшенные тактильные и декоративные характеристики (металлический блеск). Таким образом, металлизация полипропилена позволяет создать конкурентоспособные материалы, расширяющие функциональные границы применения данного полимера в высокотехнологичных отраслях (Mehdizadeh, et al., 2018).

Важным преимуществом металлизированных деталей является их электропроводность. В связи с этим разработаны и широкое применение имеет металлизация полимерных материалов при изготовления печатных плат (ПП), автомобильных компонентов и в средствах направленных на защиту от электромагнитных помех (EMI) (Melentiev, et al., 2022). Сегодня разработаны целый ряд методов нанесения металлических пленок на полимерные материалы. В данные время существует три основных метода металлизации полимеров: физическое осаждение из паровой фазы (PVD), химическое осаждение из паровой, газовой или жидкой фазы (CVD) и химическая электролитическая металлизация (ХЭМ). Сравнительный анализ этих трёх основных методов металлизации полимеров представлен в таблице 1.

CC BY NC

Таблица 1 - Сравнительный анализ основных методов металлизации полимеров

Параметр	**PVD (Физическое осаждение из паровой фазы (** Mai, et al., 2004**))**	**CVD (Химическое осаждение из паровой фазы (**Mai, et al., 2005**))**	**Химическая (электролитическая** (Pan, 2004**)) металлизация**
Температура процесса	Низкая — средняя (в зависимости от метода нагрева)	Высокая (до 1000 °C и выше)	Низкая (комнатная — 90 °C)
Необходимость вакуума	Обязателен (вакуумная камера)	Зависит от варианта (иногда требуется, но не всегда)	Не требуется
Оборудование	Сложное и дорогостоящее	Средней сложности (высокотемпературные реакторы)	Простое лабораторное или промышленное оборудование
Равномерность покрытия	Средняя (зависит от геометрии и расположения)	Высокая (при точном контроле параметров)	Высокая (даже на сложных геометриях)
Применение на полимерах	Ограничено (термочувствительность полимеров)	Ограничено (высокая температура разрушает полимеры)	Широко применимо, особенно для диэлектриков
Толщина покрытия	Тонкие покрытия (от нескольких нанометров до микронов)	От тонких до средних слоёв	От тонких до толстых (легко контролируется)
Энергозатраты	Высокие (электронные пушки, нагрев, вакуум)	Высокие (нагрев, реакторы)	Низкие
Тип реакций	Физическое осаждение	Химические газофазные реакции	Химическое восстановление в растворе
Катализаторы / электропроводность	Не требуются	Часто не требуются	Требуется предварительная активация поверхности
Сферы применения	Оптика, микроэлектроника, антикоррозийные покрытия	Микроэлектроника, теплозащита, антикоррозийные покрытия	Автомобилестроение, электроника, бытовая техника

Как видно из таблицы, наиболее эффективным и часто используемым в промышленности методом является химико-электролитический металлизация. Данный процесс включает несколько этапов:

– подготовка поверхности пластмассы, включающий в себя механическую обработку, обезжиривание, предтравление, травление, улавливание и обезвреживание раствора травления, промежуточные промывки;

– активация поверхности пластмасса путем создания каталитических центров, обеспечивающих инициирование реакции химического восстановления металла;

– химическое осаждение тонкого слоя металла (обычно 0,3-0,8 мкм) придающего поверхности пластмасса электропроводность, достаточную для последующего нанесения электрохимических покрытий;

– гальваническое осаждения основного металлического покрытия требуемой толщины.

CC BY NC

При этом ключевой является стадия создание электропроводного подслоя, по которому и будет происходить электроосаждение основного металла [Aminul Islam, et al 2017]. Обычно способ создания подслоя является главным отличием всех известных технологий металлизации полимеров. В настоящее время экологический аспект имеет важное значение, и процесс химического меднения признан экологически вредным и потенциально опасным для здоровья человека (Scarazzato, et al, 2017).

Основные проблемы, связанные с использованием процесса химического меднения:

– Длительное время подготовки заготовок в процессе химического меднения (около 2 часов);

– Высокий уровень экологического ущерба;

– Необходимость постоянной работы с формалином;

– Использование каустической соды и подготовка каустического концентрата;

– Перекачивание раствора и наличие вспомогательной емкости;

– Необходимость добавления стабилизаторов в ванну;

– Нестабильность меднящего раствора;

– Значительный объем аналитических процедур;

– Частая необходимость корректировки процесса.

Современный рынок печатных плат требует высококачественной продукции, что предполагает использование новых технологий и современного оборудования. Одной из наиболее доступных альтернатив замене процесса химического меднения является технология, которая успешно вытесняет традиционные методы химического металлизирования, — прямая металлизация. В технологии гальванического покрытия полимеров термин «прямая металлизация» означает процесс нанесения гальванического покрытия на полимерные материалы без стадии восстановления меди и никеля.

Для обеспечения электрической проводимости (Dupenne, 2020), необходимой для последующего гальванического осаждения меди на стенки отверстий ПП, применяются следующие процессы (Augustyn et al, 2017):

• с использованием палладиево-оловянного активатора с полиоксиэтиленом;

• с использованием палладиево-оловянного активатора с ванилином;

• на основе преобразования палладия в сульфид палладия;

• технология Neopact, использующая свободный от олова палладий в коллоидной форме.

Эта группа методов прямой металлизации развивалась как усовершенствование технологии с химическим меднением. Каждый техпроцесс обладает определенными достоинствами и недостатками. Но в свою очередь, эти методы открыли путь к поиску возможности создания электропроводящих покрытий, предшествующих гальваническому меднению, на основе иных материалов — менее химически активных, чем палладий, и при этом более доступных по стоимости и простоте получения. В частности, селективное нанесение электропроводного полимерного покрытия привлекает все большее внимание как

CC BY NC

реальная альтернатива химическому меднению. Преимущества этого метода — высокая производительность и надежность, хорошая совместимость с различными типами ламинатов, малое количество стадий и низкий уровень воздействия на окружающую среду. Интересным аспектом, который заслуживает особого внимания, является возможность модификации известных гальванических покрытий с применением фотохимических процессов, что дает возможность эффективного решения указанных проблем.

Для решения обозначенной проблемы авторами разработан метод низкотемпературного прямого нанесения электропроводящей серебряной плёнки на полипропилен. Ключевой стадией является формирование сорбционного активационного слоя посредством иммерсионной обработки в растворах нитрата серебра и аскорбиновой кислоты (Serikbayeva, et al., 2023).

Методика. Научные исследования проводились на полимерных пластинах из полипропилена с размерами 2см х 5см и толщиной 3мм. Для наглядного наблюдения за ходом химических и фотохимических процессов предпочтение отдавалось полимерам с светлыми оттенками. Все используемые реагенты были аналитической чистоты и соответствовали классификации "х.ч". Составы растворов и последовательность операций при металлизации полимеров представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Процессы и составы растворов, используемых в процессах металлизации полимеров

Процесс	Состав растворов
Обезжиривание	Na_3PO_4- 20г/л, Na_2CO_3 — 20г/л.
Травление	$K_2Cr_2O_7$ — 6,5%, H_2SO_4 —93,5%
Нейтрализация	NaOH 10г/л
Активация	$CuCL_2$ 100г/л
Получение электропроводного слоя	$AgNO_3$ 20г/л $C_2H_8O_6$ 40г/л
Гальваническая металлизация	1)$CuSO_4 \cdot 7H_2O$ - 50г/л; H_2SO_4 - 50г/л; C_2H_5OH.-50г/л. 2) $NiSO_4$ -125г/л $NiCl_2$ — 25 г/л; H_3BO_3— 25 г/л; $HOOCH-CH_2-CH_2-COOH$ — 10 г/л.

Исходная поверхность полимера гидрофобна поэтому необходимо провести предварительную химическую обработку поверхности с целью придания ей гидрофильных свойств. Процесс обработки полимера начинается с использованием щелочного обезжиривателя, за которым следует тщательное промывание водой. После этого следующим шагом является обработка пластика травителем.

Продукты, образующиеся при предварительной обработке полимеров, анализировали методом ИК-спектроскопии.

Для исследования воздействия электромагнитных волн светового излучения в

работе использовались как солнечное излучение, так и излучение искусственного освещения от электроламп. Плотность потока излучения измерялась при помощи специального измерителя солнечного излучения SM 206-SOLAR и, в большинстве случаев, составляла от 800 до 1100 Вт/м^2.

Анализ структуры и состава полученных пленок проводился с использованием растрового электронного микроскопа ISM-6490-LV.

Для определения электропроводности образованных пленок применялся тестер для измерения сопротивления DT-830B. Адгезия серебряных покрытий к полимерной основе проверялась с помощью обычного скотча. Результаты указанных тестов были важными для дальнейшего изучения влияния ионов металла на поверхность пластика.

Свойства гальванических покрытий меди и никеля изучали методом рентгенофазового анализа

Результаты и обсуждения. В результате проведённой предварительной обработки полимерных образцов, включавшей механическое воздействие и химическое травление, на их поверхности формировался модифицированный слой. Согласно литературным данным (Gornukhina, 2006), данный слой содержит функциональные группы, такие как гидроксильные, карбонильные и альдегидные, связанные с частицами полимерной матрицы. Сформированные поверхности были исследованы методами ИК-спектроскопии. На рисунках 1 и 2 представлены ИК-спектры исходной и модифицированной полимерной подложки соответственно.

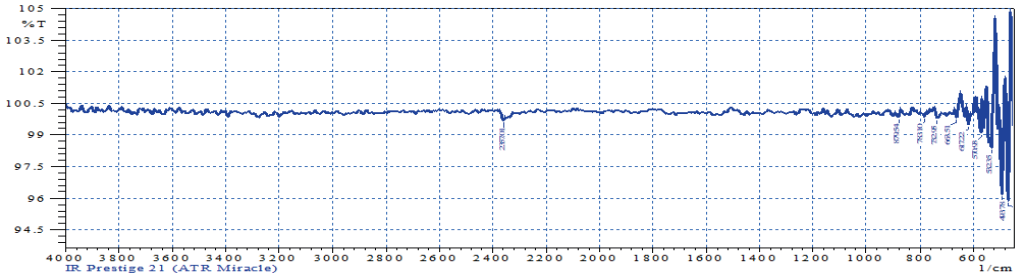


Рисунок 1 - ИК-спектр образца исходного полипропилена

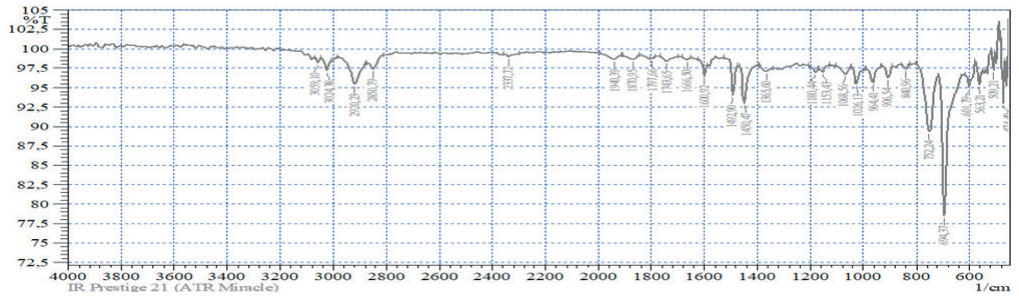


Рисунок 2 - ИК-спектр обработанной полимерной подложки

CC BY NC

ИК-спектроскопия исходного полипропилена (рис. 1) выявила наличие характерных полос: валентных колебаний связей С–Н (2357 см$^{-1}$), а также деформационных колебаний связей С–Н в плоскости (663 см$^{-1}$) и вне плоскости (879 см$^{-1}$), что соответствует группам –CH_2– и =С–Н соответственно (Тарасевич, 2012).

Анализ ИК-спектров (рис. 2) позволил идентифицировать ключевые структурные элементы. Поглощение в областях 3059,10 см$^{-1}$, 2850,79 см$^{-1}$ и 2920,23 см$^{-1}$ соответствует валентным колебаниям связей С–Н в метиленовых (–CH_2–) и метильных (–CH_3) группах, характерным для полипропиленового скелета. Наличие широкой полосы поглощения в диапазоне 1450,47 – 1365,60 см$^{-1}$ может свидетельствовать о присутствии фрагментов с гидроксильными группами (–ОН). Сигналы в области 1068,56 – 1026,13 см$^{-1}$ интерпретируются как валентные колебания связей С–О в простых эфирных или сложноэфирных фрагментах (например, =С–О–С), а не винильной группы, для которой более характерны иные частоты. Поглощения при 964,41 см$^{-1}$, 752,24 см$^{-1}$ и 694,37 см$^{-1}$ относятся к деформационным колебаниям связей С–Н и, вероятно, отражают регулярность (стереорегулярность) макромолекулярной структуры исходного полимера. Сравнительный анализ ИК-спектров исходного и подвергнутого обработке полипропилена однозначно подтверждает химическую модификацию поверхности. Критерием служит появление новых полос поглощения, характерных для карбонильных (>С=О, ~1700-1750 см$^{-1}$) и гидроксильных (–ОН, ~3200-3600 см$^{-1}$) функциональных групп, что указывает на процессы окисления в ходе предварительной обработки.

На поверхности полимера за счёт накопления карбонильных, гидроксильных и карбоксильных групп, относящихся к альдегидам, кетонам и кислотам, формируются различные функциональные группы, придающие поверхности смачиваемость.

После активации поверхности полипропилена с помощью смачивания в растворе дибромида меди с концентрацией 100 г/л и воздействия солнечного излучения, на поверхности образуется пленка, содержащая монобромид меди и элементную медь. Полученная пленка отличается хорошим сцеплением с основой, благодаря формированию ассоциатов с продуктами травления на поверхности. Образование монобромида меди и элементной меди в процессе травления полипропилена может быть представлено уравнениями, включающими соединения альдегидной или кетонной группы, такие как RcCHO.

$$R_cCHO + 2CuBr_2 + H_2O = R_cCOOH + 2CuBr + 2HBr \quad (1)$$

CC BY NC

$$R_cCHO + CuBr + H_2O = R_cCOOH + Cu + HBr \quad (2)$$

Нанесение токопроводящего слоя проводилось по запатентированному ранее способу (Патент на Изобретение РК № 36399). После промывки и сушки образца, проводилось смачивание водным раствором, содержащим нитрат серебра в диапазоне концентрации 20-40 г/л, аскорбиновая кислота в диапазоне 50-100 г/л. При этом на поверхности пластины оставался сорбционный слой этого раствора. В дальнейшем пластину подвергали воздействию электромагнитных волн видимого спектра солнечного излучения. В результате такого воздействия протекает фотохимическая реакция 3.

$$2AgNO_3 + C_6H_8O_6 \xrightarrow{hv} Ag + C_6H_6O_6 + 2HNO_3 \quad (3)$$

Но кроме этой реакции может протекать и чисто химическая реакция 4. Этому способствует довольно высокая концентрация аскорбиновой кислоты.

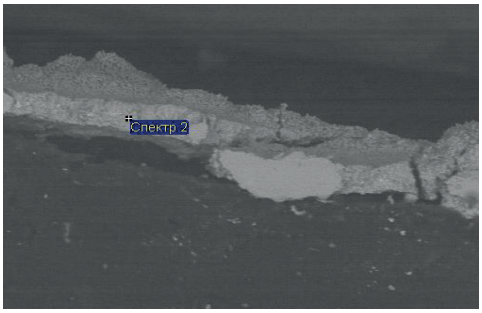
$$2AgNO_3 + C_6H_8O_6 \rightarrow Ag + C_6H_6O_6 + 2HNO_3 \quad (4)$$

Таким образом, эффективные концентрации нитрата серебра и аскорбиновой кислоты обеспечивают образование слоя серебра с характерными физико-химическими свойствами металлического серебра, включая электронную проводимость.

Полученная электропроводная пленка серебра позволяет гальваническим методом нарастить слой практически любого металла до требуемой толщины.

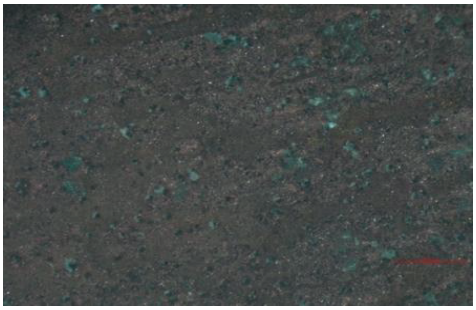
В данной работе проводилось электроосаждение меди на образцах полипропилена гальваностатическим методом. Адгезия оценивается в 100% и может быть результатом связи меди с ядром Ag/ПП. СЭМ-микрофотографии (рис. 3) показывают, что размер зерна медной пленки увеличивался при повышении времени электролиза. При этом медное покрытие становится компактным, хорошо растекающимся по поверхности.

а

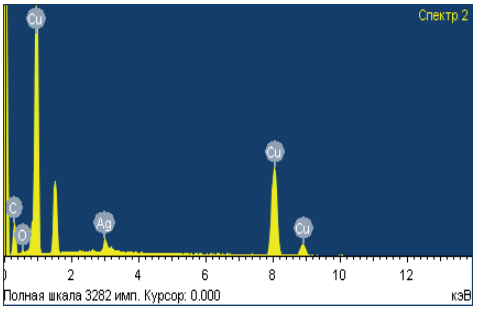


б

CC BY NC



в



г

Рисунок 3 — Характеристики медного покрытия, полученного гальваническим методом: а — общий вид поверхности покрытия (x100); б — микроструктура поперечного сечения (x100); в — морфология поверхности (x1000); г — результаты анализа элементного состава.

Ag/ПП без каких-либо трещин и видимой геометрии кристаллов меди на микрофотографиях СЭМ. Медное покрытие, полученное в течение 15 мин, характеризуется глобулярной структурой. Эта морфология показывает, что на первом этапе формируется медное осаждение по форме Ag. Более длительное время электролиза влияет на текстуру, которая изменяется на компактные зерна кубической формы с геометрией кристаллографии меди.

Прочность на отрыв между гальваническим медным слоем и подложкой является важным показателем для оценки возможности передачи электронного сигнала. В этой работе медное покрытие после нанесения на подложку было испытано на царапание с помощью скотча. Тест скотча проводили над свежеприготовленными образцами (Hamill, et al., 2018). Медное покрытие с маркировкой реза оказалось прочным под быстро отслаивающейся лентой (рис. 4а). В соответствии со стандартом (ISO2409-1992) медное покрытие вообще не отрывалось (рис. 4б), демонстрируя превосходную адгезию для требуемого применения.

а

б

Рисунок 4 — Результаты испытания адгезии гальванического медного покрытия методом решётчатых надрезов с использованием клейкой ленты: а — оценка обычного медного покрытия; б — оценка медного покрытия, проведённая в соответствии со стандартом ISO 2409-1992.

Гальваническое покрытие Ni на подложках ПП тоже исследовалось. Электроосаждение Ni из промышленной ванны, упомянутое в экспериментальном

CC BY NC

разделе, легко достигается, поскольку поверхность ПП уже обработана однородной серебренной пленкой. Полученное никелевое покрытие однородный. СЭМ-изображения никелированных образцов ПП представлены на рис. 5. На микрофотографиях видна однородная никелевое покрытие с глобулярной структурой. Время электролиза оказывает большое влияние на морфологию покрытия. Образованный шаровидный форма увеличивается с увеличением времени электролиза, а текстура становится более плотной и гладкой.

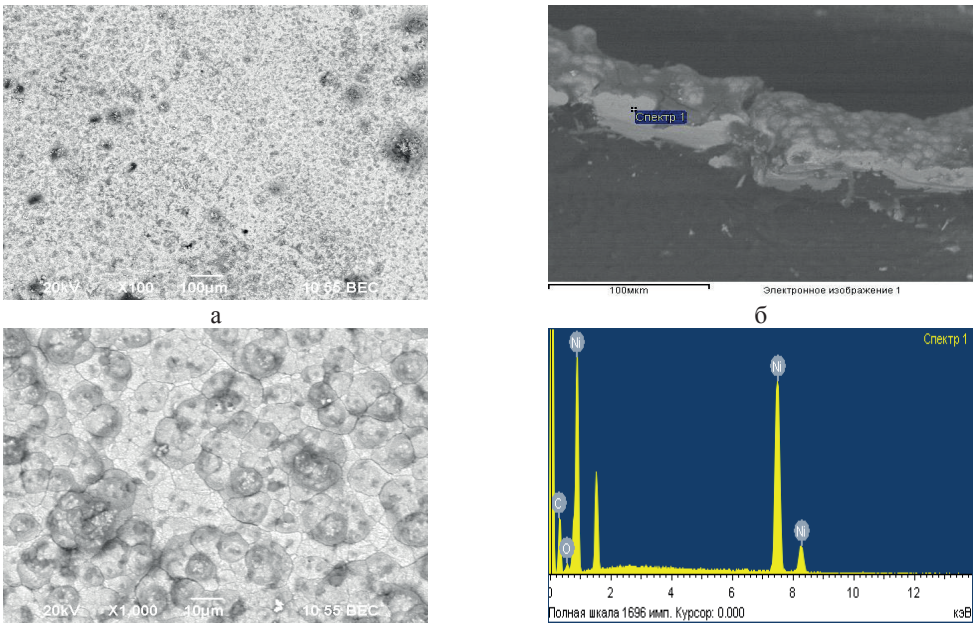


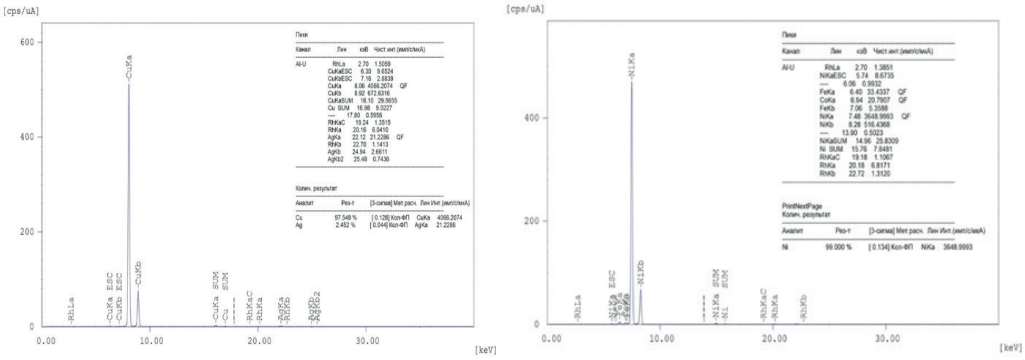
Рисунок 5 — Характеристики никелевого покрытия, полученного гальваническим методом: а — общий вид поверхности покрытия (x100); б — микроструктура поперечного сечения (x100); в — морфология поверхности (x1000); г — результаты анализа элементного состава.

а б

Рисунок 6 — Испытание адгезии гальванического никелевого покрытия методом решётчатых надрезов: а — обычное никелевое покрытие; б — никелевое покрытие, соответствующее требованиям стандарта ISO 2409-1992.

CC BY NC

Никаких трещин не наблюдается адгезия оцениваются в 100% от стандартного теста на клейкой ленте, подтверждающий высокое качество никелевого покрытия. Проведённые исследования показали возможность формирования серебряных плёнок на поверхности полипропилена в присутствии реагентов нитрата серебра и светового излучения. В результате на полимерных подложках, активированных указанными металлами, были получены гальванические покрытия меди и никеля, а также определены их физико-химические и физико-механические свойства. Состав гальванических покрытий, полученных на полимерных поверхностях с электропроводящим слоем серебра, был также подтвержден рентгеновским фазовым анализом (рис. 7).



а) б)

Рисунок 7 - Рентгенофазовый анализ гальванических покрытий меди и никеля, сформированных на полимерной подложке а) гальваническая мед; б) гальваническая никель;

По данным фазового анализа, на дифрактограмме зарегистрированы рефлексы, соответствующие металлической меди и никельи, на фоне пиков исходного полимера. Разработана принципиальная схема формирования на поверхности полимера плёнок, обладающих электропроводящими свойствами (рис. 8).

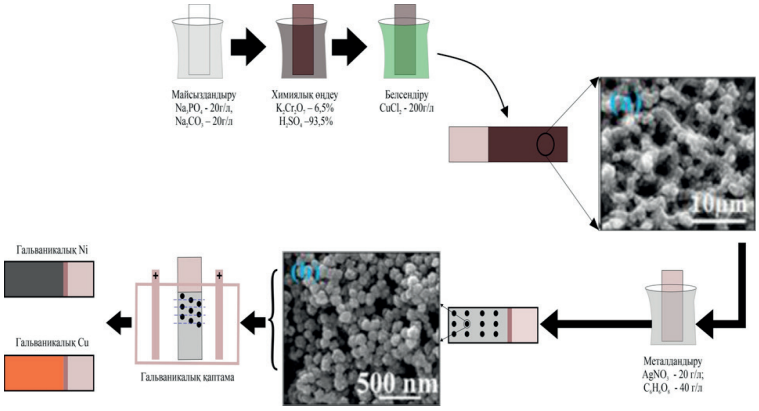


Рисунок 8 - Общие этапы процесса получения гальванического покрытия на поверхности полипропилена с использованием электропроводящего слоя.

CC BY NC

Вывод. Проведенное исследование доказало эффективность разработанного метода металлизации полипропилена, основанного на формировании специального электропроводящего слоя. Ключевым фактором успеха стала комплексная подготовка поверхности, включающая ее механическую и химическую обработку с последующей активацией раствором хлорида меди для создания активных центров. Применение авторской методики нанесения сорбционной пленки позволило получить высокоадгезивный электропроводящий подслой, что обеспечило осаждение равномерных и качественных гальванических покрытий меди и никеля.

Научная значимость работы заключается в разработке целостной технологической цепочки, переводящей химически инертный диэлектрик в состояние, пригодное для стандартных процессов гальванопластики. Практическая ценность исследования подтверждается созданием конкурентоспособной технологии, которая открывает новые возможности для применения металлизированных полимеров в высокотехнологичных отраслях, таких как электроника, транспорт и системы связи. Таким образом, данная работа вносит существенный вклад в функционализацию полимерных материалов, предлагая надежное решение для их металлизации и расширяя потенциал промышленного использования.

Литература

Aminul Islam, Hans Nørgaard Hansen, Peter Torben Tang, (2017) Direct electroplating of plastic for advanced electrical applications, CIRP Annals. — Volume 66. — Issue 1. — P 209-212. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.124

Augustyn P., Rytlewski P., Moraczewski K. et al. (2021) A review on the direct electroplating of polymeric materials.J Mater Sci 56. — P. 14881—14899. https://doi.org/10.1007/s10853-021-06246-w

Dupenne D., Lonjon A., Dantras E., Pierré T., Lubineau M., Lacabanne C., (2020) Carbon fiber reinforced polymer metallization via a conductive silver nanowires polyurethane coating for electromagnetic shielding. J Appl Polym Sci, 50146. https://doi.org/10.1002/app.50146

Gornukihna, O.V, (2005) Polypropylene surface modified with biologically active compounds. Dissertation of the Candidate of Chemical Sciences, Ivanovo State University of Chemical Technology

Hamill L, Nutt S. (2018) Adhesion of metallic glass and epoxy in composite-metal bonding. Compos B Eng 134:186—92. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.044

Mai T.T., Schultze J.W., Staikov G. (2004) Relation between surface preconditioning and metal deposition in direct galvanic metallization of insulating surfaces. J Solid State Electrochem. — №8. — P. 201—208. https://doi.org/10.1007/s10008-003-0426

Mai T.T., Schultze J.W., Staikov G., Muñoz A.G. (2005) Mechanism of galvanic metallization of CoS-activated insulating polymer surfaces. Thin Solid Films. — Vol. 488. — Iss.1—2. — P. 321-328. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.04.069

Mehdizadeh M, Khorasanian M, Lari Baghal SM. (2018) Direct electroplating of nickel on ABS plastic using polyaniline—silver surface composite synthesized using different acids. J Coatings Technol Res 15:1433—42. https://doi.org/10.1007/s11998- 018-0075-2

Pan C.T. (2004) Selective electroless copper plating micro-coil assisted by 248 nm excimer laser // Microelectronic Engineering. — Vol. 71. — Iss. 3—4. — P.242-251. https://doi.org/10.1016/j.mee.2003.12.003

Ruslan Melentiev, Arief Yudhanto, Ran Tao, Todor Vuchkov, Gilles Lubineau, (2022) Metallization of polymers and composites: State-of-the-art approaches, Materials & Design, Volume 221, 110958, ISSN 0264-1275, https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110958

Scarazzato Z. Panossian J.A.S. Tenório V. Pérez-Herranz D.C.R. Espinosa (2017) A review of cleaner production in electroplating industries using electrodialysis, Journal of Cleaner Production. — Volume 168. — P. 1590-1602. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.152

Serikbayeva B. (2024). Полимерлердің тікелей фотохимиялық күмістенуі. Academic Journal of Physical and Chemical Sciences, (1). — P. 230—243. https://doi.org/10.32014/2024.2518-1483.269

Serikbayeva B.; Satayev M., Koshkarbayeva S.; Azimov A.; Amanbayev K.; Sagitova G.; Suigenbayeva A.; Narmanov M.; Kolesnikov A. (2023) Photochemical Metallization: Advancements in Polypropylene Surface Treatment. Polymers, 15, 3687. https://doi.org/10.3390/polym15183687

Патент на Изобретение РК. — № 36399.

Тарасевич Б.Н. (2012) Основы ИК-спектроскопии с переобразованием Фурье. Подготовка проб в ИК-спектроскопии—М.: МГУ. — 222 с.

References

Aminul Islam, Hans Nørgaard Hansen, Peter Torben Tang, (2017) Direct electroplating of plastic for advanced electrical applications, CIRP Annals. — Volume 66. — Issue 1. — P 209-212. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.124 (in English)

Augustyn P., Rytlewski P., Moraczewski K. et al. (2021) A review on the direct electroplating of polymeric materials.J Mater Sci 56. — P. 14881—14899. https://doi.org/10.1007/s10853-021-06246-w (in English)

Dupenne D, Lonjon A, Dantras E, Pierré T, Lubineau M, Lacabanne C, (2020) Carbon fiber reinforced polymer metallization via a conductive silver nanowires polyurethane coating for electromagnetic shielding. J Appl Polym Sci, 50146. https://doi.org/10.1002/app.50146 (in English)

Gornukihna, O.V, (2005) Polypropylene surface modified with biologically active compounds. Dissertation of the Candidate of Chemical Sciences, Ivanovo State University of Chemical Technology (in English)

Hamill L, Nutt S. (2018) Adhesion of metallic glass and epoxy in composite-metal bonding. Compos B Eng 134:186—92. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.044 (in English)

Mai T.T., Schultze J.W., Staikov G. (2004) Relation between surface preconditioning and metal deposition in direct galvanic metallization of insulating surfaces. J Solid State Electrochem. — №8. — P. 201—208. https://doi.org/10.1007/s10008-003-0426 (in English)

Mai T.T., Schultze J.W., Staikov G., Muñoz A.G. (2005) Mechanism of galvanic metallization of CoS-activated insulating polymer surfaces. Thin Solid Films. — Vol. 488. — Iss.1—2. — P. 321-328. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.04.069 (in English)

Mehdizadeh M, Khorasanian M, Lari Baghal SM. (2018) Direct electroplating of nickel on ABS plastic using polyaniline—silver surface composite synthesized using different acids. J Coatings Technol Res 15:1433—42. https://doi.org/10.1007/s11998- 018-0075-2(in English)

Pan C.T. (2004) Selective electroless copper plating micro-coil assisted by 248 nm excimer laser // Microelectronic Engineering. — Vol. 71. — Iss. 3—4. — P.242-251. https://doi.org/10.1016/j.mee.2003.12.003 (in English)

Patent na Izobretenie RK. — № 36399 [Patent for Invention RK № 36399] (in Russian)

Ruslan Melentiev, Arief Yudhanto, Ran Tao, Todor Vuchkov, Gilles Lubineau, (2022) Metallization of polymers and composites: State-of-the-art approaches, Materials & Design. — Volume 221, 110958. — ISSN 0264-1275. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110958 (in English)

Scarazzato Z. Panossian J.A.S. Tenório V. Pérez-Herranz D.C.R. Espinosa (2017) A review of cleaner production in electroplating industries using electrodialysis, Journal of Cleaner Production. — Volume 168. — P. 1590-1602. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.152 (in English)

Serikbayeva B.; Satayev M.; Koshkarbayeva S.; Azimov A.; Amanbayeva K.; Sagitova G.; Suigenbayeva A.; Narmanov M.; Kolesnikov A, (2023) Photochemical Metallization: Advancements in Polypropylene Surface Treatment. Polymers, 15, 3687. https://doi.org/10.3390/polym15183687 (in English)

Serikbayeva, B. (2024). Polimerlerdiń tikelej fotohimijalyq kymistenui [Direct photochemical silvering of polymers] Academic Journal of Physical and Chemical Sciences. — P. 230—243. https://doi.org/10.32014/2024.2518-1483.269 (in Kazakh).

Tarasevich B.N. (2012) Osnovy IK-spektroskopii s pereobrazovaniem Fur'e. Podgotovka prob v IK-spektroskopii [Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Sample preparation in IR spectroscopy] — M.: MGU, - 222 s (in Russian).

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 172–183

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.392

ҒТАХР (МРНТИ) 61.29.39
ӘОЖ (УДК) 661.846:66.082

©A.P. Auyeshov, Ch.Z. Yeskibayeva*, A.K. Dikanbayeva*, 2025.
M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan.
E - mail**:** dikanbaeva86@mail.ru

RESOURCE-EFFICIENT UTILIZATION OF SERPENTINITE WASTE FOR MAGNESIUM SULFATE PRODUCTION

Auyeshov Abdrazakh — South Kazakhstan University named after M. Auezov, Head of the SRL "Applied Chemistry", Shymkent, Kazakhstan,
E-mail: centersapa@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000 0002-3504-9117;
Yeskibayeva Chayzada — South Kazakhstan University named after M. Auezov, chief specialist of the SRL "Applied Chemistry", Shymkent, Kazakhstan,
E-mail: yeskibayeva@internet.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8049-8851;
Dikanbayeva Aizhan — South Kazakhstan University named after M. Auezov, employee of the SRL "Applied Chemistry" Shymkent, Kazakhstan,
E-mail: dikanbaeva86@mail.ru; ORCID: https://orcid. org/0000-0003-4982-1566.

Abstract. This study presents a techno-economic assessment of technologies for producing magnesium sulfate from serpentinite waste generated during the mining and processing of chrysotile asbestos, which poses an environmental hazard. The investigation focuses on a new alternative method for processing powdered serpentinite waste (PTW), including stages of low-concentration sulfuric acid leaching and subsequent neutralization of the resulting sulfate solution using serpentinite waste thermally activated at 750 °C. The approach aims to evaluate the efficiency of magnesium sulfate production, the quality of the final product, and the potential profitability of the technology. It was demonstrated that the combined leaching and neutralization of serpentinite waste enables the production of magnesium sulfate with a total yield of 46%, yielding a high-quality commercial product — $MgSO_4 \cdot 7H_2O$. Preliminary techno-economic indicators, calculated based on material and energy inputs (excluding fixed costs) and average market prices of $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, indicate the economic feasibility of the proposed technology. A comparative analysis with conventional magnesium sulfate production methods showed that the use of local serpentinite waste and its thermally activated form for neutralization significantly reduces raw material costs and enhances profitability. The study establishes that the proposed processing scheme has high technological efficiency and can be integrated into existing chrysotile waste

processing facilities. Overall, the findings confirm the feasibility of industrial-scale magnesium sulfate production based on Kazakhstan's local mineral resources, offering an environmentally responsible and resource-efficient approach while generating a valuable chemical product for agricultural and industrial applications.

Keywords: magnesium sulfate, serpentinite waste, sulfuric acid leaching, thermally activated serpentinite

Financing. *This study was conducted with the financial support of the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (BR21882242).*

©А.П. Ауешов, Ч.З. Ескибаева*, А.К. Диканбаева*, 2025.
М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан.
E-mail**:** dikanbaeva86@mail.ru

СЕРПЕНТИНИТ ҚАЛДЫҒЫНАН МАГНИЙ СУЛЬФАТЫН АЛУДЫҢ ТЕХНИКАЛЫҚ-ЭКОНОМИКАЛЫҚ ЗЕРТТЕУІ

Ауешов Абдразах — М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, «Қолданбалы химия» ҒЗЗ меңгерушісі, Шымкент, Қазақстан,
E-mail: centersapa@mail.ru; ORCID: https:// orcid.org/0000-0002-3504-9117;
Ескибаева Чайзада — М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, «Қолданбалы химия» ҒЗЗ бас маманы, Шымкент, Қазақстан,
E-mail: yeskibayeva@internet.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8049-885;
Диканбаева Айжан — М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, «Қолданбалы химия» ҒЗЗ қызметкері, Шымкент, Қазақстан,
E-mail: dikanbaeva86@mail.ru; ORCID: https:// orcid.org/0000-0003-4982-1566.

Аннотация. Бұл мақалада хризотил асбестті өндіру және байыту кезінде пайда болатын серпентинит қалдықтарынан магний сульфатын алу технологиясының технико-экономикалық зерттеулері ұсынылған. Зерттеу барысында ұнтақталған технологиялық қалдықтарды төмен концентрациялы күкірт қышқылы ерітіндісімен өңдеу және алынған сульфат ерітіндісін 750 °C-та термоактивтенген серпентинит қалдығымен бейтараптау және тазарту кезеңдері жан-жақты қарастырылған. Бұл тәсіл магнийдің тиімді шығуын қамтамасыз етіп, қосымша иондармен ластануды азайтуға мүмкіндік береді. Бұл тәсіл магний сульфатын $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 46% өнімділікпен және тазалығы жоғары сапада алуға мүмкіндік береді. Элементтік талдау барысында магний сульфатының құрамында кальций мен темірдің мөлшері өте аз екені анықталды, бұл өнімнің коммерциялық тұрғыдан тартымдылығын арттырады. Материалдық және энергетикалық шығындар, сондай-ақ өнімнің орташа нарықтық бағалары негізінде, магний сульфатын өндірудің технико-экономикалық көрсеткіштері анықталып, технологияның экономикалық тиімділігін бағалауға мүмкіндік берді. Салыстырмалы талдау көрсеткендей, жергілікті серпентинит қалдықтарын магний сульфатын алу өндірісінде пайдалану және оның термоактивтенген формаларын қышқыл

ерітіндісін бейтараптауда қолдану шығындарды айтарлықтай азайтып, өндірістің рентабельділігін арттырады. Сонымен қатар, ұсынылған технология экологиялық тұрғыдан қауіпсіз, тұрақты өндіріс процессін қамтамасыз етеді және ресурстарды тиімді пайдалануға мүмкіндік береді. Бұл технология қайта өңдеу арқылы техногендік қалдықтардың қоршаған ортаға тигізетін зиянды әсерін азайтады. Жаңа өңдеу технологиялық сұлбасы жоғары тиімділікке ие болып, хризотил қалдықтарын қайта өңдейтін кәсіпорындарға енгізілуі мүмкін. Зерттеу нәтижелері Қазақстандағы жергілікті минералдық-шикізат базасына сүйене отырып, магний сульфатының өнеркәсіптік өндірісін ұйымдастырудың перспективтілігін нақты дәлелдейді.

Түйін сөздер: магний сульфаты, серпентинит қалдықтары, күкіртқышқылды сілтісіздендіру, термобелсендірілген серпентинит

©А.П. Ауешов , Ч.З. Ескибаева *, А.К. Диканбаева*, 2025.
Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан.
E - mail**:** dikanbaeva86@mail.ru

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ СУЛЬФАТА МАГНИЯ ИЗ СЕРПЕНТИНИТОВОГО ОТХОДА

Ауешов Абдразах — Заведующий НИЛ «Прикладная химия», Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан,
E-mail: centersapa@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000 0002-3504-9117;
Ескибаева Чайзада — Главный специалист НИЛ «Прикладная химия», Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан,
E-mail: yeskibayeva@internet.ru; ORCID: https:// orcid.org/0000-0002-8049-8851;
Диканбаева Айжан — Сотрудник НИЛ «Прикладная химия», Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан,
E-mail: dikanbaeva86@mail.ru; ORCID: https://orcid. org/0000-0002-9859-5545.

Аннотация. В статье представлено технико-экономическое исследование технологии получения сульфата магния из серпентинитового отхода, образующегося при добыче и обогащении хризотил-асбеста и представляющего экологическую опасность. Рассмотрены основные аспекты новой альтернативной технологии переработки порошкообразного отхода хризотилового сырья, включающей стадии сернокислотного выщелачивания растворами серной кислоты низкой концентрации и последующей нейтрализации продуктивного сульфатного раствора с использованием термоактивированного при 750 °C серпентинита. Проведена оценка эффективности получения сульфата магния, качества конечного продукта и потенциальной рентабельности предложенной технологии. Показано, что сочетание процессов выщелачивания и нейтрализации позволяет получить сульфат магния с общим выходом 46% и высокими качественными характеристиками товарного продукта $MgSO_4 \cdot 7H_2O$. На основе расчетов материальных и энергетических затрат (без учета постоянных расходов) и средней рыночной стоимости $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ определены предварительные

CC BY NC

технико-экономические показатели, позволяющие прогнозировать экономическую эффективность технологии. Проведен сравнительный анализ с известными методами получения сульфата магния. Установлено, что использование местных серпентинитовых отходов и их термоактивированных форм для нейтрализации кислых растворов выщелачивания позволяет существенно снизить затраты на сырьё и повысить рентабельность производства. Показано, что новая технологическая схема обладает высокой эффективностью и может быть интегрирована в действующие предприятия по переработке хризотиловых отходов. Результаты исследования подтверждают перспективность организации промышленного производства сульфата магния на основе минерально-сырьевой базы Казахстана.

Ключевые слова: сульфат магния, серпентинитовые отходы, сернокислотное выщелачивание, термоактивированный серпентинит

Introduction. Serpentinites are magnesium-rich silicate rocks containing significant amounts of silica and have been widely investigated as raw materials for producing magnesium and its compounds. These rocks, including industrial waste generated during the processing of chrysotile-asbestos ores, represent a valuable source of magnesium (Kalichenko et al. 2007; Sagarunyan et al. 2014; Shevko et al. 2022; Kozlov et. al. 2015; Gabdullin et al. 2012; Fedorôcková et al. 2016; Sierra et al. 2018). Various processing methods for serpentinites have been proposed, each with specific technological and economic limitations (Auyeshov et al. 2024).

The serpentinite ores from the Zhitikara deposit, located on the eastern slope of the Southern Urals in Kazakhstan, belong to the Bazhenov geological-industrial type and consist primarily of serpentinized peridotites, dunites, and serpentinites (Dzhafarov 2013).

The average chrysotile content in these ores is approximately 4.5–5.5%. The mineralogical composition includes chrysotile, lizardite, and antigorite ($Mg_3Si_2O_5(OH)_4$), along with brucite ($Mg(OH)_2$) and magnetite (Fe_3O_4). The processing plant, JSC "Kostanay Minerals," has an annual production capacity of approximately 500,000 tons of chrysotile, and over 65 years of operation, it has generated substantial volumes of waste. This waste, which may still contain residual chrysotile fibers, poses environmental and health risks due to airborne dispersion (Punenkov et al. 2022).

To mitigate these issues, several approaches for valorizing the tailings have been proposed, with particular attention to extracting magnesium from serpentinite waste. Compared to dolomite, which contains 20–22 wt.% Mg, serpentinite can have a higher magnesium content of 25–26 wt.%, making it a promising alternative raw material. Previous studies have investigated its leaching behavior using various acids, including sulfuric (Błońska et al. 2016) and hydrochloric acid (Mpouras et al. 2017; Fouda et al. 1996; Shaban et al. 2018; Huang et al. 2017; Teixeira et al. 2012). However, despite extensive research, there is still limited practical implementation of technologies for producing specific industrial-grade magnesium compounds from serpentinite, especially those supported by techno-economic analyses.

In response to this gap, the present study proposes a novel process scheme for the production of magnesium sulfate ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) from serpentinite waste generated during chrysotile processing at the Zhitikara deposit. The process involves sulfuric acid leaching followed by neutralization using thermally activated serpentinite, combined with a preliminary economic evaluation of the key process stages. The aim is to assess the resource and economic efficiency of this technology and the feasibility of utilizing industrial waste for the production of high-purity magnesium compounds.

Materials and Methods. *Sample preparation.* Powdered process waste (PTW) from the chrysotile beneficiation plant at JSC "Kostanay Minerals" was used as the main raw material. The chemical and mineralogical composition of this waste closely resembles that of the original chrysotile ore. The material appears as a bluish-gray fibrous powder without lumps or solid inclusions, collected using bag-type dust collection systems used during the crushing and fractionation of chrysotile raw materials. The elemental composition of the PTW is presented in Table 1.

Table 1. Elemental composition of PTW

Element	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Total
Elemental composition of PTW, wt.%	2.58	51.00	25.00	0.54	17.45	–	0.50	2.93	100.00

Thermal activation. Thermal treatment of the PTW was carried out at 750°C for one hour in order to prepare it for use as a neutralizing and purifying reagent for the sulfate solution. The treatment significantly altered the particle size distribution, eliminating fractions smaller than 0.9mm. The dominant particle size fraction after calcination was in the range of 0.14—0.08—0.07mm, representing approximately 94% of the material. The thermally activated PTW was used without any further grinding.

Analytical instrumentation. Analytical measurements were performed using a JSM-6490LV scanning electron microscope (JEOL, Japan) equipped with an INCA Energy 350 EDS system, and an iCAP-Q mass spectrometer (Thermo Scientific, Germany). All analyses were conducted in accordance with established laboratory protocols to ensure the accuracy and reproducibility of results.

Results and discussion. *Leaching of process tailings (PTW) with sulfuric acid*

Leaching of powdered PTW with sulfuric acid was carried out according to the following stoichiometric reaction:

$$Mg_3Si_2O_5(OH)_4 + 3H_2SO_4 \rightarrow 3MgSO_4 + 2SiO_2 + 5H_2O \quad (1)$$

To ensure complete reaction of magnesium with sulfuric acid and account for the presence of trace metal impurities, a slight excess of acid was introduced. The leaching process also follows the simplified ionic reaction:

$$Mg^{2+} + H_2SO_4 \rightarrow MgSO_4 + 2H^+ \quad (2)$$

CC BY NC

A molar ratio of 1.0:1.046 (Mg^{2+}: H_2SO_4) was selected. The stoichiometric amount of sulfuric acid was calculated based on the total magnesium content in PTW.

Leaching was performed in a round-bottom flask equipped with a thermometer, reflux condenser, sampler, and a propeller stirrer. A mixture of 500 g of PTW and 1000 cm³ of distilled water was placed into the flask. Under continuous stirring at 200—300 rpm, 415 cm³ of 92% sulfuric acid (density = 1.824 g/cm³) was added dropwise in three portions of 150—200 cm³ using a dropping funnel. The total mass of the reaction mixture was 2256 g, resulting in a liquid-to-solid (L:S) ratio of 4.51.

Upon acid addition, the suspension rapidly heated to 100—105°C within 2—3 minutes, accompanied by intense foaming and boiling. To avoid overheating, acid was added in intervals. After the final portion, gentle boiling was maintained throughout the remainder of the 3-hour leaching period.

The resulting mixture appeared as a dense bluish-gray suspension with a measured pH of 0.57. Aliquots (10 mL) were taken at 30, 60, 120, and 180 minutes. Samples were filtered, and the residues were washed, dried at 105°C, and analyzed chemically. Magnesium concentration was determined both instrumentally and by classical chemical titration, with a relative error not exceeding 2—3%, confirming the consistency of results. The elemental compositions of both filtrates and residues for the different leaching durations are summarized in Table 2.

Table 2. Elemental composition of the filtrate and insoluble residue at different leaching durations (30, 60, 120, and 180 min, t = 100—105°C)

Element	Leaching time, min							
	30	60	120	180	30	60	120	180
	Filtrate, wt.%				Residue, wt.%			
C	—	—	—	—	4.85	4.36	5.19	4.43
O	5.09	57.10	53.65	57.41	54.17	53.53	53.79	53.98
Mg	10.36	10.71	11.11	11.69	3.31	2.99	2.42	2.39
Al	0.48	0.42	0.37	0.30	0.33	—	—	—
Si	4.10	3.82	4.25	3.86	34.53	36.06	36.36	36.45
S	28.99	28.02	28.46	28.42	1.50	1.31	1.19	1.56
Ca	—	0.27	—	—	0.22	0.28	—	—
Fe	1.98	2.66	2.16	2.32	1.10	1.46	1.06	1.19
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
m, g ($MgSO_4$)	168.65	168.90	171.60	167.68	—	—	—	—
Note: "—" indicates values below the detection limit or not determined.								

Analysis of the data in Table 2 shows that within 30 minutes from the start of PTW leaching with sulfuric acid, nearly all elements present in the waste are transferred into the sulfate solution, with the exception of calcium, which appears in the solution only after 60 minutes. However, a significant change in the concentrations of the main elements in the sulfate solution and insoluble residue is not observed in the time interval from 30 to 180 minutes. Specifically, the magnesium content in the solution increases by only 12.8%, iron by 17%, and silicon decreases by 5.8%. In the insoluble residue, the concentrations of these elements also change accordingly: magnesium decreases

by 27%, silicon increases by 5.5%, and iron by 17%. These results confirm that the maximum rate of PTW dissolution during acid leaching occurs within the first 30 minutes of contact with sulfuric acid.

The mass of magnesium sulfate formed during the leaching of 100 g of PTW with sulfuric acid at 98 °C after 30 minutes was 168.65 g (containing 10.36% Mg, equivalent to 16.90 g), which corresponds to 70% of the theoretical yield. It is also notable that the yield of magnesium sulfate in the solution does not increase significantly beyond the 30—180-minute range (168.65, 168.90, 171.60, and 167.68 g).

Neutralization and purification of the productive sulfate solution using thermally activated PTW at 750°C. Under the same conditions, the leaching of PTW with sulfuric acid was conducted, but the leaching time was limited to 30 minutes. Upon completion of this step, 1.0 dm³ of distilled water was added to the acidic suspension. Thermally activated PTW (TA-PTW), previously heated at 750°C for one hour, was used as the neutralizing agent. At this temperature, the alkaline reactivity of the material is significantly enhanced due to internal structural transformations of the serpentinite, including the formation of periclase (Dikanbayeva et al. 2021; Yeskibayeva et al. 2024). Neutralization was carried out until the suspension reached a pH of 8.3. The resulting mixture was then filtered, and the solid residue was washed twice with 0.5 L of distilled water. It is noteworthy that at pH = 8.3, both filtration and washing were completed efficiently. The obtained filtrate was almost completely free of impurity metal ions, with the exception of trace amounts of calcium.

Table 3 presents the results of elemental analysis of both the filtrate and the solid residue after neutralization of the acidic suspension using thermally activated PTW (TA-PTW). The data reflect the composition of the purified productive magnesium sulfate solution and the remaining solid phase.

Table 3. Elemental analysis of the neutralized sulfate suspension at pH = 8.3: initial materials, filtrates after phase separation, and solid residue (OS)

	Initial materials		Neutral suspension		
Element	PTW	TA-PTW	Filtrate I	Filtrate II	Residue (OS)
C	2.58	2.54	—	—	9.35
O	51.00	45.22	59.90	61.90	48.55
Mg	25.00	27.89	16.60	15.64	11.91
Al	0.54	0.46	—	—	0.56
Si	17.45	19.17	—	—	23.60
S	—	—	23.50	22.21	0.43
Ca	0.50	0.53	—	0.25	0.30
Fe	2.93	4.19	—	–	5.30
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Note: "—" indicates values below the detection limit or not determined.					

The yield of magnesium sulfate during the neutralization of the acidic PTW suspension using TA-750 reaches 46% of the total magnesium content in the initial materials (PTW and TA-PTW), while magnesium recovery relative to the amount of sulfuric acid used was approximately 100%.

CC BY NC

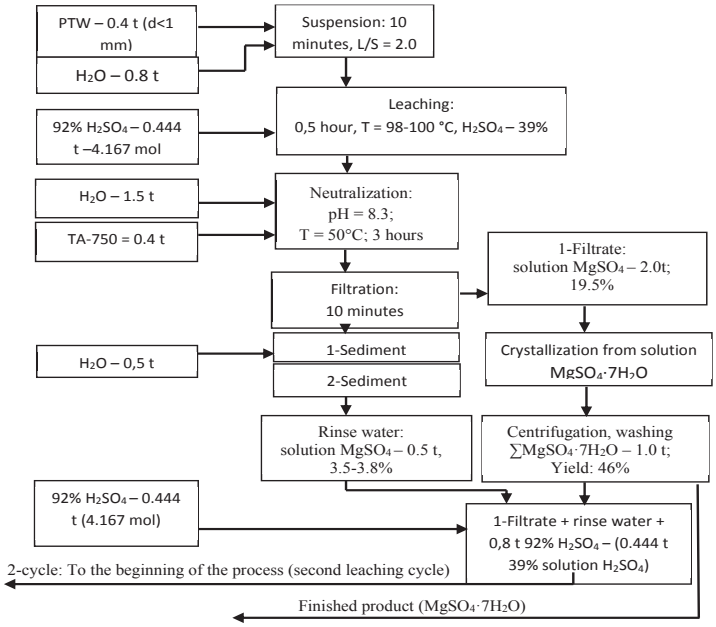
The concentration of magnesium sulfate in the filtrate obtained after leaching the first portion of PTW (Filtrate I) was 243 g/L (24.3%). When a second, fresh portion of PTW was leached using this magnesium sulfate solution (with sulfuric acid concentration adjusted for repeated leaching), the concentration of magnesium sulfate in Filtrate II increases to 47—48%. Calcium remained in the final product at a concentration of 0.014—0.016% (see Table 3, residue—OS).

The solid residue obtained after neutralization of the acidic PTW suspension using TA-PTW contained the following elements: Mg = 11.91%, Al = 0.56%, Si = 23.56%, S = 0.43%, Ca = 0.30%, and Fe = 5.30%. These values suggest the potential reuse of the residue as a magnesium- and silicon-containing fertilizer for agricultural applications.

The use of TA-PTW as a neutralizing reagent offers several advantages over conventional reagents such as NaOH:

1. It additionally enriches the productive sulfate solution with magnesium due to acid—base interactions between TA-PTW and the acidic suspension;
2. It does not introduce any foreign elements into the sulfate system from external sources;
3. Owing to its specific structural and adsorptive properties, it ensures more efficient purification of the magnesium sulfate solution from impurity metal ions, except for a minor amount of calcium.

The production of magnesium sulfate heptahydrate using the described leaching (Figure 1), neutralization, and purification processes with TA-PTW enables the formation of high-purity $MgSO_4 \cdot 7H_2O$.



2-cycle: To the beginning of the process (second leaching cycle)

Finished product ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)

Figure 1 - Technological scheme for the production of magnesium sulfate heptahydrate ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) from chrysotile processing waste (PTW)

Comparative analysis (Table 4) demonstrates that the purity characteristics of the synthesized magnesium sulfate comply with the requirements of GOST 4523-77, confirming its classification as a marketable product with established commercial value.

Table 4. Comparison of magnesium sulfate heptahydrate ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) quality indicators with GOST 4523-77

No	Indicator	Norm		Experimentally obtained $MgSO_4 \cdot 7H_2O$*
		Chemically pure	Pure for analysis (h.d.a.)	
1	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (magnesium sulfate heptahydrate), %	99.5	99.5	99.5
2	Water-insoluble substances, %	0.00200	0.00200	0.00100
3	H_2SO_4 (acidity), %	0.00200	0.00200	–
4	MgO (alkalinity), %	0.00100	0.00100	0.00100
5	Cl (chlorides), %	0.00050	0.00200	–
6	NH_4 (ammonium salts), %	0.00100	0.00200	–
7	Fe (iron), %	0.00020	0.00030	0,00024
8	Ca (calcium), %	0.01000	0.02000	0.01400-0.01600
9	Mn (manganese), %	0.00050	0.00100	0.00070
10	As (arsenic), %	0.00004	0.00004	–
11	Pb (heavy metals), %	0.00010	0.00010	–
12	Zn (zinc), %	0.00100	0.00500	0.00020

Note: * — Analysis performed using Thermo Scientific iCAP-Q Mass Spectrometer.
"–" indicates values below the detection limit or not determined.
h.d.a., highly defined analytical.

Based on the scaled data from Table 3, the resource and energy efficiency of the proposed technology for producing 1.0 t of $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ from PTW was assessed, considering only material and energy inputs and excluding capital and operational costs. The calculations were performed using average market prices for sulfuric acid and electricity tariffs in Kazakhstan in 2024 (0.065 $/kWh) (Table 5).

Table 5. Resource and energy efficiency of the technology for producing commercial-grade magnesium sulfate heptahydrate ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) from PTW (serpentinite waste)

1) Specific consumption of raw materials and energy required to produce 1 ton of $MgSO_4 \cdot 7H_2O$			
Resource type	Unit	Consumption per product	Role
PTW	tons	0.40	Raw material
TA-PTW		0.40	Raw material
Sulfuric acid (density = 1.824 g/cm^3)	tons	0.44	Reagent 1
Technical water	tons	2.80	Reagent 2
2) Specific consumption of raw materials and energy resources to produce 0.400 tons of TA- PTW			
Resource type	Unit	Consumption per product	Role
PTW	tons	0.46	Raw material
Electricity	kWh	92.40	Energy input
3) Resource and energy efficiency $MgSO_4 \cdot 7H_2O$			

CC BY NC

Articles	Unit	Quantity	Price, $/t	Price, $
Income part				175.00
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	tons	1.00	175.00	175.00
Expenditure part				60.00
PTW	tons	0.46	3.00	1.40
TA- PTW	tons	0.40	3.00	1.20
Sulfuric acid (density=1.824 g/ cm^3	tons	0.44	100.00	44.40
Water (technical)	tons	2.80	1.00	2.80
Electricity (firing)	kWh	92.40	0.07	6.00
Note: Estimated based on average market prices for 2024 in Kazakhstan: sulfuric acid — $100/t; technical water — $1/t; electricity — $0.07/kWh. Labor, depreciation, and overhead costs are not included.				

Thus, the gross profit, excluding fixed costs, for the production of magnesium sulfate ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) is $115/t. The break-even price (P_{min}) is $60/t, and since P_{min}< $175/t, this indicates that magnesium sulfate production by this method is economically viable. From an economic perspective, the process demonstrates a sufficiently positive balance. Industrial production of magnesium sulfate heptahydrate ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) is carried out using several technological routes, which differ both in terms of the raw materials employed and the associated cost structures. The most common approaches include: 1) extraction from natural kieserite/epsomite; 2) processing of magnesite/ dolomite using sulfuric acid. Under typical prices for industrial H_2SO_4 and energy resources, the production costs via these conventional routes generally exceed those of direct processing of serpentinite waste, reaching approximately from 150 to 220 USD/t. Therefore, reducing the costs of raw materials (PTW) and the neutralizing agent (TA-PTW) represents a critical factor in enhancing the economic efficiency of the proposed technology.

Conclusions. The techno-economic study of the processes of sulfuric acid leaching of PTW using low-concentration sulfuric acid solutions and the neutralization of the resulting sulfate solution with thermally activated serpentinite waste (TA-PTW) demonstrates that this technology can achieve a total magnesium sulfate yield of 46% relative to the theoretical magnesium content in the raw serpentinite involved in the extraction processes, producing a commercial-quality product — $MgSO_4 \cdot 7H_2O$.

The techno-economic indicators, determined based on calculations of material and energy consumption and the average market price of the product, show promisingly high values, confirming the resource and economic efficiency of the proposed magnesium sulfate production technology from PTW, as well as the feasibility of the repeated utilization of chrysotile-based technogenic waste.

Simple calculations show that 1.0 ton of PTW can yield magnesium sulfate ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) products valued at $175-200. At the same time, success from both technological and economic standpoints is ensured by the use of thermally activated PTW for the neutralizing and purifying the sulfate leaching solution. The rational use of sulfuric acid, which is the only consumable reagent, is an additional advantage in the process of producing magnesium sulfate from serpentinite waste.

References

Auyeshov A, Yeskibayeva Ch, Arynov K, Kolesnikov A (2024) Aspects of waste recycling problems in the chrysotile asbestos industry. Scientific and Technical Journal Mining Informational and Analytical Bulletin 9:88–98. (in English)

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 30(4):401–414. https://doi.org/10.1515/intag-2016-0015 (in English).

Dikanbayeva AK, Auyeshov AP, Satayev MS, Arynov KT, Yeskibayeva ChZ (2021) Researching of sulfuric acid leaching of magnesium from serpentines. News of the academy of sciences of the republic of Kazakhstan Satbayev university, series of geology and technical sciences 5(449):32–38 https://doi.org/10.32014/2021.2518-17OX.95 9 (in English)

Dzhafarov N.N. Nektorye osobennosti ocenki hrizotil-asbestovyh mestorozhdenij [Some features of the assessment of chrysotile-asbestos deposits]. Gorno-geologicheskij zhurnal. — Zhitikara, 2013. — № 3-4 (35-36). — S. 8-10. (in Russian)

Fedorôcková A, Raschman P, Sučik G, Ivanova D, Kavuličová J (2016) Utilization of Chrysotile-Type Tailings for Synthesis of High-Grade Silica by Controlled Precipitation. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review 37:287—294 https://doi.org/10.1080/08827508.2016.1167173 (in English)

Fouda MFR, Amin RE-S, Abd-Elzaher MM (1996) Extraction of magnesia from Egyptian serpentine ore via reaction with different acids I Reaction with sulfuric acid. Bull Chem Soc Jpn 69(7):1907–1912 https://doi.org/10.1246/bcsj.69.1907 (in English).

Gabdullin A.N. Bezothodnaya azotnokislotnaya pererabotka serpentinita — othoda asbestoobogatitelnoj promyshlennosti [Waste-free nitric acid processing of serpentinite — waste of asbestos beneficiation industry]// Gabdullin A.N., Kalinichenko I.I., Pecherskih E.G., Semenishev V.S. Sbornik dokladov. II Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Sovremennye resursosberegayushie tehnologii: problemy i perspektivy». — Odessa: ONU imeni I. I. Mechnikova. — 2012. — S. 50-52. (in Russian)

Huang P, Li Z, Chen M, Hu H, Lei Z, Zhang Q, Yuan W (2017) Mechanochemical activation of serpentine for recovering Cu (II) from wastewater. Appl Clay Sci 149:1–7. https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.08.030 (in English).

Mpouras T, Chrysochoou M, Dermatas D (2017) Investigation of hexavalent chromium sorption in serpentine sediments. J Contam Hydrol 197:29–38. https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2016.12.009 (in English)

Patent 2292300 Rossijskaya Federaciya, MPK S01F5/02. Sposob pererabotki serpentinita [Method for processing serpentinite]. Kalichenko I.I., Gabdullin A.N.; zayavl. 13.07.2005; opubl. 27.01.2007. (in Russian)

Patent 2953 A Respublika Armeniya, MPK S 01 V33/00, S 09 S1/00. Sposob kompleksnoj pererabotki serpentinitov [Chrysotile asbestos and resource conservation in the chrysotile asbestos industry]. Sagarunyan S.A., Arustamyan A.G., Agamyan E.S., Arakelyan A.M., Sagarunyan A.S.; opubl. 2014. (in Russian)

Patent 29779 Respublika Kazahstan. Sposob kompleksnoj pererabotki othodov hrizotil-asbestovogo proizvodstva [Method for integrated processing of chrysotile asbestos production waste]. V.A. Kozlov, O.S. Bajgenzhenov, K.K. Zhusupov, V.V. Shevelev; zayavitel i patentoobladatel RGP na PHV «Nacionalnyj centr po kompleksnoj pererabotke mineralnogo syrya Respubliki Kazahstan»; zayavl. 14.03.2014; opubl. 15.04.2015, byul. — №4. (in Russian).

Punenkov S.E., Kozlov Yu.S. Hrizotil-asbest i resursosberezhenie v hrizotil-asbestovoj otrasli [Chrysotile asbestos and resource conservation in the chrysotile asbestos industry]. Gornyj zhurnal Kazahstana. — 2022. — № 1. — S. 5-10. (in Russian)

Shaban M, Abukhadra MR, Khan AAP, Jibali BM (2018) Removal of Congo red, methylene blue and Cr (VI) ions from water using natural serpentine. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 82:102–113 https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.10.023 (in English)

Shevko V, Akylbekov E, Karataeva G, Badikova A (2022) Processing of chrysotile asbestos production waste. Metallurgical research and technology 119(4):410 https://doi.org/10.1051/metal/2022050 (in English)

Sierra C, Chouinard S, Pasquier LC, Mercier G, Blais JF (2018) Feasibility Study on the Utilization

of Serpentine Residues for $Mg(OH)_2$ Production. Waste Biomass Valorization 9:1921–1933. https://doi.org/10.1007/s12649-017-9926-9 (in English)

Teixeira APC, Purceno AD, Barros AS, Lemos BRS, Ardisson JD, Macedo WAA et al (2012) Amphiphilic magnetic composites based on layered vermiculite and fibrous chrysotile with carbon na nostructures: Application in catalysis. Catalysis Today 190:133–143. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2012.02.062 (in English)

Yeskibayeva Ch, Auyeshov A, Arynov K, Dikanbayeva A, Satimbekova (2024) Nature of serpentinite interactions with low-concentration sulfuric acid solutions. Green Processing and Synthesis 13(9). https://doi.org/10.1515/gps-2024-0034 (in English)

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 184–195

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.393

IRSTI 31.37.35
UDC 544.723:628.34

©A.K. Kozybaev, Zh.D. Alimkulova, S.O. Abilkasova*, 2025.
Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan.
E-mail*:* sandugash.abilkasovaa@gmail.com

KINETIC AND THERMODYNAMIC STUDIES OF HEAVY METAL ADSORPTION ONTO WATER-WASHED CA-MONTMORILLONITE CLAY

Kozybaev Asylbek — Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan
E-mail: asilbek_k@mail.ru; ORCID: https//orcid.org/0000-0003-1792-5993;
Alimkulova Zhamila — Master of Technical Sciences, senior-lecturer, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: zhamilya111@mail.ru; ORCID: https//orcid.org/0000-0002-9938-6710;
Abilkasova Sandugash — Candidate of Technical Science, Associate Professor, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: sandugash.abilkasovaa@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8322-4592.

Abstract. Relevance. Pollution of water resources with heavy metal ions remains a major environmental problem. Wastewater from mining, metallurgical, and chemical industries often contains toxic Pb^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+}, and Cu^{2+} ions that bioaccumulate and threaten ecosystems and human health. Due to the limited effectiveness of traditional treatment methods, environmentally safe and cost-efficient adsorption technologies based on natural minerals are gaining importance.

Research objective. This study investigates the kinetics and thermodynamics of heavy metal ion adsorption on modified diatomite sorbents based on Ca-montmorillonite and determines diffusion, energy, and practical characteristics of the process.

Research methods. Adsorption of Pb^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+}, and Cu^{2+} was studied under static conditions at pH = 5.5 ± 0.5 and 288–313 K. Kinetic parameters were determined using pseudo-second-order models, while equilibrium data used the Langmuir isotherms. IR spectroscopy evaluated structural and chemical changes in the sorbent surface.

Results. Heavy metal extraction reached 95–100% within 20—30 minutes and equilibrium achieved in 40—60 minutes. The kinetics follow a pseudo-second-order model ($R^2 \approx 0.99$), while equilibrium adsorption is described by the Langmuir isotherm, which indicates the monolayer nature of adsorption. Activation energies (kJ/mol) were: Pb^{2+} – 75.5; Cd^{2+} – 51.1; Zn^{2+} – 45.6; Cu^{2+} – 26.1. IR spectroscopy confirmed the

CC BY NC

participation of $–NH_2$, –COOH, and –OH groups in ion exchange and donor-acceptor interactions.

Practical significance. Modified diatomite sorbents demonstrate high efficiency in removing heavy metals from wastewater. The material is inexpensive, environmentally friendly, and suitable for use in industrial water treatment systems.

Keywords: heavy metals, Ca-montmorillonite, diatomite, polyethylenepolyamine, adsorption

©А.Қ. Қозыбаев, Ж.Д. Әлімқұлова, С.О. Әбілқасова*, 2025.
Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан.
E-mail:* sandugash.abilkasovaa@gmail.com

СУМЕН ЖУЫЛҒАН СА-МОНТМОРИЛЛОНИТ САЗЫНДА АУЫР МЕТАЛДАРДЫҢ СОРБЦИЯСЫНЫҢ КИНЕТИКАСЫ МЕН ТЕРМОДИНАМИКАСЫ

Қозыбаев Асылбек — Химия ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан,
E-mail: asilbek_k@mail.ru; ORCID: https//orcid.org/0000-0003-1792-5993;
Әлімқұлова Жамила — Техника ғылымдарының магистрі, сениор-лектор, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан,
E-mail: zhamilya111@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-9938-6710;
Әбілқасова Сандуғаш — Техника ғылымының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан,
E-mail: sandugash.abilkasovaa@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-8322-4592.

Аннотация. Өзектілігі. Ауыр металл иондарымен судың ластануы қазіргі заманның ең өзекті экологиялық мәселелерінің бірі болып қала береді. Тау-кен, металлургия және химия өнеркәсібінен шығатын өнеркәсіптік ағынды суларда көбінесе биоаккумуляциялық және экожүйелер мен адам денсаулығына қауіп төндіретін Pb^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+} және Cu^{2+} сияқты улы иондар болады. Дәстүрлі тазарту әдістерінің тиімділігі шектеулі болғандықтан, табиғи минералды материалдарға негізделген экологиялық таза және үнемді сорбциялық технологиялар ерекше маңызды.

Зерттеудің мақсаты. Бұл жұмыстың мақсаты — Са-монтмориллонит негізіндегі модификацияланған диатомды жер адсорбенттеріндегі ауыр металл иондарының сорбциясының кинетикасы мен термодинамикасын зерттеу, сондай-ақ процестің диффузиясын, энергиясын және практикалық сипаттамаларын анықтау.

Зерттеу әдістері. Pb^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+} және Cu^{2+} сорбциясы тұрақты шайқалу жағдайында, pH = 5,5 ± 0,5 және температурасы 288–313 К болғанда, статикалық жағдайда зерттелді. Кинетикалық параметрлер жалған екінші ретті модельдерді қолдану арқылы анықталды, ал тепе-теңдік деректері Ленгмюр изотермаларын қолдану арқылы талданды. Адсорбент бетіндегі құрылымдық және химиялық өзгерістер ИҚ спектроскопиясын қолдану арқылы бағаланды.

Нәтижелері. Ауыр металл иондарының экстракция жылдамдығы 20–30 минут ішінде 95–100%-ға жететіні, ал тепе-теңдікке 40–60 минут ішінде жететіні анықталды. Процесс кинетикасы жалған екінші ретті модельмен жақсы сипатталған ($R^2 \approx 0,99$), ал тепе-теңдік сорбциясы Ленгмюр изотермасымен сипатталады, бұл адсорбцияның моноқабатты сипатын көрсетеді. Белсенділік энергиялары (кДж/моль) анықталды: Pb^{2+} – 75,5; Cd^{2+} – 51.1; Zn^{2+} – 45.6; Cu^{2+} – 26.1. ИҚ-спектроскопия –NH^+, –COOH және –OH топтарының ион алмасу және донор-акцепторлық өзара әрекеттесулерге қатысуын растады.

Практикалық маңыздылығы. Нәтижелер модификацияланған диатомды жер сорбенттерінің ауыр металдарды ағынды суларды тазартуда жоғары тиімділігін растайды. Материал арзан, экологиялық таза және өнеркәсіптік су тазарту жүйелерінде енгізу үшін ұсынылуы мүмкін.

Түйін сөздер: ауыр металдар, Са-монтмориллонит, диатомит, полиэтиленполиамин, адсорбция

©А.К. Козыбаев, Ж.Д. Алимкулова, С.О. Абилкасова* 2025.
Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан.
*E-mail: sandugash.abilkasovaa@gmail.com

КИНЕТИКА И ТЕРМОДИНАМИКА СОРБЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА ПРОМЫТОЙ ВОДОЙ КАЛЬЦИЕВО-МОНТМОРИЛЛОНИТОВОЙ ГЛИНЕ

Козыбаев Асылбек — кандидат химических наук, ассоциированный профессор, Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан,
E-mail: asilbek_k@mail.ru; ORCID: https//orcid.org/0000-0003-1792-5993;
Алимкулова Жамила — магистр технических наук, сениор-лектор, Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан,
E-mail: zhamilya111@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9938-6710;
Абилкасова Сандугаш — кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан,
E-mail: sandugash.abilkasovaa@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-8322-4592.

Аннотация. *Актуальность*. Загрязнение водных ресурсов ионами тяжёлых металлов остаётся одной из наиболее острых экологических проблем современности. Сточные воды горнодобывающей, металлургической и химической промышленности содержат токсичные ионы Pb^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+} и Cu^{2+}, склонные к биоаккумуляции и представляющие серьёзную угрозу для экосистем и здоровья человека. В условиях низкой эффективности традиционных методов очистки возрастает значение экологически безопасных и экономичных сорбционных технологий на основе природных минералов.

Цель исследования. Изучение кинетических и термодинамических параметров сорбции ионов тяжёлых металлов на модифицированных адсорбентах на основе Са-монтмориллонита, а также определение диффузионных, энергетических и эксплуатационных характеристик процесса.

CC BY NC

Методы исследования. Адсорбция Pb^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2}+ и Cu^{2+} изучалась в статических условиях при постоянном встряхивании, pH = 5,5 ± 0,5 и температуре 288—313 К. Кинетические параметры рассчитывались по модели псевдовторого порядка; равновесные данные анализировались по изотерме Ленгмюра. Структурно-химические изменения поверхностных групп оценивались методом ИК-спектроскопии.

Результаты. Показано, что степень извлечения ионов тяжёлых металлов составляет 95—100% в течение 20—30 минут, а равновесие достигается за 40—60 минут. Кинетика сорбции соответствует модели псевдовторого порядка ($R^2 \approx 0,99$), что свидетельствует о хемосорбционном механизме. Равновесная адсорбция хорошо описывается изотермой Ленгмюра, подтверждая монослойный характер процесса. Определены энергии активации (кДж/моль): Pb^{2+} — 75,5; Cd^{2+} — 51,1; Zn^{2+} — 45,6; Cu^{2+} — 26,1. ИК-спектроскопия выявила участие функциональных групп —NH^{+}, —COOH и —OH в ионообменных и донорно-акцепторных взаимодействиях с ионами металлов.

Практическое значение. Результаты демонстрируют высокую эффективность модифицированных диатомитовых сорбентов при очистке сточных вод от тяжёлых металлов. Материал отличается низкой стоимостью, экологической безопасностью и может быть рекомендован к использованию в промышленных системах водоочистки.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, Ca-монтмориллонит, диатомит, полиэтиленполиамин, адсорбция

Introduction. Environmental pollution with heavy metal ions is one of the pressing environmental issues of our time. Wastewater from industrial enterprises, including mining, metallurgical, and chemical industries, often contains toxic elements such as lead (Pb^{2+}), cadmium (Cd^{2+}), zinc (Zn^{2+}), and copper (Cu^{2+}). Since these elements are not biodegradable and tend to accumulate in living organisms, they pose a significant threat to ecosystems and human health (Iqbal, 2018).

Currently, various methods are used to remove heavy metals from aqueous environments: chemical precipitation, ion exchange, membrane and electrolytic technologies (Azimi et.al., 2017). However, most of these methods require high energy consumption, large amounts of reagents, and generate additional waste. Therefore, adsorption methods based on natural and inexpensive mineral materials are a more environmentally friendly and economically advantageous alternative (Ugwu et.al., 2019; Barakan et.al., 2021).

In recent years, natural diatomite and montmorillonite clays have been widely studied as effective sorbents for heavy metals due to their high specific surface area, porosity, and chemical stability. Modification of these materials with organic polymers, such as polyethylene polyamine, increases their adsorption capacity and enhances the activity of surface functional groups (ElSayed 2018; Zhao et.al., 2019).

The aim of this work is to study the kinetics and thermodynamics of heavy metal ion adsorption on modified diatomite sorbents based on Ca-montmorillonite, to determine

the diffusion and energy characteristics of the process, and to determine the practical significance of the results obtained in the field of environmental protection.

Materials and methods. Water-washed Ca-montmorillonite clay was used in the study. The adsorption of heavy metals from solutions was studied in a static mode with constant shaking. A sample of the sorbent-a solution with a specific sorbate concentration-was placed in a conical flask, maintained at a pH of 5.5 ± 0.5 for a specific time and at a specific temperature (Esmail et.al., 2013; Khachatryan 2014).

The components of the sorbent and metal solutions were determined depending on time and temperature. The kinetics and thermodynamics of the adsorption process were studied. Various temperatures (288, 293, 303, 313 K) were used to study the effect of temperature.

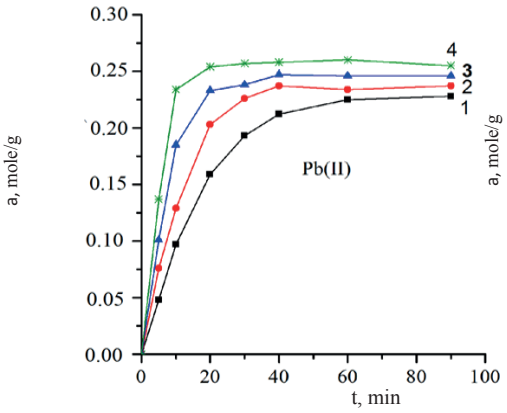
The following equations were used to describe the proportion of external diffusion into the environment: $D_{external}$ is the external diffusion coefficient, and signal is the thickness of the solution film.

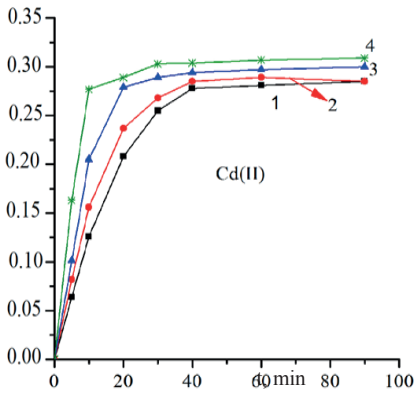
The Arrhenius equation was used to determine the activation energies (Ea) of the heavy metal adsorption process on diatomite sorbent. The Langmuir adsorption model was used to explain the experimental data.

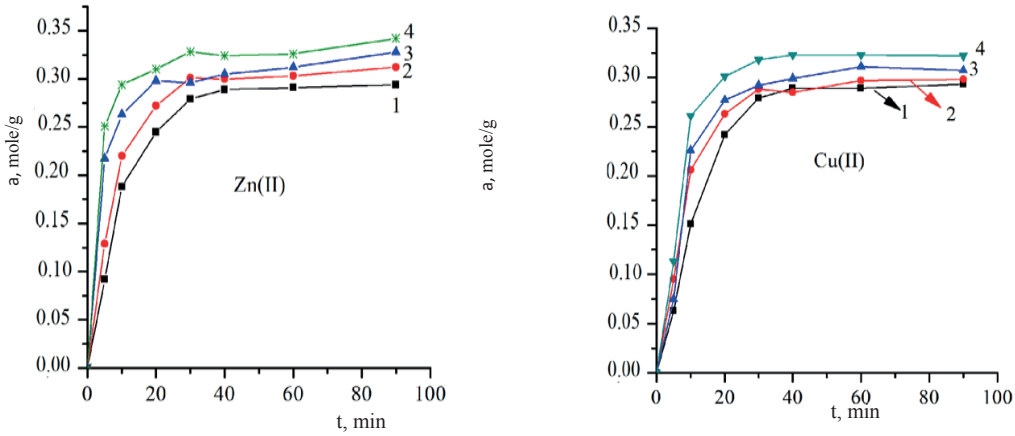
Adsorbed metal ions are desorbed with a 1 M hydrochloric acid solution, with a deadsorption rate of 95—98%. The adsorbent purified in this way is treated with a 20—30% alkali solution for 2—3 hours and reused for further purification and extraction of metal ions.

To determine the mechanism of interaction of the modified diatomite sorbent with the surface, IR spectroscopy studies of samples were carried out before and after interaction with Cu^{2+} and Pb^{2+} ions.

Results and Discussion. *3.1 Kinetics.* The time dependencies of heavy metal adsorption studied in the temperature range of 288—293 K (Figure 1) show that for all studied systems, the adsorption values reach constant values after 40—60 minutes.







(C=100mg/dm^3) at temperatures: 1-288K, 2-293K, 3-303K, 4-313K
Figure 1 — Kinetic curves of heavy metal adsorption on diatomite sorbent

The degree of metal removal reaches 95-100% in about 20-30 minutes.

The contribution of external diffusion to the adsorption of heavy metals in the studied sorbent can be described (Wagner et.al., 2005; Godymchuk 2003) as follows (1):

$$\gamma = \frac{3D_{ext}}{r_0 \delta K_p} \qquad (1)$$

Taking into account this equation, where $D_{external}$ is the external diffusion coefficient, r_0 is the radius of the sorbent particles, sigma is the thickness of the solution shell around the sorbent particles, its value is taken to be equal to $5*10^{-3}$ cm (Adebowale et.al., 2005), Kp is the distribution coefficient, determined by the equation (Lutsenko 2004; Vezentsev 2008): Kp = a/Cp, where a is the number of sorbed ions (mmol/g), and Cp is the equilibrium concentration of these ions in solution (mmol/cm^3), t $D_{external}$ can be calculated from the tangent of the slope of the line-ln(1-F).

Processing of the kinetic adsorption curves of the studied heavy metals using equation (1) showed that the time of onset of the linear dependence of the function -ln(1-F)=f(t) depends primarily on the temperature of the experiment.

Thus, if at a temperature of 288–293 K a high linear dependence of this function is observed in the first 20–30 minutes, then at a temperature of 303–313 K this time is reduced to 5–10 minutes, which is due to a decrease in external diffusion resistance with increasing temperature. Consequently, the external diffusion coefficient also increases with increasing temperature.

In most cases, the dependence $a_t - t^{1/2}$ is polylinear, characterized by 2—3 sections and described by the following equation (2):

$$a_t = k_d \cdot t^{\frac{1}{2}} + A \qquad (2)$$

where A is the segment cut off from the coordinate axis at a_t=f($t^{1/2}$), dependence.

Diffusion parameters. *3.2.* In equation (1), δ describes the thickness of the boundary layer. The first part describes the diffusion of the sorbate through the solution layer to the sorbent surface (Table 1).

Table 1. Diffusion parameters of heavy metal adsorption on diatomite sorbent.

Ion	*t*,K	D_{ext}, cm²/sec.	k_d, mole*g^{-1}*sec.$^{-0,5}$	D_i, cm²/sec.	B_i
Pb^{2+}	288	1.65*10^{-5}	4.60*10^{-3}	1.70*10^{-8}	5.00
	293	4.93*10^{-5}	5.60*10^{-3}	6.81*10^{-8}	3.37
	303	5.86*10^{-5}	6.90*10^{-3}	8.52*10^{-8}	3.00
	313	1.01*10^{-4}	9.30*10^{-3}	1.19*10^{-7}	3.10
Cd^{2+}	288	2.07*10^{-5}	6.10*10^{-3}	5.96*10^{-8}	3.13
	293	2.80*10^{-5}	6.70*10^{-3}	7.24*10^{-8}	3.37
	303	3.20*10^{-5}	8.20*10^{-3}	8.94*10^{-8}	3.21
	313	5.85*10^{-5}	8.20*10^{-3}	2.26*10^{-7}	2.35
Zn^{2+}	288	1.14*10^{-5}	6.30*10^{-3}	5.96*10^{-8}	3.37
	293	1.46*10^{-5}	7.40*10^{-3}	7.66*10^{-8}	3.19
	303	1.53*10^{-5}	8.90*10^{-3}	5.96*10^{-8}	4.35
	313	2.58*10^{-5}	1.25*10^{-2}	9.37*10^{-8}	4.74
Cu^{2+}	288	1.18*10^{-5}	6.60*10^{-3}	6.39*10^{-8}	3.36
	293	1.41*10^{-5}	6.60*10^{-3}	8.09*10^{-8}	3.19
	303	1.68*10^{-5}	8.40*10^{-3}	6.81*10^{-8}	6.02
	313	1.81*10^{-5}	9.20*10^{-3}	8.52*10^{-8}	4.38

The second part, whose slope determines the internal diffusion rate constant, describes the internal diffusion process itself [3]. To calculate the internal diffusion coefficients (Di), the classical equation for internal diffusion from a confined volume into a spherical body, proposed by Boyd and Adamson (Ivanov 2005; Byurnieva 2009; Neudachina 2004), was used (3):

$$F = 1 - \frac{6}{\pi^2}\exp\left(-\frac{D_i \pi^2 t}{r^2}\right) \qquad (3)$$

where Di is the internal diffusion coefficient, cm²/s; r is the radius of the sorbent grain, cm; t is the time, s. $-\frac{D_i \pi^2 t}{r^2} = B_r$ — Fourier homochromy criterion.

Based on the determined t-Bt, the Bt—t dependence is constructed, the slope of which is determined by Di.

The temperature dependence of the internal diffusion coefficient (Wax et.al., 2001) is expressed by equation (4):

$$D_i = D_o \exp\left(\frac{\Delta E_a}{RT}\right) \qquad (4)$$

where ΔEa is the activation energy of the overall diffusion process, and D_0 is the factor before the exponential factor.

The Biot coefficient is used to estimate the contributions of external and internal diffusion in the overall process (5):

CC BY NC

$$B_i = \frac{D_{ext}\, r}{D_i\, \delta K_p} \qquad (5)$$

As noted in (Kasani 2023), at $B_i \geq 20$ the adsorption process is limited by internal diffusion, at $B_i 1$ — by external diffusion, intermediate values indicate mixed diffusion kinetics.

From Table 1, it can be seen that the external diffusion coefficients, being mainly single-order quantities, depend on the ion type and vary sequentially in the temperature range 293—313 K:

$$D_{ext}Pb^{2+} > D_{ext}Cd^{2+} > D_{ext}Zn^{2+} > D_{ext}Cu^{2+}.$$

The internal diffusion coefficients of Pb2+ and Cd2+ increase with increasing temperature, while for Zn2+ and Cu2+, Di does not show a clear temperature dependence. Studies have shown that the Di values (and, consequently, the internal diffusion rate) of the ions under investigation depend on their crystallographic radii, decreasing as the latter increases; a similar dependence (Kostenko 2004).

The ions under study can be arranged in a row according to their crystallographic radii:

$$Pb^{2+} > Cd^{2+} > Zn^{2+}$$
$$Cu^{2+}\ 0.1120.0990.0830.060$$

The results of the study indicate a mixed diffusion mechanism for the adsorption of heavy metals in the clay under investigation, with a slight predominance of the external diffusion mechanism, as also indicated by Bi criterion values ranging from 3.0 to 6.02.

It is assumed that the adsorption stage itself can make a significant contribution to the kinetics of the entire process. Therefore, to describe the patterns of this kinetic stage, pseudo-first-order and pseudo-second-order reaction models were used, which are linearly expressed by equations (6) and (7) (Lukaszczyk et.al., 2004):

$$\ln(a_\infty - a_t) = ln a_\infty - k_1 t$$

$$\frac{t}{a_t} = \frac{1}{k_2 a_\infty^2} + \frac{1}{a_\infty} t \qquad (6)$$

where a_∞ and at are the equilibrium adsorption quantity and adsorption quantity (mmol/g) at time t, respectively, and k_1, k_2 are the adsorption rate constants of pseudo-first and pseudo-second order reactions, respectively.

t/a_t was calculated from the dependencies t, k_2, and a_∞ using equation (6). A comparison of the results of using pseudo-first and pseudo-second-order models (Table 2) to describe the adsorption kinetics of the studied ions shows that in most cases the pseudo-second-order equation allows for the description of highly correlated experimental data. Coefficients are R_2. Moreover, the values of a_∞ calculated by equation (1) give the best agreement with the experimental a_∞. From Table 1, it can be seen that the values of the rate constants k_2 for all the ions studied increase with increasing temperature. From the dependences of ln k_2.

$$\ln k_2 = -\frac{E_a}{RT} + const \qquad (7)$$

According to the 1/T Arrhenius equation: the activation energies (Ea) of the adsorption process of heavy metals on diatomaceous sorbent were determined, kJ/mol: Pb^{2+} 75,5; Cd^{2+} 51,1; Zn^{2+} 45,6; Cu^{2+} 26,1.

Sufficiently high activation energy values may indicate reversely activated adsorption from subsequent ions on the modified sorbent.

Thus, in the case of Pb^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+} and Cu^{2+} adsorption on modified diatomite, the adsorption kinetics are a combination of external and internal diffusion kinetics (with a slight predominance of external diffusion) and a pseudo-second-order reaction model is described.

The adsorption isotherms of Pb^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+} and Cu^{2+} at 293 K are shown in Figure 2, which shows that the saturation process occurs during the adsorption of the studied ions in the concentration range of 0.8—1.2 mmol/dm^3.

The results of the Langmuir isotherm equations based on experimental data are shown. The results obtained may be useful in developing a adsorption technology for the purification of natural wastewater from heavy metals using a modified sorbent based on diatomite.

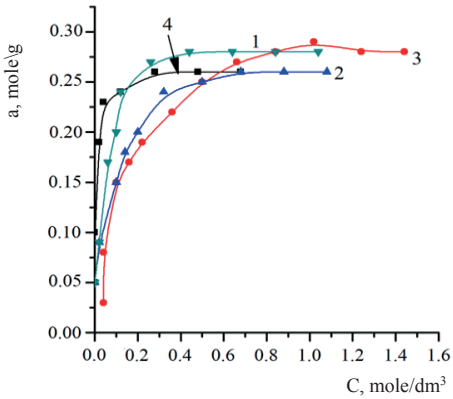
When describing experimental isotherms of heavy metal ions by mineral sorbents, the Langmuir adsorption model is often used in the literature (Vezentsev et.al., 2008).

$$A = \frac{A_\infty \cdot K \cdot C_p}{(1 + K \cdot C_p)} \qquad (8)$$

where A_∞ is the adsorption limit; K is the adsorption equilibrium concentration constant, which characterizes the intensity of the adsorption process, l/mol.

Linearization of adsorption isotherms according to the equation (Ivanov 2005):

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{A_\infty} + \frac{1}{A_\infty \cdot K} \cdot \frac{1}{C_p} \qquad (9)$$



Pb^{2+} (1), Cd^{2+} (2), Zn^{2+} (3) and Cu^{2+} (4) (V = 50 cm^3; m = 0,1 g; pH = 5,5 ± 0,5; τ = 60 min; t = 293K)

Figure 2 - Adsorption isotherms of heavy metals on diatomite sorbent

CC BY NC

The constants and correlation coefficients of the Langmuir equation are summarized in Table 2, which shows that the Langmuir isotherm is most suitable for describing the adsorption of the studied ions by the modified diatomite sorbent (see correlation R_2 and satisfactory agreement between experimental and calculated values according to equation (4) a_∞, which indicates a monolayer covering the surface of the heavy metal sorbent. It was also noted that the adsorption of heavy metals on diatomite sorbent is better described by the Langmuir equation and the pseudo-second-order reaction model.

Table 2. Equation constants.

Cations	Langmuir equation			a_{exp}
	a, mmole/g	b, dm^3/ mmole	R^2	
Pb^{2+}	0.26	135.795	0.999	0.26
Cd^{2+}	0.31	8.405	0.997	0.28
Zn^{2+}	0.28	15.489	0.998	0.26
Cu^{2+}	0.29	28.851	0.999	0.28

It is known that the adsorption of heavy metals on the sorbent under study can occur through several mechanisms [5]: 1) ion exchange; 2) formation of chelate complexes with surface hydroxyl groups of the mineral; 3) “stacking” bonds on the edges and corners of valence attachment during the growth stages of montmorillonite crystals. In the case of the natural sorbent under study, the adsorption process proceeded by the mechanism of ion exchange with the replacement of heavy metal ions mainly by calcium, sodium, and magnesium cations.

The results of the study showed that the adsorption of Pb^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+} and Cu^{2+} on modified diatomite occurs mainly by the ion exchange mechanism, is endothermic in nature and is well described by the Langmuir isotherm equation. The kinetics of this process is a combination of external and internal diffusion kinetics with the dominance of external diffusion kinetics and is best described by a pseudo-second-order reaction model.

The degree of deadsorption of adsorbed metal ions with hydrochloric acid solution reaches 95-98%. The purified adsorbent is reused for further purification and extraction of metal ions. This indicates that the diatomites modified in this way can be reused many times, and metals can be further concentrated and extracted by any physicochemical methods, which ensures the disposal of waste and the environmental and economic feasibility of using such a universal adsorbent.

3.3. IR spectra. In order to determine the mechanism of interaction of the modified diatomite sorbent with the surface, the IR spectra of the samples before and after interaction with Cu^{2+} and Pb^{2+} ions were studied.

On the surface of the sorbent, —NH_2, COOH, OH- groups were found, the corresponding vibrations were as follows: ν=1646.09-1408.53 cm^{-1}, 1079.29-589.31 cm^{-1}, 2926.75-3400 cm^{-1} (Akhmedov et.al., 2001).

After contact with metal ions of the sorbents, a shift phenomenon is observed in all recorded peaks. The adsorption bands corresponding to amino groups at a frequency of 1408.53 cm^{-1} shifted to lower frequencies, while the band corresponding to the deformation vibrations of NH groups (at 799.52 cm^{-1}) shifted to higher frequencies. In addition, a peak at 1079.29 cm^{-1} sensitive to the influence of metal ions was detected. After interaction with Cu^{2+} and Pb^{2+} ions, this peak shifted to lower frequencies. A similar change occurred in the peak corresponding to carboxyl groups at 1243.82 cm^{-1}.

3.4. Sorption mechanism. Considering the above, it can be concluded that during the adsorption of Cu^{2+} and Pb^{2+} ions on the sorbent surface, their binding occurs mainly due to electrostatic, donor-acceptor interactions, and ion exchange mechanisms under the influence of —NH, -COO-, and OH- groups. Pb^{2+} and Cu^{2+} ions, as d-elements, tend to form donor-acceptor bonds with amino groups on the cell surface. In addition, both ions have the ability to interact with carboxyl and hydroxyl groups through ion exchange mechanisms.

Conclusion. The study showed that water-washed modified diatomite sorbents based on Ca-montmorillonite are capable of effectively removing heavy metal ions (Pb^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+}, Cu^{2+}) from aqueous solutions. The adsorption process was studied under static conditions at pH = 5.5 ± 0.5 and in the temperature range of 288—313 K. The results showed that adsorption equilibrium is reached in 40—60 minutes, and the degree of metal ion extraction is 95—100%.

The results of kinetic analysis showed that the adsorption process follows a pseudo-second-order reaction model, and the Langmuir isotherm is in good agreement with the experimental data. This confirms the monolayer nature of adsorption and the endothermicity of the process. An increase in temperature leads to an increase in the rate of external diffusion and a decrease in activation energy.

IR spectroscopy studies have shown that the functional groups —NH_2, —COOH, and —OH on the sorbent surface interact with heavy metal ions, participating in ion exchange and the formation of donor-acceptor bonds, which, in turn, ensures high efficiency and selectivity of the sorbent.

The use of modified diatomite sorbents is an environmentally friendly and cost-effective method for treating natural and industrial water contaminated with heavy metals. The results of this study can serve as a scientific basis for the development of a new generation of adsorption materials for removing heavy metal ions.

References

Adebowale K.O. et.al. (2005). Adsorption of some heavy metal ions on sulfate and phosphate-modified kaolin AppliedClayScience. — V.30. — P.145-148. (in English)

Akhmedov S. A., Babuev M. A., Basargin N. N., Rozovsky Yu. G. (2001). Sintez i izuchenie sorbcionnyh svojstv nekotoryh polimernyh helatnyh sorbentov na osnove polistirola [Synthesis and study of adsorption properties of some polymer chelate sorbents based on polystyrene]. Factory laboratory. — V.67. — No.5. — P.15-17. (in Russian)

Azimi A., Azari A., Rezakazemi M., & Ansarpour M. (2017). Removal of heavy metals from industrial wastewaters: a review. ChemBioEng Reviews, — V.4(1). — P.37-59. (in English)

Barakan, S., & Aghazadeh, V. (2021). The advantages of clay mineral modification methods for enhancing adsorption efficiency in wastewater treatment: a review. Environmental Science and Pollution Research, — V. 28(3). — P. 2572-2599. (in English)

Byurnieva U. G. (2009). Koncentrirovanie i opredelenie medi, svinca i kadmiya s ispol'zovaniem polimernyh sorbentov, modificirovannyh azosoedineniyami [Concentration and determination of copper, lead and cadmium using polymeric sorbents modified with azo compounds]. Diss. Cand. Chem. Sciences: 02. 00. 02. Dagestan State University—Makhachkala. —111 p. (in Russian)

ElSayed, E. E. (2018). Natural diatomite as an effective adsorbent for heavy metals in water and wastewater treatment (a batch study). Water Science, — V. 32(1). — P. 32-43. (in English)

Esmail G.K., Ramazanov A.Sh. (2013) Sorbciya ionov kadmiya i svinca iz vodnogo rastvora prokalyonnoj glinoj [Adsorption of cadmium and lead ions from an aqueous solution by calcined clay]. Bulletin of Dagestan State University. — Issue 6. — P.200-203. (in Russian)

Godymchuk A. Yu. (2003) Tekhnologiya izgotovleniya silikatno-karbonatnyh sorbentov dlya ochistki vody ot kationov tyazhelyh metallov [Technology of manufacturing silicate-carbonate sorbents for water purification from heavy metal cations]. Abstract of Cand. Tech. Science Dissertation: 05.17.11. —Tomsk. —24 p. (in Russian)

Iqbal M. N., & Ashraf, A. (2018). Environmental pollution: Heavy metals removal from water sources. International Journal of Alternative Fuels and Energy, — V. 2(1). — P. 14-15. (in English)

Ivanov V.M., Polyanskov R.A., Sedova A.A. (2005). Sorbciya ionov medi (II) vismutolom I, immobilizovannym na prirodnom ceolite. [Adsorption of copper (II) ions by bismuthol I immobilized on natural zeolite]. Vestn. Moscow Univ.Ser.2. Chemistry. —T.46. — No.1. — P.61-65. (in Russian)

Kasani H. A., & Selvadurai, A. P. S. (2023). A review of techniques for measuring the Biot coefficient and other effective stress parameters for fluid-saturated rocks. Applied Mechanics Reviews. — V. 75(2). — P. 020801. (in English)

Khachatryan Sh. V. (2014). Heavy metal adsorption by Armenian natural zeolite from natural aqueous solutions. Chemistry and Biology. — №2. — P.31-35. (in English)

Kostenko E.E., Shtokalo M.I. (2004). Tverdofaznaya spektrofotometriya—effektivnyj metod opredeleniya tyazhelyh metallov v pishchevyh ob"ektah [Solid-phase spectrophotometry — an effective method for determining heavy metals in food objects]. J. Analytical Chemistry. — Vol. 59. — No. 12. — P. 1276-1282. (in Russian)

Lukaszczyk J. et.al. (2004). Sorbents for Removal Surfactants from Aqueous Solutions. Surface Modification of Natural Solids to Enhance Adsorption Ability. J.Appl.Pol.Sci. — №2. — P.1510-1515. (in English)

Lutsenko M. M. (2004). Sovershenstvovanie tekhnologii ochistki stokov gal'vanicheskih proizvodstv ot ionov medi nikelya :author's abstract of candidate of technical sciences dissertation [Improving the technology of cleaning galvanic production wastewater from copper and nickel ions]. 05.23.04. St. Petersburg. — 20 p. (in Russian)

Neudachina L. K., Eremin D. V., Skorik Yu. A., Yatluk Yu. G., Lakiza N. V. (2004). Sintez i sorbcionnye svojstva novyh helatoobrazuyushchih sorbentov s neorganicheskoj osnovoj i funkcional'nymi gruppami b-alanina [Synthesis and adsorption properties of new chelating sorbents with an inorganic base and functional groups of b-alanine]. Proceedings of the VII conference "Analytics of Siberia and the Far East". http://www.anchem.ru/literature/books/asdv-2004/030.asp. (in Russian)

Ugwu I. M., & Igbokwe, O. A. (2019). Adsorption of heavy metals on clay minerals and oxides: a review. Advanced adsorption process applications. — P.1-23. (in English)

Vezentsev A.I., Korolkova S.V., Volovicheva N.A. (2008). Fiziko-himicheskie harakteristiki prirodnoj i modificirovannoj gliny mestorozhdeniya polyana Belgorodskoj oblasti [Physicochemical characteristics of natural and modified clay from the Polyana deposit in the Belgorod region]. Adsorption and chromatographic processes. — Vol. 8. — Issue 5. — P. 790-795. (in Russian)

Wagner A.C. et.al. (2005). Removal of Heavy Metals from Wastewater by Brazilian Natural Materials. Revista CENIC Ciencias Químicas. — V. 36, No. Especial. . (in English)

Wax J. F., Albaki, R., & Bretonnet, J. L. (2001). Temperature dependence of the diffusion coefficient in liquid alkali metals. Physical Review B. — V. 65(1). — P. 014301. (in English)

Zhao Y., Tian, G., Duan, X., Liang, X., Meng, J., & Liang, J. (2019). Environmental applications of diatomite minerals in removing heavy metals from water. Industrial & Engineering Chemistry Research. — V. 58(27). — P.11638-11652. (in English)

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 196–207

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.394

©A.Abdrakhmanova[1]*, V. Krivchenko[2], A. Sabitova[1], B. Kuderina[3], 2025.
[1]NJSC «Shakarim University», Semey, Kazakhstan;
[2]The Scientific Research, Design, and Technological Center for Electrochemical Engineering, Dubna State University, Moscow Region, Dubna, Russian Federation;
[3]NJSC «Kokshetau University named after Sh.Ualikhanov», Kokshetau, Kazakhstan.
*E-mail: zzzk2014@mail.ru

DOL-ENHANCED ELECTROLYTES AS A ROUTE TO STABLE ANODES IN Li—V_2O_5 SYSTEMS

Abdrakhmanova Azhar — PhD student, Chemistry and ecology department, NJSC «Shakarim University», Semey, Kazakhstan,
E-mail: zzzk2014@mail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1196-6081;
Krivchenko Victor — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, The Scientific Research, Design, and Technological Center for Electrochemical Engineering, Dubna State University, Moscow Region, Dubna, Russian Federation,
E-mail: victi81@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8909-9021;
Sabitova Alfira — PhD, Head of Chemical technologies and Ecology department, NJSC «Shakarim University», Semey, Kazakhstan,
E-mail: alfa-1983@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3360-7998;
Kuderina Balken — PhD, Senior Lecturer, Department of Morphology, Physiology, and General Pathology, Sh. Ualikhanov Kokshetau University, Kokshetau, Kazakhstan,
E-mail: b.kuderina@shokan.edu.kz; ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4602-8194.

Abstract. The development of stable anodes based on metallic lithium remains one of the key and most urgent challenges in creating lithium batteries with high specific energy and long cycle life. Increasing requirements for safety, efficiency, and durability make it important to study the interfacial processes that determine lithium-anode stability under various operating conditions and external influences. In this regard, the aim of the work is a comprehensive evaluation of the influence of electrolyte composition on the interfacial stability and electrochemical characteristics of the lithium anode in the Li—V_2O_5 system, as well as the identification of the most practical electrolyte formulation. The study analyzed four electrolytes based on a mixture of propylene carbonate and 1,2-dimethoxyethane (3:7): 1 M lithium difluoro(oxalato)borate (LiDFOB) and 1 M lithium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide (LiTFSI), each tested with and without the addition of 15% 1,3-dioxolane (DOL). The applied methods included galvanostatic cycling at different current densities, recording of discharge curves, and impedance

spectroscopy for evaluating interfacial resistance and SEI-layer dynamics. Experimental results showed that the introduction of DOL significantly improves electrode processes by reducing interfacial resistance, increasing Coulombic efficiency, and ensuring more stable anode behavior. The best performance was demonstrated by the LiTFSI + 15% DOL electrolyte, which retained approximately 75% of its initial capacity near 300 cycles. The practical significance of the study lies in the fact that the identified patterns enable targeted optimization of electrolyte systems to create more reliable, energy-dense, long-lasting lithium batteries of the next generation.

Keywords: lithium anode; V_2O_5; electrolyte; LiDFOB; LiTFSI; 1,3-dioxolane; Coulombic efficiency; impedance spectroscopy

©А. Абдрахманова[1]*, В. Кривченко[2], А. Сабитова[1], Б. Кудерина[3], 2025.
[1]«Шәкәрім университеті» КеАҚ, Семей қ., Қазақстан;
[2]Электрохимиялық машина жасау бойынша ғылыми-зерттеу, жобалау-конструкторлық және технологиялық орталығы, «Дубна» университеті, Мәскеу облысы, Дубна, Ресей Федерациясы;
[3]«Ш. Уәлиханов атындағы Көкшетау университеті» КеАҚ, Көкшетау, Қазақстан.
*E-mail: zzzk2014@mail.ru

Li–V_2O_5 ЖҮЙЕСІНДЕГІ ТҰРАҚТЫ АНОДТАРҒА ҚОЛ ЖЕТКІЗУГЕ АРНАЛҒАН DOL-МЕН МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН ЭЛЕКТРОЛИТТЕР

Абдрахманова Ажар — PhD-докторант, кафедра химии и экологии, НАО «Шәкәрім университет», г. Семей, Казахстан.
E-mail: zzzk2014@mail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1196-6081;
Кривченко Виктор — кандидат физико-математических наук, Научно-исследовательский, проектно-технологический центр электрохимического машиностроения, Государственный университет «Дубна», Московская область, г. Дубна, Российская Федерация.
E-mail: victi81@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8909-9021;
Сабитова Альфира — PhD, заведующая кафедрой химичи и экологии, НАО «Шәкәрім университет», г. Семей, Казахстан.
E-mail: alfa-1983@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3360-7998;
Кудерина Балкен — PhD, старший преподаватель кафедры морфологии, физиологии и общей патологии, Кокшетауский университет имени Ш. Уалиханова, г. Кокшетау, Казахстан.
E-mail: b.kuderina@shokan.edu.kz; ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4602-8194.

Аннотация. Металл литий негізіндегі тұрақты анодтарды жасау жоғары меншікті энергиясы және ұзақ қызмет ету мерзімі бар литий-ионды аккумуляторларды әзірлеудегі аса өзекті және маңызды ғылыми міндеттердің бірі болып табылады. Қауіпсіздікке, тиімділікке және ұзақмерзімді жұмысқа қойылатын талаптардың артуы литий анодының әртүрлі жұмыс режимдері мен сыртқы әсерлер жағдайындағы тұрақтылығын анықтайтын межфазалық үдерістерді терең зерттеуді қажет етеді. Осыған байланысты бұл жұмыстың мақсаты – Li–V_2O_5 жүйесіндегі литий анодының межфазалық тұрақтылығына және электрохимиялық сипаттамаларына электролит құрамының әсерін кешенді түрде бағалау, сондай-ақ ең перспективалы және практикалық тұрғыдан маңызды электролит құрамын айқындау. Зерттеуде

пропиленкарбонат пен 1,2-диметоксиэтан қоспасы (3:7) негізінде дайындалған төрт электролит қарастырылды: 1 М литий дифтор(оксалато)борат (LiDFOB) және 1 М литий бис(трифторметансульфонил)имид (LiTFSI), олардың әрқайсысы 15% 1,3-диоксолан (DOL) қосылған және қосылмаған нұсқаларда зерттелді. Қолданылған әдістерге әртүрлі ток тығыздықтарында гальваностатикалық циклдеу, разрядтық қисықтарды тіркеу және межфазалық кедергіні, сондай-ақ SEI қабатының қалыптасу динамикасын талдау үшін импеданстық спектроскопия кірді. Эксперименттік нәтижелер функционалдық қоспа ДОЛ енгізу электродтық процестерді айтарлықтай жақсартатынын, фазааралық кедергіні төмендететінін, кулондық тиімділікті арттыратынын және анодтың тұрақты жұмысын қамтамасыз ететінін көрсетті. Ең жоғары нәтижелерді 15% ДОЛ қосылған LiTFSI электролиті көрсетіп, 300 циклдан кейін бастапқы сыйымдылықтың шамамен 75%-ын сақтады. Зерттеудің практикалық маңызы – алынған заңдылықтар литий-ион аккумуляторларының жаңа буыны үшін неғұрлым сенімді, энергиясы жоғары және ұзақмерзімді электролиттік жүйелерді мақсатты түрде оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: литий аноды; V_2O_5; электролит; LiDFOB; LiTFSI; 1,3-диоксолан; кулондық тиімділік; импеданстық спектроскопия

©А. Абдрахманова[1]*, В. Кривченко[2], А. Сабитова[1], Б. Кудерина[3], 2025.
[1]НАО «Шәкәрім университет», Семей, Казахстан;
[2]Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический центр электрохимического машиностроения, Университет «Дубна», Московская область, Дубна, Российская Федерация;
[3]НАО «Кокшетауский университет им. Ш. Уалиханова», Кокшетау, Казахстан.
*E-mail: zzzk2014@mail.ru

DOL – МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТЫ КАК ПУТЬ К СТАБИЛЬНЫМ АНОДАМ В СИСТЕМАХ Li–V_2O_5

Абдрахманова Ажар — PhD докторант кафедры «Химия и экология», НАО «Шәкәрім университеті», Семей, Казахстан,
E-mail: zzzk2014@mail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1196-6081;
Кривченко Виктор — кандидат физико-математических наук, Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический центр электрохимического машиностроения, Государственный университет «Дубна», Московская область, Дубна, Российская Федерация,
E-mail: victi81@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8909-9021;
Сабитова Альфира — PhD, заведующая кафедрой «Химические технологии и экология», НАО «Шакарим университет», Семей, Казахстан,
E-mail: alfa-1983@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3360-7998;
Кудерина Балкен — PhD, старший преподаватель кафедры морфологии, физиологии и общей патологии, Ш. Уалиханов атындағы Көкшетау университеті, Кокшетау, Казахстан,
E-mail: b.kuderina@shokan.edu.kz; ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4602-8194.

Аннотация. Разработка стабильных анодов на основе металлического лития остаётся одной из ключевых и актуальных задач при создании литиевых

CC BY NC

аккумуляторов с высокой удельной энергией и длительным сроком службы. Повышенные требования к безопасности, эффективности и долговечности делают особенно важным исследование межфазных процессов, определяющих устойчивость литиевого анода при различных режимах работы и внешних воздействиях. *Целью* данной работы является комплексная оценка влияния состава электролита на межфазную стабильность и электрохимические характеристики литиевого анода в системе Li–V_2O_5, а также выявление наиболее перспективного и практически значимого состава электролита. В исследовании анализировались четыре электролита на основе смеси пропиленкарбоната и 1,2-диметоксиэтана (3:7): 1 М литий дифтор(оксалато)бората (LiDFOB) и 1 М литий бис(трифторметансульфонил)имида (LiTFSI), каждый — в варианте с добавлением 15% 1,3-диоксолана (DOL) и без него. *Методы* включали гальваностатическое циклование при разных плотностях тока, анализ разрядных кривых и импедансную спектроскопию для оценки межфазного сопротивления и динамики формирования SEI-слоя. *Экспериментальные результаты* показали, что введение функциональной добавки DOL значительно улучшает электродные процессы: уменьшает межфазное сопротивление, повышает кулоновскую эффективность и обеспечивает более стабильное поведение литиевого анода. Наилучшие характеристики продемонстрировал электролит LiTFSI + 15% DOL, сохранивший около 75% первоначальной ёмкости к 300-му циклу. *Практическая значимость* исследования заключается в том, что выявленные закономерности позволяют целенаправленно оптимизировать электролитные системы для разработки более надёжных, энергоёмких и долговечных литиевых аккумуляторов нового поколения.

Ключевые слова: литиевый анод; V_2O_5; электролит; LiDFOB; LiTFSI; 1,3-диоксолан; кулоновская эффективность; импедансная спектроскопия

Introduction. Lithium-ion batteries (LIBs) have transformed the landscape of energy storage, underpinning the rapid expansion of portable electronics, electric vehicles, and grid-scale storage systems due to their high energy density and extended cycle life (Tarascon & Armand, 2001, Goodenough & Park, 2013, Zhang et al., 2018). Yet, the growing demand for batteries with even higher energy densities and enhanced safety characteristics has revealed the limitations of conventional graphite anodes. In this context, lithium metal has emerged as a promising alternative anode material, owing to its exceptionally high theoretical specific capacity (3860 $mAh \cdot g^{-1}$) and the lowest redox potential among known electrode materials (–3.04 V vs. SHE) (Xu, 2014, Lin et al., 2017, Bruce et al., 2012).

Despite its advantages, the practical application of lithium metal anodes (LMAs) is hampered by several critical issues, including the formation of lithium dendrites, continuous parasitic reactions with electrolyte components, and the development of an unstable and resistive solid electrolyte interphase (SEI) (Zhang, 2013, Liu et al., 2019, Chen et al., 2021a). These phenomena contribute to rapid capacity fading, reduced Coulombic efficiency, and severe safety hazards. Therefore, stabilizing the lithium–

electrolyte interface is a key prerequisite for the successful deployment of lithium metal batteries in commercial applications (Wang et al., 2022).

Recent progress has shown that ether-based electrolytes, particularly those comprising dimethoxyethane (DME) and 1,3-dioxolane (DOL), exhibit improved compatibility with lithium metal due to their low viscosity and ability to form flexible and uniform SEI layers (Hong et al., 2025, Ren et al., 2020, Chen et al., 2021b). In parallel, the use of advanced lithium salts such as lithium difluoro (oxalato)borate (LiDFOB) has proven effective in constructing SEI layers rich in inorganic components like LiF, which reduce interfacial resistance and improve passivation stability (Wang et al., 2020, Li et al., 2019). Lithium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide (LiTFSI), known for its superior ionic conductivity and electrochemical stability, is another widely explored salt, although it often requires additives or co-solvents to mitigate corrosion and side reactions (Li et al., 2024, Song et al., 2022).

The design of mixed-solvent systems combining high-permittivity components such as propylene carbonate (PC) with low-viscosity ethers offers a rational approach to balance ion transport, SEI formation, and chemical stability. Moreover, the choice of cathode material plays a crucial role in defining electrolyte requirements. Vanadium pentoxide (V_2O_5) stands out for its high theoretical capacity and layered structure enabling multivalent redox reactions, but it is also highly sensitive to electrolyte-induced degradation, especially in the presence of aggressive solvents or decomposition products (Hu et al., 2023, Kim et al., 2025).

To address these challenges, this study focuses on evaluating the electrochemical performance of lithium metal electrodes in Li–V_2O_5 systems using ether-based electrolytes with and without DOL co-solvent and two different lithium salts (LiDFOB and LiTFSI). The results provide new insights into the role of electrolyte formulation in stabilizing lithium metal interfaces and enabling long-term cycling in high-energy battery systems.

Materials and methods. All chemicals and materials were used as received without further purification. Lithium difluoro(oxalato)borate (LiDFOB, >99.5%, Solvionic) and lithium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide (LiTFSI, >99.9%, Sigma-Aldrich) were used as lithium salts. The solvents propylene carbonate (PC, 99.7%, Sigma-Aldrich), 1,2-dimethoxyethane (DME, 99.5%, Sigma-Aldrich), and 1,3-dioxolane (DOL, 99.8%, TCI) were dried over 3 Å molecular sieves and handled under an inert atmosphere.

Vanadium pentoxide (V_2O_5, 99.2%, Alfa Aesar) was used as the active cathode material. Conductive additives included multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs, >95%, CheapTubes Inc.) and Super C45 carbon black. The binder was polyvinylidene fluoride (PVDF, Solef 5130), dissolved in N-methyl-2-pyrrolidone (NMP, 99.5%, Merck). Aluminum foil (20 µm thick, MTI Corp.) served as the current collector, and lithium metal foil (150 µm thick, Ø15.6 mm, China Energy Lithium Co.) was used as the anode.

Cathode Preparation

The cathode slurry was composed of V_2O_5 (91 wt%), MWCNTs (1 wt%), Super C45 carbon black (3 wt%), and PVDF (5 wt%) dispersed in NMP. The mixture was magnetically stirred at room temperature for 12 hours to obtain a homogeneous paste.

CC BY NC

The slurry was cast onto aluminum foil using a Doctor Blade Coater (MTI AFA-II-V), with the blade height set to 200 μm to ensure uniform film thickness. The coated electrodes were dried at 100 °C under vacuum for 12 hours. After drying, the electrodes were calendered using a hot rolled to a final thickness of 100–120 μm and punched into 14 mm diameter discs. Prior to cell assembly, the discs were additionally dried under vacuum at 110 °C for 6 hours to remove residual moisture.

Electrolyte Preparation

Four electrolyte formulations were prepared based on a PC: DME solvent mixture (3:7 by volume) with 1 $mol \cdot L^{-1}$ concentration of either LiDFOB or LiTFSI. Two of the formulations included 15 vol% of DOL as a co-solvent:

1. 1 M LiDFOB in PC: DME (3:7);
2. 1 M LiDFOB in PC: DME (3:7) + 15% DOL;
3. 1 M LiTFSI in PC: DME (3:7);
4. 1 M LiTFSI in PC: DME (3:7) + 15% DOL.

Each solution was stirred for 12 hours, filtered through a 0.22 μm PTFE syringe filter, and stored in sealed glass vials under argon.

Cell Assembly

CR2032-type coin cells were assembled in an argon-filled glovebox (SPECS GB02M, Russia) equipped with oxygen and moisture sensors. The glovebox-maintained oxygen levels below 1.0 ppm and moisture content below 0.1 ppm, which was essential for handling lithium metal and ether-based electrolytes. Celgard 2325 microporous polypropylene membranes were used as separators. Approximately 100 μL of electrolyte was added to each cell. Cells were sealed using a hydraulic crimper and allowed to rest for 12 hours prior to testing to ensure proper electrolyte wetting. For each electrolyte formulation, 2–3 cells were assembled to verify reproducibility.

Electrochemical Testing

Galvanostatic cycling was performed using a BioLogic VMP-300 multichannel potentiostat in the voltage range of 2.2–3.8 V. Rate capability tests were carried out at C/2, C, 2C, and 5C, followed by a return to C/2 to assess capacity recovery. Long-term cycling was conducted at C/2 for 300 cycles. Coulombic efficiency was calculated as the ratio of discharge to charge capacity in each cycle.

Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

EIS measurements were performed before and after the first three formation cycles. The frequency range was from 100 kHz to 10 mHz with an amplitude of 10 mV. All impedance measurements were conducted at room temperature (25 ± 1 °C). Data were analyzed using equivalent circuit models in EC-Lab software.

Results and discussion. The primary objective of this study was to investigate the impact of electrolyte composition on the stability of the lithium metal electrode in Li–V_2O_5 systems under varying discharge rates and extended cycling conditions. Four electrolyte systems were evaluated:

1. 1 M LiDFOB in PC: DME (3:7);
2. 1 M LiDFOB in PC: DME (3:7) + 15% DOL;
3. 1 M LiTFSI in PC: DME (3:7);
4. 1 M LiTFSI in PC: DME (3:7) + 15% DOL.

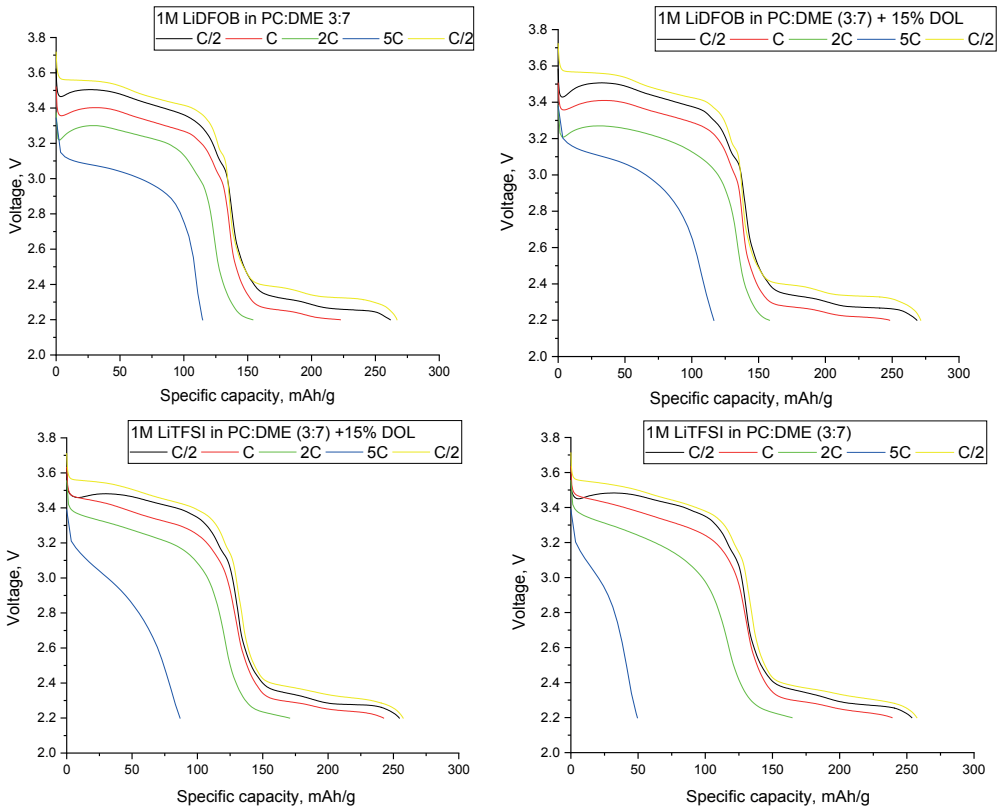


Figure 1 - Discharge voltage profiles of Li—V_2O_5 cells with different electrolytes at varying discharge rates: (a) 1 M LiDFOB in PC:DME (3:7); (b) 1 M LiDFOB in PC:DME (3:7) + 15% DOL; (c) 1 M LiTFSI in PC:DME (3:7) + 15% DOL; (d) 1 M LiTFSI in PC:DME (3:7)

Figure 1 presents the discharge voltage profiles at current densities of C/2, 1C, 2C, and 5C for the different electrolytes. While all systems demonstrated similar specific capacities at low discharge rates (C/2), significant differences emerged under higher current loads. The LiTFSI-based electrolyte without DOL exhibited the most rapid performance degradation with increasing current, showing pronounced polarization and capacity drop, especially at 2C and 5C. In contrast, electrolytes containing DOL-particularly the LiDFOB + DOL formulation-retained higher capacities and flatter voltage plateaus, indicating improved lithium-ion conductivity and lower interfacial resistance at elevated rates.

These results suggest that DOL plays a critical role in facilitating lithium-ion transport and suppressing interfacial polarization at high rates, likely due to its low viscosity and ability to form an elastic, ion-conductive SEI layer. The superior performance of the LiDFOB + DOL electrolyte can be attributed to the synergistic effects of the borate salt, which promotes the formation of a stable SEI enriched with LiF and boron species, and DOL, which enhances the mechanical integrity of the interphase. Together, these factors enable more uniform lithium deposition and reduce charge-transfer resistance, thereby improving voltage stability under dynamic conditions.

CC BY NC

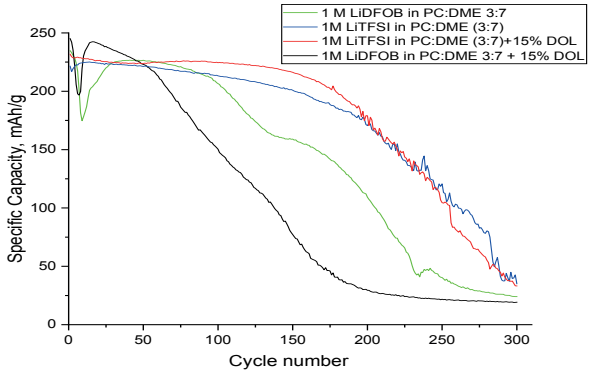


Figure 2 - Cycling performance of Li—V_2O_5 cells with different electrolyte compositions: variation of specific discharge capacity versus cycle number

Figure 2 displays the long-term cycling performance up to 300 cycles. The results clearly show that DOL-containing electrolytes exhibited superior capacity retention. The LiTFSI + DOL system retained ~85% of its initial capacity after 300 cycles, while LiDFOB + DOL retained ~75%. In contrast, systems without DOL showed significant capacity degradation: LiDFOB retained less than 50%, and LiTFSI about 60%. Figure 2 presents the long-term cycling performance of Li– V_2O_5 cells with different electrolyte compositions over 300 cycles. Among the four tested systems, the 1 M LiTFSI in PC: DME (3:7) with 15% DOL exhibited the most stable cycling behavior, retaining approximately 75% of its initial specific capacity after 300 cycles. This result indicates that the combination of LiTFSI with DOL effectively stabilizes the lithium metal anode, likely due to the formation of a uniform, elastic, and ion-conductive SEI layer supported by the synergistic effects of the high-ionic-conductivity TFSI anion and DOL-derived polymeric interface.

Surprisingly, the electrolyte with 1 M LiDFOB + 15% DOL, which had demonstrated excellent rate capability in Figure 1, showed the most rapid capacity fading during extended cycling. The capacity dropped sharply after ~50 cycles and approached zero by the 300th cycle. This suggests that while the initial SEI formed by LiDFOB and DOL may be effective, it lacks long-term mechanical or chemical stability**,** potentially leading to SEI breakdown, increased resistance, or parasitic reactions over time.

The electrolyte 1 M LiDFOB without DOL maintained moderate cycling performance, retaining about 60% of its initial capacity, suggesting that LiDFOB alone forms a somewhat stable SEI, albeit less effective under extended stress. The electrolyte 1 M LiTFSI without DOL, showed around 50% capacity retention**,** highlighting that while TFSI provides good ionic conductivity, the absence of a co-solvent like DOL results in unstable interphase growth and gradual degradation.

Overall, these results emphasize that the combination of TFSI□ with DOL is more favorable for long-term cycling performance than DFOB□ with DOL, despite the latter showing better initial rate capability. This finding underlines the importance of compatibility between the lithium salt and co-solvent in designing electrolytes for high-energy lithium metal batteries.

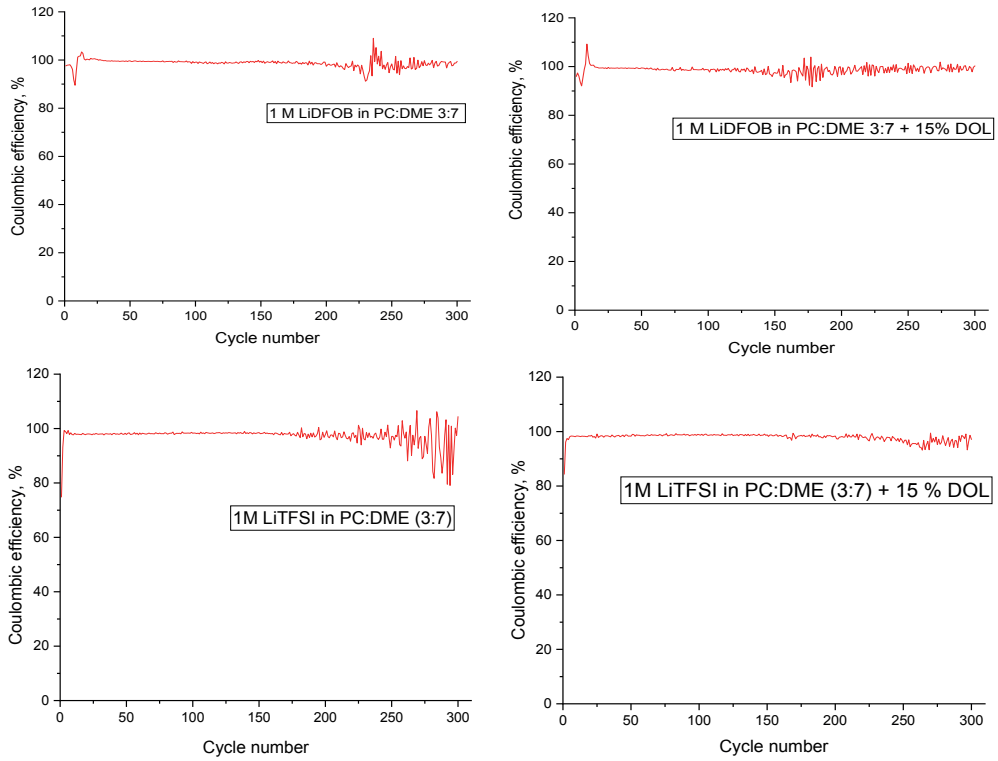


Figure 3 - Coulombic efficiency of Li—V_2O_5 cells over cycling for different electrolyte compositions: (a) 1 M LiDFOB in PC: DME (3:7); (b) 1 M LiDFOB in PC: DME (3:7) + 15% DOL; (c) 1 M LiTFSI in PC: DME (3:7) + 15% DOL; (d) 1 M LiTFSI in PC: DME (3:7)

Figure 3 presents the evolution of Coulombic efficiency (CE) in Li–V_2O_5 cells with different electrolytes over 300 cycles. All systems achieved CE values close to or above 98%, but important differences in stability and fluctuation patterns were observed.

Electrolytes containing DOL initially reached higher CE values (approaching 99—100%) within the first few cycles. However, over prolonged cycling, both DOL-containing systems exhibited increased fluctuations in CE, especially after 200 cycles. This behavior may indicate evolving interfacial instability or progressive degradation of the SEI formed in the presence of DOL, possibly due to mechanical stress or electrolyte depletion.

In contrast, DOL-free electrolytes demonstrated lower absolute CE values, particularly in the early cycles, but maintained more stable and consistent CE behavior throughout the entire test. This suggests that although the SEI formed without DOL may be less protective or conductive, it remains chemically more uniform and structurally stable over time, minimizing cycle-to-cycle variability.

Thus, the use of DOL improves initial CE and SEI formation, but its long-term benefits may be limited by mechanical or chemical degradation of the polymer-rich interfacial layer. The lower fluctuation in CE observed in DOL-free systems highlights the trade-off between initial interfacial activation and long-term electrochemical stability.

CC BY NC

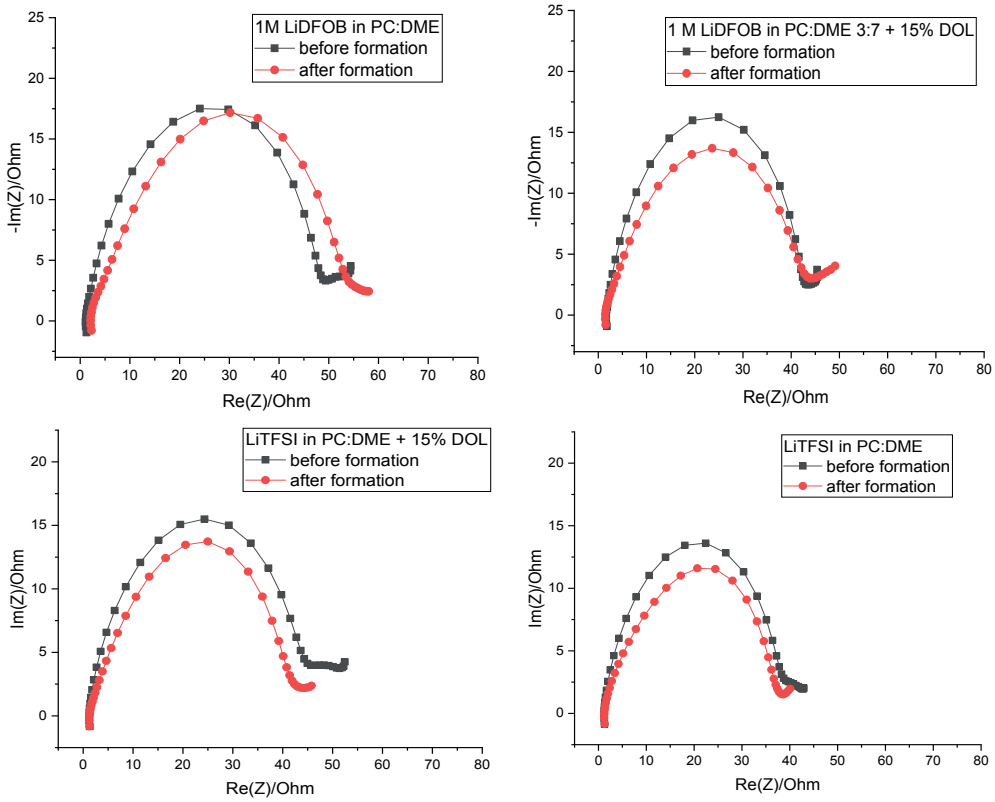


Figure 4 - Nyquist plots of Li–V_2O_5 cells before and after initial formation cycles for different electrolyte formulations: (a) 1 M LiDFOB in PC: DME (3:7); (b) 1 M LiDFOB in PC: DME (3:7) + 15% DOL; (c) 1 M LiTFSI in PC: DME (3:7) + 15% DOL; (d) 1 M LiTFSI in PC: DME (3:7)

Figure 4 presents the results of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) for Li—V_2O_5 cells with different electrolyte compositions, measured before and after initial formation cycles. In all cases, the Nyquist plots exhibit characteristic semicircles in the high-to-mid frequency range, which correspond to charge-transfer resistance (R_ct) and interfacial impedance associated with the formation and properties of the solid electrolyte interphase (SEI) on the lithium metal anode. After formation, all systems demonstrate a decrease in semicircle diameter, indicating improved electrode—electrolyte contact due to SEI development. However, the extent and stability of this improvement differ markedly depending on the electrolyte formulation.

The electrolyte based on 1 M LiTFSI in PC: DME (3:7) + 15% DOL (Figure 4c) exhibited the lowest interfacial resistance and minimal increase in R_ct after formation, suggesting the formation of a highly conductive and mechanically robust SEI. These findings are consistent with earlier results shown in Figure 2 (superior capacity retention) and Figure 3 (high and stable Coulombic efficiency), confirming that the combination of LiTFSI and DOL leads to an interfacial structure favorable for long-term cycling and fast lithium-ion transport.

In contrast, the LiDFOB + DOL system (Figure 4b), while initially promising

in high-rate discharge tests (Figure 1), showed a pronounced increase in impedance after formation. This may be attributed to the gradual accumulation of decomposition products or instability of the polymer-rich SEI formed from DOL, leading to higher resistance and unstable performance in prolonged cycling (Figure 2) and fluctuating CE (Figure 3). Additionally, the LiTFSI-only electrolyte (Figure 4d) maintained moderately low impedance, further supporting the known electrochemical stability of the $TFSI^-$ anion. This agrees with prior, which emphasize the benefits of LiTFSI in high-performance lithium battery systems due to its weak coordination strength and favorable SEI chemistry.

In summary, this EIS investigation confirms that LiTFSI-based electrolytes, particularly in combination with DOL, yield more stable, conductive, and low-resistance interphases, which directly contribute to enhanced electrochemical performance and durability of Li— V_2O_5 cells.

Conclusion. The growing demand for high-energy and long-life lithium-metal batteries requires the development of advanced electrolyte systems capable of stabilizing the lithium anode and ensuring compatibility with high-voltage cathode materials. This study addresses this challenge by systematically evaluating the impact of different electrolyte compositions - based on LiDFOB and LiTFSI salts in PC: DME solvent mixtures, with and without the addition of 1,3-dioxolane (DOL) - on the electrochemical performance of Li— V_2O_5 cells.

The research confirmed that electrolyte composition plays a decisive role in governing the cycling stability, Coulombic efficiency, and interfacial resistance of lithium-metal batteries. Electrolytes containing DOL showed superior rate performance, particularly LiDFOB + DOL**,** due to improved ionic conductivity and reduced polarization. Notably, the LiDFOB + DOL electrolyte demonstrated excellent performance at high current densities, maintaining stable operation under increased rate conditions. However, long-term cycling tests revealed that LiTFSI + DOL offers the best combination of capacity retention (~75% after 300 cycles) and high Coulombic efficiency, which remained consistently close to 99%. Electrochemical impedance spectroscopy further demonstrated that this formulation yields the lowest charge-transfer resistance after formation, highlighting the formation of a stable and conductive SEI.

The use of LiTFSI, a salt known for its high ionic mobility and chemical stability, together with DOL, which enables the formation of an elastic polymer-rich SEI, proved to be particularly effective. The synergy between these two components led to improved interfacial stability, suppressed parasitic reactions, and reduced degradation over time.

By contrast, while the LiDFOB + DOL system provided excellent initial performance, its stability under extended cycling was limited. This underlines the importance of not only additive selection but also salt—solvent compatibility in tailoring electrolyte formulations for specific battery chemistries.

In conclusion, the 1 M LiTFSI in PC: DME (3:7) + 15% DOL electrolyte demonstrated the most promising overall performance and can be considered a viable candidate for further scaling and integration into advanced lithium-metal battery systems. Future work may focus on optimizing DOL concentration, incorporating additional additives, or extending the approach to other cathode materials to further enhance performance.

CC BY NC

References

Bruce P.G., Freunberger S.A., Hardwick L.J., Tarascon J.-M. (2012) Li—O2 and Li—S batteries with high energy storage. Nature Materials 11 19—29 https://doi.org/10.1038/nmat3191 (in English)

Chen L., Fu J., Wang Z., Lu Y., Qin B., Zhang X., Chou S.L., Dou S.X. (2021) Electrolyte engineering for lithium metal batteries. Advanced Functional Materials 31 2101275 https://doi.org/10.1002/adfm.202101275 (in English)

Chen X., Xie D., Zhang R., Shen X., Chen Y., Zhang Q. (2021) Dendrite-Free Li Metal Anodes Suppressing Lithium Dendrites via Lithium Nitrate/Lithium Sulfide Dual Additives. ACS Energy Letters 6 1137—1145 https://doi.org/10.1021/acsenergylett.1c00112 (in English)

Goodenough J.B., Park K.-S. (2013) The Li-Ion Rechargeable Battery A Perspective. Journal of the American Chemical Society 135 1167—1176. https://doi.org/10.1021/ja3091438 (in English)

Hu P., et al. (2023) Vanadium Oxide Phase Diagrams Structures Synthesis and Applications. Chemical Reviews 123(8) 4353—4415. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00546 (in English)

Kim S., Cho K., Lee J., Lee S. (2025) Interface Engineering for Stable Anode-Free Lithium Metal Batteries. Nature Energy 10 420—431. https://doi.org/10.1038/s41560-024-01234-3 (in English)

Li N., Chen Z., Zhu M., Yang J., Li Z., Pei A., Wu C., Wang H., Yu Y. (2019) Regulating SEI Components via Electrolyte Engineering for High Performance Lithium Metal Batteries. Nano Energy 59 732—741. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.03.036 (in English)

Li Z., Wang L., Huang X., He X. (2024) Lithium Bis(Trifluoromethanesulfonyl)Imide (LiTFSI) A Prominent Lithium Salt in Lithium□Ion Battery Electrolytes — Fundamentals Progress and Future Perspectives. Advanced Functional Materials 34(48). https://doi.org/10.1002/adfm.202408319 (in English)

Lin D., Liu Y., Cui Y. (2017) Reviving the lithium metal anode for high-energy batteries. Nature Nanotechnology 12 194—206 https://doi.org/10.1038/nnano.2017.16 (in English)

Liu J., Bao Z., Cui Y., Dufek E.J., Goodenough J.B., Khalifah P., Li Q., Philip N., Yang J.,Xu W. (2019) Pathways for practical high-energy long-cycling lithium metal batteries. Nature Energy 4 180—186. https://doi.org/10.1038/s41560-019-0338-x (in English)

Ren D., He Y., Jin Y., Wang J., Qi Y., Xu W. (2020) Regulating Interphase Chemistry for Enhanced Li Metal Cycling. Advanced Energy Materials 10 1902675. https://doi.org/10.1002/aenm.201902675 (in English)

Song Z., et al. (2022) Bis(fluorosulfonyl)imide-based electrolyte for rechargeable lithium batteries A perspective. Journal of Power Sources Advances 14 100088. https://doi.org/10.1016/j.powera.2022.100088 (in English)

Tarascon J.-M., Armand M. (2001) Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. Nature 414 359—367. https://doi.org/10.1038/35104644 (in English)

Wang X., Kerr R., Yi E., Fang C. (2022) Toward Practical Li-Metal Anodes From Fundamental Understanding to Engineering Design. Advanced Materials 34 2107570. https://doi.org/10.1002/adma.202107570 (in English)

Wang X., Shen X., Zhang R., Chen X., Zhang Q. (2020) Interfacial chemistry in solid-state batteries Formation mechanisms characterization techniques and research progress. Chemical Reviews 120 4257—4300. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00835 (in English)

Xu K. (2014) Electrolytes and Interphases in Li-Ion Batteries and Beyond. Chemical Reviews 114 11503—11618. https://doi.org/10.1021/cr500003w (in English)

Zhang H., Eshetu G.G., Laruelle S., Grugeon S., Armand M., Rojo T. (2018) Electrolyte Additives for Lithium Metal Anodes and Rechargeable Lithium Metal Batteries Progress and Perspectives. Advanced Energy Materials 8 1703495. https://doi.org/10.1002/aenm.201703495 (in English)

Zhang S.S. (2013) Liquid electrolyte lithium/sulfur battery Fundamental chemistry problems and solutions. Journal of Power Sources 231 153—162. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.12.102 (in English)

Zhou X., Ren D., Yang J., Cui G. (2024) Strategies for High Energy Density and Long Life Anode-Free Lithium-Metal Batteries. Energy Storage Materials 64 856—874. https://doi.org/10.1016/j.ensm.2024.03.019 (in English)

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 208–226

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.395

ҒТАХР 31.21.01; 87.15.91
ӘОК 556.04

©B.K. Massalimova[1,*], A.S. Shayakhmetova[1], A.S.Darmenbayeva[2], 2025.
[1]M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan;
[2] M.Kh. Dulaty Taraz University, Taraz, Kazakhstan.
E-mail: bkmasalimova@ku.edu.kz

WATER RESOURCES OF NORTHERN KAZAKHSTAN: ENVIRONMENTAL MONITORING AND SUSTAINABLE MANAGEMENT

Massalimova Bakytgul — candidate of chemical sciences, professor, M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan,
E-mail: bkmasalimova@ku.edu.kz; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0135-9712;
Shayakhmetova Altyn — candidate of Agricultural Sciences, associate professor, M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan,
E-mail: asshayahmetova@ku.edu.kz; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8446-7446;
Darmenbayeva Akmaral — PhD in Chemistry, Associate Professor of the Department of Chemistry and Chemical Technology, M.Kh. Dulaty Taraz University, Taraz, Kazakhstan,
E-mail: maral88.ad@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2974-0398.

Abstract. In the context of increasing anthropogenic pressure on water resources, climate change and increasing water scarcity, the issue of sustainable water resource management is of particular relevance for Northern Kazakhstan. The dominance of agriculture in the region's economy, the development of mining and mining production, and the deterioration of municipal infrastructure pose a significant threat to the quality and availability of fresh water, which in turn affects the stability of ecosystems and public health. Systematize modern technological solutions for environmental monitoring and water purification, as well as assess institutional and management mechanisms that ensure the rational use of water resources. A systematic literature review of domestic and foreign scientific publications, analysis of regulatory and legal documents, as well as a comparative assessment of modern technologies in the field of environmental monitoring and water purification were used as research methods. Satellite remote sensing, sensor networks, geoinformation systems, bioindication methods, and membrane, sorption, and biological purification technologies were considered. The practical significance is determined by the formation of scientifically based recommendations aimed at improving the water resources management system, reducing environmental risks, improving the quality of drinking water and protecting the health of the population of

Northern Kazakhstan. Based on the summarized data, the main challenges are identified and promising areas for the development of water technologies are identified, including digitalization, the use of artificial intelligence and an interdisciplinary approach. A conclusion is drawn about the need to integrate science, management and business to improve water security and public health in the region.

Keywords: water resources, environmental monitoring, rational water use, satellite remote sensing, water purification technologies, institutional management, digitalization, Northern Kazakhstan

Financing. *The study was conducted with the financial support of the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (BR28712227).*

©Б.К. Масалимова[1*], А.С. Шаяхметова[1], А.С. Дарменбаева[2], 2025.
[1]М.Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті,
Петропавл, Қазақстан;
[2]М.Х.Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, Қазақстан.
E-mail: bkmasalimova@ku.edu.kz

СОЛТҮСТІК ҚАЗАҚСТАННЫҢ СУ РЕСУРСТАРЫ: ЭКОЛОГИЯЛЫҚ МОНИТОРИНГ ЖӘНЕ ҰТЫМДЫ БАСҚАРУ

Масалимова Бакытгуль — Ххимия ғылымдарының кандидаты, профессор, М.Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавл, Қазақстан,
E-mail: bkmasalimova@ku.edu.kz; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0125;
Шаяхметова Алтын — Ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, М.Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавл, Қазақстан;
E-mail: asshayahmetova@ku.edu.kz; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8446-7446;
Дарменбаева Ақмарал — Химия мамандығы бойынша PhD, М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, «Химия және химиялық технология» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Тараз, Қазақстан, E-mail: maral88.ad@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2974-0398.

Аннотация. Су ресурстарына түсетін антропогендік қысымның күшеюі, климаттың өзгеруі және су тапшылығының артуы жағдайында Солтүстік Қазақстан үшін су ресурстарын тұрақты басқару мәселесі ерекше өзектілікке ие. Аймақтың экономикасында ауыл шаруашылығының басым болуы, тау-кен өндірісінің дамуы және коммуналдық инфрақұрылымның тозуы тұщы судың сапасы мен қолжетімділігіне елеулі қауіп төндіреді, бұл өз кезегінде экожүйелердің тұрақтылығына және халық денсаулығына әсер етеді. Осы шолу мақаласының мақсаты — Солтүстік Қазақстандағы су ресурстарының қазіргі жағдайын кешенді талдау, экологиялық мониторинг пен су тазартудың заманауи технологиялық шешімдерін жүйелеу, сондай-ақ су ресурстарын ұтымды пайдалануды қамтамасыз ететін институционалдық және басқарушылық тетіктерді бағалау. Зерттеу әдістері ретінде отандық және шетелдік ғылыми жарияланымдарға жүйелі әдеби шолу жүргізу, нормативтік-құқықтық құжаттарды талдау, сондай-ақ экологиялық

мониторинг пен су тазарту саласындағы заманауи технологияларды салыстырмалы бағалау қолданылды. Спутниктік қашықтықтан зондтау, сенсорлық желілер, геоақпараттық жүйелер, биоиндикация әдістері және мембраналық, сорбциялық, биологиялық тазарту технологиялары қарастырылды. Зерттеу нәтижелері су ресурстарын басқарудағы негізгі технологиялық, институционалдық және кадрлық қиындықтарды айқындап, цифрландыру мен жасанды интеллектті енгізудің жоғары әлеуетін көрсетті. Практикалық маңызы су ресурстарын басқару жүйесін жетілдіру, экологиялық тәуекелдерді төмендету, ауыз су сапасын жақсарту және Солтүстік Қазақстан халқының денсаулығын қорғауға бағытталған ғылыми-негізделген ұсынымдарды қалыптастырумен айқындалады. Қорытындыланған деректер негізінде негізгі қиындықтар белгіленіп, су технологияларын дамытудың перспективалы бағыттары, соның ішінде цифрландыру, жасанды интеллектті пайдалану және пәнаралық тәсіл анықталады. Аймақтағы су қауіпсіздігі мен қоғамдық денсаулықты жақсарту үшін ғылымды, басқаруды және бизнесті біріктіру қажеттілігі туралы қорытынды жасалды.

Түйін сөздер: су ресурстары, қоршаған ортаны бақылау, суды тиімді пайдалану, спутниктік қашықтықтан зондтау, суды тазарту технологиялары, институционалдық басқару, цифрландыру, Солтүстік Қазақстан

©Б.К. Масалимова[1*], А.С. Шаяхметова[1], А.С. Дарменбаева[2], 2025.
[1]Северо-Казахстанский университет имени М.Козыбаева,
Петропавловск, Казахстан;
[2]Таразский университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан.
E-mail: bkmasalimova@ku.edu.kz

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА: ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И УСТОЙЧИВОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Масалимова Бакытгуль — Кандидат химических наук, профессор, Северо-Казахстанский университет имени М.Козыбаева, Петропавловск, Казахстан,
E-mail: bkmasalimova@ku.edu.kz; ORCID:https://orcid.org/0000-0003-0135-9712;
Шаяхметова Алтын — Кандидат сельскохозяйственных наук, ассоциированный профессор, Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, г. Петропавловск, Казахстан,
E-mail: asshayahmetova@ku.edu.kz; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8446-7446;
Дарменбаева Акмарал — PhD по химии, ассоциированный профессор кафедры «Химии и химической технологии» Таразского университета имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан,
E-mail: maral88.ad@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2974-0398.

Аннотация. В условиях растущего антропогенного воздействия на водные ресурсы, изменения климата и усиливающегося дефицита воды вопрос устойчивого управления водными запасами приобретает особую значимость для Северного Казахстана. Доминирование сельского хозяйства в экономике региона, развитие горнодобывающей промышленности, а также деградация муниципальной инфраструктуры создают серьёзные угрозы качеству и доступности пресной воды, что напрямую влияет на состояние экосистем и здоровье населения. *Цель данной*

обзорной статьи - провести всесторонний анализ современного состояния водных ресурсов Северного Казахстана, систематизировать передовые технологические решения в области экологического мониторинга и очистки воды, а также оценить институциональные и управленческие механизмы, обеспечивающие рациональное водопользование. *Методы исследования* включают систематический анализ отечественных и зарубежных научных публикаций, изучение нормативно-правовой документации, а также сравнительную оценку современных технологий мониторинга и очистки воды. Рассматривались спутниковое дистанционное зондирование, сенсорные сети, геоинформационные системы, методы биоиндикации, а также мембранные, сорбционные и биологические технологии очистки. *Результаты исследования* выявили ключевые технологические, институциональные и кадровые проблемы, затрудняющие эффективное управление водными ресурсами региона, а также продемонстрировали высокий потенциал цифровизации и использования искусственного интеллекта в сфере водных технологий. *Практическая значимость работы* заключается в разработке научно обоснованных рекомендаций, направленных на совершенствование системы управления водными ресурсами, снижение экологических рисков, улучшение качества питьевой воды и защиту здоровья населения Северного Казахстана. На основе полученных данных определены основные проблемы, тенденции и перспективные направления развития водных технологий, включая цифровизацию, внедрение искусственного интеллекта и междисциплинарный подход. Сделан вывод о необходимости интеграции науки, управления и бизнеса для повышения водной безопасности и обеспечения устойчивого развития региона.

Ключевые слова: водные ресурсы, экологический мониторинг, рациональное водопользование, спутниковое дистанционное зондирование, технологии очистки воды, институциональное управление, цифровизация, Северный Казахстан

Кіріспе. Соңғы онжылдықтарда жаһандық климаттың өзгеруі және антропогендік қысымның артуы жағдайында халықты жоғары сапалы су ресурстарымен қамтамасыз ету мәселесі өзекті болып келеді. БҰҰ-ның 2023 жылғы Дүниежүзілік су ресурстарын дамыту туралы есебіне сәйкес, бүгінде әлемде екі миллиардтан астам адам қауіпсіз ауыз су тапшылығына тап болуда, ал ағынды сулардың 80%-ға дейіні тиісті тазартусыз табиғи су айдындарына ағызылады, бұл су экожүйелерінің деградациясына және санитарлық-гигиеналық тәуекелдердің артуына әкеледі (UN-Water, 2023). Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымы сонымен қатар қауіпсіз емес судың жұқпалы және токсикологиялық аурулардың таралуында, әсіресе су тазарту инфрақұрылымы ластану деңгейі мен халықтың қажеттіліктерін қанағаттандырмайтын аймақтарда негізгі фактор болып қала беретінін атап өтеді. Бұл жаһандық үрдістер су ресурстарын бақылауға, тазартуға және ұтымды пайдалануға жаңа тәсілдерді әзірлеу қажеттілігін тудырады, бұл тек заманауи технологиялық стандарттарға ғана емес, сонымен қатар экожүйелердің тұрақты дамуын және адам денсаулығын қорғауды қамтамасыз етеді.

Солтүстік Қазақстандағы жағдай бірқатар жалпы жаһандық қиындықтарды көрсетеді, сонымен қатар өзіндік аймақтық ерекшеліктері бар. Аймақтың су экожүйелеріне ауыл шаруашылығын, өнеркәсіпті және халықты қолдауда маңызды рөл атқаратын өзендер, көлдер және жер асты сулы қабаттары кіреді. Сонымен қатар, көптеген зерттеулер Солтүстік Қазақстандағы су айдындарының экологиялық жағдайының нашарлауын, ең алдымен ауыр металдармен, агрохимиялық заттармен ластанумен және қалалық ағынды сулардың төгілуімен байланысты екенін көрсетті. Осындай динамика Орталық Азияның басқа да көптеген аймақтарында байқалады, онда гидрологиялық режимдердің өзгеруі, өзендердің таяздануы және температураның көтерілуі су ресурстарына қысым жасап, экологиялық тепе-теңдікті сақтауды қиындатады. Осылайша, Солтүстік Қазақстанның су экожүйелерінің жағдайын жеке-жеке емес, керісінше жер үсті және жер асты суларының осалдығын анықтайтын аймақтық және жаһандық процестер тұрғысынан қарастыру керек.

Осы қиындықтар аясында су ресурстарын ұтымды басқару қоршаған ортаны қорғау саясаты мен ғылыми зерттеулердің негізгі бағытына айналуда. Қазіргі үрдістер суды тиімді пайдалану жоғары технологиялық суды тазарту және сапаны бақылау әдістерін енгізбей мүмкін емес екенін көрсетеді. Мысалы, мембраналық сүзу әдістері және озық тотығу процестері химиялық және биологиялық ластаушы заттардың кең ауқымын жоюға мүмкіндік береді және жоғары сапалы суды тазартуды қамтамасыз ету үшін бүкіл әлемде кеңінен қолданылады (Zhang et.al., 2024).

Наноматериалдар технологияларының жедел дамуы ауыр металдарды, органикалық токсиканттарды және микроластаушы заттарды селективті түрде жою үшін жаңа мүмкіндіктер ашты, оларды дәстүрлі әдістер көбінесе тиімді түрде жоя алмайды (Saleem & Zaidi, 2020). Сонымен қатар, металдар мен радионуклидтерді алуда жоғары тиімділікті қамтамасыз ету үшін сорбциялық материалдар жетілдірілуде, бұл ауылшаруашылық және антропогендік әсерлері қарқынды аймақтар үшін өзекті. Мұның бәрі суды тазарту мен қайта пайдаланудың тұрақты модельдеріне көшудің негізін құрайды.

Дегенмен, технологиялық шешімдер сенімді суды бақылау жүйелерінсіз тиімді бола алмайды. Соңғы жылдары су сапасын бақылаудың сандық және автоматтандырылған әдістерінің, соның ішінде қашықтықтан зондтау, спутниктік бақылаулар, заттар интернеті (IoT) сенсорлық желілерінің және ластаушы заттардың химиялық құрамы мен динамикасы бойынша үлкен деректерді талдауға арналған машиналық оқыту әдістерінің қарқынды дамуы байқалды (Mohan et al., 2025). Бұл технологиялар, әсіресе, ластану нүктелерінің кеңістіктік таралуы мониторингтің жоғары тиімділігі мен дәлдігін талап ететін ауылшаруашылық аймақтарында сұранысқа ие болып келеді. Солтүстік Қазақстан үшін мұндай шешімдерді біріктіру ерекше құнды, себебі аймақ ластану көздерін жедел анықтау және су сапасының төмендеу қаупін болжау қажеттілігіне тап болуда.

Осылайша, Солтүстік Қазақстандағы су ресурстарын ұтымды басқару қоршаған ортаны талдауды, заманауи су тазарту технологияларын және көп деңгейлі

CC BY NC

мониторинг жүйелерін біріктіретін кешенді тәсілді қажет етеді. Аймақтың су ресурстары халықтың өмір сүру сапасымен тығыз байланысты: ластанған су денсаулыққа қауіп төндіреді, әлеуметтік-экономикалық тәуекелдерді арттырады және тұрақты даму әлеуетін шектейді. Мысалы, зерттеулер судағы нитраттар мен ауыр металдардың болуы созылмалы және жедел аурулардың дамуына ықпал ететінін, су қауіпсіздігі мәселесін тек экологиялық қана емес, сонымен қатар әлеуметтік тұрғыдан да шешетінін көрсетеді (Ayejoto et al., 2021). Осы жағдайларда мониторинг және су тазарту жүйелерін ғылыми және технологиялық жаңарту стратегиялық мақсатқа айналуда.

Бұл шолу Солтүстік Қазақстандағы су ресурстарының қазіргі жағдайын талдауға, суды бақылау және тазартудың қазіргі технологияларын зерттеуге және оларды тиімді енгізуге кедергі келтіретін негізгі қиындықтарды анықтауға бағытталған. Бұл жұмыстың ғылыми жаңалығы жаһандық ғылыми тәсілдерді аймақтық ерекшеліктермен біріктіруде, бұл су экожүйелерінің жағдайын кешенді бағалауға және оларды ұтымды пайдалану мен қорғаудың перспективалы аймақтарын анықтауға мүмкіндік береді. Зерттеудің маңыздылығы су ресурстарын басқару тиімділігін арттыру қоршаған ортаның тұрақтылығына, қоғамдық денсаулыққа және аймақтың тұрақты әлеуметтік-экономикалық дамуына тікелей әсер ететіндігімен байланысты.

Зерттеу материалдары. Зерттеу материалдары ретінде Солтүстік Қазақстан аймағындағы су ресурстарының жағдайын сипаттайтын отандық және шетелдік ғылыми жарияланымдар, халықаралық ұйымдардың (БҰҰ, Дүниежүзілік банк, ДДСҰ) аналитикалық есептері, сондай-ақ Қазақстан Республикасының нормативтік-құқықтық құжаттары пайдаланылды. Сонымен қатар зерттеуде гидрологиялық және экологиялық мониторинг деректері, оның ішінде «Қазгидромет» ұсынған ашық ақпарат көздері, спутниктік қашықтықтан зондтау материалдары және аймақтың негізгі су объектілері бойынша жинақталған статистикалық мәліметтер қолданылды. Материалдар Солтүстік Қазақстанның гидрографиялық, экологиялық және әлеуметтік-экономикалық ерекшеліктерін кешенді түрде бағалауға мүмкіндік берді.

Зерттеу әдістері. Зерттеу барысында жүйелі әдеби шолу әдісі қолданылып, су ресурстарын басқару, экологиялық мониторинг және су тазарту салаларындағы заманауи ғылыми еңбектерге талдау жүргізілді. Сонымен қатар нормативтік-құқықтық актілерді салыстырмалы талдау, экологиялық және технологиялық шешімдерді жіктеу, сондай-ақ алынған деректерді синтездеу және жалпылау әдістері пайдаланылды. Су ресурстарын мониторингілеу мен басқарудың заманауи тәсілдерін бағалау үшін спутниктік қашықтықтан зондтау, геоақпараттық жүйелер, сенсорлық желілер және цифрлық платформаларға негізделген шешімдерге шолу жасалды. Қолданылған әдістер аймақтық деңгейде су ресурстарын ұтымды басқарудың негізгі үрдістері мен перспективаларын айқындауға мүмкіндік берді.

Зерттеу нәтижелері және талқылау. Солтүстік Қазақстандағы су ресурстарының қазіргі жағдайы. Солтүстік Қазақстандағы су ресурстарының қазіргі жағдайы ерекше табиғи жағдайлар мен антропогендік қысымның артуының

үйлесімімен анықталады. Аймақ далалық және орманды дала аймағында орналасқан, салыстырмалы түрде төмен ылғалдылықпен және жыл аралық ағынның жоғары өзгергіштігімен сипатталады, бұл су ресурстарын табиғи түрде осал етеді. Үш өзен бассейні маңызды рөл атқарады: Есіл, Тобыл және Ертіс, сондай-ақ күрделі гидрографиялық желіні құрайтын көптеген шағын көлдер мен эндорейлік жүйелер. Қазақстанның су ресурстарына классикалық шолу солтүстік және солтүстік-шығыс аймақтарында ауыл шаруашылығын, өнеркәсіпті және елді мекендерді сумен қамтамасыз ететін, бірақ сонымен бірге климаттың ауытқулары мен экономикалық дамуға өте сезімтал шағын өзендер мен көлдердің тығыздығы жоғары екенін атап көрсетеді.

Есіл бассейні Солтүстік Қазақстанның су балансында орталық орын алады. Бұл негізінен Қазақстаннан басталатын жалғыз ірі трансшекаралық өзен, оның су ағысының ауданы шамамен 177 000 км² және ұзындығы шамамен 2450 км (Yapiyev, et al. 2025). Жақында жүргізілген зерттеулер Есіл бассейніндегі жер үсті суларының жалпы ресурстары орташа есеппен жылына шамамен 2,5 км³ болатынын көрсетеді, бірақ құрғақ кезеңдерде олар екі еседен астамға азаюы мүмкін, бұл ұзақ уақыт бойы төмен ағынға әкеледі.

Солтүстік аймақтарды ішінара қамтитын Тобыл-Торғай және Ертіс бассейндері трансшекаралық ағынның қайта бөлінуімен сипатталады, бұл аймақтың мемлекетаралық су ынтымақтастығына және келісілген су пайдалану режимдерін қабылдауға тәуелділігін арттырады.

Климаттың өзгеруіне және экономикалық белсенділікке өте сезімтал көл экожүйелері де маңызды. Солтүстік Қазақстан және оған іргелес Ақмола облысында Бурабай курорттық-рекреациялық кластері, Көкшетау қыратының эндорей көлдері және сумен жабдықтау мен суару үшін пайдаланылатын су қоймалары сияқты көптеген шағын және орта көлдер орналасқан. Бурабай көлінің егжей-тегжейлі зерттеулері оның гидрофизикалық және гидрохимиялық параметрлері ауа температурасының жоғарылауына және жауын-шашынның өзгеруіне жауап беретінін, су деңгейінің, минералдануының және жеке иондардың құрамының ауытқуы байқалатынын көрсетті.

Ақмола және Солтүстік Қазақстан облыстарындағы су айдындарына климаттың өзгеруінің гидрометеорологиялық әсерін бағалайтын жақында жүргізілген зерттеу 1986-2023 жылдар аралығындағы орташа жылдық температураның статистикалық тұрғыдан айтарлықтай өсуін, жеке көлдердің беткі ауданының азаюын және маусымдық су деңгейінің динамикасының өзгеруін анықтады (Yessenzholov et al. 2024). Бұл нәтижелер аймақтың көл-өзен жүйелерінің климаттық үрдістердің әсерінен қайта құрылымдалып жатқанын көрсетеді.

Жер асты сулары, әсіресе орталықтандырылған жүйелері дамымаған ауылдық жерлерде, ауыз сумен және тұрмыстық сумен жабдықтауда маңызды рөл атқарады. Қазақстанның су ресурстарына шолулар солтүстік аймақтарда су ағынының жылдамдығы мен сапасының айтарлықтай кеңістіктік гетерогенділігімен сипатталатын жабық және шектелмеген сулы горизонттардың кең таралғанын атап өтеді.

CC BY NC

Сонымен қатар, ауылдық және шағын қалалардағы ауыз су сапасын зерттеу кейбір орталықсыздандырылған көздердің табиғи минералдану мен антропогендік әсерлерге байланысты санитарлық және химиялық стандарттарға сәйкес келмеу мәселесін көрсетеді. Бірге алғанда, бұл жер үсті және жер асты суларының өзара байланысты және бір мезгілде климаттық және экономикалық факторлардың әсеріне ұшырайтын күрделі көріністі жасайды.

Солтүстік Қазақстандағы судың ластануының негізгі көздері агроөнеркәсіптік кешенмен, қалалық ағынды сулармен және тау-кен өндірісімен байланысты. Дәнді дақылдарға бағытталған өсімдік шаруашылығы аймақ экономикасының айтарлықтай үлесін құрайды; минералды тыңайтқыштар мен өсімдіктерді қорғау құралдарын кеңінен қолдану диффузиялық ағынға әкеледі, бұл азот, фосфор және органикалық ластаушы заттарды су айдындарына тасымалдайды.

Әсіресе кәріз инфрақұрылымы нашар шағын қалалар мен ауылдарда қалалық ағынды сулар көбінесе жеткіліксіз тазартылады, бұл шағын өзендер мен көлдерге қоректік заттардың түсуін арттырады. Есіл өзені мен оның салалары бойында орналасқан өнеркәсіптік кәсіпорындар мен ауылшаруашылық өңдеу кәсіпорындары да өз үлесін қосады.

Ауыр металдар су экожүйелерінің антропогендік ластануының ең қауіпті компоненттерінің бірі болып саналады. Қазақстанның жер үсті суларындағы металл деңгейінің ұзақ мерзімді мониторингі «Heavy metals» блогына негізделген аймақтық су сапасының жіктемесін әзірлеуге мүмкіндік берді, оған сәйкес кадмий, мырыш, мыс және марганец көбінесе шектеуші көрсеткіштер болып табылады, бұл су айдынын төмен сапалық класқа жатқызады Солтүстік және шығыс аймақтардағы ірі көлдер мен су қоймалары үшін ауыр металдардың су бағанында да, түбіндегі шөгінділерде де, су организмдерінде де жиналатыны, бұл ұзақ мерзімді экологиялық қауіп төндіретіні көрсетілген (Krupa et.al. 2020).

Фондық ластанудың маңызды көрсеткіші болып табылатын солтүстік-шығыс Қазақстандағы қар жамылғысында өнеркәсіптік орталықтар мен көлік дәліздерінің жанында қорғасын, мыс және никельдің жоғары концентрациясы анықталды, бұл атмосфералық көліктің жер үсті және жер асты суларын ластаудағы рөлін көрсетеді (Faurat et.al. 2025).

Нитраттардың ластануы ауыл шаруашылығы жерлерін қарқынды пайдаланумен және ағынды суларды нашар басқарумен тығыз байланысты, бұл ерекше қиындық тудырады. Қазақстанның қалалық және ауылдық жерлеріндегі ауыз су сапасын зерттеу бірқатар аймақтарда нитрат концентрациясы рұқсат етілген шекті деңгейге жақындайтынын және кейбір жағдайларда олардан асып түсетінін, әсіресе балалар мен жүкті әйелдердің денсаулығына қауіп төндіретінін көрсетеді.

Жер асты суларындағы ластаушы заттардың кеңістіктік таралуын талдау нитрат деңгейінің жоғары болуы қарқынды ауыл шаруашылығы және нашар кәріз инфрақұрылымы бар аудандарда, сондай-ақ жеке құдықтар арқылы пайдаланылатын таяз сулы қабаттарда тән екенін көрсетеді (Beisenova et.al. 2025). Бұл деректер әсіресе солтүстік аймақтар үшін өзекті, онда ауыл халқының көп бөлігі сумен жабдықтау үшін жергілікті жер асты су көздеріне сүйенеді.

Климаттың өзгеруі су ресурстарының тапшылығы мен сапасының бар проблемаларын ушықтыруда. Ақмола және Солтүстік Қазақстан облыстарындағы көлдер мен су қоймалары бойынша талданған ұзақ мерзімді бақылау деректері орташа жылдық температураның көтерілуін және жауын-шашынның таралуының өзгеруін көрсетеді, бұл кейбір су қоймаларындағы су деңгейінің төмендеуіне, су бетінің ауданының азаюына және ағынды кезеңдердің ұзақтығының артуына әкеледі (Yessenzholov et.al. 2024).

Есіл бассейні үшін ағынның азаюы климаттық үрдістермен де, ауыл шаруашылығы мен сумен жабдықтау үшін су алудың артуымен де байланысты екені анықталды, бұл аймақты елдегі су тапшылығына ең осал аймақтардың біріне айналдырады.

Орталық Азияға арналған стратегиялық шолуларда температураның көтерілуі, жиі болатын құрғақшылық және қатты су тасқыны алдағы онжылдықтарда Қазақстанның солтүстік және шығыс аймақтарында су ресурстарына қысымды арттыратыны атап өтілген (Abdullaev et.al. 2025).

Солтүстік Қазақстандағы су ресурстарын басқарудың негізін негізінен заңнамалық база мен мемлекеттік бағдарламалар анықтайды. Қазақстан Республикасының Су кодексінде бассейндік басқару принципі, жер үсті және жер асты суларын тиімді пайдалану талаптары, сондай-ақ ауыз су көздері үшін суды қорғау аймақтары мен санитарлық қорғау белдіктерін белгілеу бекітілген. 2021 жылғы Қазақстан Республикасының Экологиялық кодексі ірі табиғи ресурстарды пайдаланушылар үшін кешенді экологиялық рұқсат беру механизмін, сондай-ақ жер үсті және жер асты суларын қорғауға, ағынды суларды төгуге және суды қорғау аймақтарындағы қызметке қойылатын нақты талаптарды енгізу арқылы су заңнамасын толықтырады.

2025 жылы су секторын ауқымды жаңғыртуға, су үнемдейтін технологияларды енгізуге және суару және коммуналдық жүйелердегі су шығындарын бақылауды күшейтуге бағытталған жаңа Су кодексіне қол қойылды, бұл солтүстік ауылшаруашылық аймақтарына тікелей әсер етеді.

Бұл құжаттарды біріктіріп алғанда, суды тиімді пайдалану және климаттың өзгеруіне бейімделу бойынша ұлттық және аймақтық бағдарламалар Солтүстік Қазақстандағы су ресурстарын қорғаудың институционалдық негізін жасайды. Дегенмен, гидрохимиялық және гидрологиялық зерттеулердің нәтижелері реттеуші талаптар мен су нысандарының нақты жағдайы арасындағы алшақтықты көрсетеді. Бұл алшақтықты жою үшін инфрақұрылымды жаңғырту, мониторингті күшейту және өзен бассейні деңгейінде кешенді су ресурстарын басқару қағидаттарын кеңінен енгізу қажет.

Су ресурстарын ұтымды пайдалану және мониторингілеудің технологиялық және институционалдық шешімдері. Солтүстік Қазақстандағы су ресурстарын ұтымды пайдалану және олардың қоршаған ортаны бақылауы технологиялық және институционалдық шешімдерді бір мезгілде әзірлеуді талап етеді. Бұл аймақ құрғақ климаттың, жер үсті және жер асты суларының біркелкі емес таралуының және ауыл шаруашылығы, өнеркәсіп және қала құрылысы тарапынан қысымның

CC BY NC

артуымен сипатталады. Дүниежүзілік банктің мәліметтері бойынша, Қазақстан әлі де елеулі инфрақұрылымдық шектеулерге тап болып отыр: ауылдық жерлерде орталықтандырылған ауыз суға қолжетімділік 63%-дан төмен, ал кәрізге қолжетімділік 2%-дан аз, жиналған ағынды сулардың тек аз ғана бөлігі тиісті түрде тазартылады.

Осы жағдайларда суды ұтымды пайдалану енді суды алуды азайтумен шектелмейді; ол интеграцияланған мониторинг жүйелерін құруды, тиімді суды тазарту және қайта пайдалану технологияларын енгізуді, нормативтік база мен экономикалық ынталандыруды әзірлеуді қамтиды. Негізгі бағыттардың бірі - эпизодтық өлшеулерден қашықтықтан зондтау, автоматтандырылған сенсорлық желілер, географиялық ақпараттық жүйелер (ГАЖ), биоиндикация әдістері және заманауи цифрлық деректерді өңдеу платформаларын интеграциялауға негізделген кешенді қоршаған ортаны бақылауға көшу. Қазгидромет Республикасының Ұлттық гидрологиялық қызметі 377 гидрологиялық бекеттен (329 өзен, 38 көл және 10 теңіз бекеті мен станциясы) тұратын мониторинг желісін дамытуда және оны су деңгейінің, ағынды сулардың және басқа да параметрлердің күнделікті жаңартылып отыратын интерактивті гидрологиялық мониторинг картасымен қамтамасыз етіп отыр. Бұл спутниктік бақылаулар мен жергілікті су сапасының сенсорларын қоса алғанда, басқа деректер көздерімен интеграциялауға негіз қалайды.

Қашықтықтан зондтау деректері (Sentinel-2, Landsat-8 және т.б.) маңызды рөл атқарады, бұл су бетінің ауданының динамикасын, судың түсін, қалқымалы қатты заттардың мөлшерін және жанама түрде су айдындарының эвтрофикациясы мен шөгінділерін бағалауға мүмкіндік береді. Орталық Азиядағы халықаралық жобалар 10-20 жыл ішіндегі спутниктік деректер жиынтығы көл ауданының азаюы мен батпақты жерлердің деградациясы үрдістерін, сондай-ақ су тапшылығы қаупі жоғары аймақтарды анықтай алатынын көрсетеді (Tesch, 2020).

Қазгидрометтің жер үсті желісінің деректерімен және климаттық болжамдармен бірге бұл су ресурстарын белсенді басқарудың негізін құрайды. Сонымен қатар, су сапасын нақты уақыт режимінде бақылау үшін автоматтандырылған сенсорлық желілер жасалуда. Мұндай желілерге өзендердің, көлдердің және су қоймаларының негізгі учаскелерінде орнатылған температура, pH, электр өткізгіштік, еріген оттегі, лайлылық және басқа параметрлер үшін сенсорлар кіруі мүмкін. Қазақстанда әзірленіп жатқан интерактивті жер үсті суларының сапасы карталары мен гидромониторинг дерекқорлары индикаторлардың кеңістіктік және уақыттық таралуын визуализациялауға және су сапасының нашарлауына жедел жауап беруге мүмкіндік береді.

Келесі қадам - гидрологиялық, климаттық, жер және әлеуметтік-экономикалық деректерді бірыңғай аналитикалық платформаларға біріктіру үшін геоақпараттық жүйелер (ГАЖ) технологияларын пайдалану. Қазақстандағы БҰҰДБ су ресурстарын басқару бағдарламасы су ресурстарын басқаруға жүйелік тәсіл фрагменттелген шешімдерден су айналымын толығымен қамтитын интеграцияланған цифрлық платформаларға - көзден тұтынушыға және ағынды сулардың қоршаған ортаға

қайтарылуын қамтитын интеграцияланған цифрлық платформаларға көшуді талап ететінін атап көрсетеді. Бұл тәсіл ауыл шаруашылығының, өнеркәсіптің және урбанизацияның жиынтық әсерін ескеруге, суды пайдалану сценарийлерін модельдеуге және климаттың өзгеруіне бейімделудің әртүрлі шараларының тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді.

Физикалық-химиялық мониторингтен басқа, биоиндикацияның рөлі артып келеді. Орталық Азиядағы су айдындары бойынша жүргізілген бірнеше зерттеулер фитопланктонның, макрофиттердің және бентос омыртқасыздарының түр құрамы ауыр металдар мен қоректік заттардың ұзақ мерзімді ластануына сезімтал екенін және зертханалық мониторинг ресурстары шектеулі болғандықтан экожүйенің денсаулығын кешенді бағалау үшін пайдаланылуы мүмкін екенін көрсетті (Tesch, 2020). Сонымен қатар, су сапасының индекстерін (WQI) болжау және суларды ластану деңгейі бойынша жіктеу үшін машиналық оқыту және терең оқыту әдістерін пайдалануға қызығушылық артып келеді. Wang et.al. (2023) шолулары нейрондық желілерге, кездейсоқ ормандарға және градиенттің күшеюіне негізделген модельдер су сапасының өзгерістерін дәл болжай алатынын және осылайша қауіптер туралы ерте ескертудің негізі бола алатынын көрсетеді. Бұл тәсілдерді негізгі мониторинг технологияларын, олардың қолданылу салаларын және негізгі артықшылықтарын жүйелейтін жиынтық кестеде ыңғайлы түрде қорытындылауға болады.

1-кестеде келтірілген деректер Қазақстанда да, басқа жерлерде де қолданылатын қоршаған ортаны бақылаудың негізгі технологиялық тәсілдерін қорытындылайды.

Кесте қашықтықтан зондтау, сенсорлық желілер және ГАЖ технологияларының заманауи су ресурстарын бақылау жүйелерінің негізіне айналып келе жатқанын және су ресурстарын басқару үшін жоғары дәлдіктегі және уақтылы ақпарат алуға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Кесте 1. Заманауи су ресурстарын бақылау технологиялары

Технология	Негізгі қолданылуы	Негізгі артықшылықтары
Спутниктік қашықтықтан зондтау (Sentinel-2, Landsat-8)	Су деңгейінің және беткі ауданының динамикасы, беткі суларды бағалау	Кеңістіктік қамту, ретроспективті талдау
Автоматтандырылған сенсорлық желілер	Нақты уақыт режимінде су сапасын бақылау	Үздіксіз мониторинг, жоғары уақытша ажыратымдылық
Интерактивті ГАЖ платформалары	Су ресурстары мен жүктеме көзі деректерін интеграциялау	Шешімдерді қолдау, сценарийлерді талдау
Биоиндикация	Су экожүйелерінің ұзақ мерзімді бағалауы	Созылмалы ластануға жоғары сезімталдық
Жасанды интеллект/ машиналық оқыту модельдері	Су сапасының индексі және ластану класын болжау	Ерте ескерту мүмкіндігі

Су ресурстарын тиімді пайдаланудың технологиялық шешімдері тек бақылаумен шектелмейді. Тұщы су тапшылығы мен қайтарылатын ағынның жоғары үлесін ескере отырып, тиімді суды тазарту және қайта пайдалану

CC BY NC

технологиялары ерекше маңызды. Mahmood et.al. (2022) Орталық Азия елдеріндегі ағынды суларды тазарту бойынша шолуында дәстүрлі аэрация цистерналары мен тұрақтандыру тоғандарымен қатар, суды суару және өнеркәсіптік мақсаттарда қауіпсіз қайта пайдалануға бағытталған мембраналық технологиялар, сорбция, озық биореакторлар және аралас тазарту схемалары біртіндеп енгізіліп жатқаны көрсетілген.

Мембраналық технологиялар — кері осмос, нанофильтрация және ультрафильтрация — еріген тұздардың, органикалық ластаушы заттардың және кейбір микроластаушы заттардың терең жойылуын қамтамасыз етеді және ауыз суды тазарту жүйелерінде де, өнеркәсіптік қайта айналымда да қолданылады. (Radelyuk et.al. 2021) жұмыстарында қазақстандық мұнай өңдеу зауыттарын мысал ретінде пайдалана отырып, мембраналық қондырғылар мен суды интеграциялау схемаларын біріктіру тұщы суды қабылдауды және ағынды суларды ағызуды айтарлықтай азайта алатынын, сонымен бірге процестің сенімділігін арттыра алатынын көрсетті.

Сорбциялық материалдар суды тазартудың ең қолжетімді және үнемді құралдарының бірі болып қала береді. Белсендірілген көмірлер, табиғи цеолиттер және модификацияланған минералды сорбенттер ауыр металл иондарын, органикалық боғыштарды және микроластаушы заттарды кетіру үшін кеңінен қолданылады (Kesari et.al., 2021). Соңғы жылдары нанокомпозиттік сорбенттер (мысалы, кеуекті тіректерге иммобилизацияланған магнетит нанобөлшектері) белсенді түрде зерттелді. Олар жоғары сорбциялық сыйымдылық пен селективтілікті, сондай-ақ магниттік бөлу арқылы оңай қалпына келуді қамтамасыз етеді.

Биологиялық тазарту әдістері, соның ішінде дәстүрлі аэрациялық цистерналар, биосүзгілер және салынған батпақты жерлер, ресурстары шектеулі шағын қауымдастықтар мен ауылшаруашылық аймақтары үшін ерекше маңызды. Орталық Азия елдерінің талдауы тұрақтандыру тоғандары мен салынған батпақты жерлер аумақ пен гидравликалық режим дұрыс таңдалған жағдайда минималды энергия мен күтімді қажет ететін ең тиімді шешімдердің бірі болып қала беретінін көрсетеді (Brix, 2020). Мұндай жүйелерді муниципалдық ағынды суларды тазартудан кейінгі және су айдындарындағы қоректік заттардың жүктемесін азайту үшін пайдалануға болады. Тұтастай алғанда аймақ бойынша жүргізілген зерттеулердің нәтижелері суды тазарту және қайта пайдалану технологияларын екінші жиынтық кесте түрінде жүйелеуге мүмкіндік береді.

2-кестеде Солтүстік Қазақстан жағдайына қолданыла алатын ең перспективалы суды тазарту және қайта пайдалану технологияларын жүйелеу көрсетілген.

Кесте 2. Суды тазарту және қайта пайдаланудың негізгі технологиялары

Технология	Типтік қолданылуы	Негізгі артықшылықтары
Кері осмос, нанофильтрация	Ауыз суын тазарту, өнеркәсіптік ағынды суларды қайта өңдеу	Тұздар мен органикалық заттарды терең тазарту
Ультрафильтрация	Алдын ала тазарту, аспалы қатты заттар мен коллоидтарды жою	Жоғары өнімділік

Сорбциялық материалдар	Ауыр металдарды, органикалық заттарды және микроластаушы заттарды жою	Төмен құны, пайдаланудың қарапайымдылығы
Нанокомпозиттік сорбенттер	Арнайы ластаушы заттарды өңдеуден кейін	Жоғары селективтілік және қалпына келу мүмкіндігі
Биореакторлар, аэрация цистерналары	Қалалық және өнеркәсіптік ағынды сулар	Дәлелденген, сенімді технология
Құрылған батпақты жерлер	Шағын қалалар, ауылшаруашылық аймақтары	Төмен пайдалану шығындары, табиғи қасиеттері
Қайта пайдалану схемалары	Өнеркәсіптік сумен жабдықтау, суару	Су алуды және су айдындарына түсетін жүктемені азайту

Ұсынылған шешімдер — мембраналық сүзгілеуден бастап биологиялық әдістерге дейін — суды тұтынуды азайту, антропогендік жүктемелерді азайту және суды басқару жүйелерінің тұрақтылығын арттыру әлеуетін көрсетеді.

Қазақстан өнеркәсібіндегі суды басқару тәжірибесі мембраналық технологиялардың үйлесімі, зауыттың су балансын оңтайландыру және тазартылған суды қайта пайдалану суды басқару көрсеткіштерін айтарлықтай жақсарта алатынын көрсетеді. Атап айтқанда, мұнай өңдеу зауыттары бойынша зерттеулер кешенді суды басқару схемаларын енгізу және өнеркәсіпте тұрақты суды пайдалану тұжырымдамаларын қолдану арқылы жалпы су тұтыну мен ағызу көлемін азайту мүмкіндігін атап өтті. Дегенмен, тіпті ең тиімді технологиялар да тиісті институционалдық негізсіз осал болып қала береді. Қазақстан Республикасының Су кодексі және Экологиялық кодекс суды ұтымды пайдаланудың құқықтық негізін құрайды, суды алу, ағынды суларды ағызу, көздерді санитарлық қорғау және ең жақсы қолжетімді технологияларды енгізу талаптарын белгілейді.

Соңғы жылдары бассейндік кеңестер, ведомствоаралық үйлестіру механизмдері және жергілікті әкімдіктердің қатысуымен жүзеге асырылатын кешенді су ресурстарын басқаруға (СРБ) баса назар аударылуда. БҰҰ-ның 6-шы тұрақты даму мақсаты («Таза су және санитария») қоса алғанда, аймақтық және халықаралық құжаттар қауіпсіз су мен санитарияға жалпыға қолжетімділікті қамтамасыз ету, тазартылмаған ағынды сулардың үлесін азайту және қайта пайдалануды арттыру үшін бағдарлар белгілейді.

Қазақстан «Жасыл көпір» бағдарламасы және БҰҰДБ мен Азия даму банкі жобалары сияқты халықаралық бастамаларға белсенді түрде қатысып келеді, олар ағынды суларды тазарту қондырғыларын жаңғыртуға, орталықсыздандырылған тазарту технологияларын енгізуге және суды қайта пайдалану жобаларын көрсетуге бағытталған.

Сонымен қатар, Дүниежүзілік банк су инфрақұрылымын ауқымды жаңғырту және тарифтік саясатты қайта қарау қажеттілігін атап көрсетеді, себебі қолданыстағы тарифтер көбінесе инфрақұрылымға салынған инвестицияларды өтемейді және суды үнемдеуді ынталандырмайды. Бұл институционалдық және экономикалық шараларды үшінші кестеде қысқаша жүйелеуге болады.

3-кесте суды тиімді пайдаланудың негізгі институционалдық және

CC BY NC

экономикалық құралдарын құрылымдауға мүмкіндік береді. Онда Қазақстандағы тұрақты су саясатының негізін құрайтын мемлекеттік органдардың, халықаралық бастамалардың және экономикалық тетіктердің рөлі көрсетілген.

Кесте 3. Суды тиімді пайдаланудың институционалдық және экономикалық механизмдері

Механизм	Негізгі мазмұны	Күтілетін әсер
ҚР Су кодексі	Су алуды және ағызуды реттеу, су айдындарын қорғау	Тұрақты суды пайдаланудың заңнамалық негізі
ҚР Экологиялық кодексі	Кешенді экологиялық рұқсат беру және мониторинг	Ең үздік тәжірибелерді енгізуге арналған ынталандырулар
Бассейндік кеңестер және Су ресурстарын басқару және ресурстарды басқару жөніндегі халықаралық ұйым	Салалар мен аумақтар бойынша үйлестіру	Қақтығыстарды азайту және кешенді жоспарлау
Халықаралық бағдарламалар (БҰҰДБ, АДБ, Жасыл көпір)	Қаржыландыру, технологияларды беру, оқыту	Тазарту мен мониторингті жеделдетілген жаңартулар
Тарифтік және экономикалық саясат	Экотарифтер, сараланған су төлемдері	Суды үнемдеу және қайта пайдалану үшін ынталандырулар
Тұрақты даму мақсаттары 6 және Тұрақты даму мақсаттары туралы есеп беру	Халықаралық деңгейдегі прогресті бақылау	Су қауіпсіздігі мәселелеріне назар аудару

Соңында, технологиялық және институционалдық шешімдер суды пайдаланудың экономикалық және әлеуметтік аспектілерімен сөзсіз байланысты. Солтүстік Қазақстанда, халықтың айтарлықтай бөлігі ауылдық жерлерде тұратындықтан, сапалы суға қол жеткізу тек қоғамдық денсаулықты ғана емес, сонымен қатар ауыл шаруашылығының тұрақтылығын, көші-қон үрдістерін және әлеуметтік тұрақтылықты да анықтайды. Дүниежүзілік банктің бағалауы сумен жабдықтау және кәріз жүйелеріне қосылудың төмен деңгейі үй шаруашылықтарының осалдықтарын арттыратынын және тек инженерлік шешімдерді ғана емес, сонымен қатар субсидияланған қосылымдарды, тарифтердің ашықтығын арттыруды және жергілікті қауымдастықтардың су ресурстарын басқаруға қатысуын қоса алғанда, мақсатты әлеуметтік бағдарламаларды қажет ететінін атап көрсетеді.

БҰҰДБ талдауында көрсетілген Қазақстандағы суды басқаруға заманауи тәсілдер дағдарыстарға (құрғақшылық, су тасқыны, ағынды суларды тазарту қондырғыларының істен шығуы) реактивті жауап беруден деректерге негізделген алдын алу және бейімделгіш басқаруға ауысуды ұсынады.

Бұл жоғарыда сипатталған суды бақылау, тазарту және қайта пайдалану технологияларын оқшауламай, керісінше, нормативтік базамен, экономикалық ынталандырулармен және қоғамның қатысуымен қолдау табатын бірыңғай жүйенің элементтері ретінде қарастыру керек дегенді білдіреді. Климаттың өзгеруіне осалдығы және тұщы су ресурстарының шектеулі болуымен Солтүстік Қазақстан үшін технологиялық, институционалдық, экономикалық және әлеуметтік шешімдердің бұл үйлесімі ұзақ мерзімді су қауіпсіздігін қамтамасыз ету және қоғамдық денсаулықты сақтау үшін маңызды.

Су ресурстарын ұтымды басқарудағы қиындықтар мен перспективалар. Су ресурстарын тиімді басқару бүгінгі таңда тұрақты суды пайдалануға қол жеткізуді айтарлықтай қиындататын көптеген кедергілерге тап болуда. Солтүстік Қазақстан және тұтастай алғанда Қазақстан жағдайында бұл кедергілер - технологиялық, қаржылық, институционалдық және адами ресурстар - әсіресе өткір. Жақында жүргізілген зерттеулер ғылымды, басқаруды және бизнес секторын қамтитын кешенді, пәнаралық тәсіл ғана бұл шектеулерді жеңіп, цифрландыру мен жасанды интеллекттің (ЖИ) әлеуетін суды басқаруға біріктіре алатынын көрсетеді.

Технологиялық кедергілерге инфрақұрылымның тозуы, автоматтандырудың төмен деңгейі және цифрлық технологиялардың шектеулі енгізілуі жатады. Қазақстанда каналдардағы су шығыны 50-60%-ға жетті, ал суды тұтыну мен тұтыну көбінесе ескірген әдістермен өлшенеді, бұл ресурстарды ашық басқаруға кедергі келтіреді.

Қаржылық шектеулер сумен жабдықтау және тазарту жүйелерін жаңғыртуға капиталдық инвестицияларға да, интеллектуалды мониторинг жүйелерінің жұмысына да әсер етеді. Институционалдық кедергілерге басқарудың бөлшектенуі, агенттіктер арасындағы әлсіз үйлестіру және су, ауылшаруашылық және өнеркәсіп салаларының жеткіліксіз интеграциясы жатады. Karatayev et.al. (2017) шолуы Қазақстанда каналдар арқылы су жеткізу тиімділігі дамыған елдерде 70-90% болса, тек 15-20% екенін атап өтті.

Адам ресурстарының шектеулеріне сандық су технологиялары, су құқығы және су ресурстарын басқару жүйелері саласындағы мамандардың жетіспеушілігі, сондай-ақ зерттеулер мен тәжірибе арасындағы әлсіз байланыстар жатады. Бұл кедергілерді жеңу үшін ғылыми деректер, басқару процестері және бизнес модельдері синергетикалық түрде жұмыс істейтін пәнаралық тәсілге көшу қажет. Атап айтқанда, цифрлық стартаптар, венчурлық капитал инвестициялары және университеттер мен өнеркәсіп арасындағы ынтымақтастық Қазақстандағы су инновацияларының экожүйесін қалыптастыра бастады: мысалы, Astana Hub экожүйесі су секторы үшін шешімдер әзірлейтін стартаптарды қолдайды.

Су сапасын болжауға жасанды интеллект пен машиналық оқытуды қолдану бойынша ғылыми зерттеулер деректерді, басқаруды және бизнесті біріктіру арқылы ғана маңызды нәтижелерге қол жеткізуге болатынын атап көрсетеді. Сондықтан ғылыми мекемелер, реттеуші органдар және кәсіпкерлер аймақтың қажеттіліктеріне бейімделген басқарылатын, деректерге негізделген жүйелерді құру үшін бірлесіп жұмыс істеуі керек.

Су жүйелерін цифрландыру және жасанды интеллектті қолдану тұрақты басқару үшін жаңа мүмкіндіктер ашады. Krishnan et.al. (2022) мақаласында IoT сенсорларына, бұлттық платформаларға және терең оқытуға негізделген ақылды суды басқару жүйелері жергілікті деңгейде дұрыс конфигурацияланған кезде су тұтынуды азайтып, ресурстарды бөлуді оңтайландыра алатынын атап көрсетеді.

Қазақстан жер үсті және жер асты сулары бойынша жасанды интеллектке негізделген деректерді қамтитын су ресурстарын басқарудың бірыңғай цифрлық платформасын құрғанын жариялады. Дегенмен, цифрлық технологиялардың өзі

CC BY NC

әмбебап шешім емес екенін атап өту маңызды: олар тиісті инфрақұрылымды, бақылауды және басқару саясатына интеграцияны қажет етеді.

Өңірлік озық су технологияларын енгізу әлеуеті айтарлықтай. Суды қайта пайдалану үлесін арттыру, сумен жабдықтау жүйелерін жаңғырту және интеллектуалды мониторингті енгізу сумен жабдықтаудың тұрақтылығын айтарлықтай жақсартып, экожүйелерге түсетін жүктемені азайта алады. Атап айтқанда, тазарту және қайта пайдалану технологиялары арқылы ауыз судың сапасын жақсарту ауыр металдар мен нитраттардың ластануымен байланысты созылмалы аурулардың қаупін азайта алады. Мысалы, цифрлық мониторинг арқылы қолдау көрсетілетін жер асты және орталықсыздандырылған сумен жабдықтау жүйелерінің үлесін арттыру ауыл тұрғындарының су қауіпсіздігін жақсарта алады. Аймақтың ауыл шаруашылығы мен су өндіруге жоғары тәуелділігін ескере отырып, технология мен мониторинг тек инженерлік шешімнен де артық нәрсеге айналуда; олар әлеуметтік және денсаулық сақтау факторы болып табылады. Климаттың өзгеруі және суға деген стресстің артуы жағдайында мұндай жүйелерді енгізу стратегиялық басымдық болып табылады.

Солтүстік Қазақстандағы су ресурстарын тұрақты басқарудағы қиындықтар айтарлықтай: ескірген инфрақұрылым, әлсіз институционалдық үйлестіру, кадрлардың жетіспеушілігі және технологиялық артта қалушылық. Дегенмен, цифрландырумен, жасанды интеллектпен, ғылымды, бизнесті және басқаруды интеграциялаумен, сондай-ақ су инфрақұрылымын технологиялық жаңғыртуға байланысты перспективалар суды тұрақты пайдалануға нақты жол ашады. Келесі ұсыныстар ұсынылады:

– Инфрақұрылымды жаңғыртуды және цифрлық мониторинг жүйелерін енгізуді жеделдету.

– Ғылым, бизнес және үкімет арасындағы пәнаралық платформаларды және ынтымақтастықты дамыту.

– Суды тұтынуды оңтайландыру және ерте тәуекелдер туралы ескерту үшін жасанды интеллект пен деректерді талдауды белсенді түрде енгізу.

– Суды қайта пайдалану технологиялары мен орталықсыздандырылған сумен жабдықтау жүйелерінің аймақтық пилоттық жобаларына назар аудару, олардың қоғамдық денсаулыққа әсерін бағалау.

– Инновациялық жүйелерді қаржыландыруды, пайдалануды және күтіп ұстауды қамтамасыз ету үшін кадрларды оқытуды және нормативтік-құқықтық базаны күшейту.

Бұл шаралардың сәтті үйлесімі аймақтың су секторын сапалы жаңа деңгейге көтеруге, халықтың экологиялық, әлеуметтік және денсаулық сақтау тұрақтылығын жақсартуға және Қазақстанның басқа аймақтарына қолданылатын модель жасауға мүмкіндік береді.

Қорытынды. Солтүстік Қазақстандағы су ресурстарын ұтымды басқару ғылыми деректерді, заманауи технологияларды және тиімді институционалдық механизмдерді біріктіретін жүйелік тәсілді қажет етеді. Бұл шолу аймақтың бірнеше өзара байланысты қиындықтарға тап болатынын көрсетеді: жер үсті

және жер асты суларының біркелкі емес таралуы, антропогендік жүктемелердің артуы, климаттың өзгеруінің әсері, инфрақұрылымдық және басқару шектеулері. Бұл факторлар цифрландырудың жеткіліксіздігімен, тазарту қондырғыларының тозуымен және мамандандырылған кадрлардың жетіспеушілігімен күрделене түседі, бұл тұрақты суды пайдалануды айтарлықтай қиындатады.

Сонымен қатар, суды бақылау және тазарту технологияларының дамуы су қауіпсіздігін жақсарту үшін нақты мүмкіндіктер ұсынады. Спутниктік деректерді, сенсорлық желілерді, ГАЖ аналитикасын және жасанды интеллект модельдерін біріктіру су ресурстарын дәлірек және уақтылы бақылаудың негізін құрайды. Мембраналық технологияларды, сорбциялық материалдарды, нанокомпозиттерді және биологиялық тазарту әдістерін пайдалану экожүйелерге түсетін жүктемені азайту және суды қайта пайдалану үлесін арттыру үшін айтарлықтай әлеуетті көрсетеді, бұл әсіресе тұщы су ресурстары шектеулі аймақтар үшін маңызды. Технологиялық шешімдермен қатар, институционалдық орта маңызды рөл атқарады. Нормативтік базаны жетілдіру, су ресурстарын интеграцияланған басқару қағидаттарын енгізу, экономикалық ынталандыруды әзірлеу және халықаралық ынтымақтастықты нығайту тұрақты өзгерістерге жағдай жасайды. Қазақстан тәжірибесі технологиялық инновациялардың, тиімді басқарудың және жергілікті қоғамдастықтың қатысуының үйлесімі су қауіпсіздігінде нақты нәтижелерге қол жеткізуге мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Солтүстік Қазақстандағы су ресурстарын тұрақты басқарудың болашағы цифрлық платформаларды одан әрі дамытумен, интеллектуалды мониторинг жүйелерін енгізумен, тазарту құрылыстарын жаңғыртумен және жаңа буын мамандарын даярлаумен тікелей байланысты. Ұзақ мерзімді перспективада бұл шараларды жүзеге асыру су ресурстарының сапасын жақсартуға, экологиялық тәуекелдерді азайтуға, қоғамдық денсаулықты нығайтуға және аймақтың әлеуметтік-экономикалық дамуының тұрақтылығын арттыруға ықпал етеді.

Сондықтан, су ресурстарын тұрақты басқаруды жеке сала ретінде емес, ғылым, технология, мемлекеттік басқару және бизнес арасындағы ынтымақтастықты қажет ететін пәнаралық сала ретінде қарастыру керек. Тек кешенді тәсіл ғана Солтүстік Қазақстандағы су қауіпсіздігін қамтамасыз етеді және экологиялық қауіпсіз және әлеуметтік тұрғыдан тұрақты болашақтың негізін қалайды.

Әдебиеттер

Abdullaev, I., et al. (2025). Current challenges in Central Asian water governance and their implications for research, higher education and science-policy interaction. Central Asian Journal of Water Research. (in Eng.)

Ayejoto, D. A., & Egbueri, J. C. (2024). Human health risk assessment of nitrate and heavy metals in urban groundwater in Southeast Nigeria. Ecological Frontiers, 44(1), 60-72. (in Eng.)

Beisenova, R., Chen, J., Kussainova, M., Tussupova, K., Tazitdinova, R., Mujahid, N., & Rakhymzhan, Z. (2025). Influence of Geographical Locations on Drinking Water Quality in Rural Pavlodar Region, Kazakhstan. Water, 17(7), 945. https://doi.org/10.3390/w17070945 (in Eng.)

Brix, H. (2020). Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes, and treatment performance. In Constructed wetlands for water quality improvement (pp. 9-22). CRC Press. (in Eng.)

Faurat, A., Yessimova, D., Satybaldiyeva, G., Kuatbayev, A., Utarbayeva, A., Kaliyeva, A., ... & Rakhmanov, S. (2025). Assessing the spatial distribution and sources of heavy metal pollution in the snow cover: A case study from Pavlodar, Northeastern Kazakhstan. PLoS One, 20(5), e0322300. (in Eng.)

Karatayev, M., Kapsalyamova, Z., Spankulova, L., Skakova, A., Movkebayeva, G., & Kongyrbay, A. (2017). Priorities and challenges for a sustainable management of water resources in Kazakhstan. Sustainability of Water Quality and Ecology, 9, 115-135. (in Eng.)

Kesari, K. K., Soni, R., Jamal, Q. M. S., Tripathi, P., Lal, J. A., Jha, N. K., ... & Ruokolainen, J. (2021). Wastewater treatment and reuse: a review of its applications and health implications. Water, Air, & Soil Pollution, 232(5), 208. (in Eng.)

Krishnan, S. R., Nallakaruppan, M. K., Chengoden, R., Koppu, S., Iyapparaja, M., Sadhasivam, J., & Sethuraman, S. (2022). Smart water resource management using Artificial Intelligence—A review. Sustainability, 14(20), 13384. (in Eng.)

Krupa, E., et al. (2020). Tracking pollution and its sources in the catchment—lake system in Kazakhstan. Ecohydrology & Hydrobiology, 20(2), 247—259. (in Eng.)

Mahmood, Q., Maqbool, T., Khan, S., & Ahmad, Z. (2022). Technologies for wastewater treatment and reuse in arid and semi-arid regions: A review. Journal of Cleaner Production, 340, 130692. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130692 (in Eng.)

Mohan, S., Kumar, B., & Nejadhashemi, A. P. (2025). Integration of machine learning and remote sensing for water quality monitoring and prediction: A review. Sustainability, 17(3), 998. (in Eng.)

Radelyuk, I. (2021). Towards sustainable water use in industry: A case study of the oil refinery industry in Kazakhstan [Doctoral dissertation, Lund University]. (in Eng.)

Saleem, H., & Zaidi, S. J. (2020). Developments in the application of nanomaterials for water treatment and their impact on the environment. Nanomaterials, 10(9), 1764. (in Eng.)

Tesch, N., et al. (2020). Wetland distribution trends in Central Asia. Water Resources of Central Asia. (in Eng.)

UN-Water. (2023). United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water.UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384659. (in Eng.)

Wang, X., Yang, Y., Wang, Y., & Li, X. (2023). Water quality prediction based on machine learning and comprehensive weighting methods. Entropy, 25(8), 1186. https://doi.org/10.3390/e25081186 (in Eng.)

Yapiyev, V., et al. (2025). Baseline information and regionalization of the large river systems of Kazakhstan. Frontiers in Water, 3, 1601671. (in Eng.)

Yessenzholov, B., et al. (2024). Assessment of hydrometeorological impacts of climate change on water bodies in Northern Kazakhstan. Water, 16(19), 2794. https://doi.org/10.3390/w16192794 (in Eng.)

Zhang, C., Yuan, R., Chen, H., Zhou, B., Cui, Z., & Zhu, B. (2024). Advancements in Inorganic Membrane Filtration Coupled with Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment. Molecules, 29(17), 4267. (in Eng.)

References

UN-Water. (2023). United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water.UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384659. (in Eng.)

Zhang, C., Yuan, R., Chen, H., Zhou, B., Cui, Z., & Zhu, B. (2024). Advancements in Inorganic Membrane Filtration Coupled with Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment. Molecules, 29(17), 4267. (in Eng.)

Saleem, H., & Zaidi, S. J. (2020). Developments in the application of nanomaterials for water treatment and their impact on the environment. Nanomaterials, 10(9), 1764. (in Eng.)mus

Mohan, S., Kumar, B., & Nejadhashemi, A. P. (2025). Integration of machine learning and remote sensing for water quality monitoring and prediction: A review. Sustainability, 17(3), 998. (in Eng.)

Ayejoto, D. A., & Egbueri, J. C. (2024). Human health risk assessment of nitrate and heavy metals in urban groundwater in Southeast Nigeria. Ecological Frontiers, 44(1), 60-72. (in Eng.)

Yapiyev, V., et al. (2025). Baseline information and regionalization of the large river systems of Kazakhstan. Frontiers in Water, 3, 1601671. (in Eng.)

Yessenzholov, B., et al. (2024). Assessment of hydrometeorological impacts of climate change on water bodies in Northern Kazakhstan. Water, 16(19), 2794. https://doi.org/10.3390/w16192794 (in Eng.)

Krupa, E., et al. (2020). Tracking pollution and its sources in the catchment—lake system in Kazakhstan. Ecohydrology & Hydrobiology, 20(2), 247—259. (in Eng.)

Faurat, A., Yessimova, D., Satybaldiyeva, G., Kuatbayev, A., Utarbayeva, A., Kaliyeva, A., ... & Rakhmanov, S. (2025). Assessing the spatial distribution and sources of heavy metal pollution in the snow cover: A case study from Pavlodar, Northeastern Kazakhstan. PLoS One, 20(5), e0322300. (in Eng.)

Beisenova, R., Chen, J., Kussainova, M., Tussupova, K., Tazitdinova, R., Mujahid, N., & Rakhymzhan, Z. (2025). Influence of Geographical Locations on Drinking Water Quality in Rural Pavlodar Region, Kazakhstan. Water, 17(7), 945. https://doi.org/10.3390/w17070945 (in Eng.)

Abdullaev, I., et al. (2025). Current challenges in Central Asian water governance and their implications for research, higher education and science-policy interaction. Central Asian Journal of Water Research. (in Eng.)

Tesch, N., et al. (2020). Wetland distribution trends in Central Asia. Water Resources of Central Asia. (in Eng.)

Wang, X., Yang, Y., Wang, Y., & Li, X. (2023). Water quality prediction based on machine learning and comprehensive weighting methods. Entropy, 25(8), 1186. https://doi.org/10.3390/e25081186 (in Eng.)

Mahmood, Q., Maqbool, T., Khan, S., & Ahmad, Z. (2022). Technologies for wastewater treatment and reuse in arid and semi-arid regions: A review. Journal of Cleaner Production, 340, 130692. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130692 (in Eng.)

Radelyuk, I. (2021). Towards sustainable water use in industry: A case study of the oil refinery industry in Kazakhstan [Doctoral dissertation, Lund University]. (in Eng.)

Kesari, K. K., Soni, R., Jamal, Q. M. S., Tripathi, P., Lal, J. A., Jha, N. K., ... & Ruokolainen, J. (2021). Wastewater treatment and reuse: a review of its applications and health implications. Water, Air, & Soil Pollution, 232(5), 208. (in Eng.)

Brix, H. (2020). Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes, and treatment performance. In Constructed wetlands for water quality improvement (pp. 9-22). CRC Press. (in Eng.)

Karatayev, M., Kapsalyamova, Z., Spankulova, L., Skakova, A., Movkebayeva, G., & Kongyrbay, A. (2017). Priorities and challenges for a sustainable management of water resources in Kazakhstan. Sustainability of Water Quality and Ecology, 9, 115-135. (in Eng.)

Krishnan, S. R., Nallakaruppan, M. K., Chengoden, R., Koppu, S., Iyapparaja, M., Sadhasivam, J., & Sethuraman, S. (2022). Smart water resource management using Artificial Intelligence—A review. Sustainability, 14(20), 13384. (in Eng.)

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 227–240

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.396

IRSTI 65.35.33
UDC 662:666.763

©A. Rakhimov[1], N. Zhanikulov[2*], B. Taimasov[1], E. Potapova[3], A.K. Sviderskiy[4], 2025.

[1]M. Auezov South Kazakhstan university, Shymkent, Kazakhstan;
[2]Ye.A. Buketov Karaganda National Research University, Karaganda, Kazakhstan;
[3]D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, Moscow, Russia;
[4]Toraighyrov University, Pavlodar, Kazakhstan.
E-mail: nurgali.zhanikulov@mail.ru

INVESTIGATION OF LEAD SLAG PROCESSING WASTE AS RAW MATERIAL FOR CEMENT INDUSTRY

Rakhimov Aidos — PhD student of M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan,
E-mail: aidos_0194@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3671-148X;
Zhanikulov Nurgali — PhD, associate professor, Ye.A. Buketov Karaganda National Research University, Karaganda, Kazakhstan,
E-mail: nurgali.zhanikulov@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0750-9753;
Taimasov Bakhitzhan — Doctor of Technical Sciences, Professor, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan,
E-mail: taimasovukgu@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1844-4932;
Potapova Ekaterina — Doctor of technical sciences, professor, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, Moscow, Russia,
E-mail: Potapova.e.n@muctr.ru; ORCID: https://orcid.org/0000—0002-5796—2265;
Sviderskiy Alexander — Doctor of chemical sciences, professor, Toraighyrov university, Pavlodar, Kazakhstan,
E-mail: katsostud@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7277-5882.

Abstract. This scientific article presents the results of physicochemical studies aimed at assessing the potential use of lead slag processing waste as a raw material for the cement industry. The studies were conducted using state-of-the-art analytical equipment: a BRUKER S8 TIGER X-ray fluorescence spectrometer, a JEOL JSM-6490LV scanning electron microscope, and a Shimadzu IR Prestige-21 Fourier-transform IR spectrometer. X-ray fluorescence spectroscopy, scanning electron microscopy, and infrared spectroscopy were used to analyze the lead slag processing waste generated at «Standard Steel KZ». As a result of X-ray fluorescence analysis, the chemical composition of lead slag processing waste was established, including: SiO_2 — 23,58%, Al_2O_3 — 5,2%, Fe_2O_3 — 32,04%, CaO — 14,99%, MgO — 3,12%; SO_3 —

1,91%; Na_2O — 1,95%; K_2O — 1,12%; CuO — 0,42%; PbO — 0,05%; ZnO — 3,02%; loss on ignition - 9.10%. Heavy metal oxides were also found in the waste: Mn_3O_4 — 0,65 %; SrO — 0,18 %; Cr_2O_3 — 0,07 %; BaO — 2,02 %; TiO_2 — 0,37 %; P_2O_5 — 0,21 %. Scanning electron microscopy data revealed the following mineral phases in the waste: hedenbergite ($CaFeSi_2O_6$), fayalite (Fe_2SiO_4), pseudowollastonite ($CaSiO_3$), magnetite (Fe_3O_4), hematite (Fe_2O_3), and zinc oxide (ZnO). Fourier transform infrared spectroscopy data showed that silicate and aluminosilicate phases, as well as functional groups and secondary minerals present in lead slag processing waste, are formed and manifested in the spectral range of 3900—500 cm^{-1}. Comprehensive physicochemical studies have shown that lead slag processing waste in the production of Portland cement clinker can be used as a potential substitute for iron ore raw materials.

Keywords: waste, lead slag, recycling, raw mix, clinker, cement

©А. Рахимов[1], Н. Жаникулов[2*], Б. Таймасов[1], Е. Потапова[3], А.К. Свидерский[4], 2025.

[1]М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан;
[2]Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университеті, Қарағанды, Қазақстан;
[3]Д.И. Менделеев атындағы Ресей химиялық технология университеті, Мәскеу, Ресей;
[4]Торайғыров университеті, Павлодар, Қазақстан.
E-mail: nurgali.zhanikulov@mail.ru

ЦЕМЕНТ ӨНЕРКӘСІБІ ҮШІН ШИКІЗАТ РЕТІНДЕ ҚОРҒАСЫН ҚОЖЫН ӨҢДЕУ ҚАЛДЫҚТАРЫН ЗЕРТТЕУ

Рахимов Айдос — М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университетінің PhD докторанты, Шымкент, Қазақстан,
E-mail: aidos_0194@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3671-148X;
Жаникулов Нұрғали — PhD докторы, қауымдастырылған профессор, Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университеті, Қарағанды, Қазақстан,
E-mail: nurgali.zhanikulov@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0750-9753;
Таймасов Бахитжан — техника ғылымдарының докторы, профессор, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан,
E-mail: taimasovukgu@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1844-4932;
Потапова Екатерина — техника ғылымдарының докторы, профессор, Д.И. Менделеев атындағы Ресей химиялық технология университеті, Мәскеу, Ресей,
E-mail: Potapova.e.n@muctr.ru; ORCID: https://orcid.org/0000—0002-5796—2265;
Свидерский Александр — химия ғылымдарының докторы, профессор, Торайғыров университеті, Павлодар, Қазақстан,
E-mail: katsostud@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7277-5882.

Аннотация. Ғылыми мақалада цемент өнеркәсібі үшін қорғасын қожын өңдеу қалдықтарын шикізат ретінде пайдалану мүмкіндігін физика-химиялық әдістермен зерттеу нәтижелері көрсетілген. Зерттеу жұмыстары заманауи BRUKER S8 TIGER, JEOL JSM-6490LV сканерлейтін электронды микроскоп және

Shimadzu IR Prestige-21 спектрометр құрал-жабдықтардың көмегімен жасалды. ЖШС «Standard Steel KZ» қорғасын қожын қайта өңдеуден қалған қалдықтарды рентгендік флуоресценциялық, растрлы электронды микроскопиялық және ИҚ спектроскопиялық талдау әдістері қолданылды. Рентгендік флуоресценциялық спектрометрия әдісімен зерттеу нәтижесінде қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтардың химиялық құрамында: SiO_2 — 23,58 %, Al_2O_3 — 5,2 %, Fe_2O_3 — 32,04 %, CaO — 14,99 %, MgO — 3,12 %; SO_3 — 1,91 %; Na_2O — 1,95 %; K_2O — 1,12 %; CuO — 0,42 %; PbO — 0,05 %; ZnO — 3,02 %; күйдіру кезіндегі жоғалу — 9,10 % және басқа ауыр металлдар: Mn_3O_4 — 0,65 %; SrO — 0,18 %; Cr_2O_3 — 0,07 %; BaO — 2,02 %; TiO_2 — 0,37 %; P_2O_5 — 0,21 % анықталды. Расторлы электронды микроскопиялық талдау нәтижесінде қалдықтардың құрамында геденбергит ($CaFeSi_2O_6$), фаялит (Fe_2SiO_4), псевдоволластонит ($CaSiO_3$), магнетит (Fe_3O_4), гематит (Fe_2O_3) және мырыш оксиді (ZnO) минералдары анықталды. Қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтардың құрамында кездесетін силикатты және алюмосиликатты фазалардың, функционалдық топтар мен екінші реттік минералдардың 3900—500 $см^{-1}$ диапазонында түзілгендігі дәлелденді. Нәтижесінде жүргізілген физика-химиялық зерттеу нәтижесінде портландцемент клинкерін алу үшін қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтарды әлеуетті темір рудасын алмастырушы шикізат ретінде пайдалануға жарамды екендігі дәлелденді.

Түйін сөздер: қалдықтар, қорғасын қожы, кәдеге жарату, шикізат қоспасы, клинкер, цемент

©А. Рахимов[1], Н. Жаникулов[2*], Б. Таймасов[2], Е. Потапова[3], А.К. Свидерский[4], 2025.

[1]Южно-Казахстанский университет имени Ауэзова, Шымкент, Казахстан;
[2]Карагандинский национальный исследовательский университет имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан;
[3]Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Москва, Россия;
[4]Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан.
E-mail:nurgali.zhanikulov@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ СВИНЦОВОГО ШЛАКА В КАЧЕСТВЕ СЫРЬЯ ДЛЯ ЦЕМЕНТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Рахимов Айдос — PhD докторант Южно-Казахстанского университета им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан,
E-mail: aidos_0194@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3671-148X;
Жаникулов Нургали — доктор PhD, ассоциированный профессор, Карагандинский национальный исследовательский университет имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан,
E-mail: nurgali.zhanikulov@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0750-9753;
Таймасов Бахитжан — доктор технических наук, профессор, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан,
E-mail: taimasovukgu@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1844-4932;
Потапова Екатерина — доктор технических наук, профессор, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Москва, Россия,

E-mail: Potapova.e.n@muctr.ru; ORCID: https://orcid.org/0000—0002-5796—2265;
Свидерский Александр — доктор химических наук, профессор, Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан,
E-mail: katsostud@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7277-5882.

Аннотация. В статье представлены результаты физико-химических исследований, направленных на оценку возможности использования отходов переработки свинцового шлака в качестве сырья для цементной промышленности. Исследования выполнены с применением современного аналитического оборудования: рентгенофлуоресцентного спектрометра BRUKER S8 TIGER, сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6490LV и ИК-Фурье-спектрометра Shimadzu IR Prestige-21. Для анализа отходов, образующихся на ТОО «Standard Steel KZ», применялись методы рентгенофлуоресцентной спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии и инфракрасной спектроскопии. Рентгенофлуоресцентный анализ показал, что химический состав отходов переработки свинцового шлака включает (мас. %): SiO_2 — 23,58; Al_2O_3 — 5,20; Fe_2O_3 — 32,04; CaO — 14,99; MgO — 3,12; SO_3 — 1,91; Na_2O — 1,95; K_2O — 1,12; CuO — 0,42; PbO — 0,05; ZnO — 3,02; потери при прокаливании — 9,10 %. Также выявлены оксиды тяжёлых металлов: Mn_3O_4 — 0,65 %; SrO — 0,18 %; Cr_2O_3 — 0,07 %; BaO — 2,02 %; TiO_2 — 0,37 %; P_2O_5 — 0,21 %. По данным сканирующей электронной микроскопии идентифицированы минеральные фазы: геденбергит ($CaFeSi_2O_6$), фаялит (Fe_2SiO_4), псевдоволластонит ($CaSiO_3$), магнетит (Fe_3O_4), гематит (Fe_2O_3) и оксид цинка (ZnO). Результаты ИК-Фурье-спектроскопии подтвердили присутствие силикатных и алюмосиликатных фаз, а также функциональных групп и вторичных минералов, проявляющихся в спектральном диапазоне 3900—500 $см^{-1}$. Комплексные физико-химические исследования показали, что отходы переработки свинцового шлака могут быть использованы в качестве потенциального заменителя железорудного сырья при производстве портландцементного клинкера.

Ключевые слова: отходы, свинцовый шлак, утилизация, сырьевая смесь, клинкер, цемент

Кіріспе. Қазақстан Республикасы өнеркәсіптік өндіріс бойынша ТМД елдерінің арасында екінші және Орталық Азия елдерінің арасында бірінші орынды иеленіп аймақта көшбастады. 2024 жылы еліміздің өндіріс көлемі 106,8 млрд долларға жетіп, бұл көрсеткіш бойынша тек Ресейден (1,3 трлн доллар) қалып келе жатыр (Kazakhstan Leads, 2025). Competitive Industrial Performance деректеріне сәйкес Қазақстан 2025 жылы әлем бойынша өнеркәсіптік қуаты бойынша 153 елдің арасынан 63-ші орынға тұрақтаған (Competitive, 2025). Негізгі мықты позицияларды тау-кен өнеркәсібі, мұнай-газ, машина жасау және химия саласы көрсеткен (Kazakhstan Accelerates, 2025). Қазақстанда жоғарыда аталған өнеркәсіптік өндіріс секторы өндірістік қалдықтарды шығаруда, үйінділерді қалыптастыруда, жасанды минералды түзілімдері пайда қылуда да белсенділік көрсетуде. Елімізде жыл сайын шамамен 1 млрд тоннаға жуық көлемде қалдықтар

CC BY NC

(тау-кен – 70 %, өңдеу саласы – 15-16 %) түзіледі, ал жинақталған қалдықтардың жалпы көлемі 31,6 млрд тоннаны құрады (Information, 2023). Қалдықтарды қайта өңдеу, оларды кәдеге жарату шамамен 11 % құрап отыр (Kazakhstan recycles, 2025). Бұл айтарлықтай төмен көрсеткіш болғандықтан экологиялық мәселелерді тиімді шешудің нақты қадамдарына мемлекеттік бағдарламаларды әзірлеу арқылы қол жеткізілуде. Атап өтетін болсақ: «Жасыл экономикаға» көшу тұжырымдамасы; «Жасыл Қазақстан» ұлттық жобасы; EcoQoldau бағдарламасы; Индустрияны дамыту қоры және «Жасыл Даму» арқылы мемлекеттік қаржыландыру; 2026–2030 жылдарға арналған барлық қалдықтарды басқару тұжырымдамасын әзірлеу және бекіту; Кәсіпорын қалдықтарын басқару бағдарламалары; Өнеркәсіптік қалдықтарды қайта өңдеу жобалары; Инфрақұрылым жобаларында қайта өңделген материалдарды пайдалану және т.б. бағдарламалар. Аталған бағдарламалар аясында қалдықтарды қайта өңдеу және жаңа технологияларды енгізу бойынша ауқымды жобалар әзірленіп, іске асуда. Солардың бірі 1934 жылы ашылған «Чимкент қорғасын өндіру» зауытының аумағында орналасқан қорғасын қожын қайта өңдеу жобасын айтуға болады. Шымкент қаласында орналасқан ЖШС «Standard Steel KZ» қорғасын қалдықтарын қайта өңдеу зауыты қож құрамынан түсті металдарды алуға бағытталған. Қорғасын қожының жалпы көлемі 4,5 млн тоннаны құрайды. Бұл өндіріс орны жылына 300 мың тонна қожды қайта өңдеп, 21 мың тонна мырыш оксидін өндіреді (Извлечь, 2025). Осыған орай, қождарды қайта өңдеуден кейін қалған қалдықтарды кәдеге жарату, олардың қоршаған ортаға тигізер зияндылығын төмендету өзекті мәселе екендігін көрсетеді.

Бұл зерттеудің мақсаты ЖШС «Standard Steel KZ» қорғасын қожын қайта өңдеуден қалған қалдықтарды цемент өнеркәсібі үшін шикізат материал ретінде пайдалану мүмкіндігін зерттеу, қалдықтарды шикізат қоспасына темір рудасын алмастырушы компонент ретінде қолдану болып табылады.

Өнеркәсіптік қалдықтардың көлемінің артуымен және қоршаған ортаны қорғау ережелерінің қатаңдауы жағдайында қорғасын қожын қоса алғанда, түсті металлургия қалдықтарын жою ерекше өзекті мәселеге айналды. Қорғасын қожы қорғасын концентраттарын пирометаллургиялық өңдеу кезінде айтарлықтай мөлшерде түзіледі және кальций, кремний, темір, алюминий оксидтерін және ауыр металл қосылыстарын (Pb, Zn, Cu және т.б.) қамтитын күрделі химиялық және минералогиялық құрамымен сипатталады (Li et. al, 2017). Пера мен Амбруаз металлургиялық қождарды цемент өнеркәсібінде балама шикізат ретінде пайдалануға болатынын, клинкер фазасының түзілуіне және күйдіру процестеріне тиімді әсер ететінін анықтаған. Авторлар қорғасынның клинкер күйдіру температурасын төмендетуге көмектесетінін, бірақ оның құрамын қатаң бақылауды қажет ететінін атап өткен (Pera et. al, 2004). A.M. Рашад түсті металлургия қождарының цемент композиттерінің физикалық және механикалық қасиеттеріне әсерін зерттеу арқылы бұл мәселеге айтарлықтай үлес қосқан. Оның жұмысы алдын ала өңделген қорғасын бар қождарды цементтің беріктік қасиеттерін айтарлықтай төмендетпей, сонымен бірге қоршаған ортаға зиянды әсерді азайту мақсатында минералды қоспа ретінде пайдалануға болатынын

анықтаған (Rashad, 2019). Қытайлық зерттеушілер Го Ю. және Чжан Т. цемент өндірісі үшін шикізат қоспаларда қорғасын мен мырыш қождарын пайдалану мүмкіндігін зерттеді. Олардың зерттеу нәтижелері қождарды ұсақ ұнтақтау және термиялық өңдеу арқылы цемент матрицасында қорғасын иондарының тұрақты бекітілуіне әкелетінін көрсеткен, бұл олардың шайылу процесін қолайлы деңгейге дейін төмендеткен (Guo et. al, 2017). Ресейлік ғалымдар В.И. Логанина мен А.В. Селяев (Loganina et. al, 2014) түсті металлургия қалдықтарын тұтастырғыштардың минералды компоненттері ретінде пайдалануды зерттеген. Авторлар қорғасын қождарының пуццоландық белсенділігінің болуы мүмкін екенін және тиісті физика-химиялық өңдеуден кейін цемент жүйелерінде қолданыла алатынын атап көрсеткен. А.Н. Плагин мен Н.М. Кузнецованың жұмыстары цемент пен бетон композиттеріндегі ауыр металдарды тұрақтандыруға бағытталған. Цемент тасы нашар еритін фазаларды қалыптастыру арқылы қорғасын қосылыстарын тиімді түрде иммобилизациялай алатыны, бұл цемент материалдарында қорғасын бар қалдықтарды пайдалануға мүмкіндік беретінін анықтаған (Плугин және басқа, 2010). Қазақстанда Айтхожиннің, Б.К. Исабековтің зерттеулері осы қождардың химиялық және минералогиялық құрамын зерттеуге және оларды цемент өнеркәсібінде пайдалану әлеуетін бағалауға арналған (Айтхожин және басқа, 2018). Бұл жұмыстың нәтижелері түсті металдарды бөліп алып, құрамын тұрақтандырғаннан кейін қалдықтарды клинкер шикізат қоспасына реттеуші қоспа немесе цементке белсенді минералды қоспа ретінде пайдаланылуы мүмкін екенін атап көрсеткен. Ауыр металдарды шаймалау сынақтарын қоса алғанда, міндетті түрде қоршаған ортаны бақылау қажеттілігін атап өткен. Ғылыми әдебиеттерді талдау қорғасын қождарын өңдеуден кейінгі қалдықтарды цемент өнеркәсібінде пайдалану үшін айтарлықтай әлеуетке ие шикізат екенін көрсетеді. Зерттеушілердің көпшілігі технологиялық және экологиялық талаптар орындалған жағдайда, мұндай қалдықтарды табиғи ресурстарды тұтынуды азайтуға және қоршаған ортаға теріс әсерді азайтуға көмектесетін перспективалы екінші реттік шикізат деп санауға болатынын анықтаған.

Материалдар мен зерттеу әдістері. ЖШС «Standard Steel KZ» қорғасын қождарын қайта өңдеу зауытында негізгі түзілетін қалдықтар келесідей технологиялық процестерден өтеді:

Қождарды қабылдау және дайындау → ұсақтау және ұнтақтау → қождарды балқыту және мырыш, мыс, күмісті бөліп алу → қалдықтардың түзілуі (Brett et al, 2008). Аталған өңдеу кезеңдерден өткен қалдықтың жалпы көрінісі 1 суретте көрсетілген.

CC BY NC

а)

ә)

а — қорғасын қожын технологиялық өңдеу процесі; ә — өңдеуден қалған қалдық.
Сурет 1 – Қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтар.

Қорғасын қождарын қайта өңдеу қалдықтарын екінші реттік шикізат ретінде пайдалану металлургия, құрылыс және онымен байланысты салалар үшін айтарлықтай практикалық қызығушылық тудырады. Қалдықтардың бұл түрінің практикалық қолданылуы оның айтарлықтай көлемде тұрақты түзілуіне, сондай-ақ темір, кальций, кремний және алюминий оксидтері мен қалдық түсті емес металл қосылыстарын қоса алғанда, салыстырмалы түрде біртекті химиялық және минералогиялық құрамына байланысты. Өнеркәсіптік жағдайда негізгі фактор – қорғасын қождарын өңдеуді жабдықтарды айтарлықтай жаңартпай-ақ қолданыстағы технологиялық тізбектерге біріктіру мүмкіндігі. Тәжірибе көрсеткендей, алдын ала операцияларды – ұсақтау, електен өткізу, магниттік өңдеу және қажет болған жағдайда гидрометаллургиялық өңдеуді – стандартты байыту және өңдеу жабдықтарын пайдалану арқылы жүзеге асыруға болады. Бұл капиталдық шығындарды азайтады және технологияны енгізудің экономикалық мүмкіндігін жақсартады. Қорғасын қождарын қайта өңдеу қалдық қоймалары мен қалдық үйінділеріне түсетін жүктемені азайтады және улы компоненттердің (негізінен қорғасын және ауыр металл қосылыстары) топырақ пен жер асты суларына ауысу қаупін азайтады. Қауіпті компоненттер тиісті түрде тұрақтандырылған және санитарлық-гигиеналық стандарттар сақталған жағдайда, қайта өңделген қалдықтарды құрылыс материалдарын, агрегаттарды, минералды қоспаларды немесе металлургиялық флюстерді өндіру үшін шикізат ретінде пайдалануға болады. Қорғасын қож қалдықтарын өнеркәсіптік пайдалану үшін химиялық талдауды, бөлшектердің мөлшерін бағалауды және шикізат сапасын міндетті түрде бақылау қажет екенін атап өткен жөн. Нақты өндіріс жағдайында бұл өнеркәсіптік экологиялық бақылау жүйесін енгізуді және нормативтік-техникалық құжаттаманы екінші реттік шикізаттың нақты түріне бейімдеуді талап етеді.

Өңдеуден қалған қалдықтарды шарлы диірменде ұнтақтап, әрі қарай физика-химиялық әдістердің көмегімен талдау жасалды. Зерттеу жұмыстары М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университетінің Инженерлік Бейінді Аймақтық сынақ зертханасы мен ЖШС «Стандарт Цемент » цемент зауытының зертханасында орындалды.

CC BY NC

Өңдеуден қалған қалдықтарға рентгендік флуоресценциялық талдау ЖШС «Стандарт Цемент» зауытында жасалды. Талдау BRUKER S8 TIGER рентгендік флуоресценциялық спектрометрі көмегімен қалдық құрамына сандық және сапалық анықтау үшін қолданылды. BRUKER S8 TIGER рентген флуоресценциялық спектрометрі (толқынды дисперсиялық, WDXRF), Родий (Rh) анодымен рентген түтігі, қуаты 4 кВт дейін, SPECTRAPlus бағдарламалық жасақтамасы, Планшеттік пресс, Муфель пеші (егер кальцинация қажет болса), ±0,0001 г дәлдікпен аналитикалық таразы жабдықталған. Үлгі дайындау 105 ± 5 °С температурада тұрақты салмаққа дейін кептіріледі, содан кейін 63 мкм-ден аз бөлшектердің өлшеміне дейін ұнтақталады. Алынған ұнтақ біртектілікті қамтамасыз ету үшін мұқият араластырылады. Аналитикалық мақсаттарға байланысты престелген таблеткалар дайындалады. 5,0–7,0 г ұнтақ үлгісі 10% байланыстырғышпен (бор қышқылымен) араластырылады. Үлгі 20–30 т қысыммен престеледі. Алынған таблетка анализатор кюветіне орналастырылады. Талдау кезінде түтіктің жұмыс режимі: 20–60 кВ, 20–150 мА, талдау атмосферасы: вакуум немесе гелий (жеңіл элементтер үшін), талданатын элементтер диапазоны: Na-дан U-ға дейін, сигналдың жинақталу уақыты: әр жолға 10–40 с, қолданылатын анализатор кристалдары: LiF, PET, Ge (элементке байланысты). Дайындалған үлгі өлшеу камерасына орналастырылады. Талдау элементтердің сипаттамалық сызықтарын тізбектей өлшеуді қамтитын алдын ала орнатылған бағдарламаға сәйкес автоматты түрде жүргізіледі. Алынған спектрлер элементтердің немесе оксидтердің массалық үлестерін есептеу үшін бағдарламалық жасақтамамен өңделеді. Талдау нәтижелері элементтердің массалық үлестері (%) немесе оксидтер (%) ретінде ұсынылады. Анықтау шегі элементке байланысты 0,001-ден 0,01%-ға дейін болады. Салыстырмалы өлшеу қателігі 2–5%-дан аспайды (Zhanikulov et. al, 2020).

Өңдеуден қалған қалдықтарға электронды-микроскопиялық талдау Инженерлік Бейінді Аймақтық сынақ зертханасында жасалды. Талдау JEOL JSM-6490 LV маркалы электронды микроскоптың көмегімен орындалды. JEOL JSM-6490LV сканерлейтін электронды микроскоп жұмыс режимі - төмен вакуумды (LV), Детекторы - екінші реттік электрон (SE), кері шашыраңқы электрон (BSE), энергияны дисперсиялық микроталдау жүйесі, Вакуумдық жүйе; JEOL бағдарламалық жасақтамасы бар компьютермен жабдықталған. Үлгілер 105 ± 5°С температурада тұрақты салмаққа дейін кептіріледі. Қажет болған жағдайда, олар ұсақталады немесе сындырылады. Үлгілер алюминий ұстағыштарға көміртекті таспа немесе өткізгіш желім арқылы бекітіледі. Бұл ұстағышпен сенімді электрлік байланысты қамтамасыз етеді. Жоғары вакуумды сынау үшін өткізбейтін үлгілер шашырату арқылы алтынның, көміртектің немесе платинаның жұқа қабатымен жабылады. Жабылмаған үлгілерді төмен вакуумды (ТВ) сынау кезінде сынауға болады. Зерттеу шарттары: үдеу кернеуі – 5–30 кВ (әдетте 15–20 кВ), зонд тогы - 10^{-10} — 10^{-9} А, жұмыс қашықтығы – 10–15 мм, үлкейту - х20-дан х30 000-ға дейін, камера қысымы — LV 10–270 Па. ЭДС талдауы микроаймақтардағы элементтік құрамды сапалық және жартылай сандық анықтауға мүмкіндік береді. элемент

CC BY NC

диапазоны: B-дан U-ға дейін; талдау аймағы: 1–5 мкм; спектрді алу уақыты: 30–120 с; қателік: ±2–5% (Мырзақожа және басқа, 2014).

Өңдеуден қалған қалдықтарға спектроскопиялық талдау Инженерлік Бейінді Аймақтық сынақ зертханасында жасалды. Талдау ATR Miracle қосымшасы бар Shimadzu IR Prestige-21 спектрометр көмегімен орындалды. Фурье түрлендіруімен инфрақызыл спектроскопия функционалдық топтарды, фазалық құрамды және заттардың химиялық құрамын анықтау үшін қолданылады. ATR қосымшасын пайдаланатын әдіс қатты, ұнтақ тәрізді және нашар дайындалған үлгілерді күрделі үлгі дайындамай талдауға мүмкіндік береді, бұл өнеркәсіптік қалдықтарды зерттеу үшін тиімді әдіс. Shimadzu IR Prestige-21 FTIR спектрометрі ATR Miracle әлсіретілген толық шағылысу (ATR) қондырмасы (Pike Technologies), ATR кристалы (алмаз / ZnSe / Ge – конфигурацияға байланысты), қатты үлгілерді ұстау механизмі, IRsolution бағдарламалық жасақтамасы, деректерді өңдеу компьютерімен жабдықталған. Сынақ материалдары (шлактар, цемент, клинкер) 105 ± 5°C температурада тұрақты салмаққа дейін алдын ала кептіріледі. Ұнтақталған үлгілер ATR кристалды бетімен тығыз байланыста болу үшін ұсақ бөлшектер өлшеміне (<63 мкм) дейін ұнтақталады. Үлгілерді қосымша химиялық өңдеу қажет емес. Талдау шарттары: спектрлік диапазон: 4000–400 см$^{-1}$, спектрлік ажыратымдылық: 4 см$^{-1}$; сканерлеу саны: 32–64; өлшеу температурасы: бөлме температурасы 20–25°C; сынама қысымы: реттелетін 150 Н дейін (Horgnies et al, 2013).

Нәтижелер және талқылаулар. Өңдеуден қалған қалдықтарды шарлы диірменде ұнтақтау нәтижесінде Ле-Шателье құрылғысында меншікті тығыздығы анықталды. 100 г тығыздықта (Ле Шателье меншікті салмағын өлшегіш) – 3,474 г/см^3 тең болды.

$$\gamma_{Ц} = \frac{m_{Ц}}{V} = \frac{74}{21,3} = 3,474 \text{ г/см}^3 \quad (1)$$

BRUKER S8 TIGER рентгендік флуоресценциялық спектрометрде өңдеуден қалған қалдықтардың химиялық құрамына көп элементті талдау жүргізілді. Нәтижесінде қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтардың химиялық құрамы 1 кестеде келтірілген.

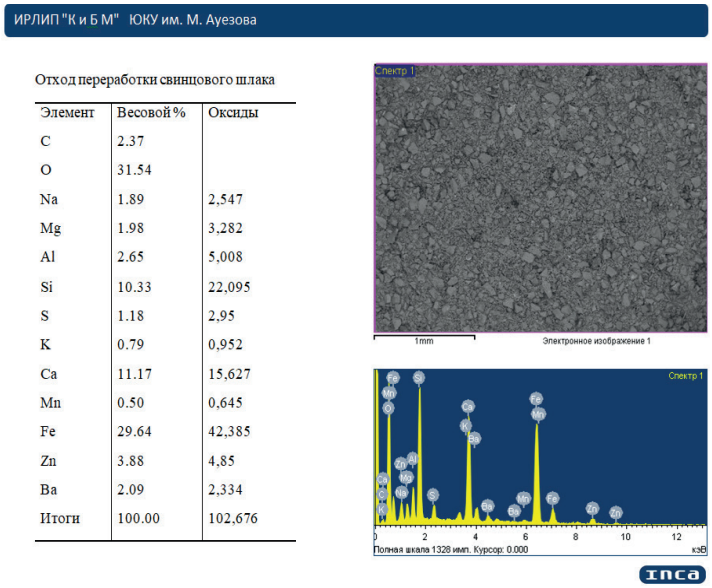
Кесте 1. Қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтардың химиялық құрамы.

Шикізат	Химиялық құрамы, сал. %													
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	CuO	PbO	ZnO	ККЖ	бас-қа	жал-пы
Қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтары	23,58	5,20	32,04	14,99	3,12	1,91	1,95	1,12	0,42	0,05	3,02	9,10	3,5	100

Қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтардың химиялық құрамында кремний оксидінің мөлшері 23 %-дан асады, Al_2O_3 — 5,2 %, Fe_2O_3 — 32 % жоғары

және CaO — 15 % жуық кездеседі. Сонымен қатар, химиялық құрамның 3,5 % басқа оксидтерге: Mn_3O_4 — 0,65; SrO — 0,18; Cr_2O_3 — 0,07; BaO — 2,02; TiO_2 — 0,37; P_2O_5 — 0,21 % болды. Нәтижесінде қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтарды клинкер күйдіру процесі кезінде шикізат қоспа құрамына темір рудасын алмастыруға жарамды компонент ретінде қолдануға болатын материал етеді.

JEOL JSM-6490 LV маркалы электронды микроскоптың көмегімен қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтарға микроқұрылымдық талдау жасалды. 2 суретте қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтардың микроқұрылымы және спектрограммасы келтірілген.



Отход переработки свинцового шлака

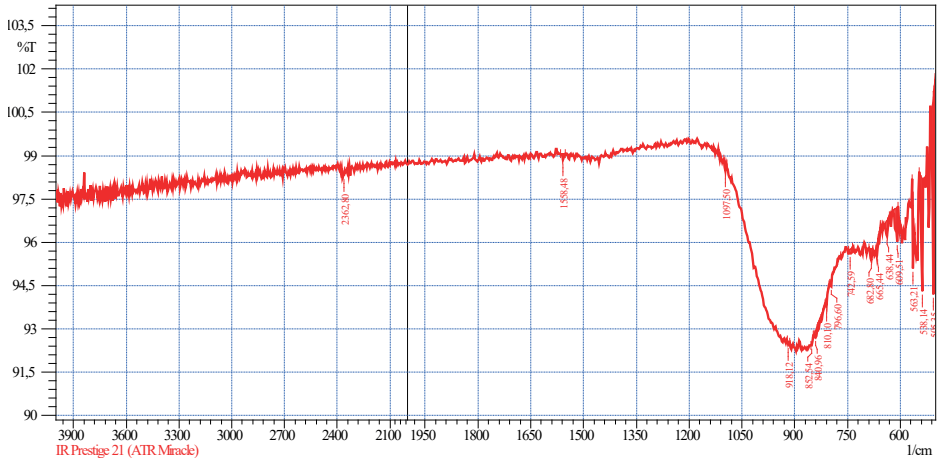
Элемент	Весовой %	Оксиды
C	2.37	
O	31.54	
Na	1.89	2,547
Mg	1.98	3,282
Al	2.65	5,008
Si	10.33	22,095
S	1.18	2,95
K	0.79	0,952
Ca	11.17	15,627
Mn	0.50	0,645
Fe	29.64	42,385
Zn	3.88	4,85
Ba	2.09	2,334
Итоги	100.00	102,676

Сурет 2 — Қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтардың микроқұрылымы және спектрограммасы.

JEOLJSM-6490LV сканерлеуші электронды микроскопын пайдаланып қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтарын зерттеген кезде, пирометаллургиялық процестерге тән бірқатар минералды фазалар мен құрылымдық компоненттерді анықталды. Микроқұрылымның басым бөлігі силикатты және алюмосиликатты фазалардан – геденбергит ($CaFeSi_2O_6$) жоғары температурада балқыған ашық сұр түсті призмалық құрылымды минерал, фаялит (Fe_2SiO_4) қорғасын қож құрамында ең көп таралған изотермиялық кристалды қою сұр түсті минерал, псевдоволластонит ($CaSiO_3$) металлдардың бөлінуінен кейін түзілетін ине тәрізді пішіндегі минерал, сонымен қатар, магнетит (Fe_3O_4), гематит (Fe_2O_3), мырыш оксиді (ZnO) минералдары анықталды.

Shimadzu IR Prestige-21 спектрометр көмегімен қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтарға спектроскопиялық талдау жасалды. 3 суретте қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтардың ИК спектрофотометрі келтірілген.

CC BY NC



No.	Peak	Intensity	Corr. Intensity	Base (H)	Base (L)	Area	Corr. Area
1	505,35	94,1819	7,0360	513,07	499,56	0,1262	0,1970
2	538,14	94,3041	3,8919	545,85	534,28	0,1790	0,0890
3	563,21	95,0804	2,1874	567,07	559,36	0,1263	0,0333
4	609,51	96,0063	1,2080	621,08	605,65	0,2302	0,0386
5	638,44	96,2154	0,5455	646,15	630,72	0,2388	0,0196
6	665,44	95,5221	0,4858	669,30	655,80	0,2410	0,0173
7	682,80	95,3620	0,4037	688,59	677,01	0,2275	0,0099
8	742,59	95,6094	0,1480	746,45	734,88	0,2223	0,0058
9	796,60	94,4625	0,2394	800,46	769,60	0,6717	0,0043
10	810,10	93,8107	0,2243	812,03	802,39	0,2511	0,0041
11	840,96	92,6995	0,2455	844,82	813,96	0,9438	0,0255
12	852,54	92,4229	0,0880	854,47	846,75	0,2590	0,0029
13	918,12	92,4645	0,1009	921,97	914,26	0,2602	0,0013
14	1097,50	98,4837	0,3064	1101,35	1093,64	0,0459	0,0051
15	1558,48	98,8387	0,2430	1566,20	1550,77	0,0665	0,0047
16	2362,80	98,3107	0,0737	2364,73	2358,94	0,0418	0,0014

Сурет 3 — Қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтардың ИҚ спектрофотометрі.

Фурье түрлендіруінің инфрақызыл спектрометриясы қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтарының фазалық және химиялық құрамын зерттеу, сондай-ақ металлургиялық өңдеу кейінгі сақтау кезінде пайда болған функционалдық топтар мен екінші реттік минералдарды анықтау үшін қолданылды. Талдау 3900–500 см$^{-1}$ диапазонында ATR қосымшасын пайдаланып жүргізілді, бұл күрделі үлгі дайындаусыз үлгіні талдауға мүмкіндік берді. Қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтарының ИҚ спектрлері кең және қабаттасатын жұтылу жолақтарымен сипатталады, бұл аморфты шыны фазасының және күрделі силикат құрылымдарының басым екенін көрсетеді. Жеке қарқынды жолақтардың

болуы кристалды силикат, алюмосиликатты және оксид фазаларының бар екенін көрсетеді. 505—609 $см^{-1}$ аралығында темір мен мырыш оксиді фазаларының және қалдық қорғасын қосылыстарының бар екенін көрсететін Me–O (Fe–O, Pb–O, Zn–O) тербелістеріне сәйкес келетін жолақтар бар. 638–810 $см^{-1}$ аралығында қалдықтың силикат матрицасына тән Si–O–Si деформациялық тербелістеріне тән жолақтар байқалады. Бұл жолақтар фаялит және геденбергит тәрізді құрылымдармен байланысты. 840–1100 $см^{-1}$ аралығында ең қарқынды кең сіңіру жолағы 840–1097 $см^{-1}$ аймағында байқалады, бұл алюмосиликат және кальций-силикат фазаларындағы асимметриялық Si–O созылу тербелістеріне сәйкес келеді. Максимумның төменгі толқын сандарына қарай ығысуы силикат желісінің ауыр катиондармен (Pb^{2+}, Fe^{2+}, Zn^{2+}) өзгертілгенін көрсетеді. 1550–1650 $см^{-1}$ аралығында әлсіз жолақтар H–O–H деформация тербелістерімен байланысты, бұл адсорбцияланған ылғалдың болуын көрсетеді. 2100–2700 $см^{-1}$ аралығында кең сіңіру жолақтары гидроксилденген фазалар мен бетімен байланысқан суға тән O–H топтарының созылу тербелістеріне сәйкес келді.

Қорытынды. Цемент өнеркәсібі үшін қорғасын қожын өңдеу қалдықтарын шикізат ретінде пайдалану мүмкіндігін зерттеу нәтижесінде:

1. Қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтардың химиялық құрамында SiO_2 – 23,58 %, Al_2O_3 – 5,2 %, Fe_2O_3 – 32,04 % және CaO – 14,99 % кездесетіндігі анықталды. Бұл оның портландцемент клинкерін күйдіру процесі кезінде реттеуші компонент ретінде темір рудасын алмастыра алатындығын дәлелдейді. Химиялық құрамында ауыр металдардың мөлшері 7 % құрады, бұл шамадан артық емес екендігін дәлелдейді.

2. Қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтардың құрамында геденбергит ($CaFeSi_2O_6$), фаялит (Fe_2SiO_4), псевдоволластонит ($CaSiO_3$), магнетит (Fe_3O_4), гематит (Fe_2O_3) және мырыш оксиді (ZnO) минералдары анықталды.

3. Қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтардың құрамында кездесетін силикатты және алюмосиликатты фазалардың, функционалдық топтар мен екінші реттік минералдардың 3900–500 $см^{-1}$ диапазонында түзілгендігі дәлелденді.

Қорытындылай келе, жүргізілген физика-химиялық зерттеу нәтижесінде қорғасын қожын өңдеуден қалған қалдықтарды портландцемент клинкерін алу үшін темір құрамдас шикізатты алмастырушы компонент ретінде пайдалануға, портландцемент клинкерін ұнтақтау кезінде белсенді минералды қоспа ретінде қолдануға жарамды екендігін көрсетті. Сондай-ақ, қалдықтарды бетон өндірісінде толтырғыштар ретінде қолдану мүмкіндігі бар.

Әдебиеттер

Brett D.Y., Smith J.L. (2008) Technology of Portland cement: textbook for institutes of higher education, Michigan Technical Institute: — USA. — 345 p.

Competitive Industrial Performance Index 2025. Kazakhstan. JRC Indicators ∑xplorer. Мына сілтемеде. https://composite-indicators.jrc.ec.europa.eu/explorer/indices/cipi/competitive-industrial-performance-index.

Guo Y., Zhang T., Li Y. (2017) Stabilization of heavy metals in cement-based materials containing metallurgical slag. Journal of Hazardous Materials. — 321. — 215—223.

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.

CC BY NC

Information on waste reduction, recycling and reuse. egov public services and online information. Мына сілтемеде. https://egov.kz/cms/en/articles/waste_reduction_recycling_and_reuse?mobile=no 09.01.2023.

Kazakhstan Accelerates Industrial Transformation With Focus on Manufacturing, Digitalization, and Energy Modernization. The Astana Times. Мына сілтемеде. https://astanatimes.com/2025/12/kazakhstan-accelerates-industrial-transformation-with-focus-on-manufacturing-digitalization-and-energy-modernization/?utm_source 02.12.2025.

Kazakhstan Leads Central Asia in Industrial Output. MINEX forum. Мына сілтемеде. https://minexforum.com/2025/04/22/kazakhstan-leads-central-asia-in-industrial-output/?utm_source 22.04.2025.

Kazakhstan recycles only 11 % of industrial waste — Ministry of Industry and Construction. KazTAG. Мына сілтемеде. https://kaztag.kz/en/news/kazakhstan-recycles-only-11-of-industrial-waste-ministry-of-industry-and-construction?utm_source 26.03.2025.

Li X., Wu S. (2017) Leaching behavior of lead in cementitious systems containing metallurgical slag. Journal of Environmental Management. — 196, — 424—430.

Loganina V.I., Selyaev A.V. (2014) Technogenic waste of non-ferrous metallurgy in construction materials. Construction Materials. — 7. —18—22.

Pera J., Ambroise J**.** (2004) Influence of lead compounds on clinker formation and cement properties. Cement and Concrete Research. — 34. — 145—152.

Rashad A.M. (2019) A comprehensive overview about recycling lead slag as construction materials. Journal of Cleaner Production. —215. — 45—60.

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.

Айтхожин А.С., Исабеков Б.К. (2018) Исследование свинцовых шлаков Шымкентского региона и пути их утилизации. Вестник КазНИТУ. — № 3. — С.72—78.

Извлечь металлы, переработать шлаки // Казахстанская правда. 9.01.2025. Мына сілтемеде. https://kazpravda.kz/n/izvlech-metally-pererabotat-shlaki/

Мырзақожа Д.А., Мирзаходжаев А.А. (2014) Заманауи зерттеу әдістері, Алматы. — 2014. — 352 б.

Плугин А.Н., Кузнецова Н.М. (2010) Иммобилизация тяжёлых металлов в цементных системах. Строительные материалы. — № 5. — С.32—36.

References

Aytkhozhin A.S., Isabekov B.K. (2018) Issledovaniye svintsovykh shlakov Shymkentskogo regiona i puti ikh utilizatsii [Study of lead slags of the Shymkent region and ways of their utilization]. Vestnik KazNITU. — 2018. — No.3. — P.72—78. (in Russian)

Brett D.Y., Smith J.L. (2008) Technology of Portland cement: textbook for institutes of higher education, Michigan Technical Institute: — USA. — 345 p. (in English)

Competitive Industrial Performance Index 2025. Kazakhstan. JRC Indicators ∑xplorer. On this link. https://composite-indicators.jrc.ec.europa.eu/explorer/indices/cipi/competitive-industrial-performance-index (in English)

Guo Y., Zhang T., Li Y. (2017) Stabilization of heavy metals in cement-based materials containing metallurgical slag. Journal of Hazardous Materials. — 321. — 215—223. (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. (in English)

Information on waste reduction, recycling and reuse. egov public services and online information. On this link. https://egov.kz/cms/en/articles/waste_reduction_recycling_and_reuse?mobile=no 09.01.2023. (in English)

Izvlech' metally, pererabotat' shlaki [Extract metals, process slag]. Kazakhstan Pravda. On this link. https://kazpravda.kz/n/izvlech-metally-pererabotat-shlaki/ 09.01.2025. (in Russian)

Kazakhstan Accelerates Industrial Transformation With Focus on Manufacturing, Digitalization, and Energy Modernization. The Astana Times. On this link. https://astanatimes.com/2025/12/kazakhstan-

accelerates-industrial-transformation-with-focus-on-manufacturing-digitalization-and-energy-modernization/?utm_source 02.12.2025. (in English)

Kazakhstan Leads Central Asia in Industrial Output. MINEX forum. On this link. https://minexforum.com/2025/04/22/kazakhstan-leads-central-asia-in-industrial-output/?utm_source 22.04.2025. (in English)

Kazakhstan recycles only 11 % of industrial waste — Ministry of Industry and Construction. KazTAG. On this link. https://kaztag.kz/en/news/kazakhstan-recycles-only-11-of-industrial-waste-ministry-of-industry-and-construction?utm_source 26.03.2025. (in English)

Li X., Wu S. (2017) Leaching behavior of lead in cementitious systems containing metallurgical slag. Journal of Environmental Management. — 196. — 424—430. (in English)

Loganina V.I., Selyaev A.V. (2014) Technogenic waste of non-ferrous metallurgy in construction materials. Construction Materials. — 7. —18—22. (in English)

Myrzakozha D.A., Mirzakhodzhaev A.A. (2014) Zamanaui zertteu adisteri [Modern research methods]. Almaty. — 2014. — 352 p. (in Kazakh)

Pera J., Ambroise J. (2004) Influence of lead compounds on clinker formation and cement properties. Cement and Concrete Research. — 34. — 145—152. (in English)

Plugin A.N., Kuznetsova N.M. (2010) Immobilizatsiya tyazholykh metallov v tsementnykh sistemakh [Immobilization of heavy metals in cement systems]. Construction materials. — 5. — 32-36.

Rashad A.M. (2019) A comprehensive overview about recycling lead slag as construction materials. Journal of Cleaner Production. —215. — 45—60. (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. — 814-823. (in English)

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 241–255

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.397

ӘӨЖ (УДК) 628.3
ҒТАХР (МРНТИ) 70.25

©L.M. Kalimoldina, K.Zh. Zhalgasbayev*, A.S. Dauletbayev, 2025.
Almaty Technological University» JSC, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: kairat_zhalgasbayev82@mail.ru

COMPARATIVE STUDY OF INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT METHODS

Kalimoldina Laila — Candidate of technical sciences, associate professor of the Department of «Chemistry, Chemical Technology and Ecology", Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: kalimoldinal@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4397-9629;
Zhalgasbayev Kairat — master of technical sciences, senior-lecturer of the Department of «Chemistry, Chemical Technology and Ecology», Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan,
E-mail:kairat_zhalgasbayev82@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6580-6457;
Dauletbayev Akim — senior-lecturer of the Department of «Chemistry, Chemical Technology and Ecology», Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: aklakz@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0009- 0007-8657-5495.

Abstract. Currently, we can describe and quantify the chemical components of water bodies and assess their changing dynamics. The treatment of industrial wastewater depends on the technology used, the contamination of the source water, and the regulations. Information on the degree of water purification is indicated by the following methods: mechanical purification (suspended solids - 60-70%, sand, large particles - 80-90%); physico-chemical methods (suspended solids - 90-95%, petroleum products - 85-98%, phosphates - 70-90%, heavy metals - 60-90%); biological purification (biochemical consumption oxygen (BOD) — 85-95%, nitrogen compounds - 70-90%, organic substances - 85-95%); deep purification (salts — 90-99%, heavy metals — 95-99%, organics — 95-99%, microorganisms — 99.9%) if all methods are used, industrial wastewater can generally be cleaned at the level of 95-99%. Wastewater is reused as technical water.

The purpose of the research work is to describe the specific causes of the state of the pollutant intake in accordance with the level of industrial wastewater treatment. The trend of wastewater treatment can only be described as positive, and in most cases, it is carried out using wastewater treatment facilities.

The article describes the current practice of surface runoff and household wastewater treatment facilities. It describes the specifics of using such devices and provides reasons

that prevent the achievement of quality treatment standards. Additionally, the article discusses the main advantages and disadvantages of these technological schemes when used for local treatment of small amounts of water. A technical and economic comparison of these technologies is provided. An overview and analysis of an effective biomembrane wastewater treatment technology are also provided.

Keywords: sewage treatment plants, surface effluents, domestic wastewater, biofilters, aerotanks, bioreactors

©Л.М. Калимолдина, Қ.Ж. Жалгасбаев*, А.С. Даулетбаев, 2025.
Алматы технологиялық университеті, АҚ, Алматы, Қазақстан.
E—mail: kairat_zhalgasbayev82@mail.ru

ӨНЕРКӘСІПТІК САРҚЫНДЫ СУЛАРДЫ ТАЗАРТУДЫҢ ӘДІСТЕРІН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТҮРДЕ ЗЕРТТЕУ

Қалимолдина Ләйлә — «Химия, химиялық технология және экология» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, техника ғылымдарының кандидаты, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан,
E-mail: kalimoldinal@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4397-9629;
Жалғасбаев Қайрат — «Химия, химиялық технология және экология» кафедрасының сеньор-лекторы, техника ғылымдарының магистрі, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан,
E-mail: kairat_zhalgasbayev82@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6580-6457;
Даулетбаев Әкім — «Химия, химиялық технология және экология» кафедрасының сениор-лекторы, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан,
E-mail: aklakz@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8657-5495.

Аннотация. Қазіргі уақытта біз су объектілерінің химиялық компоненттерін сипаттап, сандық түрде анықтай аламыз және олардың өзгеру динамикасын бағалай аламыз. Өнеркәсіптік ағынды суларды тазарту қолданылатын технологияға, бастапқы судың ластануына және стандарттарға байланысты. Суды тазарту дәрежесі туралы мәліметтер мынадай әдістермен көрсетіледі: механикалық тазарту (өлшенген заттар - 60-70%, құм, ірі бөлшектер-80-90%); физика-химиялық әдістер (өлшенген заттар-90-95%, мұнай өнімдері-85-98%, фосфаттар-70-90%, ауыр металдар-60-90%); биологиялық тазарту (биохимиялық тұтыну оттегі (БПК) — 85-95%, азот қосылыстары-70-90%, органикалық заттар-85-95%); терең тазарту (тұздар-90-99%, ауыр металдар-95-99%, органикалық заттар-95-99%, микроорганизмдер — 99.9%) егер барлық әдістер қолданылса, өнеркәсіптік ағынды суларды жалпы 95-99% деңгейінде тазартуға болады. Ағынды сулар техникалық су ретінде қайта пайдаланылады.
Зерттеу жұмысының мақсаты өнеркәсіптік ағынды суларды тазарту деңгейіне сәйкес ластаушы заттардың түсу жағдайының нақты себептерін сипаттау болып табылады. Ағынды суларды тазарту үрдісін тек оң деп сипаттауға болады және көп жағдайда Ағынды суларды тазарту қондырғыларымен жүзеге асырылады.
Мақалада жер үсті ағындары мен тұрмыстық су тазарту қондырғыларының

CC BY NC

қалыптасқан тәжірибесі сипатталған. Мұндай құрылғыларды пайдалану ерекшелігі сипатталған, тазалау сапасының стандарттарына қол жеткізуге кедергі келтіретін себептер келтірілген. Сонымен қатар, мақалада осы технологиялық схемалардың негізгі артықшылықтары мен кемшіліктері қарастырылады, егер олар аз мөлшерде суды жергілікті тазарту үшін қолданылса. Бұл технологияларды техникалық-экономикалық салыстыру қарастырылған. Сондай-ақ, ағынды суларды тазартудың тиімді биомембраналық технологиясына шолу және талдау жасалды.

Түйін сөздер: ақаба суларды тазарту қондырғылары, жер үсті ағындары, тұрмыстық ағынды сулар, биофильтрлер, аэротенктер, биореакторлар

©Л.М. Калимолдина, К.Ж. Жалгасбаев*, А.С. Дәулетбаев, 2025.
«Алматинский технологический университет», Алматы, Казахстан.
E-mail: kairat_zhalgasbayev82@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

Калимолдина Лайла — кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Химия, химическая технология и экология», Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан,
E-mail: kalimoldinal@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4397-9629;
Жалгасбаев Кайрат — магистр технических наук, докторант, сениор-лектор кафедры «Химия, химическая технология и экология», Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан,
E-mail: kairat_ zhalgasbayev82@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6580-6457;
Даулетбаев Аким — старший преподаватель кафедры «Химия, химическая технология и экология», Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан,
E-mail: aklakz@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0009-0007- 8657-5495.

Аннотация. Современные аналитические методы позволяют детально описывать химический состав водных объектов и отслеживать динамику его изменений. Эффективность очистки промышленных сточных вод определяется типом применяемой технологии, характером загрязнений исходной воды и действующими нормативами качества. Степень очистки воды различными методами характеризуется следующими показателями: механическая очистка (взвешенные вещества - 60-70%, песок, крупные частицы - 80-90%); физико-химические методы (взвешенные вещества - 90-95%, нефтепродукты - 85-98%, фосфаты - 70-90%, тяжелые металлы - 60-90%); биологическая очистка (биохимическое потребление кислорода (БПК) — 85-95%, азотные соединения - 70-90%, органические вещества - 85-95%); глубокая очистка (соли — 90-99%, тяжелые металлы — 95-99%, органика — 95-99%, микроорганизмы — 99.9%). При комплексном использовании методов уровень очистки промышленных сточных вод может достигать 95—99%, что позволяет применять их повторно как техническую воду.

Целью исследования является анализ причин поступления загрязняющих веществ в сточные воды и оценка эффективности различных технологий очистки с учётом требований к качеству очищенной воды. В статье рассмотрены особенности работы очистных сооружений для поверхностных и хозяйственно-бытовых стоков, выявлены ключевые факторы, препятствующие достижению нормативных показателей. Представлены сравнительные характеристики основных технологических схем, их преимущества и ограничения при использовании для локальной очистки малых объёмов. Дополнительно проведён обзор и сравнительный анализ современных биомембранных технологий, обладающих высокой эффективностью в удалении органических загрязнений и биогенных элементов. На основе технико-экономической оценки показана перспективность их внедрения в промышленный сектор.

Ключевые слова: очистные сооружения, поверхностные стоки, бытовые сточные воды, биофильтры, аэротенки, биореакторы

Кіріспе. Су - жер бетіндегі өмірдің көзі ретінде маңызды табиғи және стратегиялық ресурс болып табылады. Соңғы онжылдықта бүкіл әлемде су ресурстарының ахуалы бойынша алаңдаушылық артып келеді.

Әлемнің көптеген ірі қалалары өзендердің сағаларында орналасқан. Бұл өзендердің сағалары мұхиттар мен тұщы судың түйісетін жері болып табылады және көбінесе табиғи суды құрайды. Тұщы суда төмен концентрацияда микроэлементтер болады. Өзендердің сағаларында нитрат концентрациясы мен тұздылық арасында байланыс бар. Өзендердің сағаларындағы жағдайлар жоғары биомассаның дамуына қолайлы болуы мүмкін (Берникова, 2011).

Соңғы жылдары мемлекеттік органдардың дамуымен су ресурстарын зерттеуге арналған агенттіктер, сумен байланысты ғылымдар өз қызметінде жаңа серпін алды. Қазіргі тенденцияларды ұстану, табиғи су объектілерінің функцияларын түсінуді дамыту осы маңызды табиғи ортаны сақтау және ұтымды пайдалануға негізделген.

Адамзат қоғамы өндіретін судың негізгі ластаушылары, олар салыстырмалы түрде аз зиянды әсер етеді. Бұл салыстырмалы түрде улы емес көбінесе ағындарға төгілетін жануарлар мен өсімдіктердің қалдықтары.

Белгілі бір шектеулі мөлшерде бұл заттар кейбіреулерінде пайдалы болуы мүмкін. Бұл қалдықтар органикалық заттарға бай, көміртегі мен және әдетте ағынды сулар, қалдықтар түрінде су жолдарына шығарылады. Ет және сүт өнімдерін, сондай-ақ қалдықтарды қайта өңдеу, қағаз өндірісі және басқа да бірқатар салаларда колданылады (Schmidt I. et al., 2003).

Органикалық қалдықтар барлық қалаларда, өнеркәсіп орталықтарында көп мөлшерде өндіріледі, бірақ ағынды суларды бастапқы, қайталама және үшінші реттік тазарту арқылы қалпына келтіруге болады. Органикалық ластану сонымен қатар қалалық жаңбыр суының ағынынан туындауы мүмкін, бұл су жолдарына төгілуге әкеледі. Кейбір жағдайларда, ағаш кесу сияқты белгілі бір қызмет түрлерінде, қалалардан тыс жерлердегі дренажды бассейндерде органикалық шикізаттың едәуір мөлшері алынуы мүмкін (Вольф, 2013).

CC BY NC

Әдістер мен материалдар. Ағынды сулар — ауыз су және техникалық су, тұрмыстық және өндірістік қажеттіліктер үшін пайдаланылған, одан әрі пайдалану техникалық шарттар бойынша немесе техникалық тұрғыдан мүмкін емес экономикалық көрсеткіштерге негізделген (Гришина, 2009).

Ағынды сулардың шығу көзі бойынша жіктелуі:

1. Өндірістік ағынды сулар (ӨАС) — құрамы өндіріс түріне байланысты:

ластанбаған (шартты түрде таза); ластанған;

2. Шаруашылық-тұрмыстық сарқынды сулар (ШТСС) — бұл санитарлық тораптардан алынған сулар, өндірістік және өндірістік емес ғимараттар, душ қондырғылардың қалдық сулары және т.б. салыстырмалы түрде тұрақты құрамы бар;

3. Атмосфералық (нөсерлі) ағынды сулар (НАС) — жаңбыр және еріген қар сулары (Данилов-Данильян, 2006).

Ластаушы заттардың шығу тегі бойынша минералды, органикалық және бактериалды-биологиялық болып бөлінеді. Ластаушы заттардың құрамы бойынша механикалық, химиялық, бактериялық ағынды сулардың биологиялық, радиоактивті және термиялық ластануы бойынша жіктеледі (Крупнова, 2005).

Гидрохимиялық судың ластану индексі (СЛИ), әдетте, алты-жеті көрсеткіш бойынша есептеледі, гидрохимиялық деп санауға болады; олардың бір бөлігі (суда еріген оттегінің концентрациясы, pH, БПК (ОБТ)5) міндетті болып табылады (1-кесте).

Кесте 1. Судың интегралды сапа көрсеткіштері бойынша жіктелуі.

Су	СЛИ мәні	Су сапасының кластары
Өте таза	0,2 дейін	1
Таза	0,2-1,0	2
Орташа ластанған	1,0-2,0	3
Ластанған	2,0-4,0	4
Лас	4,0-6,0	5
Өте лас	6,0-10,0	6
Аса лас	<10,0	7

Өнеркәсіптік сарқынды суды тазарту төрт негізгі проблемалық саланы басқаруға бағытталған: масштабтау, коррозия, ағынды сулардың қалдықтарын жою және микробиологиялық белсенділігі. Қазандықтарда микробтармен қиындық тудырмайды, өйткені жоғары температура олардың өсуіне жол бермейді (Михайлов, 2008).

Суды тазарту өндірістік шығындар мен тәуекелдер төмендеуі үшін жылыту, салқындату, өңдеу, тазарту және шаю сияқты су негізіндегі өндірістік процестерді оңтайландыру үшін қолданылады.

Суды тазарту сонымен қатар өндірілген өніммен байланыста болатын судың сапасын жақсарту үшін қолданылады. Жартылай өткізгіштер және/немесе өнімнің

бөлігі бола алады, мысалы. сусындар, фармацевтикалық препараттар және т.б. Бұл жағдайда суды сапасыз өңдеу ақаулы өнімді тудыруы мүмкін.

Көптеген жағдайларда, бір процесстен шыққан ағынды сулар басқа тазарту процедураларына сәйкес қайта өңдеуге жарамды болуы мүмкін. Бұл суды тұтыну төлемдерін төмендету арқылы шығындарды азайтуға, ағынды суларды шығаруға кететін шығындарды азайтуға мүмкіндік береді, өйткені көлем азаяды және қайта өңделген ағынды сулардағы жылуды қалпына келтіруге байланысты энергия шығындары азаяды (Никаноров, 2001).

Өнеркәсіпте судың көптеген қолданыстары бар және көп жағдайда пайдаланылған суонықайтапайдалануғанемесекәдегежаратуүшінтазартудықажет етеді. Өнеркәсіптік қондырғыға кіретін шикі суды нақты өндірістік процестерде пайдалану үшін қатаң сапа талаптарына сай тазарту қажет. Өнеркәсіптік суды тазарту барлық аспектілерді — ағынды суларды өндірістік тазарту, қазандық суы және салқындатқыш су қамтиды (Рассказов, 2011).

Ағынды суларды тазарту әдістері:

1. Механикалық және физикалық (гравиметриялық, сүзу әдістері: електер, құм ұстағыштар, май ұстағыштар)

2. Химиялық (реагенттер - pH қалыпқа келтіру, ауыр металдар (АМ) тұндыру, тотығу-тотықсыздану реакциялары, дезинфекциялау және т.б.)

3.Физика-химиялық (коагуляция, сорбция, экстракция, электролиз, иондық алмасу, кері осмос)

4. Биологиялық және биохимиялық (органикалық заттарды ыдырататын микроорганизмдер: табиғи жағдайда (сүзу өрістері, биотоғандар) және жасанды түрде құрылған (биофильтрлер, аэротенктер, тотығу арналары)

5. Ағынды суларды өңдеу тізбегі бірнеше аралас әдістермен жүзеге асады. Ағынды су — бұл коллоидтық жүйе. Коллоидты бөлшектер табиғи түрде сақталмайды. Реагенттерді қолданудың мақсаты: тазарту процесін және оның толықтығын жеделдету (Хаханина, 2015).

Кәсіпорынды қуаты аз жерге орналастырған кезде сарқынды суларды ағызуға жол берілмейді. Су қоймасында ағынды суларды сүйылту және оны өзін-өзі тазарту мүмкіндігі шектелген; ағынды суларда ШРК улы заттар болған жағдайда өте төмен; су қоймасында басқа нысандар орналасқан кезде ластану деңгейі жоғары. Тазарту қондырғылары ағынның нақты көлемі мен құрамының мәлімделгенге сәйкес келмеуі, биоценозға улы заттардың төгілуі, pH ортаның және температураның күрт өзгеруіне әкеледі (State of the World 2000.A Worldwatch Institute Report on Progress Toward a Sustainable Society. -W.W.Northon & Co., 2000).

Бұл мәселені шешу жолдарына мыналар жатады:

– қысқартуға бағытталған өндіріс технологиясын жетілдіру, су тұтыну және сарқынды суларды су айдынына ағызу;

– ағынды суларды айналымды (тұйықталған) жүйелерде пайдалану сумен жабдықтау, ағынды сулардың ластану дәрежесін төмендету;

– тазартылған және залалсыздандырылған қалалық ағынды суларды пайдалану кәсіпорындарды технологиялық сумен жабдықтау;

CC BY NC

– осы кәсіпорынның ағынды суларын техникалық мақсатта пайдалану үшін басқа кәсіпорындарды сумен жабдықтау;

– осы кәсіпорынның ағынды суларын бірлесіп тазарту және залалсыздандыру басқа кәсіпорындардың ағынды суларымен және қалалық ағынды сулармен жүзеге асады;

– өздігінен тазарту және ағынды суларды бұру жұмыстары (жергілікті тазарту құрылыстары) (Lazarova et al., 2009).

Ағынды суларды тазарту — бұл ластаушы заттарды (ЛЗ) жою немесе патогендік организмдерден дезинфекциялау.

Осы мәселені шешу үшін қажет болатын іс-шаралар:

1. Топырақ құнарлылығын реттеу мақсатында ағынды суларды пайдалану;
2. Зираттарды, мал қорымдарын, қалдықтарды орналастыру объектілерін ауашалау;
3. Зиянды организмдерге қарсы күрес жөніндегі авиациялық шараларды жүзеге асыру;
4. Көлік құралдарының қозғалысы мен тұрағын реттеу;
5. Жанармай құю станцияларын реконструкциялау;
6. Пестицидтер мен агрохимикаттарды сақтауды реттеу;
7. Ағынды суларды, соның ішінде дренажды суларды ағызу;
8. Кең таралған пайдалы қазбаларды барлау және өндіру (Мишуков и др., 2011).

Ағынды суларды ағызу кезінде ЛЗ концентрациясын төмендетудің негізгі механизмі су нысандарын сұйылту. Сұйылту коэффициенті араластыру коэффициентіне байланысты (судың қанша бөлігі сұйылтуға қатысады), ағынды сулардың максималды шығыны және бақылау жағдайындағы судың ең аз шығыны (Алексеев и др. 2000).

Жер үсті ағынын тазарту үшін "бөлу құдығы — құм бөлгіш — мұнай — май бөлгіш-сорбциялық сүзгі" схемасы іс жүзінде баламасыз болып табылады. Мұндай құрылыстар жерге көмілген және "қызмет көрсету" үшін тексеру люктері бар шыны талшықты ыдыстар түрінде жасалады. Жеткізу коллекторының тереңдігіне байланысты мұндай құрылымдар гравитациялық режимде жұмыс істей алады немесе олардың алдында сорғыш станциясы орнатылады (Свитцов, 2007).

Іс жүзінде мұндай құрылымдар әдетте ағынды суларды алғашқы екі-үш жаңбырдан тазартуды қамтамасыз етеді, яғни сорбциялық жүктеме сыйымдылығы таусылғанға дейін. Судан ластаушы заттарды гравитациялық шығаруға арналған контейнерлерде — құм бөлгіш және мұнай бөлгіш — су ең көп ағынмен бірнеше ондаған минутты құрайды. Судың ұсақ дисперсті және коллоидты қоспаларын реагентті ірілендіру қарастырылмағандықтан, бұл құрылымдар тек ауыр минералды қоспаларды, ерімеген және эмульсияланбаған мұнай өнімдерін ұстайды, осылайша құм тұзағының рөлін атқарады (Терещук, 2010).

Мұндай құрылымдарға тиімді жұмыс істейтін балама шөгінділерді кетіру үшін қырғыш жүйелермен жабдықталған темірбетон тұндырғыштары бар күрделі құрылыстар болуы мүмкін, содан кейін суды кері шаюмен және сорбциялық тазартумен сүзгілерде сүзеді. Бірақ айтарлықтай жоғары шығындарға, жобалау

мен құрылыстың ұзақ мерзімдеріне, тазарту қондырғыларын орналастыру үшін едәуір аумақтарды бөлу қажеттілігіне байланысты, бұл опция тиімді қолданысқа сәйкес келмейді (Терещук, 2011).

Нәтижесінде, объектілерді салуға және пайдалануға рұқсат алу үшін ағынды суларды қабылдайтын су айдындарының экологикалық жағдайына аз әсер ететін технологиялар қажет. Өкінішке орай, мұндай тазарту қондырғыларына тапсырыс берушілердің жалғыз ұсынысы арзан жабдықты таңдау туралы кеңес болуы мүмкін, өйткені қымбатырақ тазалаудың бірдей "сапасын" қамтамасыз етеді.

Егер мәселенің тарихына көз жүгіртсек, Кеңес заманында "КУ", "УКО", "БИО" сияқты зауытта дайындалған жиынтық қондырғылары болғанын еске түсіруге болады, бірақ тәулігіне 400 м^3-тен бастап өнімділікке құмтас, екі деңгейлі тұндырғыштар мен биофильтрлерден тұратын күрделі тазарту құрылыстарының үлгілік жобалары әзірленді, немесе тұндырғыштарды, аэротенктерді, тұнба тұрақтандырғыштарын және хлоратор мен ауа үрлеу станциясын қамтитын өндірістік ғимаратты қамтитын сыйымдылықтар блогынан жасалды. Сондай-ақ, ол кезде тазалау сапасы тек екі көрсеткіш бойынша — өлшенген заттар мен БПКП-15 мг/л деңгейінде бақыланған (Хенце, 2004).

Нәтижелер және талқылау. Ағынды суларды тазарту сапасын нормалау мәселесінің қазіргі жағдайы тазарту құрылыстарын жобалаушыларға байланысты. Шын мәнінде, тазарту дәрежесі де емес, ағынды суларды қабылдайтын су қоймасындағы судың сапасы да нормаланады, ал егер резервуардың нақты жағдайы кәсіпорынмен сәйкес келмесе, онда ШРК есептеу әдістемесіне сәйкес өндіріс иесі бұл резервуарды ауыз су сапасына жеткізілген ағындарымен "тазартуы" керек. Бұдан басқа, тазарту құрылыстарының өнімділігіне байланысты тазарту дәрежесіне қойылатын талаптарды саралау көзделмейді, сондықтан өндіріс тобының ағынды сулары ірі мегаполистің тазарту құрылғыларындағыдай толық тазарту және зарарсыздандыру циклінен өтуі тиіс (Морозова, 2009). Қалалық тазарту қондырғыларының жұмысын технологтардың, механиктердің, химиктердің, микробиологтардың бүкіл штаты қамтамасыз етеді.

Жалпы нәтижелік деңгейі тазарту дәрежесі төмен қондырғыларын пайдалану ерекшеліктеріне келетін болсақ, көбінесе олардың жұмыс режимінің күрт маусымдық күнделікті біркелкі өзгеруі, температураның ауытқуы және ағынды сулардың құрамы болып табылады. Тазарту құрылғыларының жұмысына теріс әсер ететін жоғарыда аталған факторлар өнімділігі қызмет көрсетудің мерзімді сипатымен және оларға тұрақты технологиялық бақылаудың болмауымен күрделене түседі. Бұл мұндай құрылғыларда қажетті жабдықтары бар зертханалардың да, жеткілікті білікті қызметкерлердің де болмауына байланысты.

Қазіргі уақытта шаруашылық-тұрмыстық сарқынды суларды тазартуға арналған модульдік құрылыстар арасында аэротенк негізіндегі қондырғылар кеңінен таралды, бұл биофильтрлермен салыстырғанда құрылыс өлшемдерінің аздығына, сондай-ақ бір сыйымдылықты құрылыста денитрификациямен бірге жүргізілетін аммоний азотын неғұрлым терең нитрификациялауды жүзеге асыру мүмкіндігіне байланысты. Сонымен қатар, олар мембраналық биореакторлармен

CC BY NC

жабдықталған құрылымдар. Жоғары бағаға қарамастан, мұндай жабдықтың ұсыныстарының саны жыл сайын артып келеді. Осы ретте дискілі биофильтрлері бар құрылғыларды да атап өткен жөн. Ағынды суларды тазартуға арналған толық қондырғыларға тән құрылымдардың осы түрлерін, олардың артықшылықтары мен тән құрылымдық кемшіліктерін ретімен қарастырамыз.

Дискілі биофильтрлер — бұл биофильтрдің де, аэротенктің де белгілері бар ағынды суларды биологиялық тазарту қондырғылары. Биофильтрлермен олар иммобилизациясы жүретін байланыс бетінің болуымен және мәжбүрлі аэрацияның болмауымен байланысты. Аэротенктерге ұқсастық еркін жүзетін биопленка бөлшектері бар ағынды сумен толтырылған резервуардың болуына байланысты. Ағынды сулар әдетте гофрленген беті бар дискілері бар айналмалы ротор түсірілген резервуарға түседі, осылайша дискілердің жоғарғы бөлігі судың үстінде болады, ал дискілердің төменгі бөлігі ағынды сұйықтыққа батырылады. Биофильтрлеу дискілердің бетінде жүреді. Биофильтрация су бетінен жоғары болған кезде, дискілердің айналу процесінде ауадағы оттегінің сіңуі және биосүзгілеуде сорылған ластаушы заттардың тотығуы жүреді, ал оны ағынды суға батырған кезде еріген және коллоидты органикалық заттардың сорбция процесі жүреді. Роторды дискілермен айналдыру кезінде ағынды суды аэрациялау процесі де жүзеге асырылады. Биофильтрлеу дискілерінің бетінде артқан сайын оның бір бөлігі үзіліп, ағынды сұйықтыққа өтеді, онда ол белсенді лайдың үлпектері сияқты өлшенеді, осылайша ағынды суларды тазарту процесі тек дискілердің ағынды сулармен жанасу бетінде ғана емес, сонымен қатар дискілердің астында резервуардағы ағынды сұйықтықтың көлемінде де жүзеге асырылады. Дискілерде пайда болатын биофильтрлеу қалыңдығы кіретін ағынды сулардың құрамы мен температурасы, ротордың айналу жылдамдығы, биодиск бетінің ауданы сияқты факторларға байланысты және «юск миллиметріне» жетуі мүмкін. Оларды қолдану процесінде бұл құрылымдарға бекітілген биомассаны тиеу — тасымалдаушымен жабдықталған аэротенктерді пайдалану кезінде туындайтын проблемаларға ұқсас проблемалар тән. Сонымен, бастапқы тұндыру болмаған кезде дискілерде биомассаның ыдырауы пайда болады, ал дискаралық кеңістік шірік иісі бар шырышты массамен тұншығуы мүмкін. Нәтижесінде диск биотасымалдаушылардың гидравликалық жұмыс схемасы бұзылады, өйткені дискілердің беткі қабатында пленка болмайды. Бұл қондырғылардың кейбір модификацияларында. төмен өнімділігімен ерекшеленеді (тәулігіне 5 $м^3$ аспайды), бастапқы тұндырғыш та, шөгінді тығыздағыш та жоқ. Екінші тұндырғышта тұндырылған биофильтрлеу кезінде эрлифтпен дискілі тасымалдағыштары бар резервуарға айдалады, ол бұл жағдайда бастапқы тұндырғыш пен тұнба тығыздағыштың рөлін атқарады. Бұл схема құрылымдардың қанағаттанарлықсыз жұмысына әкеледі. Мұндай құрылымдардың модификациясы тиімсіз болып табылады. Олар септиктен, биодисктерден, қайталама тұндырғыштан тиеумен алдын ала тазалау блогынан, дезинфекциялау торабынан және илеу тығыздағыштан тұратын қондырғылар (Халтурина, 2014).

Дискілі биосүзгілері бар ағынды суларды тазартатын қондырғылардың

кейбір өндірушілері биологиялық азотты кетіру мүмкіндігін көрсету үшін оларды денитрификатор бөліктерімен жабдықтайды. Алайда, денитрификация процесінің қарқындылығы тыныс алу көзі ретінде азот оксидтерін пайдаланатын микроорганизмдердің санына, демек, құрылыс көлеміндегі биомасса концентрациясына (тұнба дозасы) тікелей байланысты. Бұл компоненттегі дискілі биофильтрлер пневматикалық аэрациясы бар құрылымдардан (аэротенктерден) біржақты төмен, нәтижесінде олар негізінен оттегінің биологиялық тұтынуы (ОБТ) мәнінің төмендеуін ғана қамтамасыз етеді (Группа компаний Enviro Chemie. Технологии для очистки воды).

Эвтрофикация процестері су объектілеріне үлкен қауіп төндіреді. Эврофикация - биогендік элементтердің су объектісіне артық түсуінің нәтижесі. Қазіргі уақытта ағынды суларды тазартудың барлық қолданыстағы құрылымдары тазартылған суда азот пен фосфордың қажетті мөлшерін қамтамасыз етпейді. Бұл мәселені шешудің негізі - азот пен фосфорды кетірудің технологиялық параметрлерін сақтай отырып, тазарту қондырғысын дұрыс пайдалану (Авдеенков, 2019).

Нитрификация және денитрификация — судың сапасы мен қоршаған ортаны, адам денсаулығын қамтамасыз ету үшін зиянды азот қосылыстарын бірлесіп жоятын ағынды суларды тазартудың маңызды биологиялық процестері. Механикалық тазарту кезінде барабанды сүзгіден кейбір заттар өтіп кетеді де сорғыштардың жұмысын қиындатады және шіріп кетуіне байланысты ұзақ қолданысқа жарамайды (1,2 сурет)

Сурет 1 - Барабан елегі

CC BY NC

Сурет 2 - Дозалау сорғысы

Су жолдарындағы қоректік заттардың проблемалары жақын болашақта сақталуы мүмкін. Барлық қоректік заттардың төгінділерін қазір тоқтатуға болатын болса да, су шөгінділеріндегі қоректік заттардың үлкен қоры жоғарғы сулардағы қоректік заттардың деңгейін сақтауға кепілдік береді. Уақыт өте келе шөгінділердегі қоректік заттардың мөлшері денитрификация, дисперсия және жаңа шөгінділермен жабу сияқты процестерге байланысты төмендейді деп күтілуде. Су аймақтарындағы қоректік заттардың жоғары деңгейі және басқа да қоршаған орта жағдайлары балдырлар мен басқа да су өсімдіктерінің қарқынды өсуіне мүмкіндік береді.

Ал мембраналық биореакторлардың (МБР) негізгі артықшылықтары:

– құрылыстарда тұнбаның жоғары дозасын ұстап тұру мүмкіндігінің есебінен сыйымды құрылыстар көлемін және тиісінше оларға тартылатын алаңды азайту;

– қажетті тазалау сатыларының санын азайту, бұл электр жабдықтарының бірліктерін, соңғы сметадағы ішкі құбырлар санын азайтуға әкеледі;

– тазартылған су мен тұнба қоспасын мембраналарға бөлу биореактордан тұнбаны шығарудан қорғауды және суды бір уақытта дезинфекциялауды қамтамасыз етеді. Бірақ мембраналық биореакторлардың біздің елде әлі де кең таралмауының себептерін атап өтуге болмайды. Біріншіден. бұл осы жабдықтың жоғары бағасы, "классикалық" тазарту қондырғыларының құнынан едәуір жоғары. Екіншіден, МБР қондырғыларының ең қымбат компоненті -мембраналардың өздері - шамамен 5-7 жыл қызмет етеді. Үшіншіден, ұсақ механикалық тазартуға арналған жабдықтардың істен шығуы немесе майлардың немесе мұнай өнімдерінің төгілуі сияқты төтенше жағдайлардың туындауы мембраналардың істен шығуына әкеледі және бұл жағдайда қаржылық салдарларды "классикалық" технология бойынша жұмыс істейтін құрылыстармен салыстыруға болмайды (Abegglen et al., 2008) сәйкес, МБР технологиясы бойынша ағынды суларды ШРК деңгейіне дейін тазарту құны Snds=(2+3)ШРК қол жеткізуге болатын дәстүрлі тазарту қондырғыларымен салыстырғанда 2-3 есе артады.

Қорытынды. Сонымен, тазартылған ағынды суларды қайта пайдалану мүмкіндігі болған жағдайда, жұмыс істейтін құрылымдар туралы қорытынды жасауға болады. МБР технологиялары дәстүрлі схемалардан біржақты

артықшылыққа ие. МБР және МББР - ағынды суларды тазартудың екі түрлі технологиясы. МБР биологиялық тазартуды мембраналық сүзумен біріктіреді, ал пластикалық тасымалдағыштарда биопленка өсіруді жүзеге асырады. МБР тазартылған суды бөлшектерден бөлу үшін мембраналарды, ал МББР ағынды суларды тазарту үшін тасымалдаушыларға бекітілген биопленканы пайдаланады.

ФБР бекітілген қабаты бар биопленка реакторы, оның жұмыс принципі МБР-ге ұқсас, айырмашылығы - биопленка қатты материалдың бекітілген блогына бекітіледі.

Қатты материал блогының астындағы аэрация биопленканың өсуіне қажетті оттегімен қамтамасыз етеді және пленка блогының тазалануын бақылайды.

ФБР ерекшеліктері:

1. Ол ағынды суларға бейімделе алады, кіретін су көлемі мен органикалық заттардың мөлшері үлкен шамада өзгереді.

2. МББР-ге қарағанда жұмыс істеу ыңғайлы және энергияны аз пайдаланады (төмендегі тікелей аэрация арқылы).

Аэротенктері бар жиынтық тазарту құрылыстары нитрификация, денитрификация және тұнба қоспасын бөлу процестері бір көлемде тізбектей жүргенде ағымды (аэротенк — екінші тұндырғыш қағидаты бойынша) және кезеңдік әсер ететін (SBR-реакторлар) болуы мүмкін. Мерзімді реакторлар конструктивті түрде қарапайым, бірақ аэротенктермен салыстырғанда күрделі автоматика жүйесін қажет етеді. Сонымен қатар, мұндай қондырғылардың жұмыс істеуі үшін параллель жұмыс істейтін екі реактор болуы керек, бұл сыйымдылық құрылымдарының едәуір үлкен көлеміне әкеледі. Мұндай құрылымдардың технологиялық схемасы әдетте механикалық, биологиялық тазарту, терең тазарту, дезинфекциялау және тұнбаны сусыздандыру кезеңдерін қамтиды.

Тазартылған ағынды сулардың текше метрінің ең төменгі құнын қамтамасыз ету үшін нұсқаларды техникалық-экономикалық салыстыру қажет, оның барысында жабдықтың тікелей құны да, оның жұмысының сенімділігі мен беріктігі, пайдалану шығындары, ластаушы заттардың нормадан тыс төгілуі үшін айыппұл төлемдері, штаттан тыс жағдайлардың туындау ықтималдығы және олардан кейін жүйенің жұмысын қалпына келтіру құны ескерілуі керек.

Республика экономикасының барлық салаларында суды үнемдеудің жаңа технологияларын, су шаруашылығында өнеркәсіптік үдеріс бойынша басқарудың автоматтандырылған жүйесін, су ресурстарын тиімді пайдалану мен қорғау тұрғысында мемлекеттік саясатты жаппай енгізу су ресурстарын сақтап қалуға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар бұл саланы бұдан ары қарай дамыту аясында суды жинау үшін қажетті көлемде қосымша тиісті нысандардың, су тапшылығы бар өңірлерге су ресурстарын үнемдеуге негізделген нысандардың құрылысын іске асыру, сондай-ақ Қазақстанның жерасты суларының әлеуетін зерттеу біздің қазіргі кездегі су ресурстарының әлеуетін пайдалану бойынша мүмкіндіктерімізді арттырады.

CC BY NC

Әдебиеттер

Abegglen C., Ospelt M., et al Siegrist H. (2008). Biological nutrient removal in a small-scale MBR treating household wastewater. Water Research. — V. 42 (1-2), — 338-346.

Lazarova V. (2008) Reliability of operation and failure management of membrane wastewater treatment, Water Practice & Technology. — 3(2). DOI:10.2166/wpt.2008.044

Marek Holba, Karel Plotěný, Lukáš Dvořák, Marcel Gómez (2012) Full-scale Applications of Membrane Filtration in Municipal Wastewater Treatment Plants, CLEAN. — Soil Air Water. — 40(5). DOI:10.1002/clen.201000398. https://www.researchgate.net/publication/264264471_Full-scale_Applications_of_Membrane_Filtration_in_Municipal_Wastewater_Treatment_Plants

Schmidt I., Sliekers O., Schmid M., Bock E., Fuerst J., Kuenen J.G.., Jetten M.S.M. and Strous M. (2003). New concepts of microbial treatment processes for the nitrogen removal in wastewater, FEMS Microbiol. Rev. — 27. — P. 481—492. https://academic.oup.com/femsre/article/27/4/481/593235

State of the World 2000. A Worldwatch Institute Report on Progress Toward a Sustainable Society. — W.W.Northon & Co. (2000). New York & London. — P. 262. https://www.demoscope.ru/weekly/023/biblio02.php

Авдеенков П.П. (2019) Эксплуатация очистных сооружений, реализующих процессы нитри-денитрификации / П. П. Авдеенков, Н. Е. Чистяков. — Текст: непосредственный, Молодой ученый. — № 24 (262). — С. 16-17. — URL: https://moluch.ru/archive/262/60524/

Алексеев М.И. Курганов А.М. (2000) Организация отведения поверхностного (дождевого и талого) стока с урбанизированных территорий, М-СПб. — С. 352. https://mega.nz/file/KMRDBZJY#45T4ehrSX_ixi4oX0MTN1PGpJZu-h5b4bBAMiC6oDZs

Берникова Т.А. (2011) Гидрология с основами метеорологии и климатологии [Текст]: учебник /Т.А. Бердникова. — М.: Изд-во "Моркнига". — 600 с. https://izd-mn.com/PDF/52MNNPU20.pdf

Вольф И.В. (2013) Химия окружающей среды. Химия гидросферы [Текст]: учебное пособие /И.В. Вольф, М.А. Синякова. — СПб.: Изд-во СПбГТУРП. — 90 с. https://nizrp.narod.ru/metod/kafoxrokrsr/1.pdf

Группа компаний Enviro Chemie. Технологии для очистки воды. [Электронный ресурс]. https://www.envirochemie.ru/ru/envirochemie-gmbh-rossdorf

Данилов-Данильян В.И. (2006) Потребление воды: экологические, экономические, социальные и политические аспекты / В.И. Данилов-Данильян, К.С. Лосев. — М.: Наука. — С. 218. https://www.prometeus.nsc.ru/contents/books/danilov.ssi

Михайлов В.Н. Гидрология/В.Н. Михайлов, А.Д. Добровольский (2008). — М.: Высшая школа. — 463 с.

Мишуков Б.Г., Адельшин А.Б., Селюгин А.С., Соловьева Е.А., Адельшин А.А. (2006) Опытно-промышленная линия для биологической очистки сточных вод с денитрификацией и дефосфатированием, Известия КГАСУ. — №2(6) https://izvestija.kgasu.ru/files/2_2006/Mishukov_94_96.pdf

Морозова К.М. (2009) Принципы расчета систем биологической очистки сточных вод, Водоснабжение и сан. техника. — № 1. — С.26-31. https://vodanews.info/wp-content/uploads/2019/02/NDT_1_37.pdf?ysclid=lb7kyhozl4520769550

Никаноров А.М. (2001) Гидрохимия [Текст]: учебник/А.М. Никаноров. — 2-ое изд., перераб. и доп. — СПб: Гидрометеоиздат. —С. 444. https://mgmtmo.ru/edumat/hydrochem/Nikanorov_Hydrochemistry_2.pdf

Рассказов А.А. (2011) Учение о гидросфере [Текст]: учебно-методическое пособие / А.А. Рассказов, Е.Ю. Васильева, Е.С. Горбатов. — М.: Изд-во РУДН. — С. 76. https://edu.tusur.ru/publications/2227

Свитцов А.А. (2007) Введение в мембранные технологии. — М. ДеЛи Принт. — С. 280. http://www.membranemsk.ru/ychposob.html

Терещук М.Н. (2010). Особенности проектирования сооружений биологической очистки в условиях высоких и низких температур, «Вода и экология». — №1. http://wemag.ru/arhiv/2011

Халтурина Т.И. (2014). Очистка сточных вод промышленных предприятий: учебно-методическое пособие [для студентов профиля подготовки 270800.68.00.06 «Водоснабжение и водоотведение»] /

Сиб. федер. ун-т, Инж.-строит. ин-т. — Красноярск: СФУ [Электронный ресурс]. https://www.c-z-s.ru/doc/water-treatment/study/halturina-t.i.-ochistka-stochnyih-vodpromyishlennyih-predp.pdf

Хенце М., Армоэс П., Ля-Кур-Янсен Й., Арван Э. (2004) Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы. — М.: Мир. — С. 113-132. http://inzproekt.ru/ochistka_stochnyh_vod_ot_asota.html

References

Abegglen C., Ospelt M., et al Siegrist H. (2008) [Biological nutrient removal in a small-scale MBR treating household wastewater], Water Research, — V. 42 (1-2). — P. 338-346. (in English)

Alekseev M.I., Kurganov, A.M. (2000) Organizatsiya otvedeniya poverkhnostnogo (dozhdevogo i talogo) stoka s urbanizirovannykh territoriy [Organization of Surface (Rainfall and Melting) Runoff Disposal from Urbanized Areas], Moscow-St.Petersburg, — P. 352. https://mega.nz/file/KMRDBZJY#45T4ehrSX_ixi4oX0MTN1PGpJZu-h5b4bBAMiC6oDZs (in Russian)

Avdeenkov P. P. (2019) Ekspluatatsiya ochistnykh sooruzheniy, realizuyushchikh protsessy nitri-denitrifikatsii [Operation of Treatment Facilities Implementing Nitrite-Denitrification Processes] / P. P. Avdeenkov, N. E. Chistyakov. — Text: direct, Young Scientist. — No. 24 (262). — P. 16-17. — URL: https://moluch.ru/archive/262/60524/ (in Russian)

Bernikova T.A. (2011) Gidrologiya s osnovami meteorologii i klimatologii [Hydrology with the basics of meteorology and climatology] [Text]: textbook /T.A. Berdnikova. — M.: Publishing house "Morkniga". — P. 600. https://izd-mn.com/PDF/52MNNPU20.pdf (in Russian)

Danilov-Danilyan, V.I. (2006) Potreblenie vody: ekologicheskie, ekonomicheskie, sotsial'nye i politicheskie aspekty [Water Consumption: Environmental, Economic, Social, and Political Aspects] / V.I. Danilov-Danilyan, K.S. Losev. — Moscow: Nauka. — P. 218. https://www.prometeus.nsc.ru/contents/books/danilov.ssi (in Russian)

Enviro Chemie Group of Companies. Tekhnologii dlya ochistki vody [Technologies for Water Treatment].[Electronic resource]. https://www.envirochemie.ru/en/envirochemie-gmbh-rossdorf (in English)

Henze M. Armoes P., La-Cour-Jansen Y., Arvan E. (2004) Ochistka stochnykh vod. Biologicheskiye i khimicheskiye protsessy [Wastewater Treatment. Biological and Chemical Processes]. — M.: Mir. — P. 113-132. http://inzproekt.ru/ochistka_stochnyh_vod_ot_asota.html (in English)

Khalturina T.I. (2014) Ochistka stochnykh vod promyshlennykh predpriyatiy [Wastewater treatment of industrial enterprises: an educational and methodical manual [for students of the training profile 270800.68.00.06 "Water supply and sanitation"]. Sib. feder. un-t, Eng.-builds. in-T. — Krasnoyarsk: SFU [Electronic resource]. https://www.c-z-s.ru/doc/water-treatment/study/halturina-t.i.-ochistka-stochnyih-vodpromyishlennyih-predp.pdf (in Russian)

Lazarova V. (2008) [Reliability of operation and failure management of membrane wastewater treatment, Water Practice & Technology]. — 3(2). DOI:10.2166/wpt.2008.044 (in Russian)

Marek Holba, Karel Plotěný, Lukáš Dvořák, Marcel Gómez (2012) [Full-scale Applications of Membrane Filtration in Municipal Wastewater Treatment Plants]. CLEAN - Soil Air Water. — 40(5). DOI:10.1002/clen.201000398. https://www.researchgate.net/publication/264264471_Fullscale_Applications_of_Membrane_Filtration_in_Municipal_Wastewater_Treatment_Plants (in English)

Mikhailov V.N. Hydrology V.N. Mikhailov A.D. Dobrovolsky (2008) — Moscow: Vysshaya Shkola, — 463 p. (in Russian)

Mishukov B.G., Adelshin A.B., Selyugin A.S., Solovyova E.A., Adelshin A.A. (2006) Opytno-proizvolstvennaya liniya dlya biologicheskoy ochistki stochnih vod s denitrifikatsiey i defosfatirovaniem [Experimental and Industrial Line for Biological Wastewater Treatment with Denitrification and Dephosphorylation]], Izvestiya KGAZU. — No. 2(6) https://izvestija.kgasu.ru/files/2_2006/Mishukov_94_96.pdf (in Russian)

Morozova K.M. (2009) Printsipy rascheta sistem biologicheskoy ochistki stochnih vod, Vodosnabzheniye i san. tekhnika [Principles of Calculation of Biological Wastewater Treatment Systems], Water Supply and Sanitary Engineering. — No. 1. — P. 26-31. https://vodanews.info/wpcontent/uploads/2019/02/NDT_1_37.pdf?ysclid=lb7kyhozl4520769550 (in Russian)

Nikanorov, A.M. (2001) Gidrokhimiya [Hydrochemistry] [Text]: Textbook. A.M. Nikanorov. — 2nd ed., revised and expanded. — St.Petersburg: Gidrometeoizdat. — P. 444. https://mgmtmo.ru/edumat/hydrochem/Nikanorov_Hydrochemistry_2.pdf (in Russian)

Rasskazov A.A. (2011) Ucheniye o gidrosfere [The Doctrine of the Hydrosphere] [Text]: Educational and Methodological Guide. A.A. Rasskazov E.Yu. Vasilyeva and E.S. Gorbatov. — Moscow: RUDN University Press. — P. 76. https://edu.tusur.ru/publications/2227 (in Russian)

Schmidt I., Sliekers O., Schmid M., Bock E., Fuerst J., Kuenen J.G.., Jetten M.S.M. and Strous M. (2003) [New concepts of microbial treatment processes for the nitrogen removal in wastewater]. FEMS Microbiol. Rev. — 27. — P. 481—492. https://academic.oup.com/femsre/article/27/4/481/593235 (in English)

Svittsov A.A. (2007) Vvedeniye v membrannyye tekhnologii [Introduction to Membrane Technologies]. — M. DeLi Print. — P. 280. http://www.membranemsk.ru/ychposob.html (in Russian)

Tereshchuk M.N. (2010) [Features of Designing Biological Treatment Facilities in High and Low Temperature Conditions]. "Water and Ecology". — No. 1. http://wemag.ru/arhiv/2011 (in Russian)

Wolf I.V. (2013) Khimiya okruzhayushchey sredy. Khimiya gidrosfery [Chemistry of the environment. Chemistry of the Hydrosphere] [Text]: Textbook / I.V. Wolf, M.A. Sinyakova. — St.Petersburg: SPbGTUPR, — P. 90. https://nizrp.narod.ru/metod/kafoxrokrsr/1.pdf (in Russian)

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 256–273

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.398

УДК 665.654.2, 669.235, 661.666.1

©A. Nurlan[1], S.R. Konuspayev[2], T.S. Abildin[3], K. Toshtay[3], 2025.
[1]D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan;
[2]A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences, Almaty, Kazakhstan;
[3]Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: nurlanannas@gmail.com

TRANSFORMATIONS OF HYDROCARBONS DURING THE HYDROGENATION OF GASOLINE CONTAINING BENZENE

Nurlan Annas — PhD student at KazNU, D.V.Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: nurlanannas@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0294-7198;
Konuspayev Saparkaly — Doctor of Chemical Sciences, Professor, A.B.Bekturov Institute of Chemical Sciences, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: srkonuspayev@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7962-6107;
Tleutay Abildin — Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, Kazakh National University named after Al-FarabiAlmaty, Kazakhstan,
E-mail: Abildin54@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2710-7233;
Toshtay Kainaubek — PhD, Associate Professor, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: Kainaubek.toshtay@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1182-7460.

Abstract. The history of aromatic compound hydrogenation spans several centuries, emphasizing the continuous scientific and industrial interest in this reaction. Its attractiveness lies in the ongoing search for highly active and selective hydrogenation catalysts. In addition to its theoretical significance — where the π-complex of an aromatic ring can adsorb onto the catalyst surface in different configurations depending on the nature of the substituent groups — the reaction serves as the foundation for numerous industrial processes. For instance, in the synthesis of lubricating oils, aromatic rings are hydrogenated and transformed into naphthenes; in many organic syntheses, hydrogenation constitutes one of the key intermediate stages; and in hydrogen energy systems, this process can act as a potential hydrogen storage mechanism. Currently, aromatic hydrogenation can be considered a key component in the production of environmentally friendly motor gasoline. Incomplete combustion of gasoline containing benzene leads to the formation of benzopyrene, one of the strongest carcinogens found in exhaust gases. According to Euro standards, the benzene content in gasoline should not exceed 1%, while achieving the more stringent requirement of 0.1% remains

technologically unfeasible. The development of new, highly active, and selective catalysts capable of complete benzene hydrogenation in the presence of other aromatic compounds could provide an effective solution to this problem.

Key Words: hydrogenation, rhodium, Sibunite, aluminum oxide, BAC, benzene, hydrogen

©Ә. Нұрлан[1], С.Р. Конуспаев[2], Т.С. Абильдин[3], Қ. Тоштай[3], 2025.
[1]«Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ, Алматы, Қазақстан;
[2]«Ә.Б. Бектуров атындағы Химия ғылымдары Институты» АҚ, Алматы, Қазақстан;
[3] Әл-фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан.
E-mail: nurlanannas@gmail.com

ҚҰРАМЫНДА БЕНЗОЛ БАР БЕНЗИНДІ ГИДРЛЕУ КЕЗІНДЕ КӨМІРСУТЕКТЕРДІҢ ӨЗГЕРУІ

Нұрлан Әннәс — Докторант, Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты, Алматы, Қазақстан,
E-mail: nurlanannas@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0294-7198;
Конуспаев Сапаркали — х.ғ.д., профессор, Ә.Б. Бектуров атындағы Химия ғылымдары институты, Алматы, Қазақстан,
E-mail: srkonuspayev@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7962-6107;
Әбілдин Тілеутай — х.ғ.д., қауымдастырылған, профессор, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Қазақстан,
E-mail: Abildin54@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2710-7233;
Тоштай Қайнаубек — Доцент, PhD, Әл-фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан,
E-mail: Kainaubek.toshtay@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1182-7460.

Аннотация. Ароматты қосылыстарды гидрлену тарихы бірнеше ғасырларға созылады, бұл реакцияның тартымдылығы соншалық, зерттеушілер гидрлеу үшін активті және селективті катализаторларды іздеуді әлі де жалғастыруда. Теориялық тұрғыдан алғанда, ароматты сақинаның π-комплексі катализатор бетінде сақинадағы радикалдың табиғатына байланысты әртүрлі түрде адсорбциялана алады. Сонымен қатар, бұл реакция көптеген өндірістік процестердің негізінде жатыр: мысалы, майлау майларын синтездеу кезінде ароматты сақиналар сутекпен қанығып, нафтендерге айналады; көптеген органикалық синтездерде ол аралық сатылардың бірі болып табылады; ал сутектік энергетикада сутекті сақтау резервуары ретінде қызмет ете алады. Қазіргі уақытта бұл реакция экологиялық таза бензин өндірудің негізгі компоненттерінің бірі бола алады. Себебі , құрамында бензол бар бензиннің толық емес жануы нәтижесінде ең күшті канцерогендердің бірі — бензопирен түзіледі. Еуро стандарттарына сәйкес бензинде бензол мөлшері 1 %-дан аспауы тиіс, алайда бұл көрсеткішті 0,1 %-ға дейін төмендету үшін қазіргі уақытта тиімді технологиялық шешім жоқ. Сондықтан бензолды басқа

ароматты қосылыстардың қатысуында толық конверсиямен гидрлеуге қабілетті жаңа активті және селективті катализаторларды әзірлеу мәселені шешудің тиімді жолы бола алады.

Түйін сөздер: гидрлеу, родий, сибунит, алюминий оксиді, БАУ, бензол, сутегі

©А. Нурлан[1], С.Р. Конуспаев[2], Т.С. Абильдин[3], К. Тоштай[3], 2025.
[1]АО «Институт Топлива, катализа и электрохимии им Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан;
[2]АО «Институт химических наук им. А.Б. Бектурова», Алматы, Казахстан;
[3]Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан.
E-mail: nurlanannas@gmail.com

ПРЕВРАЩЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ ГИДРИРОВАНИИ БЕНЗИНА, СОДЕРЖАЩЕГО БЕНЗОЛ

Нурлан Аннас — Докторант, АО «Институт Топлива, катализа и электрохимии им Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,
E-mail: nurlanannas@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0294-7198;
Конуспаев Сапаркали — Доктор химических наук, профессор, АО «Институт химических наук им. А.Б. Бектурова», Алматы, Казахстан,
E-mail: srkonuspayev@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7962-6107;
Абильдин Тлеутай — Доктор химических наук, ассоциированный профессор, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,
E-mail: Abildin54@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2710-7233;
Тоштай Кайнаубек — Доцент, PhD, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан,
E-mail: Kainaubek.toshtay@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1182-7460.

Аннотация. Гидрирование ароматических соединений имеет давнюю историю и остаётся одной из центральных реакций каталитической химии благодаря своей высокой теоретической и практической значимости. Интерес исследователей к этой реакции сохраняется в связи с необходимостью разработки более активных и селективных катализаторов, способных эффективно гидрировать ароматические кольца даже в сложных многокомпонентных углеводородных системах. С теоретической точки зрения важным является разнообразие способов адсорбции π-комплексов ароматических колец на поверхности катализатора, что определяется природой заместителей и структурой ароматического соединения. С практической стороны реакция гидрирования лежит в основе широкого ряда промышленных процессов: в производстве смазочных масел ароматические соединения насыщаются водородом с образованием нафтенов; в органическом синтезе гидрирование является ключевой стадией многих последовательных процессов; в водородной энергетике реакция рассматривается как перспективный механизм аккумулирования водорода; в нефтепереработке гидрирование ароматических углеводородов — важный этап получения экологически чистого бензина. Особое значение гидрирование приобретает при снижении содержания

CC BY NC

бензола в бензине. Неполное сгорание бензина, содержащего ароматические углеводороды, приводит к образованию высокотоксичного канцерогена — бензопирена. Согласно требованиям стандартов Евро, содержание бензола в бензине не должно превышать 1 %, однако для достижения более жёсткой нормы — 0,1 % — отсутствуют эффективные промышленные решения. Поэтому разработка высокоактивных и селективных катализаторов гидрирования бензола, обеспечивающих полную конверсию в условиях присутствия других ароматических углеводородов, представляет собой актуальную и важную научно-практическую задачу. Решение данной проблемы позволит повысить экологическую безопасность автомобильных топлив и усилить соответствие международным стандартам качества.

Ключевые слова: гидрирование, родий, Сибунит, окись алюминия, БАУ, бензол, водород

Введение. Наиболее активными катализаторами гидрирования ароматических соединений является металлы платиновой группы (Haiting et al, 2024; Alimohammadi et al,2019; Xiaojing et al, 2022; Hongli et al, 2015; Glotov et al, 2018; Zhihao et al, 2019; Fang et al, 2021; Akbayrak, 2018; Konuspaev et al, 2009), а также другие d-металлы, как никель, кобальт и медь. Авторы (Haiting et al, 2024) приводят сведения о гидрировании бензола и циклогексена на платине и палладии, а также на биметаллических катализаторах Pt — Re, с определением кинетических параметров. Они сравнивали величины эффективных констант скоростей на изученных катализаторах, изучили влияние добавок сероводорода и меркаптанов на кинетические параметры и обсудили возможный механизм прохождения реакции, а также характер влияния добавок рения к платине. В работе (Shirokopoyas et al, 2024) изучено гидрирование 2-метилнафталина в гептане в присутствии добавок 400 ppm по сере дибензотиофена на нанесенных Pt — Pd катализаторах, содержащих мезопористые алюмосиликаты Al–SBA-15. Состав носителя 65 % γ-Al_2O_3 и 35 % Al–SBA-15, а содержание Pt и Pd 0,25 и 1,0 масс. %, соответственно. Опыты проводили в автоклаве при 240 — 260°C и давлении 30 атм, конверсия 2-метилнафталина при 260°C через 3 часа составила 85 % при селективности по метилтетралину 97 %. Авторы (Alimohammadi et al, 2019) приводят сведения о гидрировании бензола в смеси н-гептаном на цеолите 13X, модифицированном палладием, т.е. катализатор Pd/13X, так при температуре 200°C, давлении 1 Мпа и скорости подачи реакционной смеси 20 ч$^{-1}$ и молярном соотношении H_2/HC = 1,3 конверсия бензола составила 95 %. В обзоре (Xiaojing et al, 2022) проанализировано создание катализаторов селективного гидрирования на основе палладия, в том числе при гидрировании ароматических соединений.

Особое место при гидрировании бензола занимают катализаторы на основе рутения, где возможно превращение бензола в циклогексен (Hongli et al, 2015; Glotov et al, 2018; Zhihao et al, 2019; Fang Hao et al, 2021). Авторы (Hongli et al, 2015, Glotov et al, 2018) о гидрировании бензола в циклогексан мягких условиях. В работе [(Hongli et al, 2015) приводятся сведения Ru—Pt/MIL-10, где MIL-10

цеолит, на который Ru—Pt нанесены методом коллоидального осаждения, где конверсия бензола в мягких условиях до 99 %, создана кинетическая модель и обсуждается механизм действия катализатора. Авторы (Zhihao et al. 2019; Fang et al, 2021) приводят данные о селективном превращении бензола в циклогексен, если в работе (Zhihao et al, 2019) обобщены теоретические и экспериментальные подходы, направленные на повышение выхода циклогексена на рутениевых катализаторах с упором на термодинамические и кинетические основы, то в работе (Fang et al, 2021) при нанесении рутения на TS (TiO_2: SiO_2 = 7:1) при гидрировании бензола получено 38,2 % циклогексена, и авторы (Fang et al, 2021) обсуждают получение такого хорошего результата в взаимодействием TiO_2 и SiO_2, а также их коллективным воздействием на рутений. В работе (Fang et al, 2021) проводится сравнение рутениевых катализаторов на различных носителях и предложены катализаторы синтеза 4-карбометоксиформилциклогексана из гидрированием соответствующего ароматического соединения.

Самыми активными катализаторами гидрирования ароматического кольца являются родиевые катализаторы (Akbayrak, 2018; Konuspaev et al, 2010; Konuspaev et al, 2011; Nurlan et al, 2023). В работе (Fang et al, 2021) представлены результаты гидрирования бензола на Rh NPs/CeO_2 без растворителя в проточной системе придавлении водорода 3 бар и температуре 25°C и скорости подачи 495 ч$^{-1}$, где катализатор показывает более высокую активность по сравнению с родием, нанесенным на TiO_2, ZrO_2 и HfO_2. Авторы (Konuspaev et al, 2011) провели систематические исследования по гидрированию бензола и других ароматических соединений с целью создания катализаторов селективного гидрирования бензола. В работе (Konuspaev et al, 2010) родий наносили на угольные носители с развитой поверхностью более 500 м^2/г, как сибунит, КАУ (косточковый активированный уголь) и БАУ (березовый активированный уголь), методом РФЭС было показано, что селективного гидрирования бензола в присутствии других ароматических соединений необходимо катализатор после восстановления модифицировать кислыми добавками, чтобы на поверхности возникали кластеры с $Rh^{\delta+}$. Авторами (Konuspaev et al, 2010; Konuspaev et al, 2011) проведены работы по исследованию влияния на кинетику и механизм гидрирования ароматических соединений, как содержание родия на катализаторе, температуры, давления водорода и природы растворителя, а также в (Konuspaev S.R et al, 2011) показано, что введение в систему п-моллибдата аммония в виде модифицирующей добавки может повысить селективность гидрирования бензола в присутствии других ароматических соединений. Селективность гидрирования бензола можно увеличить если использовать протонные растворители в кислой среде (Konuspaev et al, 2009).

В следующем цикле работ представлены никелевые катализаторы для гидрирования ароматических соединений (Peyrovi et al, 2018). В обзоре (Rong et al, 2023) проанализировано использование никелевых катализаторов для гидрирования ароматических соединений, где обсуждается влияние природы носителей, количества металлической фазы, а также воздействие различных на катализаторы. Авторы (Peyrovi et al, 2018) никель наносили на SiO_2, SiO_2 — Al_2O_3

CC BY NC

и Al_2O_3, затем в проточном режиме гидриривали бензол из риформинг бензина при атмосферном давлении и интервале температур 398 — 473°K при различных соотношениях H_2/бензол и скоростях подачи реакционной смеси, наибольшая степень конверсии бензола достигнута на Ni/SiO_2 при 423°K. В работе (Peyrovi et al, 2018) гидриривали бензол в модельной смеси с толуолом на различных никелевых катализаторах: Ni/HMS, Ni/HZSM-5, Ni/HZSM5-HMS, Ni/Al_2O_3 и Ni/SiO_2. Наибольшая конверсия бензола 99,19 % отмечена на Ni/Al_2O_3 при 130°C, обсуждаются различных технологических факторов на процесс.

Цикл работ (Kumar et al, 2023; Vaśquez-Ceśpedes et al, 2018; Bayram et al, 2011; Gu et al, 2015; Johnson et al, 2025) посвящен использованию в качестве катализаторов различных комплексных соединений, так авторы (Kumar et al, 2023) для гидрирования ароматического кольца использовали стабильный на воздухе родиевый комплекс с пинцерным бис(оксазолил) фенильным лигандом. В работе (Bayram et al, 2011) для гидрирования бензола использовали комплекс $[RhCp^*Cl_2]_2$, где $Cp^* = [\eta_5\text{-}C_5(CH_3)_5]$, авторы (Vaśquez-Ceśpedes et al, 2018) использовали комплекс Rh(V) для активации связи C—H. Авторы показали, что органо-циркониевые комплексы, посаженные на оксиды циркония, алюминия и другие кислые носители в мягких условиях 25°C и атмосферное давление превращают бензол в циклогексан. В работе (Johnson et al, 2025) представлены результаты по гидрированию бензола на комплексах переходных металлов, имеющих органические лиганды.

Краткий анализ сведений по гидрированию ароматических соединений, в частности селективное гидрирование бензола, показывает, что интерес исследователей к этой реакции не ослабевает, а наоборот растет, вовлекая новых групп катализаторов, как комплексы переходных металлов.

Данная работа является логическим продолжением сведений, опубликованных в работах (Nurlan et al, 2023) и направлена на углубление знаний по созданию катализаторов селективного гидрирования бензола.

Методика гидрирования. Гидрирование проводили в специальном термостатированном автоклаве, снабженной турбинной мешалкой, исключающей внешне-диффузионные торможение с возможностью отбирать пробы в ходе реакции. Для измерения объема поглощённого водорода использовали устройство, позволяющее поддерживать постоянное давление в ходе реакции. Через специальное устройство автоклава вначале засыпали навеску катализатора, затем вносили растворитель и гидрируемое соединение. После герметизации, автоклав трижды продували водородом, затем включали обогрев автоклава и набирали нужное давление водорода. После 30 минутного отстоя при нужной температуре, включали мешалку автоклава и проводили замер объема поглощённого водорода. После реакции давали время остыть автоклаву до комнатной температуры, выгружали продукты реакции через пробоотборник, промывали автоклав растворителем. Результаты эксперимента оформляли в виде графика зависимости скорости от общего количества поглащенного водорода. Опыты с гидрированием бензинов проводили без растворителей. Продукты реакции анализировали методом ГЖХ.

Катализаторы готовили методом пропитки по влагоемкости носителя. Для определения влагоемкости носителя брали фиксированный объем предварительного прокаленного при 300—350°С носителя и прикапывали воду из бюретки с постоянным перемешиванием до образования пасты. Фиксировали объем жидкости к объему носителя. Затем брали необходимую массу носителя для приготовления катализатора и определяли его объем. Брали фиксированный объем воды, соответствующий влагоемкости носителя, и в нем растворяли соль $RhCl_3 \cdot 3H_2O$. Заливали носитель эти объем раствора, тщательно перемешивали до образования пасты и оставляли на ночь в герметичном режиме. Катализатор сушили при постоянном перемешивании до образования порошка. За тем катализатор прокаливали при 200°С 4 часа и восстанавливали в токе водорода при 300°С в течение 4 часов. Катализатор после остывания в токе водорода до комнатной температуры пересыпали в бюксы и хранили в эксикаторе над прокаленным силикагелем.

Материалы для исследований были следующие. Носители: сибунит — специальный угольный носитель, разработанный в Институте катализа им. Г.К.Борескова СО РАН, имеет развитую поверхность до 500 м^2/г и механическую прочность; БАУ — березовый активированный уголь до 500 м^2/г промышленного производства; γ-Al_2O_3 с удельной поверхностью до 100 м^2/г. Соль $RhCl_3 \cdot 3H_2O$ запаянная в ампуле. Автомобильный бензин марки АИ 92, реализуемый в Алматы, был предварительно перегнан при атмосферном давлении и к нему добавлен бензол марки «ч».

Анализы продуктов реакции и исходных соединений проводили на хроматографе «Хроматэк—Кристалл 5000.2» с пламенно-ионизационный детектор (FID), снабженной капиллярной колонкой HP-5 (5 % фенил-метилполисилоксан, 100 м × 0,25 мм × 0,25 мкм), программируемый нагрев термостата: 40 °С (2 мин) → 10 °С/мин → 250 °С (5 мин), газ носитель гелий. Хроматограф снабжен библиотекой, позволяющей идентифицировать состав углеводородов и проводить автоматические расчеты составы анализируемых проб.

Эксперименты РФЭС были выполнены на фотоэлектронном спектрометре фирмы SPECS с использованием излучения AlK_α ($h\upsilon$= 1486.6 эВ, 150 Вт). Шкала энергий связи (Ecв) была предварительно откалибрована по положению пиков остовных уровней золота и меди Au4f7/2 (84.0 эВ) и Cu2p3/2 (932.67 эВ). Образцы наносились на двухсторонний проводящий медный скотч. Эффект подзарядки, возникающий в процессе фотоэмиссии электронов, учитывался с помощью метода внутреннего стандарта, в качестве которого использовалась Al2p линия от алюминия (Ecв=74.5 эВ), входящего в состав носителя (γ-Al2O3). Как обзорные спектры, так и отдельные спектральные регионы записывались при энергии пропускания анализатора — 20 эВ. Определение относительного содержания элементов на поверхности катализаторов и отношение их атомных концентраций осуществлялось по интегральным интенсивностям фотоэлектронных линий, откорректированных на соответствующие коэффициенты атомной чувствительности.

CC BY NC

Результаты и их обсуждение. Типичные кинетические кривые гидрирования бензина на 3% Rh/сибуните при различных температурах представлены на рисунке 1, где просматриваются два участка. На первом участке до поглощения примерно 1000 мл водорода скорости гидрирования снижаются от 150 до 25 мл/мин при 80оС, далее наблюдается плато с постоянной скоростью до поглощения рассчитанного количества водорода. Причем не допоглощение при разных температурах разное, так если при 40оС реакция практически останавливается после поглощения 4300 мл Н2, то при 60оС 6000 мл, в при 80оС 6300 мл водорода.

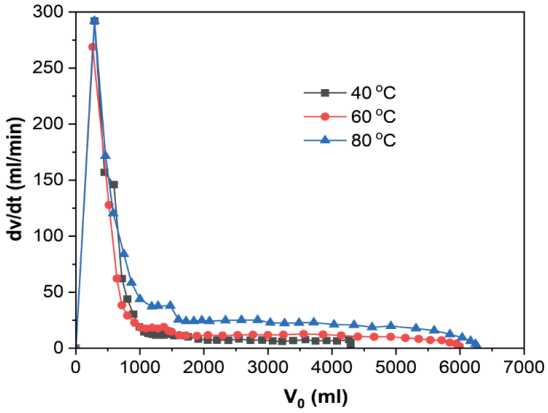


Рисунок 1 — Гидрирование бензина на 3% Rh/сибуните (0,3г) при 40 атм водорода и различных температурах: 1 — 80^{0}С, 2 — 60^{0}С, 3 — 40^{0}С.

Вид кинетических кривых гидрирования бензина на 3% Rh/БАУ (Рис.2) такой как на 3% Rh/сибуните, разница наблюдается в величинах скоростей гидрирования. Общим фактом обоих рисунков является недопоглощение водорода, причем при 40оС количество поглощенного водорода в два раза, чем при 80оС, а 60оС находится между ними.

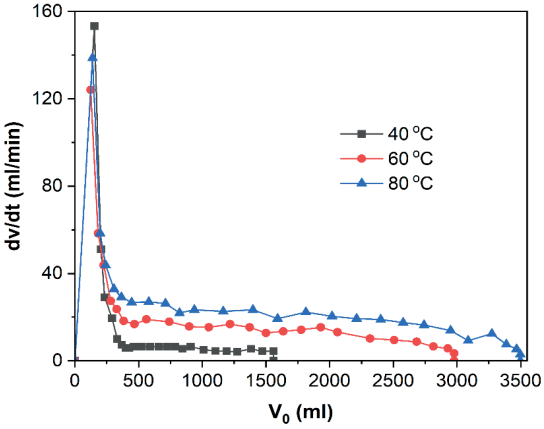


Рисунок 2 — Гидрирование бензина на 3% Rh/БАУ (0,3г) при 40 атм водорода и температуре: 1 — 80^{0}С, 2 — 60^{0}С, 3 — 40^{0}С

В чем причина такого влияния температуры, почему при снижении температуры от 80 до 40оС наблюдается недопоглощение водорода до 2000 мл H2, причем это наблюдается на обоих катализаторах (Рис.1 и Рис.2). Ответы на эти вопросы может прояснить изменение углеводородного состава бензина после гидрирования.

В таблицах 1 и 2 приведены химические составы исходного бензина и продуктов его на родиевых катализаторах, нанесенных на сибунит, БАУ и γ-Al2O3. В таблице 2 приведены групповые, а в таблице 1 индивидуальный углеводородный по конкретным соединениям. В исходном бензине содержится 82,6 % парафинов, т.е. линейных алканов, 4,9 % изоалканов, 1,8 % нафтенов, 0,3 % олефинов и 8,8 % бензола. Следует отметить, что для изучения возможности селективного гидрирования мы намеренно добавили некоторое количество бензола в бензин, который реализуется в розничной торговле. Перед добавкой торговый бензин был перегнан при атмосферном давлении, чтобы исключить негативное воздействие на катализатор добавок по изменению цвета и других технологических характеристик. В таблице 1 показано, что в бензине содержится 82,2 % гексана, а из олефинов обнаруживается 0,3 % децена-1, количество индивидуальных нафтенов менее 1 % каждый.

После гидрирования на 3 % Rh/сибунит состав бензина существенно изменяется, так при 40оС количество н-алканов уменьшается до 15,9 %, такая же тенденция наблюдается на 3 % Rh/БАУ и 3 % Rh/ γ-Al2O3. Мы рассчитывали, что катализатор будет гидрировать ароматическое кольцо бензола, но оказалось, что происходит изменение всего углеводородного состава бензина. Наряду с гидрированием параллельно идут реакции изомеризации, циклизации и другие.

Сравнение изученных катализаторов показывает, что на 3 % Rh/сибуните количество изоалканов увеличивается до 61,8 %, на 3 % Rh/БАУ до 57,9 %, а на 3 % Rh/ γ-Al2O3 до 51,3 % (Табл.2). Количество циклогексана составляет 3 % Rh/сибуните 12,8; 16,8 % на 3 % Rh/БАУ и 13,5 % на 3 % Rh/ γ-Al2O3 (Табл.1) т.е. в продуктах реакции обнаруживается больше, чем бензола в исходном бензине, что говорит о прохождении реакции циклизации алканов. Кроме циклогексана в продуктах реакции обнаруживаются и другие нафтены, как 1,3 диметилциклопентан в цис- и трансформах. 1,2-диметилциклопентан, 1,1,3-триметилциклопентан, этилциклогексан, 1,1,2-триметилциклогексан, транс-1,3-диметилциклогексан. Этих нафтенов с исходным бензином не содержатся, а также обнаруживается 0,1 % толуола, тогда в исходном бензине его не было, поэтому к числу происходящих реакций можно причислить реакцию ароматизации. К числу углеводородов, которых не было в исходном бензине необходимо добавить бутан и изобутан, пентан и изопентан, 2,2-диметилбутан, 4-метилпентен-1, 2,3-диметилбутан, 3-метилпентан, 2,2-диметилпентан, 2,4диметилпентан, 2,3диметилгексан, н-октан, а также можно отнести диены, 2,3,4триметил-1,4-петадиен и 3,3диметил-1,5-гексадиен.

На 3 % Rh/ γ-Al2O3 обнаруживаются соединения, которых не было в исходном бензине и на 3 % Rh/БАУ, и на 3 % Rh/сибуните. Это следующие соединения: цис-октен-2, 2,2-диметилгептан, 1,1,4триметилцмклогексан, этилбензол,

CC BY NC

1,2,4-триметилциклогексан, 3-метил-3-этилгексан, о-ксилол и другие, содержание которых менее 1 %.

Анализируя результаты составов продуктов гидрирования, можно констатировать, что наряду с гидрированием бензола на изученных катализаторах идут следующие реакции: изомеризации, циклизации, ароматизации, крекинга, дегидрирования, алкилирования. Все эти реакции идут через образования полугидрированной формы, которая образуется на поверхности катализатора, и является промежуточным соединением всех вышеназванных реакций.

Таблица 1. Сравнительный состав исходного бензина и продуктов его гидрирования на родиевых катализаторах при 40 атм и 80^0С.

№	Название	Исходный бензин	3 % Rh/ Сибунит	3 % Rh/БАУ	3 % Rh/ γAl_2O_3
1	и- бутен	-	0,6	0,3	-
2	н-бутен	-	2,5	1,6	0,1
3	и-пентан	-	21,5	17,9	7,5
4	н-пентан	-	6,1	5,4	3,0
5	2,2-диметилбутан	-	12,6	11,9	9,7
6	4-метилпентен-1	-	0,8	0,8	0,6
7	2,3-диметилбутан	-	2,6	2,5	2,4
8	2-метилпентан	0,1	8,7	8,6	8,5
9	3-метилпентан	-	5,1	5,2	5,3
10	n-гексан	82,2	4,1	4,3	4,7
11	2,2-диметилпентан	-	2,7	2,8	3,2
12	2,4-диметипентан	-	0,6	0,6	0,8
13	Бензол	8,8	0,8	0,8	1,2
14	Н-нонан	0,4	-	-	0,1
15	2,5-диметилоктан	0,5	-	-	-
16	I-c10-1	0,1	-	-	-
17	н-бутилциклопентан	0,2	-	-	-
18	N-c101	0.3	-	-	-
19	1,3,5-триметилбензол	0,3	-	-	-
20	2,3-диметилоктан	0,5	-	-	-
21	5-метилнонан	0,4	-	-	-
22	N-c10-6	0,2	-	-	-
23	I-c10-6	1.2	-	-	-
24	2-метилнонан	0,4	-	-	-
25	3-этилоктан	0,7	-	-	-
26	N-c10-2	0,2	-	-	-
27	N-c10-7	0.3	-	-	-
28	I-c10-3	0,3	-	-	-
29	N-c10-8	0.3	-	-	-
30	I-c10-8	0,2	-	-	-
31	1,2,4-триметилбензол	0,2	-	-	-
32	A-c10-1	0,6	-	-	-
33	N-c10-9	0,2	-	-	-
34	I-c10-10	0,3	-	-	-

35	I-c10-11	0,1	-	-	-
36	Децен-1	0,3	-	-	-
37	Циклогексан	-	12,8	16,8	13,5
38	2-метилгексан	-	3,0	3,2	4,7
39	3-метилгексан	-	3,2	3,4	5,2
40	1t,3-диметилциклопентан	-	0,6	0,7	1,0
41	1c,3-диметилциклопентан	-	0,4	0,4	0,7
42	3-этилпентан	-	0,4	0,5	0,7
43	1t,2-диметилциклопентан	-	0,2	0,3	0,4
44	н-гексан	-	1,8	1,9	3,3
45	1c,2-диметилциклопентан	-	5,9	6,4	11,2
46	2,3-диметилпентен-2	-	-	-	0,2
47	1,1,3-триметилциклопентан	-	0,2	0,2	0,4
48	2,3,4-триметил-1,4-пентадиен	-	0,1	0,1	0,3
49	3,3-диметил-1,5-гексадиен	-	0,2	0,2	0,4
50	этилциклопентан	-	0,1	0,1	0,2
51	2,2,3-триметилпентан	-	-	-	0,1
52	1c,2e,4c-триметилпентан	-	-	-	0,4
53	толуол	-	0,1	0,1	0,2
54	1,1,2-триметиоциклопентан	-	-	-	1,0
55	2,3-диметилгексан	-	0,2	0,2	0,5
56	2-метил-3-этилпентан	-	0,6	0,7	1,4
57	Диоксид октадиена-2	-	0,2	0,2	0,5
58	1,1,2-триметилциклопентан	-	0,4	0,5	1,1
59	2,2,5-триметилгексан	-	-	-	0,3
60	1t,3-диметилциклогексан	-	0,4	0,4	0,8
61	н-октан	-	0,2	0,3	0,7
62	цис-октен-2	-	-	-	0,5
63	2,2-диметилгептан	-	-	-	0,8
64	1,1,4-триметилциклогексан	-	-	-	0,2
65	этилбензол	-	-	-	0,4
66	1,2,4-триметилциклогексан	-	-	-	0,2
67	3-метил-3-этилгексан	-	-	-	0,2
68	O-c9-19	-	-	-	0,1
69	N-c9-13	-	-	-	0.3
70	O-ксилол	-	-	-	0,2
71	N-c10-11	-	-	-	0,2

Таблица 2. Групповой состав бензина после гидрирования на родиевых катализаторах при 40 атм.

	t,°C	Состав продуктов реакции, ГЖХ, %.						Конверсия бензола, %
		алкан	изоалкан	Ароматика		Нафтен	Олефин	
				Бензол	Толуол			
Исходный бензин		82.6	4.9	8.8	0	1.8	0,3	-
3% Rh/Сибунит	40	15,9	67,6	1,8	0,1	12,2	2,1	79,5
	60	13,3	59,1	0,9	0,09	10,9	1,9	89,8
	80	14,8	61,8	0,8	0,08	9,1	1,4	90,9

CC BY NC

3% Rh/БАУ	80	13,5	57,9	0,8	0,08	9,8	1,3	90,9
3% Rh/γAl_2O_3	80	11,9	51,3	1,2	0,2	19,4	3,1	86,0

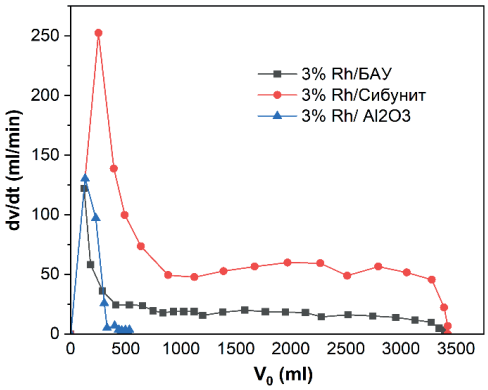


Рисунок 3 — Гидрирование бензина на 3% родиевых катализаторах (0,3 г) при 80°С и 40 атм: 1 — сибунит, 2 — БАУ, 3 — γ-Al_2O_3.

Сравнение кинетических кривых гидрирования бензина на родиевых катализаторах, нанесенных на различные носители, показывает, что вид их идентичен (Рис.3). На угольных носителях активность родия выше, чем на окиси алюминия, очевидно это связано с удельной поверхностью носителя, если на γ-Al_2O_3 удельная поверхность до 100 м^2/г, то сибуните и БАУ превышает 500 м^2/г. Кроме того необходимо отметить кислый характер угольных носителей, которые могут на родиевых кластерах положительный заряд $Rh^{\delta+}$, который, как было отмечено ранее нами (Konuspaev et al, 2010), способствует повышение активности катализатора и селективному гидрированию бензола в смеси с другими ароматическими соединениями.

Использованные для гидрирования бензина родиевые катализаторы были изучено методом рентгенофотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Типичный обзорный фотоэлектронный спектр образца 3 % Rh/БАУ представлен на рисунке, для 3 % Rh/γ-Al_2O_3 спектр имеет такой вид. Других линий элементов на поверхности образцов не обнаружено.

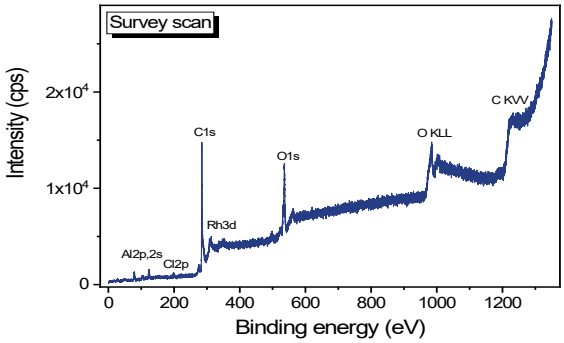


Рисунок 4 — Обзорный фотоэлектронный спектр образца 3 % Rh/БАУ.

Таблица 3. Состав поверхности измеренных образцов в атомных процентах (ат.%) и атомное отношение Rh/Al и Rh/C.

Образец	Rh-%	Al-%	Cl-%	C-%	O-%	Rh/Al	Rh/C
1%Rh-Al_2O_3	0.9	27.9	0.3	16.2	54.7	0.03	0.06
3%Rh-Al_2O_3	1.4	31.7	4.0	12.1	50.7	0.05	0.12
3%Rh/БАУ	1.2	8.0	0.9	68.9	21.0	0.15	0.02

Химический состав поверхности родиевых катализаторов представлен в таблице 3, так на поверхности катализатора Rh/γ-Al_2O_3 обнаруживаются все элементы носителя, как алюминий, кислород, а также хлор, который остался на поверхности после восстановления хлористого родия до металлического. На поверхности 3 % Rh/БАУ помимо углерода и хлора обнаруживается алюминий, которого не должно быть, что является неожиданным фактом, хотя БАУ, приготовлен из березовой древесины, в котором может быть алюминий.

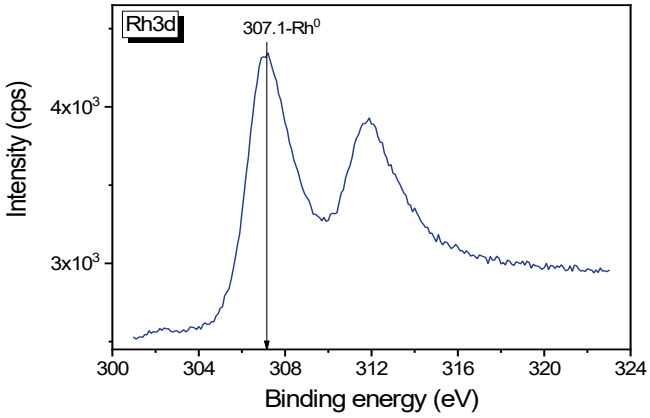


Рисунок 5 — Rh3d фотоэлектронный спектр образца 1%Rh/Al_2O_3.

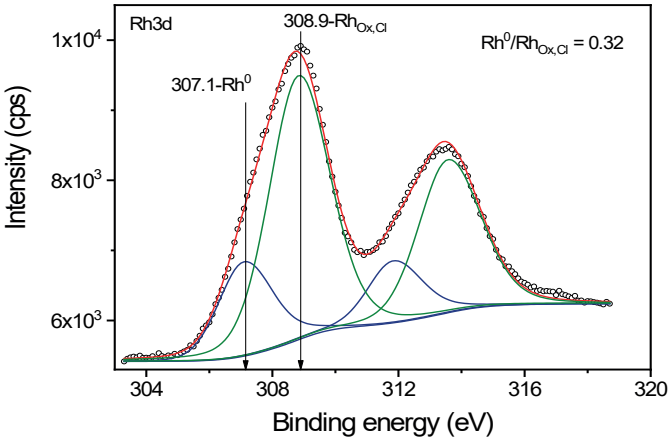


Рисунок 6 — Rh3d фотоэлектронный спектр образца 3 % Rh/Al_2O_3.

CC BY NC

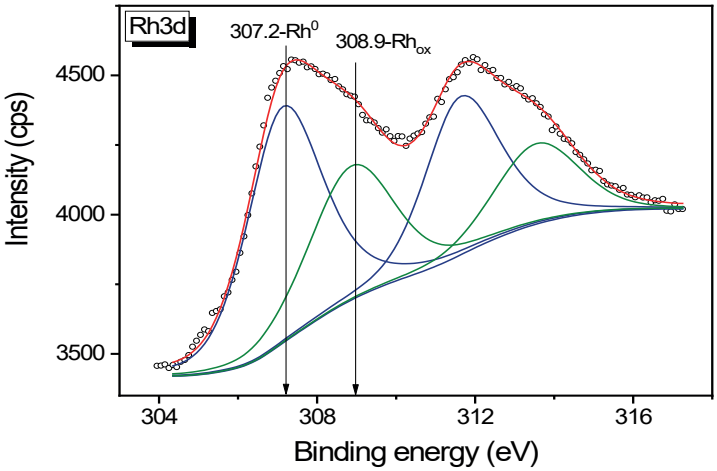


Рисунок 7 — Rh3d фотоэлектронный спектр образца 3 % Rh/БАУ.

Анализ фотоэлектронных линий родия (Rh3d) (Рис.5, 6, 7) позволяет сделать вывод, что в образце 1 % Rh/Al_2O_3 родий находится преимущественно в металлическом состоянии, об этом свидетельствует как значение энергии связи пика Rh3d ($E_{св}$ = 307.2 эВ), которое типично для металла, так и асимметрия фотоэлектронных пиков со стороны больших значений энергий связи, что также является характерным для металлов.

В противоположность этому образцу значение энергии связи основного пика Rh3d полученное для образца 3 % Rh/Al_2O_3 составляет ~ 309 эВ, такое значение характерно для родия в составе хлорида или оксида. Однако следует отметить, что в спектре Rh3d дополнительно наблюдается плечо со стороны меньших значений энергии связи (~ 307 эВ), которое можно приписать металлическому родию. С помощью программы XPS-Peak было проведено разложение пиков в регионе Rh3d на отдельные спектральные компоненты. Результаты разложения представлены на рис.6. Отношение площадей пиков индивидуальных состояний металла и родия в составе оксида или хлорида ($Rh^0/Rh_{Ox,Cl}$) составляет — 0.32. В спектре Rh3d образца 3 % Rh/БАУ (Рис.7) также наблюдаются два состояния родия (металл и оксид). Отношение площадей пиков этих индивидуальных состояний (Rh^0/Rh_{ox}) составляет — 1.5. Авторами (Kumar et al, 2023) при изучении катализатора Rh/сибунит методом РФЭС было показано, что для селективного гидрирования бензола в присутствии других ароматических соединений необходимо присутствие на поверхности $Rh^{\delta+}$, для чего в каталитическую систему подкисляли, для появления положительного заряда на кластерах родия.

Заключение и выводы. В ранее проведенных нами работах (Nurlan et al, 2023) было изучено гидрирование индивидуальных ароматических соединений, как бензол, толуол и кумол в среде растворителей, которыми были этанол и вода. Растворитель не участвовал в реакции, а был всего лишь средой, который мог участвовать в сольватации или гидратации исходных соединений,

продуктов реакции и поверхности катализатора. В случае гидрирования бензола, находящегося в бензине, катализатор оказывает глубокое воздействие на все углеводородные соединения, находящиеся в составе бензина. Авторы в начале полагали, что углеводородная среда будет служить растворителем и средой, в котором проходит реакция. Эксперимент показал, что родий, нанесенный на сибунит, БАУ и γ-Al_2O_3, проводит не только гидрирование бензола, но и проводит целый букет химических реакций превращения углеводородов, как изомеризация (каркасная и цис-транс-), циклизация, крекинг, ароматизация, дегидрирование, алкилирование и другие. Причиной этому является наличие на поверхности металлического родия различных форм адсорбированного водорода и возможность активации и ароматических соединений, и алканов, и нафтенов, и олефинов. Если ароматические соединения и олефины адсорбируются и активируются через взаимодействие π-комплекса, то алканы активируются через образование σ-соединений с родием. В обоих случаях идет образование полугидрированной формы, как отмечено Д.В. Сокольским, позднее хемосорбцию стали связывать с координацией, т.е. образованием на поверхности координационных соединений. Полугидрированную форму можно рассматривать, как координационное соединение, которое является промежуточным состоянием выше названных реакций, идущих параллельно, при гидрировании бензола в составе бензина.

Исходя из этого можно сделать следующие выводы.

1. При гидрировании бензола, содержащегося в бензине, идет целый букет химических реакций, основной из которых является каркасная изомеризация углеводород.

2. Во случаях гидрирование бензина отмечается недопоглощение рассчитанного количества водорода, меньше на Rh/сибунит, больше на 3 % Rh/γAl_2O_3, что связано с прохождением параллельных реакций.

3. При гидрировании бензола, содержащегося в составе бензина, не достигается 100% конверсии бензола, что, видимо, связано с наличием параллельных реакций.

4. Методом РФЭС показано, что на поверхности изученных катализаторов помимо металлического родия обнаруживаются заряженный формы родия близкие к солям и оксидам родия.

Литература

Akbayrak S. (2018) Rhodium (0) Nanoparticles Supported on Ceria as Catalysts in Hydrogenation of Neat Benzene at Room Temperature. J. Colloid and Interface Sci. — Vol 530. 15. — No 2018. — P.459-4647.

Alimohammadi N., Fathi S. (2019) Selective benzene reduction from gasoline using catalytic hydrogenation reactions over zeolite Pd/13X. Reac. Kinet. Mech. and Cat. — Vol. 128. p. 949—964.

Bayram E., Linehan I.C., Fulton J.L., Roberts J.A., Szymczak N.K., Smurthwaite T.D., O^{c}zkar S ., Balasubramanian M., and Finke R.G. (2011) Is It Homogeneous or Heterogeneous Catalysis Derived from $[RhCp^*Cl_2]_2$ In Operando XAFS., Kinetic, and Crucial Kinetic Poisoning Evidence for Subnanometer Rh_4 Cluster-Based Benzene Hydrogenation Catalysis. J. Am. Chem. Soc. — Vol. 133. — P.18889—18902.

Fang Hao, Jingsong Zheng, Donghong Ouyang, Wei Xiong, Pingle Liu, and Hean Luo. (2021) Selective hydrogenation of benzene over Ru supported on surface modified TiO_2 . Korean J. Chem. Eng. — No 38(4). — P.736-746.

CC BY NC

Glotov A.P., Stavitskaya A.V., Chudakov Ya.A., Artemova M.I., Smirnova E.M., Demikhova N.R., Shabalina T.N., Gureev A.A., and Vinokurov V.A. (2018) Nanostructured Ruthenium Catalysts in Hydrogenation of Aromatic Compounds. Petrol. Chem. — Vol. 58. — No.14. — P.1221-1226.

Gu W., Stalzer M.M., Nicholas C.P., Bhattacharyya A., Motta A., Gallagher J.R., Zhang G., Miller J.T., Kobayashi T., Pruski M., Delferro M. and Marks T.J. (2015) Benzene Selectivity in Competitive Arene Hydrogenation: Effects of Single-Site Catalyst•••Acidic Oxide Surface Binding Geometry. J. Am. Chem. Soc. — Vol. 137. — P. 6770-6780.

Haiting Cai, Haoyu Nie, Zhuole Lu, Chandra Veer Singh, Ya-Huei (Cathy) Chin. (2024) Catalytic consequences of the identity and coverages of reactive intermediates during benzene hydrogenation on Pt, Pd, and Pt-Re catalysts. J. Catal. — Vol. 436. 115582.

Hongli Liu, Ruiqi Fang, Zhong Li, Yingwei Li. (2015) Solventless hydrogenation of benzene to cyclohexane over a heterogeneous Ru—Pt bimetallic catalyst. Chem. Eng. Sci. — Vol. (122)27. — P.350-359.

Johnson R., Hu P., Pugh J., Haridasan R.K. and Searles K. (2025) Benzene hydrogenation utilizing organometallic early transition metal precursors. Catal. Sci. Technol. — Vol. 15. — P.41-45.

Kumar P., Qi L., Williams S., Dop R.A., Liu Y, Tao Zhang, Changzhi Li, Jianliang Xiao. (2023) Selective Hydrogenation of Lignin-derived Aromatics to Give Cyclohexanes with a Rhodium-Pincer Precatalyst. J. Organomet. Chem. — Vol. 997. — P.15.

L. Marot, G. De Temmerman, V. Thommen, D. Mathys, P. Oelhafen. (2008) Characterization of magnetron sputtered rhodium films for reflective coatings. Surface & Coatings Technology, — Vol. 202. — P.2837-2843.

Nurlan A., Konuspayev S.R., AbildinT.S. (2023) The Effect of Rh/BAC Catalyst Preparation and Pretreatment Methods on Benzene Hydrogenation. Eurasian J. Chem. — Vol. 4(112). — P. 123-129.

Peyrovi M.H., Parsafard N., Mohammadian Z. (2018) Benzene selective hydrogenation over supported Ni (nano-) particles catalysts: Catalytic and kinetics studies. Chinese J. of Chem. Eng. — Vol. 26. — P. 521-528.

Peyrovi M.H., Rostamikia T. and Parsafard N. (2018) Competitive Hydrogenation of Benzene in Reformate Gasoline over Ni Supported on SiO_2, SiO_2−Al_2O_3, and Al_2O_3 Catalysts: In uence of Support Nature. 8b02952 Energy Fuels 32, 11432−11439.

Shirokopoyas S.I., Baranova S.V., Maksimov A.L., Kardashev S.V., Kulikov A.B., Naranov E.R., Vinokurov V.A., Lysensko S.V. and Karakhanov E.A. (2024) Hydrogenation of Aromatic Hydrocarbons in the Presence of Dibenzothiophene over Platinum—Palladium Catalysts Based on Al—SBA15 Aluminosilicates. Petrol, Chem., —Vol. (54)2. — P.94-99.

Vaśquez-Ceśpedes S., Xiaoming Wang, and Glorius F. (2018) Plausible Rh (V) Intermediates in Catalytic C−H Activation Reactions. ACS Catal. — Vol.8. — P.242-257.

Xiaojing Zhao, Yandong Chang, Wen-Jie Chen, Qingshi Wu, XiaoyangPan, KongfaChen, and BoWeng. (2022) Recent Progress in Pd-Based Nanocatalysts for Selective Hydrogenation. ACS Omega. 7. 17-31.

Zhihao Chen, Haijie Sun, Zhikun Peng, Jie Gao, Baojun Li, Zhongyi Liu, and Shouchang Liu. (2019) Selective Hydrogenation of Benzene: Progress of Understanding for the Ru-Based Catalytic System Design. Indus. Eng. Chem. Res. — Vol. (58)31. — P.13794-13803.

Конуспаев С.Р., Шаймардан М., Ауезов А.Б., Конуспаева З.С., Кушкарина С.М., Саланов А.Н. (2011) Бензолды гидрлеудің Rh/Сибунит катализаторына Мо модификаторының әсері. Хим. журн. Казахстана. — № 2, — С. 57-63.

Конуспаев С.Р., Шаймардан М., Нурбаева Д.Р., Ауезов А.Б., Боронин А.И. (2010) Разработка катализаторов гидрирование бензола при создании экологически чистого бензина. Нефтехимия. — №1, — С. 48-51.

References

Akbayrak S. (2018) Rhodium (0) Nanoparticles Supported on Ceria as Catalysts in Hydrogenation of Neat Benzene at Room Temperature. J. Colloid and Interface Sci. — Vol. 530. 15 — No 2018. — P.459-4647. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.07.011 (in English)

Alimohammadi N., et al. (2019) Selective benzene reduction from gasoline using catalytic hydrogenation

reactions over zeolite Pd/13X. Reac. Kinet. Mech. and Cat. — Vol. 128. — P. 949-964. DOI: https://doi.org/10.1007/s11144-019-01675-w (in English)

Bayram E., et al. (2011) Is It Homogeneous or Heterogeneous Catalysis Derived from $[RhCp^*Cl_2]_2$ In Operando XAFS., Kinetic, and Crucial Kinetic Poisoning Evidence for Subnanometer Rh_4 Cluster-Based Benzene Hydrogenation Catalysis. J. Am. Chem. Soc. — Vol. 133. — P.18889-18902. DOI: https://doi.org/10.1021/ja2073438 (in English)

Fang Hao., et al. (2021) Selective hydrogenation of benzene over Ru supported on surface modified TiO_2. Korean J. Chem. Eng. — No 38(4). — P.736-746. DOI: https://doi.org/10.1007/s11814-020-0689-9 (in English)

Glotov A.P., et al. (2018) Nanostructured Ruthenium Catalysts in Hydrogenation of Aromatic Compounds. Petrol. Chem. — Vol. 58. — No.14. — P.1221-1226. DOI: https://doi.org/10.1134/S0965544118140013 (in English)

Gu W., et al. (2015) Benzene Selectivity in Competitive Arene Hydrogenation: Effects of Single-Site Catalyst•••Acidic Oxide Surface Binding Geometry. J. Am. Chem. Soc. — Vol. 137. — P.6770-6780. DOI: https://doi.org/10.1021/jacs.5b03254 (in English)

Haiting Cai., et al. (2024) Catalytic consequences of the identity and coverages of reactive intermediates during benzene hydrogenation on Pt, Pd, and Pt-Re catalysts. J. Catal. — Vol. 436. 115582. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcat.2024.115582 (in English)

Hongli Liu., et al. (2015) Solventless hydrogenation of benzene to cyclohexane over a heterogeneous Ru—Pt bimetallic catalyst. Chem. Eng. Sci. — Vol. (122)27. — P.350-359. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.09.050 (in English)

Johnson R., et al. (2025) Benzene hydrogenation utilizing organometallic early transition metal precursors. Catal. Sci. Technol. — Vol. 15. — P.41-45. DOI: https://doi.org/10.1039/D4CY01272K (in English)

Konýspaev S.R., Shaımardan M., Aýezov A.B., Konýspaeva Z.S., Kýshkarına S.M., Salanov A.N. Benzoldy gıdrleýdiń Rh/Cıbýnıt katalızatoryna Mo modıfıkatorynyń áseri. [Effect of a Mo Modifier on the Hydrogenation of Benzene over an Rh/Cibunite Catalyst]. Chemical Journal of Kazakhstan. 2011. — № 1. — P.57—63. (in Russian)

Konýspaev S.R., Shaımardan M., Nýrbaeva D.R., Aýezov A.B., Boronın A.I. Razrabotka katalızatorov gıdrırovanıe benzola prı sozdanıı ekologıcheskı chıstogo benzına. [Development of Catalysts for the Hydrogenation of Benzene in the Production of Environmentally Friendly Gasoline]. Petrochemistry. 2010. — № 1. — P.48—51. (in Russian)

Kumar P., et al. (2023) Selective Hydrogenation of Lignin-derived Aromatics to Give Cyclohexanes with a Rhodium-Pincer Precatalyst. J. Organomet. Chem. — Vol. 997. — P.15. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2023.122795 (in English)

L. Marot., et al. (2008) Characterization of magnetron sputtered rhodium films for reflective coatings. Surface & Coatings Technology, — Vol. 202. — P.2837-2843. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.10.014 (in English)

Nurlan A., et al. (2023) The Effect of Rh/BAC Catalyst Preparation and Pretreatment Methods on Benzene Hydrogenation. Eurasian J. Chem. — Vol. 4(112). — P.123-129. DOI:https://doi.org/10.31489/2959-0663/4-23-17 (in English)

Peyrovi M.H., et al. (2018) Benzene selective hydrogenation over supported Ni (nano-) particles catalysts: Catalytic and kinetics studies. Chinese J. of Chem. Eng. — Vol. 26. — P.521-528. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cjche.2017.05.022 (in English)

Peyrovi M.H., et al. (2018) Competitive Hydrogenation of Benzene in Reformate Gasoline over Ni Supported on SiO_2, $SiO_2-Al_2O_3$, and Al_2O_3 Catalysts: In uence of Support Nature. 8b02952 Energy Fuels 32. 11432−11439. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b02952 (in English)

Shirokopoyas S.I., et al. (2024) Hydrogenation of Aromatic Hydrocarbons in the Presence of Dibenzothiophene over Platinum—Palladium Catalysts Based on Al—SBA15 Aluminosilicates. Petrol, Chem., — Vol. (54)2. — P.94-99. DOI: https://doi.org/10.1134/S0965544114020108 (in English)

Vaśquez-Ceśpedes S., et al. (2018) Plausible Rh (V) Intermediates in Catalytic C−H Activation Reactions. ACS Catal. — Vol.8. — P. 242-257. DOI: https://doi.org/10.1021/acscatal.7b03048 (in English)

CC BY NC

Xiaojing Zhao., et al. (2022) Recent Progress in Pd-Based Nanocatalysts for Selective Hydrogenation. ACS Omega. 7. 17-31. DOI: 10.1021/acsomega.1c06244 (in English)

Zhihao Chen., et al. (2019) Selective Hydrogenation of Benzene: Progress of Understanding for the Ru-Based Catalytic System Design. Indus. Eng. Chem. Res. — Vol. (58)31 — P.13794-13803. DOI: 10.1021/acs.iecr.9b01475. (in English)

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 274–285

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.399

©G.J. Baisalova[1]*, B.K. Yertay[2], A.A. Taltenov[1], P. Kuzhatova[2], G. Saspugayeva[1], 2025.
[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan;
[2]Astana Medical University, Astana, Kazakhstan.
E-mail: galya_72@mail.ru

A QUANTITATIVE DETERMINATION OF THE PHENOL COMPOUNDS SUM IN THE THALLUS OF *PARMELIA SULCATA*

Baisalova Galiya — Professor of L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
E-mail: galya_72@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1338-0308;
Yertay Bekzada — Master's student at Astana Medical University, Astana, Kazakhstan,
E-mail: Bekzada2001_2001@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6883-0062;
Taltenov Abzal — Senior lecturer of L. N. Gumilyov Department, Astana, Kazakhstan,
E-mail: abzal06@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0620-3816;
Kuzhatova Pernegul — Professor of Astana Medical University, Astana, Kazakhstan,
E-mail: perne-orazai@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4378-0568;
Saspugayeva Gulnur — PhD, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
E-mail: gulnur_erzhanovna@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3223-3602.

Abstract. An important task of pharmacy is to expand the base of medicinal plant raw materials and evaluate their potential use in medical practice. The purposeful study of plants used in traditional and folk medicine is one of the main ways to identify promising types of plant raw materials.

Parmelia sulcata is a leaf-shaped lichen belonging to the Parmeliaceae family. This lichen is widespread mainly on tree bark, rocks, and cliffs, as well as in forest, steppe, and mountainous areas. *Parmelia sulcata* has long been used in traditional medicine to treat skin diseases (wounds, cuts) and respiratory diseases (bronchitis and colds). However, the phytochemical composition of this raw material has not been fully studied.

In this study, the number of phenolic compounds in the thallus of *Parmelia sulcata* was determined by the spectrophotometric method. The study examined the influence of factors such as alcohol concentration, extraction time, particle size of raw materials, and the ratio of raw materials to extractant on the total amount of phenolic compounds. As a result, the most effective extractant was 70% ethanol, the most effective particle size of the raw material was 1.5 mm, and the most effective extraction time was 48 hours. The maximum content of phenolic compounds was observed at a raw material-to-extractant ratio of 1:100. The effect of Na_2CO_3 concentration and the volume of the oxidizer on the reaction of phenolic compounds with a mixture of phosphomolybdic and phosphotungstic acids was also investigated.

CC BY NC

In the process of quantitative determination of the total phenolic compounds in the thallus of *Parmelia sulcata*, the studied extraction conditions allowed their accurate and efficient determination. This method is convenient for use in pharmacognostic and phytochemical studies and is important for quality control of future medicines. The spectrophotometric method is simpler, more resource-efficient, and more accessible than high-performance liquid chromatography, and a comprehensive study of extraction parameters allows obtaining the maximum yield of phenolic compounds.

Keywords: *Parmelia sulcata*, phenolic compounds, spectrophotometry, phosphomolybdic and phosphotungstic acids, biologically active substances

©Г.Ж. Байсалова [1]*, Б.К. Ертай[2], А.А.Талтенов[1], П. Кужатова[2], Г.Е. Саспугаева[1], 2025.

[1]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан;
[2]Астана медицина университеті, Астана, Қазақстан.
E-mail: galya_72@mail.ru

PARMELIA SULCATA ТАЛЛОМЫНДАҒЫ ФЕНОЛДЫ ҚОСЫЛЫСТАРДЫҢ ЖИЫНТЫҚ МӨЛШЕРІН САНДЫҚ АНЫҚТАУ

Байсалова Галия — Л.Н. Гумилева атындағы ЕҰУ профессоры, Астана, Қазақстан,
E-mail: galya_72@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1338-0308;
Ертай Бекзада — Астана Медицина университеті магистранты, Астана, Қазақстан,
E-mail: Bekzada2001_2001@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6883-0062;
Абзал Талтенов — Л. Н. Гумилёв атындағы ЕҰУ профессоры, Астана, Қазақстан,
E-mail: abzal06@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0620-3816;
Пернегүл Құжатова — Астана медицина университетінің аға оқытушысы, Астана, Қазақстан,
E-mail: perne-orazai@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4378-0568;
Саспугаева Гулнур — Л.Н. Гумилева атындағы ЕҰУ PhD докторы, Астана, Қазақстан,
E-mail: gulnur_erzhanovna@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3223-3602.

Аннотация. Дәрілік өсімдік шикізатының базасын кеңейту және оны медициналық практикада қолдану мүмкіндігін бағалау фармацияның маңызды міндеті болып табылады. Дәстүрлі және халықтық медицинада қолданылатын өсімдіктерді мақсатты зерттеу өсімдік шикізатының перспективалы түрлерін табудың негізгі тәсілдерінің бірі болып табылады.

Parmelia sulcata - Parmeliaceae тұқымдасына жататын жапырақ тәрізді қына. Бұл қына негізінен ағаш қабығында, тастар мен жартастарда, сондай-ақ орманды, дала және таулы аймақтарда кең таралған. *Parmelia sulcata* ұзақ уақыт бойы дәстүрлі медицинада тері ауруларын (жаралар, кесулер) және тыныс алу жолдарының ауруларын (бронхит және суық тию) емдеу үшін қолданылған. Алайда бұл өсімдік шикізатының фитохимиялық құрамы толық зерттелмеген.

Бұл зерттеуде *Parmelia sulcata* қынасының талломындағы фенолды қосылыстардың мөлшері спектрофотометриялық әдісі арқылы анықталды. Зерттеу барысында спирт концентрациясы, экстракция уақыты, шикізат бөлшектерінің өлшемі, шикізат пен экстрагенттің арақатынасы сияқты факторлардың фенолды

қосылыстардың жиынтық мөлшеріне әсері қарастырылды. Нәтижесінде ең тиімді экстрагент 70% этанол, ең тиімді шикізат бөлшек өлшемі 1,5 мм және ең тиімді бөліну уақыты 48 сағаттық экстракцияда анықталды. Шикізат пен экстрагенттің 1:100 арақатынасында фенолды қосылыстардың ең жоғары мөлшері анықталды. Сонымен қатар фенолды қосылыстардың фосформолибден және фосфорвольфрам қышқылдарыныңың қоспасымен реакцияласуына Na_2CO_3 концентрациясының және тотықтырғыш көлемінің әсері қарастырылған.

Parmelia sulcata талломындағы фенолдық қосылыстардың жиынтық мөлшерін сандық анықтау барысында зерттелген экстракция шарттары олардың дәл әрі тиімді анықталуына мүмкіндік береді. Бұл әдіс фармакогностикалық және фитохимиялық зерттеулерде қолдануға ыңғайлы, сондай-ақ болашақ дәрілік препараттар сапасын бақылауда маңызды болып табылады. Спектрофотометриялық әдіс жоғары тиімді сұйықтықты хроматографияға қарағанда қарапайым, ресурсты үнемдейтін және қолжетімді тәсіл болып табылады, ал экстракция параметрлерін кешенді түрде зерттеу фенолдық қосылыстардың шығымын максималды алуға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: *Parmelia sulcata*, фенолды қосылыстар, спектрофотометрия, фосформолибден және фосфорвольфрам қышқылдары, биологиялық белсенді заттар

©Г.Ж. Байсалова[1]*, Б.К. Ертай[2], А.А.Талтенов[1], П. Кужатова[2], Г.Е. Саспугаева[1], 2025.

[1] Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан;

[2]Медицинский университет Астана, Астана, Казахстан.

E-mail: galya_72@mail.ru

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММЫ ФЕНОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ТАЛЛОМЕ *PARMELIA SULCATA*

Байсалова Галия — Профессор, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
E-mail: galya_72@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1338-0308;
Ертай Бекзада — Магистрант, Медицинский университет Астана, Астана, Казахстан,
E-mail: Bekzada2001_2001@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6883-0062;
Абзал Талтенов — Профессор, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
E-mail: abzal06@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0620-3816;
Пернегүл Құжатова — Старший преподаватель, Медицинский университет Астана, Астана, Казахстан,
E-mail: perne-orazai@mail.ru, ORCID:https://orcid.org/0009-0008-4378-0568;
Саспугаева Гульнур — PhD доктор, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
E-mail: gulnur_erzhanovna@mail.ru, ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3223-3602.

Аннотация. Расширение сырьевой базы лекарственных средств и оценка

перспектив использования природных объектов в медицинской практике являются важнейшими задачами современной фармации. Целенаправленное исследование видов, применяемых в традиционной медицине, представляется эффективным подходом к поиску новых источников биологически активных соединений. Parmelia sulcata — листоватый лишайник семейства Parmeliaceae, широко распространённый на коре деревьев, скальных субстратах и в различных климато-географических зонах. В традиционной медицине данный вид использовался при кожных поражениях и заболеваниях дыхательных путей. Несмотря на это, его фитохимический состав остаётся изученным недостаточно. Цель данного исследования — количественное определение суммы фенольных соединений в талломе Parmelia sulcata с использованием спектрофотометрического метода. Были изучены основные параметры экстракции: концентрация спирта, время экстракции, гранулометрический состав сырья и соотношение сырьё—экстрагент. Установлено, что оптимальные условия включают использование 70% этанола в качестве экстрагента, размер частиц 1,5 мм, время экстракции 48 часов и соотношение сырья и экстрагента 1:100. Дополнительно исследовано влияние концентрации Na_2CO_3 и объема окислителя на реакцию с фосформолибденовой и фосфорновольфрамовой кислотами. Полученные данные подтверждают, что оптимизация условий экстракции обеспечивает точное и воспроизводимое определение фенольных соединений в сырье Parmelia sulcata. Спектрофотометрический метод, будучи менее ресурсоёмким и более доступным по сравнению с высокоэффективной жидкостной хроматографией, представляет собой эффективный инструмент для фармакогностических и фитохимических исследований. Результаты работы имеют важное значение для разработки стандартов качества и последующего создания лекарственных препаратов на основе сырья лишайников.

Ключевые слова: *Parmelia sulcata,* фенольные соединения, спектрофотометрия, фосформолибденовая и фосфорвольфрамовая кислоты, биологически активные вещества

Кіріспе. Қазақстанда тіркелген шамамен 6000-нан астам жоғары сатыдағы өсімдіктердің тек 30–35%-ы ғана толық зерттелген. Бұл көрсеткіш 65—70%-ға жуық өсімдік түрлерінің фитохимиялық және фармакологиялық қасиеттері әлі толық зерттелмегенін көрсетеді. Сондықтан жаңа биологиялық белсенді қосылыстарды анықтау және табиғи негізде фитопрепараттар жасау үшін зор ғылыми әлеует бар (Wagner, et al, 2016; Wang, et al, 2017).

Қына (Lichenes) — ерекше симбиотикалық организмдер, олардың құрамындағы биологиялық белсенді заттар фармакология мен медицинада кеңінен қолданылады (Boustie, et al, 2005; Mitrović, et al, 2011) *Parmelia sulcata* — Lecanoraceae туысына жататын, кең таралған жапырақ тәрізді қына түрі (González-Burgos, et al, 2019). Бұл түр негізінен қылқанжапырақты және аралас ормандарда, ағаштардың діндерінде, тастар бетінде өседі (Manojlović, et al, 2012) және Қазақстанның солтүстік, шығыс, оңтүстік аймақтарындағы таулы орман белдеулерінде жиі кездеседі.

Parmelia sulcata — ерекше иісті, сұр-жасыл түсті, 3—10 см ұзындықтағы жапырақ тәрізді талломға ие көпжылдық организм (Arya, et al, 2024). Оның тығыз құрылымы және ризиналар арқылы субстратқа жақсы бекінуі, жарық сүйгіштігі мен ылғалды жақсы көруі (Tay, et al,2004) сондай-ақ экстремалды жағдайларға төзімділігі табиғи ортасында кең таралуына ықпал етеді (Zambare, et al, 2012). Талломның құрамындағы уснин қышқылы сияқты биологиялық белсенді заттар өсімдіктің қорғаныш функциясын атқарып (Sharma, 2012.), микроорганизмдерге қарсы күреседі (Gandhi, et al, 2022). Дәстүрлі медицинада *Parmelia sulcata* өкпе аурулары, жаралар (Ferda, et al, 2015), тері аурулары мен жүйке жүйесін тыныштандыруда қолданылады (Lutzoni, et al, 2009).

Зерттеулер көрсеткендей, *Parmelia sulcata* құрамында фенолды қосылыстар (Pérez, et al, 2023), флавоноидтар, уснин қышқылы, сапониндер және басқа да биологиялық белсенді заттар бар (Kulbat, 2016). Бұл қосылыстар оның антибактериалды, қабынуға қарсы және антиоксиданттық қасиеттерін қамтамасыз етеді.

Жалпы жұмыстың мақсаты *Parmelia sulcata* талломының спирттік сығындысындағы фенолды қосылыстардың жиынтық мөлшерін Folin—Ciocalteu реактивінің көмегімен спектрофотометриялық әдіс арқылы сандық анықтау болып табылады.

Материалдар мен зерттеу әдістері. Зерттеу объектісі ретінде *Parmelia sulcata* қынасының талломы пайдаланылды. Қына үлгілері Қазақстанның Шығыс аймағынан 2025 жылдың көктемінде жиналды.Зерттелетін материал көлеңкелі жерде, жақсы желдетілетін бөлмеде, +20…+25 °C температурада табиғи жағдайда кептірілді, бөлшек өлшемдері 3,0 мм, 2,5 мм және 1,5 мм болатын тесіктері бар електен өтетін бөлшектердің мөлшеріне дейін ұсақталды.

Зерттеу барысы өсімдік шикізатындағы фенолды қосылыстардың фосформолибден және фосфорвольфрам қышқылдарының қоспасымен әрекеттесуіне негізделген. Сығынды құрамындағы фенолды қосылыстардың жалпы мөлшері галл қышқылына және абсолютті құрғақ затқа қайта есептеу арқылы жүргізілген.

Жұмысшы ерітінділер мен салыстырмалы ерітінділерді оптикалық тығыздылығын анықтау үшін Thermo Scientific Multiskan SkyHigh спектрофотометрі қолданылады. Деректерді өңдеу үшін Microsoft Excel 2010 бағдарламасы пайдаланылды, көрсеткіштер орташа мән ± стандартты қате түрінде есептелді.

Зерттеуге арналған *Parmelia sulcata* талломы алдын ала ұнтақталып, нақты 5,00 г өлшемде алынды. Ол 100 мл көлемді, тығыз жабылатын колбаға салынып, үстіне 50 мл 70% этанол ерітіндісі құйылды. Колба тығыз жабылып, ±0,01 г дәлдікпен өлшенді. Экстракция үрдісі бөлме температурасында (20—25 °C), қараңғы жерде 24 сағат бойы жүргізілді, бұл уақытта колба мезгіл-мезгіл шайқалып отырды. Содан кейін ерітінді сүзілді, алғашқы 5 мл сүзінді тасталып, қалғаны "А ерітіндісі" ретінде пайдаланылды.

Фенолды қосылыстарды анықтау реакциясы үшін 0,1 мл "А ерітіндісіне" 0,3

CC BY NC

мл дистилденген су, 0,4 мл Фолин—Чокальтеу реактиві және 2,5 мл 5% Na_2CO_3 ерітіндісі қосылды.

30 минут өткен соң реакция өнімінің оптикалық тығыздығы спектрофотометрикалық әдіспен 500–800 нм толқын ұзындығында өлшенді. Алынған нәтижелер галл қышқылына қайта есептеліп, келесі формула арқылы фенолды қосылыстардың жалпы мөлшері (%) есептелді:

$$X = \frac{A_э * m_0 * P * V_э * Vэ'}{A_0 * m_ш * Vxэ * V_0 * V_{0'}} * \frac{V_{x0}}{(100 - W)} * 100\%$$

мұндағы:

$A_э$ - тәжірибелік үлгінің оптикалық тығыздығы;

A_o - галл қышқылы стандартының оптикалық тығыздығы;

$m_ш$ - шикізат массасы (г);

m_o - галл қышқылы стандартының массасы (г);

$V_э$ — алынған экстрактінің көлемі (мл);

$V_{хэ}$ — экстракт аликвотасы көлемі(мл);

V_o - галл қышқылы ерітіндісі көлемі (мл);

V_o' - галл қышқылы өлшеуіш колбаның көлемі(мл);

$V_{хо}$ - галл қышқылы аликвотасы көлемі(мл);

W — кептіру кезіндегі массаның жоғалуы (%).

Нәтижелер және оларды талқылау. Этанол концентрациясының фенолды қосылыстардың экстракциялану дәрежесіне әсерін бағалау мақсатында 50%, 70% және 90% этанол ерітінділері қолданылды. Алынған нәтижелер 1-кестеде келтірілген.

Кесте 1. Фенолды қосылыстардың жиынтық мөлшеріне экстрагент типінің әсері.

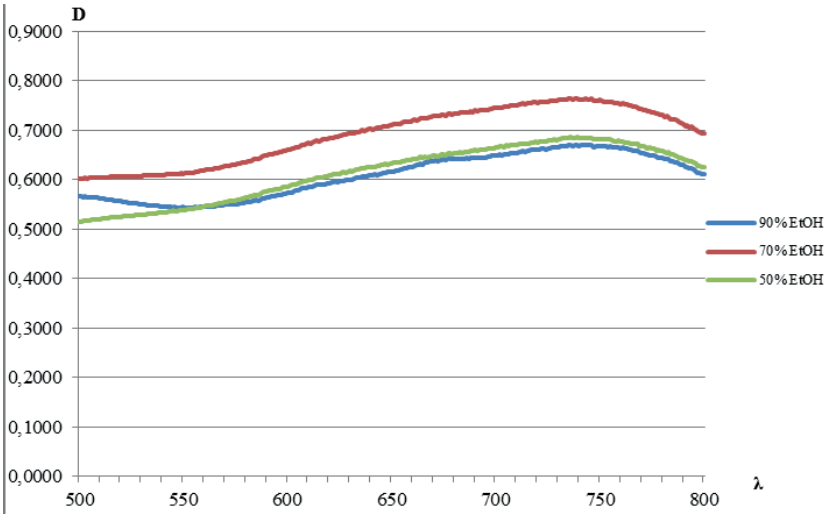
Сынақ параметрі	Фенолды қосындыларының мөлшері, %							
Экстрагент түрі	X_1	X_2	X_3	$X_{орт}$	Стандартты ауытқу (σ)	Орташа стандартты қате (SE)	Абсолюттік қате (Δ)	Нәтижені ұсыну формасы
50% EtOH	16.949	17.742	17.333	17,341	0,3967	0,2290	0.9856	17.341 ± 0.99 %
70% EtOH	19.728	20.201	19.819	19,916	0,2512	0,1450	0.6249	19.916 ± 0.62 %
90% EtOH	15.937	16.202	15.868	16,002	0,1760	0,1016	0.4373	16.002 ± 0.44 %

$*\{x\}$ ± стандартты ауытқу. n = 3.

Зерттеу нәтижелері бойынша, 70% этанол ерітіндісі қолданылған экстракцияда фенол қосылыстарының жиынтық мөлшері ең жоғары нәтиже көрсетті (19.916 ± 0.62 %). Бұл еріткіш 50% және 90% этанолмен салыстырғанда оңтайлы экстрагент болып табылады (1-сурет). Экстрагент ретінде 70% этанолдың жоғары тиімділігі оның полярлығы фенолды қосылыстардың химиялық табиғатына сәйкес

CC BY NC

келуімен түсіндіріледі. Бұл еріткіш талломның жасушалық матрицасындағы молекулааралық байланыстарды әлсіретіп, биологиялық белсенді заттардың экстракциялық ортаға тиімді өтуіне мүмкіндік береді.



Сурет 1 - Этил спиртінің әртүрлі концентрациясындағы ФҚ-тың Folin-Ciocalteu реагентімен кешенінің сіңіру спектрі

Өсімдік шикізатының ұнтақтау дәрежесінің фенолды қосылыстардың шығымына әсерін анықтау мақсатында зерттелетін өсімдік шикізатын алдын ала ұнтақтап, әртүрлі диаметрдегі електер арқылы бөлшектерге бөлінді. Нәтижесінде бөлшек өлшемі 3,0 мм, 2,5 мм және 1,5 мм болатын бөлшектер алынды. Әр фракциядан 5,0 г мөлшерінде алынған шикізат 70% этанол ерітіндісімен 1:10 қатынаста, 60 минут бойы экстракцияланды. Алынған нәтижелер 2-кестеде көрсетілген.

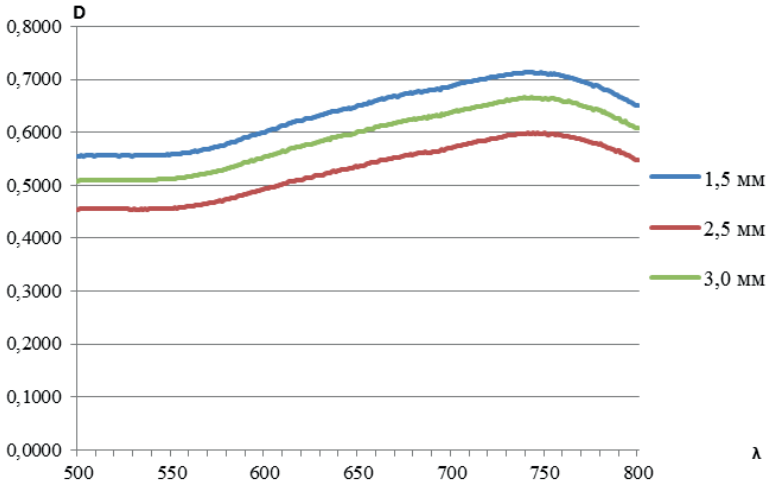
Кесте 2. Фенолды қосылыстардың жиынтық мөлшерінің шикізат бөлшектерінің өлшеміне тәуелділігі.

Сынақ параметрі	Фенолды қосындыларының мөлшері, %							
Шикізат бөлшектерінің мөлшері, мм	X_1	X_2	X_3	$X_{орт}$	Стандартты ауытқу (σ)	Орташа стандарттық қате (SE)	Абсо-люттік қате (Δ)	Нәтижені ұсыну фор-масы
3,0	16.04	16.22	16.75	16.3367	0.3691	0.2131	0.9168	16.34 ± 0.92
2,5	13.15	14.29	14.89	14.11	0.8849	0.5110	2.198	14.11 ± 2.20
1,5	18.52	18.10	18.02	18.21	0.2687	0.1551	0.667	18.21 ± 0.67

Зерттеу нәтижесінде бөлшек өлшемі 1,5 мм болған жағдайда фенолды қосылыстардың экстракциясы ең жоғары болғаны анықталды (18.21 ± 0.67 %). Бұл ұсақ бөлшектердің үлесі артқан сайын беттік ауданның ұлғаюы есебінен экстрагентпен әрекеттесу тиімділігі артатынын көрсетеді. Ал 2,5 мм және 3,0 мм

CC BY NC

өлшемдерінде нәтиже төмен болды, тиісінше 14.11 ± 2.20 % және 16.34 ± 0.92 %. Осылайша, шикізатты 1,5 мм өлшемге дейін ұнтақтау — фенолды қосылыстарды тиімді бөліп алу үшін оңтайлы шарт болып табылады (2-сурет).

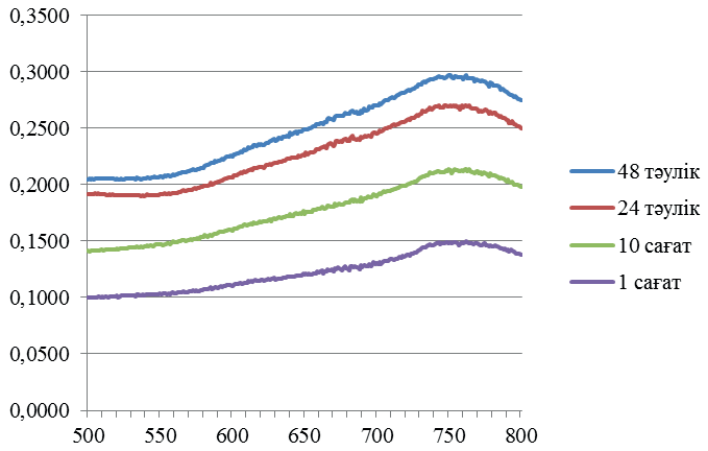


Сурет 2 - Шикізат бөлшектерінің әртүрлі өлшемдеріндегі ФҚ-тың Folin-Ciocalteu реагентімен кешенінің сіңіру спектрі

Жұмыста экстракция уақытының фенолды қосылыстардың шығымына әсері де зерттелді. 3-кестедегі мәліметтерге сәйкес, фенолдық қосылыстардың ең жоғары мөлшері 48 сағат жүргізу кезінде экстракция тиімділігі ең жоғары болды — 17.280 ± 0.899 мг/г. Бұл — ерітіндіде фенолды қосылыстардың еріткішке өтуіне жеткілікті уақыт берілгенін көрсетеді (3-сурет).

Кесте 3. Фенолды қосылыстардың житынтық мөлшерінің экстракция уақытына тәуелділігі.

Сынақ параметрі	Фенолды қосындыларының мөлшері, %							
Мацерация уақыты, сағ	X_1	X_2	X_3	$X_{орт}$	Стандартты ауытқу (σ)	Орташа стандарттық қате (SE)	Абсолюттік қате (Δ)	Нәтижені ұсыну формасы
48 тәулік	17.479	16.862	17.499	17.280	0.362	0.209	0.899	17.280 ± 0.899 мг/г
24 тәулік	15.899	15.695	15.797	15.797	0.103	0.0595	0.256	15.797 ± 0.256 мг/г
10 сағат	14.494	14.162	13.917	14.191	0.29	0.1674	0.720	14.191 ± 0.720 мг/г
1 сағат	12.215	12.396	11.871	12.161	0.266	0.1536	0.661	12.161 ± 0.661 мг/г



Сурет 3 - Түрлі экстракция уақытына байланысты ФҚ-тың Folin-Ciocalteu реагентімен кешенінің сіңіру спектрі

Сонымен қатар, фенолды қосылыстардың шығымына өсімдік шикізаты мен экстрагент арасындағы қатынастың әсері зерттелді (4-кесте). Ең жоғары шығым 1:100 қатынасында тіркелді — 63.357 ± 2.572 мг/г, бұл экстрагенттің шикізатқа қарғанда артық мөлшерде қолданылуы экстракция тиімділігін арттыратынын көрсетеді. Керісінше, 1:10, 1:30 қатынастарында алынған нәтижелер салыстырмалы түрде төмен болды (22.772 ± 1.524 мг/г және 41.098 ± 4.386 мг/г). Осылайша, шикізат пен экстрагенттің арақатынасы 1:100 болғанда фенолды қосылыстарды бөліп алу тиімділігі жоғары деп есептеледі.

Кесте 4. Фенолды қосылыстардың жиынтық мөлшерінің шикізат—экстрагент қатынасына тәуелділігі.

Сынақ параметрі	Фенолды қосындыларының мөлшері, %							
Шикізат пен экстрагенттің арақатынасы	X_1	X_2	X_3	$X_{орт}$	Стан-дартты ауытқу (σ)	Орташа стандарт-тық қате (SE)	Абсо-люттік қате (Δ)	Нәтижені ұсыну формасы
1:10	22.078	22.995	23.244	22.772	0.613	0.354	1.524	22.772 ± 1.524 мг/г
1:30	41.387	42.701	39.206	41.098	1.765	1.019	4.386	41.098 ± 4.386 мг/г
1:50	51.402	50.817	50.469	50.896	0.471	0.272	1.171	50.896 ± 1.171
1:70	53.201	52.655	51.496	52.45	0.871	0.503	2.16	52.45 ± 2.16
1:90	59.832	60.070	59.582	59.828	0.243	0.140	0.602	59.828 ± 0.602
1:100	62.939	64.535	62.597	63.357	1.036	0.598	2.572	63.357 ± 2.572

CC BY NC

Фенолды қосылыстардың фосформолибден және фосфорвольфрам қышқылдарымен әрекеттесу реакциясындағы тотықтырғыштың оңтайлы көлемі 0,4 мл екені анықталды. Бұл көлемде алынған нәтиже ең жоғары — 15.20 ± 1.13 %. Ал 0,2 мл және 0,6 мл көлемдерінде фенолды қосылыстардың мөлшері біршама төмен болды (13.635 ± 0.348 % және 14.08 ± 1.17 %). Фосформолибден және фосфорвольфрам қышқылдарының реагенті көлемінің фенолды қосылыстардың мөлшеріне әсері 5-кесте берілген.

Кесте 5. Folin-Ciocalteu реагенті көлемінің фенолды қосылыстардың жиынтық мөлшеріне әсері.

Фосформолибден және фосфорвольфрам қышқылдарының реактивінің көлемі, мл.	Фенолды қосындыларының мөлшері, %							
	X_1	X_2	X_3	$X_{орт}$	Стандартты ауытқу (σ)	Орташа стандарттық қате (SE)	Абсолюттік қате (Δ)	Нәтижені ұсыну формасы
0,2	13.731	13.473	13.702	13.635	0.141	0.081	0.348	13.635 ± 0.348
0,4	15.488	14.672	15.427	15.196	0.4545	0.2623	1.128	15.20 ± 1.13
0,6	13.535	14.334	14.362	14.077	0.469	0.271	1.165	14.08 ± 1.17

Натрий карбонаты ерітіндісінің концентрациясының осы реакцияға әсері де қарастырылды. Зерттеу нәтижесі бойынша, 5% Na_2CO_3 ерітіндісі қолданылған кезде фенолды қосылыстардың мөлшері 14.26 ± 0.14 % болып, ең жоғары нәтиже көрсеткен. Ал концентрацияны 10% және 15%-ға арттырғанда, сәйкесінше 13.78 ± 0.79 % және 13.35 ± 1.12 % нәтижелері тіркеліп, оптикалық тығыздықтың төмендеуі байқалды.

Кесте 6. Фенолды қосылыстардың жиынтық мөлшеріне натрий карбонаты ерітіндісінің концентрациясының әсері.

Сынақ параметрі	Фенолды қосындыларының мөлшері, %							
Натрий карбонаты ерітіндісінің концентрациясы, %	X_1	X_2	X_3	$X_{орт}$	Стандартты ауытқу (σ)	Орташа стандарттық қате (SE)	Абсолюттік қате (Δ)	Нәтижені ұсыну формасы
5	14.212	14.244	14.322	14.259	0.056	0.032	0.137	14.26 ± 0.14
10	13.416	13.991	13.942	13.783	0.318	0.183	0.787	13.78 ± 0.79
15	13.388	12.872	13.775	13.345	0.452	0.261	1.124	13.35 ± 1.12

Қорытынды. Экстракцияның негізгі параметрлерінің фенолды қосылыстардың шығымына әсері алғаш рет кешенді түрде қарастырылды. Бұл

экстракция әдісін оңтайландырудың практикалық маңызы мақсатты заттардың (фенолды қосылыстар) шығымын арттыруға, уақыт, ресурс үнемдеуге мүмкіндік береді. *Parmelia sulcata* талломының фенолдық қосылыстарының мөлшерін жалпы сандық анықтаудың маңызы зор. Осы өсімдік шикізатынан болашақта дәрілік заттар даярланатын болса, олардың сапасын бақылау үшін қажет фенолдық заттардың сандық мөлшерін валидациялау үшін аппаратуралық тұрғыдан қолжетімді, орындау әдісі оңай спектрофотометрия әдісі қолданылатын болады. Ғалымдардың бір тобы (Fernández-Moriano, et al, 2016;) *Parmelia sulcata* талломының фенолдық қосылыстарының мөлшерін анықтауда жоғары тиімді сұйықтықты хроматография әдісін қолданған. Бірақ бұл әдісті орындау техникасы қиынырақ, ұзағырақ уақыт алуы және хроматографтың қымбат тұруы, фенолдық қосылыстарды сандық анықтауда спектрофотометрия әдісі артықшылықтарға басым екендігін көресетеді.

Әдебиеттер

Ari F., Celikler S., Oran S., Balikci N., Ozturk S., Ozel M. Z., Ozyurt D., Ulukaya E. (2014). Genotoxic, cytotoxic, and apoptotic effects of Hypogymnia physodes (L.) Nyl. on breast cancer cells. Environmental Toxicology. — 29(7). — P. 804—813. https://doi.org/10.1002/tox.21809.

Arya V., Gill A.K., Jamwal A. (2024). Perspectives in Biomonitoring and Pharmacological Aspects of Parmelia sulcata Taylor. Pharmacognosy Research. — 16(3). — P. 500—510.

Boustie J., Grube M. (2005). Lichen secondary metabolites: a source of novel antibiotics. Planta Medica. — 71(11). — P. 1049—1057.

Fernández-Moriano C., González-Burgos E., Divakar P. K., Crespo A., Gómez-Serranillos M. P. (2016). Evaluation of the Antioxidant Capacities and Cytotoxic Effects of Ten Parmeliaceae Lichen Species. Evid Based Complement Alternat Med, 2016. 3169751. https://doi.org/10.1155/2016/3169751.

Gandhi A. D., et al. (2022). Isolation of bioactive compounds from lichen Parmelia sulcata and evaluation of antimicrobial property. Journal of Infection and Public Health. — 15(4). — P. 491—497. https://doi.org/10.1016/j.jiph.2021.10.014.

González-Burgos E., Fernández-Moriano C., Gómez-Serranillos M.P. (2019). Current knowledge on Parmelia genus: Ecological interest, phytochemistry, biological activities and therapeutic potential. Phytochemistry, 165. 112051. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2019.112051.

Kulbat K. (2016). The role of phenolic compounds in plant resistance. Biotechnology and Food Science, 80(2). — P. 97—108.

Lutzoni F., Miadlikowska J. (2009). Lichens. Current Biology. — 19(13). — P. 97—108. https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.06.012.

Manojlović N., et al. (2012). Chemical composition of three Parmelia lichens and antioxidant, antimicrobial and cytotoxic activities of some their major metabolites. Phytomedicine. — 19(13). — P. 1166—1172. https://doi.org/10.1016/j.phymed.2012.07.012.

Maria del C. M. (2011). Parmelia sulcata (Ascomycota: Parmeliaceae), a sympatric monophyletic species complex. The Lichenologist. — 43(6). — P. 585—601.

Mitrović T., et al. (2011). Antioxidant, antimicrobial and antiproliferative activities of five lichen species. International Journal of Molecular Sciences. — 12(8). — P. 5428—5448. https://doi.org/10.3390/ijms12085428.

Pérez M., Dominguez-López I., Lamuela-Raventós R.M. (2023). The Chemistry Behind the Folin-Ciocalteu Method for the Estimation of (Poly)phenol Content in Food: Total Phenolic Intake in a Mediterranean Dietary Pattern. Journal of Agricultural and Food Chemistry. — 71(46). — P. 17543—17553.

Sharma A.K., Sharma C., Dobha M.P. (2012). Phytochemical investigation of therapeutic important lichen: Parmelia perlata. Journal of Natural Product and Plant Resource. — 2(1). — P. 101—106.

CC BY NC

Tay T., et al. (2004). Evaluation of the antimicrobial activity of the acetone extract of the lichen Ramalina farinacea and its (+)-usnic acid, norstictic acid, and protocetraric acid constituents. Zeitschrift für Naturforschung C, — 59(5—6). — P. 384—388. https://doi.org/10.1515/znc-2004-5-617.

Wagner, H., Ulrich-Merzenich, G. (2016). Synergy research: creating a new generation of phytopreparations. RMJ. Medical Review, 24(3), 183. https://doi.org/10.1016/j.phymed.2008.12.018.

Wang, T. Y., Li, Q., Bi, K.-S. (2017). Bioactive flavonoids in medicinal plants: Structure, activity and biological fate. Asian Journal of Pharmaceutical Sciences, 12. — P. 100—110. https://doi.org/10.1016/j.ajps.2017.08.004.

Zambare, V. P., Christopher, L. P. (2012). Biopharmaceutical potential of lichens. Pharmaceutical Biology. — 50(6). — P. 778—798. https://doi.org/10.3109/13880209.2011.633089.

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 286–297

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.400

UDK 31.15.33

©B.E. Myrzabekov[1,2], A.B. Makhanbetov[1,2*], T.E. Gaipov[1,2], B.S. Abzhalov[2], N.N. Nurgaliyev[3], 2025.

[1]National Center on complex processing of mineral raw materials of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan;
[2]Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkistan, Kazakhstan;
[3]Shakarim university, Semey, Kazakhstan.
E-mail: arman28031984@gmail.com

ELECTROCHEMICAL REDUCTION OF MANGANESE (II) IONS ON TITANIUM AND LEAD ELECTRODES

Myrzabekov Begzat — PhD, Senior Researcher, National Center on complex processing of mineral raw materials of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: myrzabekbegzat@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7321-2782;
Makhanbetov Arman — PhD, Senior Researcher, Associate Professor, National Center on complex processing of mineral raw materials of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: arman28031984@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1620-6922;
Gaipov Tulkinzhon — Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, National Center on complex processing of mineral raw materials of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: tolya77784@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9723-3745;
Abzhalov Bagdat — Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Senior Lecturer, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkistan, Kazakhstan,
E-mail: bagdat.abzhalov@ayu.edu.kz; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7983-2392;
Nurgaliyev Nurzhan — PhD, associate professor, Department of Chemistry and Ecology, Shakarim university, Semey, Kazakhstan, Researcher of Humboldt-Innovation GmbH, Humboldt University of Berlin, Berlin, Germany,
E-mail: nurgaliynurzhan@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1216-7150.

Abstract. In this study, the cathodic reduction of manganese (II) ions on titanium and lead electrodes was investigated in ammonium sulfate ($(NH_4)_2SO_4$) solution and in aqueous media using the voltammetric method by recording potentiodynamic polarization curves. High-purity analytical-grade $MnSO_4$ salt was used in all experiments. X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed that the $MnSO_4$ sample possessed a well-defined crystalline structure. Voltammetric measurements were performed in a thermostated three-electrode electrolytic cell with separated cathodic and anodic compartments. A thermostat of the LT-105a model was used to maintain constant temperature. A silver/silver chloride electrode immersed in saturated KCl solution (E = +0,225 V at 20°C)

CC BY NC

served as the reference electrode, while a platinum wire of large surface area was used as the counter electrode. The working electrodes were titanium and lead wires (4 mm in diameter) coated with Teflon insulation. The cathodic, anodic—cathodic, and cathodic—anodic potentiodynamic polarization curves obtained on titanium and lead electrodes exhibited distinct current maxima corresponding to the reduction and reoxidation processes of manganese. However, on the lead electrode, in addition to the reduction of Mn^{2+} ions, the formation of lead sulfate ($PbSO_4$) and its subsequent reduction to metallic lead were observed. This behavior not only restricts the deposition of pure manganese but also indicates the occurrence of side reactions. Based on the obtained results, titanium is recommended as an effective cathode material for the electroextraction of manganese.

Keywords: manganese, electrolysis, electrochemistry, electroreduction, titanium electrode, lead electrode, the polarization curve

©Б.Э. Мырзабеков[1,2], А.Б. Маханбетов[1,2]*, Т.Э. Гаипов[1,2], Б.С. Абжалов[2] Н.Н. Нұрғалиев[3], 2025.

[1]Қазақстан Республикасының минералдық шикізатты кешенді қайта өңдеу жөніндегі Ұлттық орталығы, Алматы, Қазақстан;

[2]Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан, Қазақстан;

[3]Шәкәрім университеті КеАҚ, Семей, Қазақстан.

*E-mail: arman28031984@gmail.com

МАРГАНЕЦ (II) ИОНЫНЫҢ ТИТАН ЖӘНЕ ҚОРҒАСЫН ЭЛЕКТРОДЫНДА ЭЛЕКТРОХИМИЯЛЫҚ ТОТЫҚСЫЗДАНУЫ

Мырзабеков Бегзат — PhD, аға ғылыми қызметкер, Қазақстан Республикасының минералдық шикізатты кешенді қайта өңдеу жөніндегі Ұлттық орталығы, Алматы, Қазақстан,
E-mail: myrzabekbegzat@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7321-2782;

Маханбетов Арман — PhD, қауымдастырылған профессор, аға ғылыми қызметкер, Қазақстан Республикасының минералдық шикізатты кешенді қайта өңдеу жөніндегі Ұлттық орталығы, Алматы, Қазақстан,
E-mail: arman28031984@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1620-6922;

Гаипов Тулкинжон — химия ғылымдарының кандидаты, аға ғылыми қызметкер, Қазақстан Республикасының минералдық шикізатты кешенді қайта өңдеу жөніндегі Ұлттық орталығы, Алматы, Қазақстан,
E-mail: tolya77784@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9723-3745;

Абжалов Бағдат — химия ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, аға оқытушы, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан, Қазақстан,
E-mail: bagdat.abzhalov@ayu.edu.kz; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7983-2392;

Нұрғалиев Нұржан — PhD, доцент — зерттеуші, химия және экология кафедрасы, Шәкәрім университеті КеАҚ, Семей, Қазақстан,
E-mail: nurgaliynurzhan@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1216-7150.

Аннотация. Бұл зерттеу жұмысында марганец (II) иондарының титан және қорғасын электродында аммоний сульфаты ($(NH_4)_2SO_4$) ерітіндісінде және

сулы ортадағы катодты тотықсыздану процесі вольтамперометриялық әдісімен потенциодинамикалық поляризациялық қисықтар түсіру арқылы зерттелді. Зерттеу жұмыстарында тазалығы жоғары анализ үшін таза $MnSO_4$ тұзы қолданылды. Рентген фазалық талдау нәтижелері біз қолданған $MnSO_4$ үлгісінің айқын кристалдық құрылымға ие екендігі анықталды. Вольтамперометрлік зерттеулер катодты-анодты кеңістігі бөлінген үш электродты, термостатталған электролизерде жүргізілді. Тұрақты температураны сақтау мақсатында LT-105a маркалы термостат қолданылды. Салыстырмалы электрод ретінде қаныққан KCl (E=0,225В 200^0C), ерітіндісіне батырылған күміс-хлор электроды және көмекші электрод ретінде ауданы үлкен платина сымы қолданылды. Жұмысшы катод электроды ретінде тефлонмен қапталған диаметрі — 4мм болатын титан және қорғасын сымдары пайдаланылды. Титан және қорғасын электродтарында түсірілген катодты және циклді анодты-катодты, катодты-анодты потенциодинамикалық поляризациялық қисықтарда марганецтің тотықсыздануы және қайта тотығу процестерінің ток максимумдері айқын тіркелетіндігі байқалады. Дегенмен, қорғасын электродында марганец иондарының тотықсыздануымен қатар электрод бетінде қорғасын қосылыстары ($PbSO_4$) түзіліп, оның қорғасын металына дейін тотықсыздануы орын алатындығы анықталды. Бұл электрод бетінде таза өнімді алуды шектеумен қатар қосымша шығынның жүруін көрсетеді. Алынған нәтижелерге сүйене отырып, титан электродын марганецтің электроэкстракциясы үшін тиімді катодтық материал ретінде ұсынуға болады.

Түйін сөздер: марганец, электролиз, электрохимия, электрототықсыздану, титан электроды, қорғасын электроды, поляризациялық қисық

Қаржыландыру: *бұл зерттеу Қазақстан Республикасының Өнеркәсіп және құрылыс министрлігінің Өнеркәсіп комитеті қаржыландыратын BR23991563 Минералдық және техногендік шикізатты өндірудің және кешенді өңдеудің инновациялық ресурс үнемдейтін технологияларын құру бағдарламасы аясында жүргізілді.*

©Б.Э. Мырзабеков[1,2], А.Б. Маханбетов[1,2*], Т.Э. Гаипов[1,2], Б.С. Абжалов[2], Н.Н. Нургалиев[3], 2025.

[1]Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан, Алматы, Казахстан;

[2]Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, Туркестан, Казахстан;

[3]НАО Университет Шакарима, Семей, Казахстан.

E-mail: arman28031984@gmail.com

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИОНОВ МАРГАНЦА (II) НА ТИТАНОВОМ И СВИНЦОВОМ ЭЛЕКТРОДАХ

Мырзабеков Бегзат — PhD, старший научный сотрудник, Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан, Алматы, Казахстан,

CC BY NC

E-mail: myrzabekbegzat@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7321-2782;
Маханбетов Арман — PhD, доцент, старший научный сотрудник, Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан, Алматы, Казахстан,
E-mail: arman28031984@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1620-6922;
Гайпов Тулкинжон — кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан, Алматы, Казахстан,
E-mail: tolya77784@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9723-3745;
Абжалов Багдат — кандидат химических наук, доцент, старший преподаватель, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмета Яссави, Туркестан, Казахстан,
E-mail: bagdat.abzhalov@ayu.edu.kz; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7983-2392;
Нургалиев Нуржан — PhD, доцент-исследователь, Кафедра химии и экологии, НАО Университет Шакарима, Семей, Казахстан,
E-mail: nurgaliynurzhan@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1216-7150.

Аннотация. В данной работе исследован процесс катодного восстановления ионов марганца (II) на титановых и свинцовых электродах в растворе сульфата аммония ($(NH_4)_2SO_4$) и в водной среде методом вольтамперометрии путём снятия потенциодинамических поляризационных кривых. В экспериментах использовался высокочистый реактив $MnSO_4$. Рентгенофазовый анализ показал, что используемый образец $MnSO_4$ обладает чётко выраженной кристаллической структурой. Вольтамперометрические исследования проводились в термостатированной трёхэлектродной электрохимической ячейке с разделённым катодно-анодным пространством. Для поддержания постоянной температуры использовался термостат марки LT-105a. В качестве электродов применялись: насыщенный KCl (E = +0,225 В при 20°C) хлорсеребряный электрод сравнения, платиновая проволока большой площади — в качестве вспомогательного электрода, а также тефлоном покрытые титановые и свинцовые проволоки диаметром 4 мм — в качестве рабочих катодных электродов. На катодных и циклических анодно-катодных и катодно-анодных потенциодинамических поляризационных кривых, полученных на титановых и свинцовых электродах, чётко фиксируются токовые максимумы, соответствующие процессам восстановления и повторного окисления марганца. Однако на свинцовом электроде, наряду с восстановлением ионов марганца, наблюдается образование соединений свинца ($PbSO_4$) и их последующее восстановление до металлического свинца. Это ограничивает получение чистого продукта на поверхности электрода и указывает на наличие побочных процессов. На основе полученных результатов титан рекомендуется в качестве эффективного катодного материала для электроэкстракции марганца.

Ключевые слова: марганец, электролиз, электрохимия, электровосстановление, титановый электрод, свинцовый электрод, поляризационная кривая

Кіріспе. Соңғы жылдары марганец металына деген сұраныс артып, оның тазалығына қойылатын талаптар да жоғарылады. Осыған байланысты марганецті жоғары тазалықта бөліп алу әдістерін жан-жақты зерттеу өзекті мәселелердің бірі болып отыр.

Тазалығы жоғары марганец металын алу әдістерінің ішінде электроэкстракция белгілі тәсілдер бәсекелес бола алмайтын ең тиімді әдіс ретінде ерекшеленеді.

Бұл әдіс марганецті тікелей ерітіндііден бөліп алуға және металл тазалығын жоғары деңгейде қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Алайда марганецтің электродтық потенциалының теріс мәнге ие болуы оның сулы ортада электролиз арқылы алынуын күрделендіреді. Сондықтан марганец иондарының катодта тотықсыздану процесіне электролиттің құрамы мен құрамдас бөліктерінің әсері айтарлықтай маңызды фактор болып табылады (Yunyu et al, 2025).

Осыған орай, марганецтің электрохимиялық тотықсыздануы кезінде жүретін катодтық және анодтық процестер вольтамперометриялық әдіс арқылы зерттелді. Бұл мақсатта потенциодинамикалық анодты-катодты және катодты-анодты поляризациялық қисықтар тұрғызылып, электродтық реакциялардың кинетикалық ерекшеліктері мен механизмдері талданды.

Вольтамперометриялық әдістер арқылы металдардың электрохимиялық қасиетін қарастыру және электролиз жүргізу арқылы еріту немесе катод бетінде тотықсыздандырып зерттеу кейінгі әдебиеттерде көптеп кездеседі (Baeshov et al, 2024; Baeshov et al, 2020; Baeshov et al, 2020).

Марганецтің өндірісінде алюмотермиялық, селикотермиялық әдістер кеңінен қолданылғанымен, олар қазіргі талаптарға сай тазалығы жоғары металдық марганецті алуға мүмкіндік бермейді. Зерттеулер көрсеткендей, құрамында қажетсіз қоспалары мөлшері 0,1%-дан аспайтын жоғары тазалықпен марганецті тек электролиз әдісі арқылы алу мүмкін. Бұл әдіс марганец кендерін күкірт қышқылымен сілтісіздендіріп, алынған марганец сульфатын қажетсіз қоспалардан гидролиттік және сульфидтік тазалаудан өткізілген бейтарап ортадағы (pH 7-8,4 аралығында) ерітіндімен электролиз жүргізуге негізделген (Baeshov et al, 2024; Baeshov et al, 2020).

Материалдар мен әдістер. Марганец (II) иондарының сулы ерітіндідегі электрохимиялық қасиеті потенциодинамикалық поляризациялық қисықтар түсіру әдісі арқылы «Autolab PGSTAT» потенциостатында зерттелінді. Вольтамперометрлік зерттеулер катодты-анодты кеңістігі бөлінген үш электродты, термостатталған электролизерде жүргізілді. Тұрақты температураны сақтау мақсатында LT-105a маркалы термостат қолданылды. Салыстырмалы электрод ретінде қаныққан KCl (E=+0,225В 20^0C) (Baeshov et al, 2024; Akhmetov et al, 2002), ерітіндісіне батырылған күміс-хлор электроды және көмекші электрод ретінде ауданы үлкен платина сымы қолданылды. Жұмысшы катод электроды ретінде тефлонмен қапталған диаметрі — 4мм болатын титан және қорғасын сымдары пайдаланылды.

Әрбір тәжірибе алдында жұмысшы электродтарды ұнтақтылығы 2000 болатын түрпі (наждак) материалында тегістеп, майсыздандырып, сумен шайып соңынан фильтр қағазымен мұқият тазаланды.

Титан және қорғасын электродтарында марганецтің тотықсыздану процесін зерттеу үшін келесі электролит құрамы пайдаланылды:

– фон электролит ретінде $[(NH_4)_2SO_4]$ ерітіндісі;

– жұмысшы электролит ретінде $[Mn^{2+}]$ + $[(NH_4)_2SO_4]$ ерітіндісі мен $[Mn^{2+}]$ + H_2O сулы ерітіндісі қолданылды.

Нәтижелер мен талқылаулар. Марганецті электролиттік әдістер арқылы алу

CC BY NC

оның өндіріс тиімділігін айтарлықтай арттырып, осы әмбебап металға деген өсіп келе жатқан сұранысты қанағаттандыруға мүмкіндік берді. Қазіргі уақытта әлемде өндірілетін металдық марганецтің 98%-дан астамы әртүрлі электролиттерді қолдану арқылы электролиз әдісімен алынады (Yampolskiy, 1997; Sukhotina, 1981; Makhanbetov et al, 2021; Fan et al, 2012; Xu et al, 2015; Lu et al, 2014).

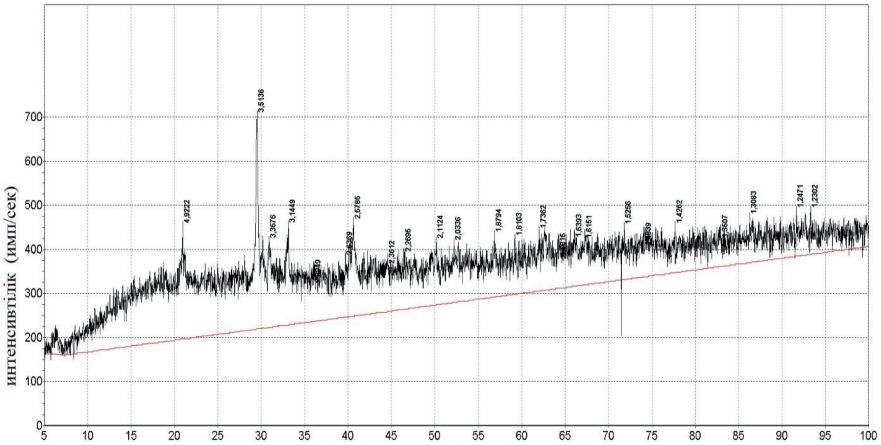
Марганец металын электролиз әдісімен алу электролит құрамына байланысты хлорлы немесе сульфатты жүйелерге бөлінеді. Сульфатты жүйемен салыстырғанда, хлорлы-тұзды жүйенің бірқатар артықшылықтары бар: ол жақсы электрөткізгіштікке ие, ұяшықтағы кернеуі төмен және энергия шығыны аз. Алайда, электролиз процесі кезінде тұз қышқылының булануы мен анодта Cl_2 газының бөлінуі қоршаған ортаны ластап, технологиялық тұрғыдан қолайсыздықтар туғызады.

Қазіргі уақытта шетелдік кәсіпорындардың басым бөлігі электролиз жүргізу үшін $MnSO_4$ ерітінділерін пайдаланады (Wei et al, 2010).

Бұл зерттеу жұмысында марганец (II) иондарының титан және қорғасын электродында тотықсыздану процесі вольтамперометриялық әдісімен потенциодинамикалық поляризациялық қисықтар түсіру арқылы зерттелді. Зерттеу жұмыстарында тазалығы жоғары $MnSO_4$ (анализ үшін таза) тұзы қолданылды. Рентген фазалық талдау нәтижелері біз қолданған $MnSO_4$ үлгісінің айқын кристалдық құрылымға ие екенін көрсетті (1 сурет).

Сонымен, титан электродында марганецтің сульфатты ерітіндісінде катодты тотықсыздану қисығын қарастырғанымызда -1,38 В потенциалында ток максимумы байқалды (2-сурет, 2 және 3 қисықтар). Бұл максимум фон ерітіндісінде тіркелген жоқ (2-сурет, қисық 1). Яғни оның тіркелуі марганец иондарының электрод бетінде тотықсыздану реакциясымен байланысты екенін көрсетеді.

Катодты поляризациялық қисықтарда (2-сурет, 2 және 3 қисықтар) байқалған ток максимумдары (1-реакцияға сәйкес) марганецтің тотықсыздану процесін сипаттайды. Осы потенциалдан кейін, шамамен -1,58 В мәнінен бастап, сутек иондарының тотықсыздануы жүреді.



Сурет 1 - Рентген фазалық талдау нәтижесі

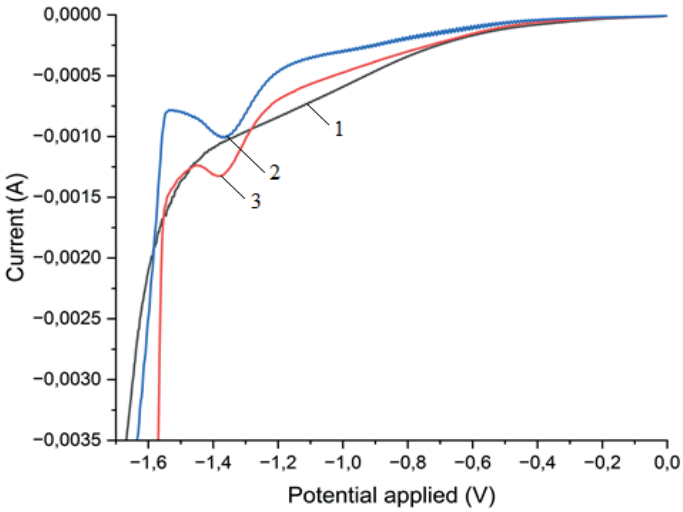
$Mn^{2+} + 2e = Mn^0$ $E^0 = -1,180В$ (1)

$2H^+ + 2e = H_20$ (2)

Сутек бөліну потенциалының неғұрлым теріс мәндерге ығысуы титан электродындағы сутектің бөліну асқын кернеуінің жоғары болуымен түсіндіріледі. Бұл қасиет титан электродында марганецті тотықсыздандыруға тиімді электрод материалы ретінде пайдалануға болатынын дәлелдейді.

Марганец (II) иондарының қорғасын электродында тотықсыздану процесін зерттеу барысында аммоний сульфаты және сулы ерітіндіде екі ток максимумы байқалды (3-сурет, 2 және 3 қисықтар). Бірінші ток максимумы фон электролитінде де тіркелді (3-сурет, 1 қисық) және ол электрод бетінде түзілетін қорғасын сульфатының ($PbSO_4$) тотықсыздану реакциясына сәйкес келеді (Dunaev, 1978; Baeshov et al, 1986). Бұл процесс келесі реакция теңдеуімен түсіндіруге болады:

$PbSO_4 + 2e = Pb^0 + SO_4^{2-}$ E0 = -5,0В (3)



Сурет 2 - Титан электродында түсірілген катодты потенциодинамикалық поляризациялық қисықтар: 1 — Фон электролиті, $[(NH_4)_2SO_4]$ = 150г/л, V = 100мВ/с, t = 25^{0}C; 2 — сулы ерітінді $[Mn^{2+}]$ = 30 г/л, V=100мВ/с, t = 25^{0}C; 3 — $[Mn^{2+}]$ = 30 г/л, $[(NH_4)_2SO_4]$ = 150г/л, V=100мВ/с, t = 25^{0}C

Екінші ток максимумы аммоний сульфаты ерітіндісінде -1,38 В-та, ал сулы ерітіндіде -1,58 В потенциалында байқалды және ол марганец иондарының 1-ші реакция бойынша тотықсыздану процесіне сәйкес келеді.

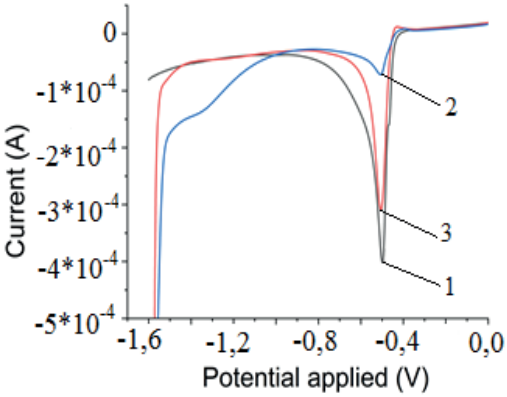
Төртінші суреттен байқағанымыздай сулы ерітіндіде (3-сурет, 3 қисық) марганец иондарының тотықсыздану процесі неғұрлым теріс потенциалдарға (-1,58 В) ығысқан. Ал, аммоний сульфаты ерітіндісінде (3-сурет, 2 қисық) марганецтің тотықсыздануы шамамен -1,0 В басталады және -1,38 В ток максимумы тіркелді. Бұл Mn^{2+} иондары аммоний иондарымен кешен түзуі нәтижесінде тұрақтанаты-

CC BY NC

нын көрсетеді. Жалпы катодты марганец алу процесінде көп жағдайда осы ортада жүргізу ұсынылады (Xiaosan et al, 2021; Xue et al, 2017; Tajima et al, 1976).

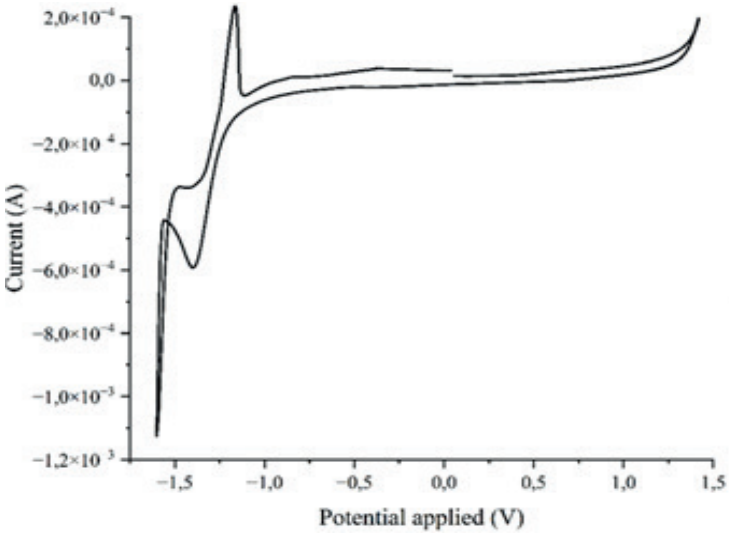
Белгілі әдебиеттерде электролит ерітіндісінің электрөткізгіштігін арттыру, ұяшық кернеуін төмендету және энергия шығынын азайту мақсатында $(NH_4)_2SO_4$ реактивін қолдануға кеңес береді. Сонымен қатар, $(NH_4)_2SO_4$ католит құрамында қышқыл-негіздік буфер ретінде қызмет атқарып, ерітіндінің pH тепе-теңдігін тұрақты ұстап тұруға мүмкіндік беретіндігі айтылған (Wei et al, 2010). Ал, тек сулы орта марганецтің кешенді қосылыстарының түзілмеуінен Mn^{2+} иондары тотықсыздану патенциалы теріс бағытқа ығысуы және сутектің бөліну реакциясының айқын бәсекелестікте жүруімен түсіндіріледі.

Титан электродындағы циклдік анодты-катодты, катодты-анодты потенциодинамикалық поляризациялық қисықтарды зерттеу нәтижесінде анод аймағында электрохимиялық белсенділіктің іс жүзінде байқалмайтыны анықталды (4-сурет). Электрод бетінде оттектің бөлінуі +1,20 В потенциалында тіркелді. Потенциал берілу бағытын анодтан катод бағытына қарай ығыстырғанда -1,30 В потенциалда марганец иондарының 1 реакция бойынша тотықсыздану процесіне сәйкес келетін ток максимумы тіркелді. Ал -1,51 В потенциалында 2 реакция бойынша сутектің бөліну процесі басталады.



Сурет 3 - Қорғасын электродында түсірілген катодты потенциодинамикалық поляризациялық қисықтар: 1 — Фон электролиті, $[(NH_4)_2SO_4]$ = 150г/л, V = 100мВ/с, t = 25^0C; 2 — $[Mn^{2+}]$ = 30 г/л, $[(NH_4)_2SO_4]$ = 150г/л, V=100мВ/с, t = 25^0C; 3 — сулы ерітінді $[Mn^{2+}]$ = 30 г/л, V=100мВ/с, t = 25^0C

Кері сканерлеу кезінде яғни, катодтан анод бағытына қарай ығыстырғанымызда -1,30 В потенциалда анодтық ток тіркелді. Оның табиғаты электрод бетінде жаңадан тотықсызданған металдық марганецтің қайта тотығуымен байланысты екені анықталды.



Сурет 4 - Титан электродында түсірілген циклдік анодты-катодты, катодты-анодты потенциодинамикалық поляризациялық қисықтар: $[Mn^{2+}]$ = 30 г/л, $[(NH_4)_2SO_4]$ = 150г/л, V=100мВ/с, t = 25^0C

Сонымен циклді анодты-катодты және катодты-анодты потенциодинамикалық поляризациялық қисықта титан электродында марганецтің тотықсыздануы және кейіннен қайта тотығу процестері айқын байқалады. Оттегі мен сутектің бөлінуі тиісінше оң және теріс потенциалдарда жүреді.

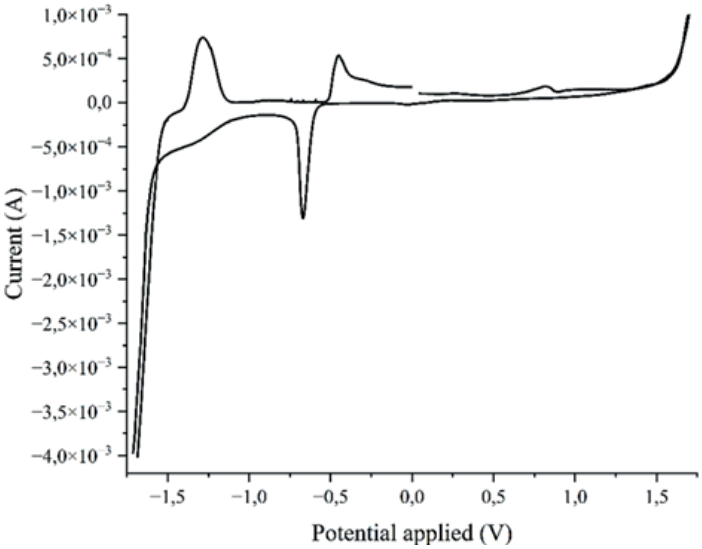
Келесі 5-суретте аммоний сульфаты ерітіндісіне батырылған қорғасын электродында алынған циклдік анодты-катодты, катодты-анодты потенциодинамикалық поляризациялық қисық көрсетілген.

Анодтық аймақта оттегінің бөлінуі тек +1,5 В потенциалда тіркеледі, бұл процестің қорғасын электродында айтарлықтай асқын кернеумен жүретінін көрсетеді. Потенциал беру жылдамдығын анодтан катод бағытына ығысқанда, -0,5 В потенциалда қорғасын сульфатының тотықсыздануына (3-реакцияға сәйкес) сәйкес келетін ток максимумы және -1,3 В потенциалда марганец иондарының тотықсыздануына (1-реакцияға сәйкес) тән ток максимумдары тіркеледі.

Потенциалдың әрі қарай катодтық жаққа ығысуы кезінде -1,52 В-тан бастап сутектің бөліну процесі жүреді.

Кері сканерлеу кезінде (катод → анод) екі анодтық максимум тіркеледі: біріншісі -1,3 В потенциалда байқалып, электрод бетінде жаңадан тотықсызданған элементті марганецтің қайта тотығуымен байланысты; екіншісі -0,5 В потенциалда байқалып, электрод бетінде тотықсызданған металл қорғасынның қайта тотығуы жүретіндігі анықталды.

CC BY NC



Сурет 5 - Қорғасын электродында түсірілген циклдік анодты-катодты, катодты-анодты потенциодинамикалық поляризациялық қисықтар: $[Mn^{2+}]$ = 30 г/л, $[(NH_4)_2SO_4]$ = 150г/л, V=100мВ/с, t = 25^0C

Қорытынды. Жүргізілген зерттеу нәтижелерін қорытындылай келе вольтамперометриялық зерттеу нәтижелері бойынша титан катодында, $(NH_4)_2SO_4$ ерітіндісінде марганец иондарының тотықсыздануы -1,38 В потенциалда токтың айқын максимумымен сипатталады. Титан катодында сутектің бөлінуі анағұрлым теріс потенциалдарда (-1,51 В) басталады, яғни сутектің тотықсыздану потенциалы марганецтің тотықсыздану потенциалынан едәуір солға ығысқан. Мұндай потенциалдық айырмашылық Mn^{2+} иондарының тотықсыздануымен H_2 бөлінуі арасындағы электрокатодтық бәсекелестікті төмендетіп, марганецтің селективті әрі тұрақты тотықсыздануына мүмкіндік береді. Сонымен қатар, титан электродында циклдік анодты-катодты, катодты-анодты сканерлеу кезінде жаңадан тотықсызданған металдық марганецтің қайта тотығуымен байланысты айқын анодтық ток максимумы тіркелді. Бұл процестің қайтымдылығын және электрод бетінде жаңа тотықсызданған металдың электрод бетімен жақсы жанасуын дәлелдейді. Ал, қорғасын электродында марганец иондарының тотықсыздануымен қатар электрод бетінде қорғасын қосылыстары ($PbSO_4$) түзіліп, оның қорғасын металына дейін тотықсыздануы орын алатындығы анықталды. Бұл электрод бетінде таза өнімді алуды шектеумен қатар қосымша шығынның жүруін көрсетеді. Осы нәтижелерге сүйене отырып, титан электродын марганецтің электроэкстракциясы үшін тиімді катодтық материал ретінде ұсынуға болады.

Әдебиеттер

Baeshov A., Figurinaite I.V., Beybitova A.D., Zhurinov M.Zh. Katodnoe povedenie shestivalentnogo tellura v sernokislom rastvore na tverdykh elektrodakh [Cathodic Behavior of Hexavalent Tellurium in Sulfuric Acid Solution on Solid Electrodes], Izvestiya VUZov. Tsvetnaya Metallurgiya, 1986. — No. 4. — P. 117—119. (In Russian).

Dunaev Y.D. Nerastvorimye anody iz splavov na osnove svintsa [Insoluble Anodes from Lead-Based Alloys]. — Alma-Ata, Nauka KazSSR, 1978. — P. 316. (In Russian).

Fan X., Xi S., Sun D., Liu Z., Du J., Tao Ch. (2012) Show more Mn-Se interactions at the cathode interface during the electrolytic-manganese process, Hydrometallurgy, 24-29. DOI 10.1016/j.hydromet.2012.07.006.

Lu J., Dreisinger D., Glückт T. (2014) Manganese electrodeposition - A literature review, Hydrometallurgy. — Vol. 141. — 105-111. DOI 10.1016/j.hydromet.2013.11.002.

Makhanbetov A.B., Myrzabekov B.E., Gaipov T.E., Tazhibayev A., Abduvaliyeva U.A. (2021) Electrochemical behavior of manganese dioxide when a part of the composite electrode and electrochemical leaching of manganese ore in a sulfuric acid medium, Rasayan J. Chem., 14. — No. 4. — P. 2202-2208. DOI 10.31788/RJC.2021.1446491.

Tajima S., Baba N. & Midorikawa T. (1976) Electrodeposition of high purity manganese from low temperature (−16° C) chloride electrolyte. J. Appl, Electrochem. — Vol. 6. — 243-250. DOI 10.1007/BF00616147.

Wei Q., Ren X., Du J., Wei S., Hu S.R. (2010) Study of the electrodeposition conditions of metallic manganese in an electrolytic membrane reactor, Minerals Engineering. — Vol. 23. — Issue 7. — 578-586. DOI 10.1016/j.mineng.2010.01.009.

Xiaosan S., Jie Z., Boyang S., Sanfan W., Nan W.U. (2021) Electrodeposition of Manganese Metal and Co-production of Electrolytic Manganese Dioxide Using Single-membrane Double-chamber Electrolysis, Electrochemistry. — Vol. 89. — No. 5. — P. 447-454. DOI 10.5796/electrochemistry.21-00060.

Xu F., Dan Zh., Zhao W., Han G., Sun Z., Xiao K., Jiang L., Duan N. (2015) Electrochemical analysis of manganese electrodeposition and hydrogen evolution from pure aqueous sulfate electrolytes with addition of SeO_2, JEAC. — Vol. 741. — 149-156. DOI 10.1016/j.jelechem.2015.01.027.

Xue J.R., Zhong H., Wang S. et al. (2017) Influence of tetraborate anions on manganese electrodeposition in an anion-exchange membrane electrolysis reactor, Ionics. — Vol. 23. — P. 177-189. DOI 10.1007/s11581-016-1793-z.

Yunyu L., Xuhai P., Bahman A.H. (2025) Advancements in Sustainable Electrolytic Manganese Recovery: Techniques, Mechanisms, and Future Trends, Recycling. — Vol. 10(1). — 1—46. DOI 10.3390/recycling10010026.

Ахметов Т.Г., Порфирьева Р.Т., Гайсин Л.Г., Ахметова Л.Т., Хацринов А.И. (2002) Химическая технология не органических веществ. — М., Высшая школа. — 533 с.

Баешов А., Баешова А.К., Турлыбекова М.Н., Мырзабеков Б.Э. (2024) Уран өндірісіндегі жерасты шаймалау процесінің тиімділігін арттыру үшін үшвалентті темірді қалпына келтірудің электрохимиялық әдісі, Қазақстанның химия журналы. — 1(85). — С. 142-153. DOI 10.51580/2024-1.2710-1185.14.

Баешов А., Мырзабеков Б.Э. (2020) Стационарлы емес токпен поляризацияланған платина электродының қышқылды ортадағы электрохимиялық қасиеті, Қазақстанның химия журналы. — 4(72). — С. 154-165.

Баешов А., Мырзабеков Б.Э. Абдувалиева У. (2020) Селенит-иондары бар тұз қышқылды мыс (II) ерітіндісінде мыс электродтарын өндірістік айнымалы токпен поляризациялау кезінде селен ұнтақтарының түзілу заңдылықтары, Қазақстанның химия журналы. — 4(72). — С. 48-59.

Сухотина А.М. (1981) Справочник по электрохимии / под ред. Сухотина А.М. Л., Химия. — 488 с.

Яампольский А.М. (1997) Электролитическое осаждение блогородных и редких металлов. Изд. 4-е, перераб. и доп. — Л., «Машиностроение». — 96 с.

References

Akhmetov T.G., Porfiryeva R.T., Gaisin L.G., Akhmetova L.T., Khatsrinov A.I. Khimicheskaya tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv [Chemical Technology of Inorganic Substances]. — Moscow, Vysshaya shkola, 2002. — P. 533. (In Russian).

Baeshov A., Baeshova A.K., Turlybekova M.N., Myrzabekov B.E. Uran ondirisindegi zherasty shaimalau protsesinin tiimdiligin arttyru ýshin ýshvalentti temirdi qalpyna qeltirudin ehlektrokhimiyalyk adisi [Electrochemical Method for the Reduction of Trivalent Iron to Enhance the Efficiency of the In-Situ

CC BY NC

Leaching Process in Uranium Production], Journal of Chemistry of Kazakhstan, 2024. — 1(85). — P. 142-153. DOI 10.51580/2024-1.2710-1185.14. (In Kazakh).

Baeshov A., Figurinaite I.V., Beibitova A.D., Zhurinov M.ZH. (1986) Katodnoe povedeniya shestivalentnogo tellura v sernokislom rastvore na tverdykh ehlektrodakh. Izvestiya vuzov, Tsvetnaya metallurgiya. — No. 4. — P. 117-119. (In Russian).

Baeshov A., Myrzabekov B.E. Ctatsionarly emes tokpen polyarizatsiyalangan platina elektrodynyn qyshqyldy ortadagy elektrokhimiyalyq qasieti [Electrochemical Properties of a Platinum Electrode in an Acidic Medium under Non-Stationary Current Polarization], Journal of Chemistry of Kazakhstan, 2020. — 4(72). — P. 154-165. (In Kazakh).

Baeshov A., Myrzabekov B.E., Abduvalieva U. Selenit-iondary bar tuz qyshqyldy mys (II) eritindisinde mys elektrodtaryn ondiristik ainymaly tokpen polyarizatsiyalau kezinde selen untaktarynyn tuzilui zandylyktary [Regularities of Selenium Powder Formation during Polarization of Copper Electrodes by Industrial Alternating Current in Hydrochloric Acid Copper (II) Solutions Containing Selenite Ions], Journal of Chemistry of Kazakhstan, 2020. — 4(72). — P. 48—59. (In Kazakh).

Dunaev YU.D. (1978) Nerastvorimye anody iz splavov na osnove svintsa. Alma- Ata., «NaukA» KaZSSR. — P. 316. (In Russian).

Fan X., Xi S., Sun D., Liu Z., Du J., Tao Ch. (2012) Show more Mn-Se interactions at the cathode interface during the electrolytic-manganese process, Hydrometallurgy. — P. 24-29. DOI 10.1016/j.hydromet.2012.07.006. (In English).

Lu J., Dreisinger D., Glückт T. (2014) Manganese electrodeposition - A literature review, Hydrometallurgy. — Vol. 141. — P. 105-111. DOI 10.1016/j.hydromet.2013.11.002. (In English).

Makhanbetov A.B., Myrzabekov B.E., Gaipov T.E., Tazhibayev A., Abduvaliyeva U.A. (2021) Electrochemical behavior of manganese dioxide when a part of the composite electrode and electrochemical leaching of manganese ore in a sulfuric acid medium, Rasayan J. Chem. — 14. — No. 4. — P. 2202-2208. DOI 10.31788/RJC.2021.1446491. (In English).

Sukhotina A.M. Spravochnik po elektrokhimii [Handbook of Electrochemistry]. Ed. by A.M. Sukhotina. Leningrad, Khimiya, 1981. — P. 488. (In Russian).

Tajima S., Baba N. & Midorikawa T. (1976) Electrodeposition of high purity manganese from low temperature (−16° C) chloride electrolyte. J. Appl, Electrochem. — Vol. 6. — P. 243-250. DOI 10.1007/BF00616147. (In English).

Wei Q., Ren X., Du J., Wei S., Hu S.R. (2010) Study of the electrodeposition conditions of metallic manganese in an electrolytic membrane reactor, Minerals Engineering. — Vol. 23. — Issue 7. — P. 578-586. DOI 10.1016/j.mineng.2010.01.009. (In English).

Xiaosan S., Jie Z., Boyang S., Sanfan W., Nan W.U. (2021) Electrodeposition of Manganese Metal and Co-production of Electrolytic Manganese Dioxide Using Single-membrane Double-chamber Electrolysis, Electrochemistry. — Vol. 89. — No. 5. — P. 447-454. DOI 10.5796/electrochemistry.21-00060. (In English).

Xu F., Dan Zh., Zhao W., Han G., Sun Z., Xiao K., Jiang L., Duan N. (2015) Electrochemical analysis of manganese electrodeposition and hydrogen evolution from pure aqueous sulfate electrolytes with addition of SeO_2, JEAC. — Vol. 741. — P. 149-156. DOI 10.1016/j.jelechem.2015.01.027. (In English).

Xue J.R., Zhong H., Wang S. et al. (2017) Influence of tetraborate anions on manganese electrodeposition in an anion-exchange membrane electrolysis reactor, Ionics. — Vol. 23. — P. 177—189. DOI 10.1007/s11581-016-1793-z. (In English).

Yampolskiy A.M. Elektroliticheskoe osazhdenie blagorodnykh i redkikh metallov [Electrolytic Deposition of Noble and Rare Metals]. 4th ed., revised and expanded. Leningrad, Mashinostroenie, 1997. — P. 96. (In Russian).

Yunyu L., Xuhai P., Bahman A.H. (2025) Advancements in Sustainable Electrolytic Manganese Recovery: Techniques, Mechanisms, and Future Trends, Recycling. — Vol. 10(1). — 1-46. DOI 10.3390/recycling10010026. (In English).

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 4.
Number 356 (2025), 298–308

https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.401

ҒТАХР 31.25.19
ӘОК 667.621.66:541.12038.2

©A.S. Darmenbayeva[1]*, G.M. Zhussipnazarova[1], R. Rajasekharan[2], Zh.B. Mukazhanova[3], V.A. Rube[4], 2025.
[1] M.Kh. Dulaty Taraz University, Taraz, Kazakhstan;
[2] Providence College of Engineering, Kerala, India;
[3] S. Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan;
[4] M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan.
E-mail: maral88.ad@gmail.com

BIOCOATINGS BASED ON FLAX STEM CELLULOSE AND THEIR PROPERTIES

Darmenbayeva Akmaral — PhD, in Chemistry, Associate Professor of the Department of Chemistry and Chemical Technology, M.Kh. Dulaty Taraz University, Taraz, Kazakhstan,
E-mail: maral88.ad@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2974-0398;
Zhussipnazarova Gaziza — Doctoral student of the M.Kh. Dulaty Taraz University, Taraz, Kazakhstan,
E-mail: jgm.092016@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5175-5169;
Rajasekharan Reshmy — PhD in Chemistry, Associate Professor of the Department of Natural Sciences and Humanities, Providence Engineering College, India,
E-mail: reshmypkumar@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2091-0135;
Mukazhanova Zhazira — PhD, Higher School of IT and Natural Sciences of the S. Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
E-mail: mukazhanovazhb@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4635-8000;
Rube Varvara — Master of Chemistry, M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan,
E-mail: rube_va@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1420-0532.

Abstract. In recent years, the development of environmentally friendly, highly biocompatible, and renewable materials based on raw materials has become one of the most pressing scientific areas in biomedicine and materials science. In particular, the production of value-added products through the processing of agricultural waste is closely linked to the concept of sustainable development. In this context, flax stems, a cellulose-rich, accessible, and renewable natural resource, are considered a promising raw material for the production of environmentally friendly biomaterials. The aim of this study was to synthesize biological coatings based on cellulose obtained from flax stems and comprehensively evaluate their structural, functional, and biomedical properties. The research methods included cellulose extraction and its composition with natural

polymers such as chitosan, sodium alginate, and glycerol. The physicomechanical properties, hydrophilicity, and functional characteristics of the resulting biocoatings were studied. Curcumin was added to the composition to enhance biological activity. The study resulted in the production of biological coatings with high mechanical strength, good hydrophilicity, biocompatibility, and pronounced antimicrobial activity. The synergistic effect of chitosan and curcumin was shown to enhance the antibacterial properties of the resulting materials. The practical significance of the study lies in the potential use of the synthesized biofilms in wound dressings, skin regeneration coatings, and tissue engineering. These results provide a scientific basis for enhancing the medical safety of the resulting materials, improving their functional stability, and adapting them for future clinical use. Furthermore, the study provides practical recommendations for the development of environmentally friendly biomaterials and the efficient use of agricultural waste, which will be important for the future.

Keywords: flax stem, cellulose, chitosan, biodegradation, biocoating

©А.С. Дарменбаева[1]*, Г.М. Жусипназарова[1], R. Rajasekharan[2], Ж.Б. Мукажанова[3], В.А. Рубе[4], 2025.

[1]М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, Қазақстан;
[2]Провиденс инженерлік колледжі, Керала, Үндістан;
[3]С.Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен, Қазақстан;
[4]М.Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавл, Қазақстан.
E-mail: maral88.ad@gmail.com

ЗЫҒЫР САБАҒЫНАН АЛЫНҒАН ЦЕЛЛЮЛОЗА НЕГІЗІНДЕГІ БИОЖАБЫНДАР ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ҚАСИЕТТЕРІ

Дарменбаева Ақмарал — Химия мамандығы бойынша PhD, М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, «Химия және химиялық технология» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Тараз, Қазақстан,
E-mail: maral88.ad@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2974-0398;
Жусипназарова Газиза — М.Х. Дулати атындағы Тараз университетінің докторанты, Тараз, Қазақстан,
E-mail: jgm.092016@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5175-5169;
Rajasekharan Reshmy — Химия мамандығы бойынша PhD, қауымдастырылған профессор, Жаратылыстану және гуманитарлық ғылымдар бөлімі, Провиденс инженерлік колледжі, Үндістан,
E-mail: reshmypkumar@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2091-0135;
Мукажанова Жазира — PhD, IT және жаратылыстану ғылымдары жоғары мектебі, С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен, Қазақстан,
E-mail: mukazhanovazhb@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4635-8000;
Рубе Варвара — химия магистрі, М.Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті «Химия және химиялық технологиялар» кафедрасы, Петропавл, Қазақстан,
E-mail: rube_va@mail.ru; ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1420-0532.

Аннотация. Соңғы жылдары экологиялық қауіпсіз, биосәйкестігі жоғары және жаңартылатын шикізатқа негізделген материалдарды әзірлеу биомедицина мен

материалтану салаларындағы өзекті ғылыми бағыттардың біріне айналды. Әсіресе ауылшаруашылық қалдықтарын қайта өңдеу арқылы қосымша құндылығы бар өнімдер алу тұрақты даму тұжырымдамасымен тығыз байланысты. Осы тұрғыда целлюлозаға бай, қолжетімді және жаңартылатын табиғи ресурс болып табылатын зығыр сабағы экологиялық таза биоматериалдар алу үшін перспективалы шикізат ретінде қарастырылады. Бұл зерттеудің мақсаты – зығыр сабағынан алынған целлюлоза негізінде биологиялық жабындарды синтездеу және олардың құрылымдық, функционалдық әрі биомедициналық қасиеттерін кешенді түрде бағалау. Зерттеу әдістері ретінде целлюлозаны экстракциялау, оны хитозан, натрий альгинаты және глицерин сияқты табиғи полимерлермен композициялау қолданылды. Алынған биожабындардың физика-механикалық қасиеттері, гидрофильділігі және функционалдық сипаттамалары зерттелді. Биологиялық белсенділікті арттыру мақсатында композиция құрамына куркумин енгізілді. Зерттеу нәтижесінде жоғары механикалық беріктікке, жақсы гидрофильділікке, биосәйкестікке және айқын антимикробтық белсенділікке ие биологиялық жабындар алынды. Хитозан мен куркуминнің синергетикалық әсері алынған материалдардың бактерияға қарсы қасиеттерін күшейтетінін көрсетті. Зерттеудің практикалық маңызы синтезделген биожабындардың жара таңатын материалдар, тері регенерациясына арналған жабындар және тін инженериясы саласында қолдану мүмкіндігімен айқындалады. Бұл нәтижелер алынған материалдардың медициналық қауіпсіздігін арттыруға, функционалдық тұрақтылығын жақсартуға және болашақта клиникалық қолданбаларға бейімдеуге ғылыми негіз қалыптастырады. Сонымен қатар зерттеу экологиялық таза биоматериалдар өндірісін дамытуға және ауылшаруашылық қалдықтарын тиімді пайдалануға бағытталған практикалық ұсынымдар беруге мүмкіндік береді болашақта маңызды.

Түйін сөздер: зығыр сабағы, целлюлоза, хитозан, биоыдырау, биожабын

©А.С. Дарменбаева[1]*, Г.М. Жусипназарова[1], R. Rajasekharan[2], Ж.Б. Мукажанова[3], В.А. Рубе[4], 2025.

[1] Таразский университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан;
[2] Инженерный колледж Провиденса, Керала, Индия;
[3] Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан;
[4] Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан.
E-mail: maral88.ad@gmail.com

БИОПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ СТЕБЛЯ ЛЬНА И ИХ СВОЙСТВА

Дарменбаева Акмарал — PhD по химии, ассоциированный профессор кафедры химии и химической технологии Таразского университета имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан,

CC BY NC

E-mail: maral88.ad@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2974-0398;
Жусипназарова Газиза — Докторант Таразского университета им. М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан,
E-mail: jgm.092016@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5175-5169;
Rajasekharan Reshmy — PhD по химии, ассоциированный профессор кафедры естественных и гуманитарных наук Инженерного колледжа Провиденса, Индия,
E-mail: reshmypkumar@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2091-0135;
Мукажанова Жазира — PhD, Высшая школа информационных технологий и естественных наук, Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан,
E-mail: mukazhanovazhb@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4635-8000;
Рубе Варвара — магистр химии Северо-Казахстанского университета имени М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан,
E-mail: rube_va@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1420-0532.

Аннотация. В последние годы разработка экологически безопасных, высокобиосовместимых и возобновляемых материалов на основе сырья стала одним из наиболее актуальных научных направлений в области биомедицины и материаловедения. В частности, получение продуктов с добавленной стоимостью путем переработки сельскохозяйственных отходов тесно связано с концепцией устойчивого развития. В этом контексте стебли льна, являющиеся богатым целлюлозой, доступным и возобновляемым природным ресурсом, рассматриваются как перспективное сырье для получения экологически чистых биоматериалов. Цель данного исследования — синтез биологических покрытий на основе целлюлозы, полученной из стеблей льна, и всесторонняя оценка их структурных, функциональных и биомедицинских свойств. Методы исследования включали экстракцию целлюлозы, ее композиция с природными полимерами, такими как хитозан, альгинат натрия и глицерин. Были изучены физико-механические свойства, гидрофильность и функциональные характеристики полученных биопокрытий. Для повышения биологической активности в состав был введен куркумин. В результате исследования были получены биологические покрытия с высокой механической прочностью, хорошей гидрофильностью, биосовместимостью и выраженной антимикробной активностью. Было показано, что синергетический эффект хитозана и куркумина усиливает антибактериальные свойства полученных материалов. Практическая значимость исследования определяется возможностью использования синтезированных биопленок в области перевязочных материалов для ран, покрытий для регенерации кожи и тканевой инженерии. Эти результаты формируют научную основу для повышения медицинской безопасности полученных материалов, улучшения их функциональной стабильности и адаптации к клиническому применению в будущем. Кроме того, исследование позволяет дать практические рекомендации, направленные на развитие производства экологически чистых биоматериалов и эффективного использования сельскохозяйственных отходов, что важно в будущем.

Ключевые слова: стебель льна, целлюлоза, хитозан, биодеградация, биопокрытие

Кіріспе. Қазіргі таңда қоршаған ортаға зиян келтірмейтін, биологиялық ыдырайтын материалдарға деген сұраныс артып келеді. Пластикалық қалдықтардың ұзақ уақыт ыдырамайтындығы және экожүйеге келтіретін зияны ғалымдарды жаңа, экологиялық балама іздеуге итермелеуде (Geyer et al., 2017). Бұл тұрғыда целлюлоза мен хитозан негізіндегі биопластиктер келешегі зор материалдардың қатарына жатады (Abdul Khalil et al., 2012).

Целлюлоза — өсімдіктер құрамындағы ең кең таралған полисахарид, ал хитозан — шаянтәрізділердің хитинінен алынатын табиғи полимер (Rinaudo, 2006). Бұл екі биополимердің ұштасуы арқылы алынған материалдар жоғары механикалық беріктікке, су ұстау қабілетіне және экологиялық қауіпсіздікке ие. Сонымен қатар, олардың беткі модификациясы немесе құрамына функционалды қоспалар қосу арқылы биомедициналық қасиеттерін жақсартуға болады (Ahmed et al., 2015; Kumar & Han, 2019).

Зерттеу жұмысы аясында целлюлоза зығыр мен арпа өсімдіктерінен лабораториялық жағдайда сілтілеу, қышқылдық өңдеу және ағарту әдістері арқылы бөлініп алынды. Бұл тәсілдер лигнин мен гемицеллюлозадан тиімді арылуға мүмкіндік беріп, таза целлюлоза алуға жағдай жасайды (Reshmy et al., 2015). Алынған целлюлоза хитозанмен біріктіріліп, әртүрлі пластификаторлар қосу арқылы биопласт үлгілері синтезделді (Ghanbarzadeh et al., 2015).

Бұл биопластик материал жараларды таңу, тін регенерациясын жылдамдату, бактерияға қарсы таңғыштар жасау сияқты биомедициналық мақсаттарға бағытталған (Dutta et al., 2004; Li et al., 2018). Оның құрамына табиғи антибактериалды агент ретінде куркумин қосылады. Куркумин – куркума өсімдігінен алынатын табиғи қосылыс, ол кең спектрлі антимикробтық әсерімен ерекшеленеді (Hewlings & Kalman, 2017).

Осылайша, хитозан мен целлюлоза негізіндегі биопласт өндіру – экологиялық және биомедициналық тұрғыдан маңызды бағыт болып табылады. Бұл зерттеу нәтижелері биоматериалдарды клиникалық мақсатта қолдануға жол ашуы мүмкін (Avérous & Pollet, 2012).

Материалдар мен әдістер. *Зығыр мен арпа сабағынан целлюлоза алу әдісі.* Зертханалық жағдайда өсімдік шикізатынан целлюлоза өндіру үдерісі әдетте үш негізгі кезеңнен тұрады: сілтілік өңдеу, қышқылдық тазарту және ағарту. Алғашқы сатыда лигнин мен гемицеллюлозаны бөліп алу үшін 2% натрий гидроксиді (NaOH) ерітіндісі қолданылады. Бұл өңдеу 120°C температурада, 20 бар қысымда автоклав ішінде шамамен 40 минут жүргізіледі (Reshmy et al., 2015). Одан кейінгі қышқылдық тазарту кезеңінде 20% азот қышқылы (HNO_3), 45% сірке қышқылы (CH_3COOH) және дистилденген судан тұратын 2:2:1 қатынасындағы қоспа пайдаланылады. Мұндай қоспа целлюлозадағы лигнин мен гемицеллюлозаның қалдықтарын толық тазартуға мүмкіндік береді. Соңғы кезеңде алынған целлюлоза 1% ағартқыш ерітіндімен өңделіп, магниттік араластырғышта 5 сағат бойы үздіксіз араластырылып ағартылады.

Биологиялық жабындарды әзірлеу. Биологиялық жабындар целлюлозаны хитозан және полиэтиленгликольмен (ПЭГ) біріктіру арқылы синтезделеді.

CC BY NC

Хитозан жабынның антимикробтық белсенділігін күшейтіп, оның механикалық беріктігін жақсартады (Kumar et al., 2019). Ал ПЭГ материалдың икемділігін арттырып, жара бетіне жақсы жабысып, біркелкі орналасуын қамтамасыз етеді (Li et al., 2018). Целлюлоза, хитозан және ПЭГ биосәйкестілігі жоғары табиғи компоненттер болып саналады және адам ағзасында иммундық реакция тудырмайды (Rinaudo, 2006). Сонымен қатар, хитозан бактериялар мен зеңдердің өсуін тиімді тежейтін биологиялық белсенді полимер ретінде белгілі (Ghanbarzadeh et al., 2015). Осындай табиғи полимерлерге негізделген жабындар 30–60 күн ішінде толық биодеградацияға ұшырап, қоршаған ортаға зиян келтірмейді (Avérous & Pollet, 2012).

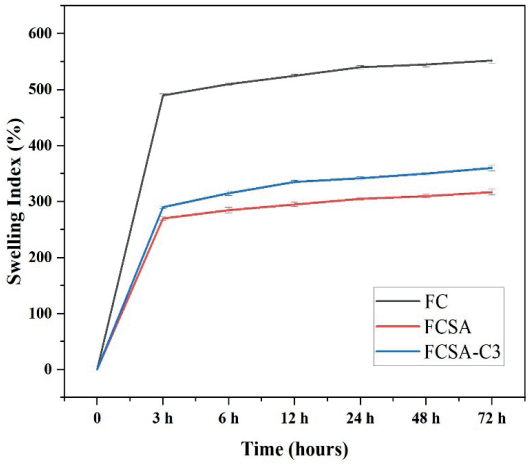
Нәтиже мен талқылау. *Биопластиктердің ылғалды сіңіру қабілеті.* Зығыр сабағынан алынған целлюлоза негізіндегі биопластикалық үлгінің сыртқы көрінісі 1-суретте келтірілген.

Сурет 1. Зығыр сабағынан алынған целлюлозадан синтезделген биопласт үлгісі.

Зығыр сабағынан алынған целлюлоза негізіндегі биопласт үлгісі сырт көзге біртекті, куркумаға тән сары-қызғылт реңкті материал түрінде байқалады. Куркуминнің қосылуына байланысты үлгінің түсі қанық әрі тұрақты. Беткі қабаты жылтыр, тегіс және тығыз, құрылымы біркелкі. Мұндай сыртқы көрініс целлюлозаның жоғары тазалық деңгейі мен биополимер компоненттерінің біртекті таралуын көрсетеді.

Целлюлоза мен хитозан негізіндегі биопластиктердің ісіну қабілеті олардың құрылымына, қолданылған шикізат көзіне және қосылған пластификатор түріне байланысты өзгереді. Бұл қасиет биопластиктердің жара таңу материалдары ретінде қолданылуы үшін маңызды, себебі жара аймағындағы ылғалды сақтау мен реттеу процестеріне әсер етеді.

Осы зерттеуде біз зығыр талшығынан (FC) алынған целлюлозадан жасалған биопластиктердің ісіну деңгейін 3, 6, 12, 24, 48 және 72 сағат аралығында зерттелді. Әртүрлі модификацияланған үлгілердің — таза целлюлоза-хитозаннан тұратын (FC), сонымен қатар натрий альгинаты (FCSA,) және куркума қосылған (FCSA-C3,) үлгілердің — суды сіңіру қабілеттері салыстырылды (Сурет 2).



Сурет 2. Биожабынды үлгілердің ылғалды сіңіру пайыздық көрсеткіші.

Суреттен көріп отырғанымыздай, FC (бастапқы зығыр целлюлозасы) үлгілердің ішіндегі ең ылғал сіңіру қабілеті жоғары, өйткені құрамында тек табиғи целлюлоза бар, ол – гидрофильді материал. Бірақ, құрылымы өзгермегендіктен, суды ұстап тұру қабілеті шектеулі.

FCSA (1% хитозан) үлгісінің ылғалды таптқытлығы сылстырмалы түрде үлгілердің ішіндегі ең төмені. Бұның себебі, хитозан жартылай катионды полисахарид, ол су сіңіру қабілетін аздап шектейді. Бұл үлгіде ылғал сіңіру FC-мен салыстырғанда төмендеуі мүмкін, себебі хитозан матрицаны тығызырақ етеді. Ал, натрий альгинаты – гидрофильді, глицерин – пластификатор, ылғалды ұстап тұруға көмектеседі.

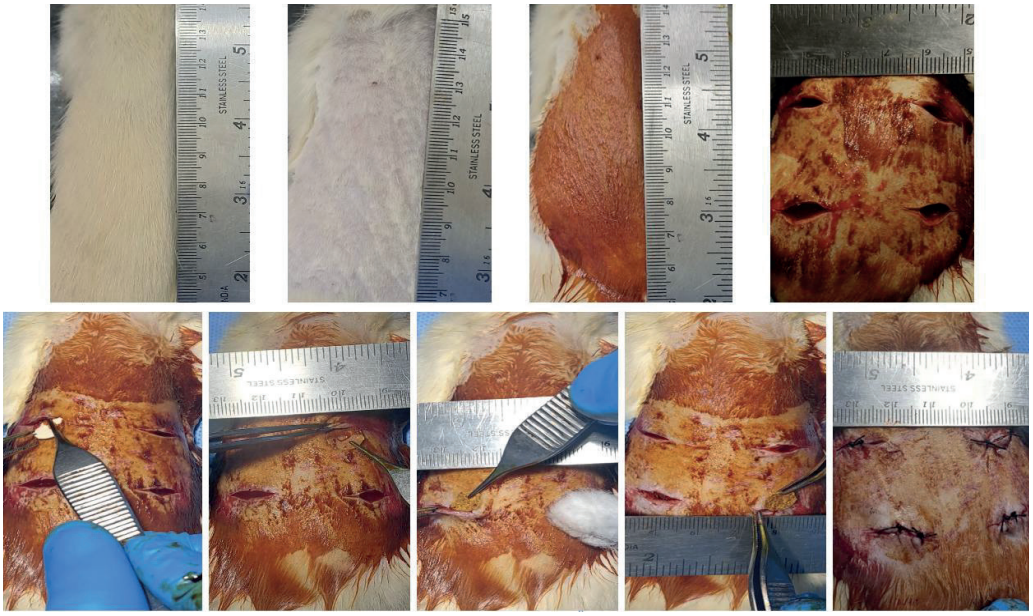
FCSA-C3 (3% хитозан) үлгісінің ылғалды салыстырмалы түрде FCSA үлгісінен көп болуы, екі себебі болуы мүмкін. Біріншісі, хитозан концентрациясының артуы суды тарту қабілетін күшейтуі. Хитозан молекуласында амин топтары (–NH_2) бар, олар сумен сутектік байланыстар түзе алады. 3% хитозан – бұл 1%-ға қарағанда көбірек гидрофильді функционалды топтардың болуымен түсіндіріледі. Нәтижесінде суды тарту қабілеті күшейіп, FCSA-C3 көбірек ылғал сіңіргенін графиктен байқауға болады. Екінші себебі, ол тор құрылымының өзгеруі. Кей жағдайларда, хитозанның артуы материалды тығыздаудың орнына кеуектілікті арттыруы мүмкін. Бұл жағдайда су үлгінің ішіне жеңіл еніп, сіңірілу жылдамдығы мен көлемі ұлғаяды.

Осылайша, ылғал сіңіру қабілетіндегі айырмашылықтар материал құрамындағы полимерлердің қасиеттерімен түсіндіріледі. Таза целлюлоза ең жоғары мән көрсетті. 1% хитозан қосылған үлгідегі тығыз матрица судың өтуін шектеп, көрсеткішті төмендетті. Ал 3% хитозан үлгісінде гидрофильді топтардың көбеюі және құрылымның өзгеруі нәтижесінде ылғал тарту артқаны байқалды. Бұл хитозан мөлшерін өзгерту арқылы биоматериалдың суға қатысты қасиеттерін тиімді реттеуге болатынын көрсетеді.

Биомедициналық зерттеу: үлгінің жара жазуға әсерін in vivo бағалау. Зығыр

CC BY NC

талшығынан алынған целлюлоза мен хитозан негізінде синтезделген биопласт үлгісінің жара жазу тиімділігін бағалау мақсатында Pushpagiri Research Institute (Керала, Үндістан) базасында зертханалық жануарларға тәжірибелік зерттеу жүргізілді. Биоматериалдың биологиялық қауіпсіздігін, қабыну реакциясына әсерін және тіндердің қалпына келу жылдамдығын анықтау үшін модель ретінде *Mus musculus* зертханалық тышқандары қолданылды (Сурет 3).



Сурет 3. Биопласт үлгісі көмегімен зертханалық тышқандарының (*Mus musculus*) тері жарасын емдеуге жүргізілген тәжірибе нәтижелері.

Жануарларға тәжірибе басталғанға дейін барлық ветеринарлық талаптарға сәйкес жағдай жасалды. Әрбір тышқанның арқа аймағы қырқылып, антисептикпен өңделгеннен кейін 1 × 1 см көлемінде стандартталған тері жарасы жасалды. Бұл тәсіл биоматериалдың жара бетімен тікелей әрекеттесуін, жасушалық жауаптың ерекшеліктерін және регенерация динамикасын нақты бағалауға мүмкіндік береді.

Тәжірибе тобына енгізілген FCSA-C3 үлгісі зығыр целлюлозасы, хитозан, натрий альгинаты және куркуминнен тұратын биокомпозициялық пленка ретінде жараға тікелей таңылды. Хитозанның антимикробтық белсенділігі, натрий альгинатының гидрогель түзуші қасиеттері және куркуминнің табиғи қабынуға қарсы әсері материалдың жара жазу процесін жеделдетуге ықпал етеді деп болжанды.

Бақылау тобында жара беті ашық қалдырылды немесе дәстүрлі стерильді дәке таңғышымен өңделді. Бұл биопласттың тиімділігін стандартты әдістермен салыстыруға мүмкіндік берді. Емдеу кезеңі 7 күнге созылды, осы уақыт ішінде күнделікті визуалды бақылау жүргізіліп, жараның беткі аумағы, қабыну дәрежесі, экссудат мөлшері және грануляциялық тіннің қалыптасуы тіркелді.

Алғашқы күндері FCSA-C3 биоматериалы салынған жараларда қабыну белгілерінің төмен болуы, экссудацияның азаюы және тіндердің ерте грануляциялануы байқалды. Бұл әсер хитозан мен куркуминнің табиғи биологиялық белсенділігімен, сондай-ақ альгинаттың ылғалды ұстап тұратын қасиетімен түсіндіріледі. Бақылау тобындағы жануарларда жараның беті салыстырмалы түрде баяу тартылып, қабыну құбылыстары айқын көрінді.

Тәжірибе барысында зығыр целлюлозасы негізінде дайындалған биопласттың жара жазу процесіне әсері 3-, 5- және 7-күндері бақылауға алынды. Зерттеу нәтижелері материалдың қабынуды төмендетуге және тіндердің қалпына келуін жеделдетуге айтарлықтай ықпал ететінін көрсетті.

Тәжірибенің 3-күні биопластпен таңылған жараларда қабыну деңгейінің айтарлықтай төмендегені байқалды. Тері бетіндегі қызару мен ісіну бақылау тобымен салыстырғанда әлдеқайда әлсіз болды, бұл материалдың алғашқы күннен бастап қабынуға қарсы әсер көрсететінін дәлелдеді. Мұндай әсер, ең алдымен, биопласт құрамындағы куркуминнің табиғи антибактериалды және қабынуды басатын қасиеттерімен байланысты.

5-күні жара бетінде эпителизация процесінің басталғаны анық көрінді. Жаңа тері жасушаларының түзілуі, тіндердің тығыздануы және грануляцияның қалыптасуы FCSA-C3 биопластымен өңделген үлгілерде бақылау тобынан жылдам жүрді. Бұл кезеңде хитозан мен натрий альгинатының рөлі ерекше байқалды, өйткені олар жарада ылғалдың тұрақты сақталуына жағдай жасап, жасушалардың миграциясы мен бөлінуін жеделдетті.

7-күні биопластпен таңылған жараларда тіндердің қалпына келуінің айқынырақ жүретіні анықталды. Жараның жиектері тарылып, беткі қабаты біркелкі жабыла бастады, ал бақылау тобында жазылу процесі баяу жүріп, қабыну белгілері толық басылмаған күйде қалды. Бұл айырмашылық биоматериалдың биосәйкестігін, жергілікті иммундық реакция тудырмайтынын және регенерацияға қолайлы микрожүйе қалыптастыратынын көрсетті.

Жалпы алғанда, зерттеу нәтижелері зығыр целлюлозасы, хитозан, натрий альгинаты және куркумин негізінде алынған биопласттың жара жазу процесін айтарлықтай жылдамдататынын, қабынуды тиімді басатынын және тері тіндерінің қалпына келуін ынталандыратынын дәлелдейді. Оның биосәйкестігі мен қауіпсіздігі бұл материалды жара таңуға арналған перспективалы биоматериал ретінде пайдалануға мүмкіндік береді.

Жүргізілген *in vivo* зерттеу зығыр сабағынан алынған целлюлоза, хитозан, натрий альгинаты және куркумин негізінде синтезделген биопласттың жара жазу процесіне айтарлықтай оң әсер ететінін көрсетті. Алынған нәтижелер халықаралық әдебиеттерде сипатталған биополимерлік жара таңғыштарының биологиялық әсерімен үйлеседі. Мысалы, куркуминнің қабынуға қарсы және антибактериалды белсенділігі бұрыннан белгілі: ол NF-κB белсенділігін төмендетіп, қабыну медиаторларының экспрессиясын басады, соның нәтижесінде жарадағы қабыну процесі анағұрлым тез басылады (Hewlings & Kalman, 2017). Біздің зерттеуде 3-күннен бастап қызарудың бәсеңдеуі дәл осы механизммен түсіндіріледі.

CC BY NC

Хитозанның жара жазуға әсері де көптеген ғылыми еңбектерде дәлелденген. Rajalakshmi et.al. (2020) хитозан негізіндегі гидрогельдердің фибробласттардың көбеюін жеделдететінін, коллаген түзілуін ынталандыратынын және бактериялардың өсімін тежейтінін анықтаған. Біздің FCSA-C3 үлгісіндегі эпителизацияның 5-күні басталуы осы тұжырыммен сәйкес келеді. Хитозанның амин топтары жара бетінде оң зарядталған орта қалыптастырып, тері жасушаларының адгезиясын жақсартатыны да белгілі (Dai et al., 2011). Бұл біздің экспериментте жаңа тері қабатының жылдам түзілуіне ықпал еткен факторлардың бірі болуы мүмкін.

Натрий альгинаты жара бетінде ылғалды орта ұстап тұру қабілетімен ерекшеленеді, бұл грануляция мен эпителизацияны жеделдететін маңызды шарт болып саналады. Thomas (2000) альгинат негізіндегі таңғыштардың экссудатты оңтайлы деңгейде сіңіріп, сонымен қатар жара бетін ылғал күйде ұстайтынын атап өтеді. Біздің нәтижелерде ылғалдың жоғалмауы және тіндердің тез қалпына келуі дәл осы қасиетпен байланысты. Сонымен қатар, целлюлозаның жоғары биосәйкестігі материалдың жергілікті тітіркену тудырмауына және иммундық реакцияның минималды болуына мүмкіндік берді. Бұл қасиет целлюлозалық биоматериалдар туралы соңғы зерттеулермен үйлеседі, онда олардың биоинерттілігі мен тері жасушаларымен жоғары үйлесімділігі атап өтіледі (Klemm et al., 2018).

Жара жазылуының 7-күні FCSA-C3 үлгісі қолданылған жануарларда тіндердің қалпына келуі бақылау тобымен салыстырғанда айтарлықтай жақсы болғаны байқалды. Бұл табиғи полимерлердің синергиялық әсерін көрсетеді. Куркумин қабынуды тежейді, хитозан антимикробтық қорғаныс береді және жасушалық регенерацияны ынталандырады, ал альгинат жара бетінде оңтайлы ылғалдылық сақтайды. Мұндай кешенді әсер әлемдік зерттеулердегі биополимерлік таңғыштардың тиімділігіне толық сәйкес келеді (Boateng et al., 2015).

Жалпы алғанда, алынған нәтижелер зығыр целлюлозасы мен биополимерлерге негізделген биопластты биомедицинада жара таңуға арналған перспективалы материал ретінде қарастыруға болатынын айқын көрсетті. Оның биосәйкестігі, қабынуды басу қабілеті және регенерациялық процестерді жеделдетуі әдебиеттерде келтірілген деректерді толық растайды.

Қорытынды. Жүргізілген зерттеу жұмысы барысында зығыр сияқты ауылшаруашылық қалдықтарынан алынған целлюлозаның хитозанмен бірігіп, әртүрлі пластификаторлар мен табиғи биоактивті қоспалар арқылы биопластик материалы ретінде қолдануға болатындығы дәлелденді. Целлюлозаны сілтілік өңдеу, қышқылмен тазарту және ағарту кезеңдері арқылы тазарту нәтижесінде жоғары сапалы биополимер алынды.

Алынған биопласт үлгілерінің физикалық-химиялық қасиеттері олардың су сіңіру қабілеті мен құрылымдық тұрақтылығын көрсетті. Әсіресе куркума (куркумин) қосылған үлгілердің ісіну дәрежесі жоғары болып, олардың ылғал ұстау қабілетінің жақсы екенін көрсетті. Бұл жара таңуға арналған биоматериалдар үшін өте маңызды фактор болып табылады.

Сонымен қатар, in vivo тәжірибе нәтижелері бойынша, зығыр целлюлозасы негізіндегі биопласт үлгілері терінің қайта қалпына келуін жылдамдатып, қабыну белгілерін төмендетті. Куркуминнің табиғи антибактериалды және қабынуға қарсы қасиеттері бұл процесте маңызды рөл атқарды. Осылайша, хитозан мен целлюлоза негізіндегі биопластиктерді медицинада, әсіресе жара таңу материалдары ретінде қолдануға болатыны анықталды.

Жалпы, бұл зерттеу биосәйкестік, экологиялық қауіпсіздік және тиімді терапевтік әсер тұрғысынан болашағы зор биоматериалдарды дамытуға жол ашады.

Әдебиеттер

Abdul Khalil H.P.S., Bhat A.H., & Ireana Yusra A.F. (2012). Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review. Carbohydrate Polymers. — 87(2). — P. 963–979. (in Eng.)

Ahmed S., Ikram S., & Yudha S.S. (2015). Chitosan based scaffolds and their applications in wound healing. Achievements in the Life Sciences. — 9(1). — P. 27–37. (in Eng.)

Avérous L., & Pollet E. (2012). Environmental Silicate Nano-Biocomposites. Green Energy and Technology, Springer. (in Eng.)

Boateng J.S., Matthews K.H., Stevens H.N. & Eccleston G.M. (2015). Wound healing dressings and drug delivery systems: A review. Journal of Pharmaceutical Sciences. — 104(4). — 1023–1038. https://doi.org/10.1002/jps.24289 (in Eng.)

Dai T., Tanaka M., Huang Y. & Hamblin M. R. (2011). Chitosan preparations for wounds and burns: Antimicrobial and wound-healing effects. Expert Review of Anti-infective Therapy. — 9(7). — P. 857–879. https://doi.org/10.1586/eri.11.59 (in Eng.)

Dutta P.K., Dutta J. & Tripathi V.S. (2004). Chitin and chitosan: Chemistry, properties and applications. Journal of Scientific and Industrial Research. — 63(1). — P. 20–31. (in Eng.)

Geyer R., Jambeck J.R. & Law K.L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances. — 3(7). e1700782. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782 (in Eng.)

Ghanbarzadeh B., Almasi H. & Entezami A.A. (2015). Physical properties of edible modified starch-chitosan blend films. Innovative Food Science & Emerging Technologies. — 11(4). — P. 697–702. (in Eng.)

Hewlings S.J. & Kalman D.S. (2017). Curcumin: A review of its effects on human health. Foods. — 6(10), — P. 92. https://doi.org/10.3390/foods6100092 (in Eng.)

Klemm D., Cranston E.D., Fischer D., Gama M., Kedziora P., Kralisch D., ... & Wågberg L. (2018). Nanocellulose as a natural source for advanced biomaterials. Materials Today. — 21(7), — P. 720–748. https://doi.org/10.1016/j.mattod.2018.02.001 (in Eng.)

Kumar A., & Han S.S. (2019). Synthesis and biomedical applications of self-healing hydrogels. Reactive and Functional Polymers. — 145, 104370. (in Eng.)

Li Y., Maciel D., Rodrigues J., Shi X. & Tomás H. (2018). Biodegradable polymer nanogels for drug/nucleic acid delivery. Chemical Reviews. — 115(16). — 8564–8608. (in Eng.)

Rajalakshmi R., Banu R. & Krishnaveni N. (2020). Chitosan-based hydrogel and its applications in wound healing. Journal of Drug Delivery Science and Technology. — 56, 101581. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2020.101581 (in Eng.)

Reshmy R., Madhavan A., Sherin C.V., et al. (2015). Extraction and characterization of cellulose nanofibers from agro-industrial residues. Industrial Crops and Products, — 72. — P. 46–54. (in Eng.)

Rinaudo M. (2006). Chitin and chitosan: Properties and applications. Progress in Polymer Science. — 31(7). — P. 603–632. (in Eng.)

Thomas S. (2000). Alginate dressings in wound management. World Wide Wounds. — P. 1–10. (in Eng.)

Publication Ethics and Publication Malpractice in the journals of the Central Asian Academic Research Center LLP

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 journals of the Central Asian Academic Research Center LLP implies that the described work 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 Central Asian Academic Research Center LLP 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 Cross Check originality detection service 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 Central Asian Academic Research Center LLP.

The Editorial Board of the Central Asian Academic Research Center LLP 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

Ответственный редактор *А. Ботанқызы*
Редакторы: *Д.С. Аленов, Т. Апендиев*
Верстка на компьютере *Г.Д. Жадырановой*

Подписано в печать 29.12.2025.
Формат 60x88 1/8.
18,0 п.л. Заказ 4.

«Central Asian Academic Research Center» LLP
Алматы, Қонаев к-сі, 142