

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

**ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES**

**№2
2026**

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

2026 • 2



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 IAAS and NAS RK, General Director of the Research Institute of Petroleum Refining and Petrochemicals (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960> <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

ADEKENOV Sergazy Mynzhasarovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Director of the JSC "Phytochemistry Research and Production Center", (Karaganda, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/48648658>

RAMAZANOV Tlekkaul 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/13503476>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

OLIVIERO Rossi Cesare, PhD (Chemistry), Professor at the University of Calabria (Calabria, Italy), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/399768>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

CALANDRA Pietro, PhD (Physics), Professor, Institute for the Study of Nanostructured Materials (Rome, Italy), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/616360>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2080231>

BURKITBAEV Mukhambetkali, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, (Almaty, Kazakhstan) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/29017135>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30353742>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/566>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/65533963>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1671760>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2023295>

ABISHEV Medeu Erzhanovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Corresponding Member of NAS RK, (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1556025>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

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>

Бас редактор:

ЖҰРЫНОВ Мұрат Жұрыңұлы, химия ғылымдарының докторы, профессор, ХҒАҚ және ҚР ҰҒА академигі, Мұнай өңдеу және мұнай-химиясы ғылыми-зерттеу институтының бас директоры (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960%3A>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

Редакция ұжымы:

КАЛИМОЛДАЕВ Максат Нұрәділұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

ӘДЕКЕНОВ Серғазы Мыңжасарұлы, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, "Фитохимия" ғылыми-өндірістік орталығы " АҚ директоры (Қарағанды, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/48648658>

РАМАЗАНОВ Тілеккабыл Сәбитұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701328029>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/13503476>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

ОЛИВЬЕРО Росси Сесаре, PhD (химия), Калабрия университетінің профессоры (Калабрия, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/399768>

ТИГІНЯНУ 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

САНГ-СУ Квак, PhD (биохимия, агрохимия), профессор, Корея Биология 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

КАЛАНДРА Пьетро, PhD (физика), нанотехнология материалдары зерттеу институтының профессоры (Рим, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/616360>

БОШКАЕВ Қуантай Авғазыұлы, Ph.D. Теориялық және ядролық физика кафедрасының доценті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54883880400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2080231>

БҮРКІТБАЕВ Мұхамбетқали, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/29017135>

QUEVEDO Hernando, профессор, Мексика ұлттық автономиялық университеті (UNAM), Ядролық ғылымдар институты (Мехико, Мексика), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30353742>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/566>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/65533963>

ТАКИБАЕВ Нұрғали Жабағұлы, 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1671760>

ХАРИН Станислав Николаевич, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2023295>

ӘБІШЕВ Медеу Ержанұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1556025>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

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>

Главный редактор:

ЖУРИНОВ Мурат Журинович, доктор химических наук, профессор, академик МАН и НАН РК, Генеральный директор НИИ нефтепереработки и нефтехимии (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960%3Cp%3Ehttps://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

Редакционная коллегия:

КАЛИМОЛДАЕВ Максат Нурадилович, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

АДЕКЕНОВ Сергезы Мынжасарович, доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, директор АО "Научно-производственного центра "Фитохимия" (Караганда, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/48648658>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/13503476>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

ОЛИВЬЕРО Росси Чезаре, доктор философии (PhD, химия), профессор Университета Калабрии (Калабрия, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/399768>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

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), (Дэжон, Корея), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

БЕРСИМБАЕВ Рахметкажи Искендинович, 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

КАЛАНДРА Пьетро, доктор философии (PhD, физика), профессор Института по изучению наноструктурированных материалов (Рим, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/616360>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2080231>

БУРКИТБАЕВ Мухамбеткали, доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/29017135>

QUEVEDO Hernando, профессор, Национальный автономный университет Мексики (UNAM), Институт ядерных наук (Мехико, Мексика), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30353742>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/566>

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/65533963>

ТАКИБАЕВ Нурғали Жабағәевич, 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1671760>

ХАРИН Станислав Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2023295>

АБИШЕВ Медеу Ержанович, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1556025>

АБИЛМАТЖАНОВ 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

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», 2026

CONTENTS

PHYSICS

Koshtybayev T.B., Aliev Sh., Aliyeva M.E., Zhavliyeva A.T. Covariant approach to the kinetic theory of plasma in a strong electromagnetic field.....	13
Kemelbekova A., Shongalova A., Bondar E., Otunchi Ye. Recycling technologies for spent lithium-ion batteries: environmental impact, recovered products, and future development trends.....	25
Koilyk N., Baimbetova G., Dalelkhankyzy A., Kaptagay G., Primkulova Zh. Simplification of the fermionic dynamical symmetry model for identical particles and its mapping into bosonic space.....	38
Massak B., Agyl-Mussapar O., Amangeldinova S., Kurmangaliyeva V., Snow M. Constraints on Yukawa-Type short-range interactions from neutron interferometry data.....	60
Nurbayev B.M., Dmitriyeva E.A. Tin-based perovskites.....	70
Nurtazina A.S., Zhubaev A.K. Study of the effect of highly dispersed ochre on the kinetic characteristics of epoxy composites.....	92
Shokanov A.K., Khamrayev Sh.I., Smikhan Y.A. Mössbauer studies of fly ash-based tracers.....	103
Ualikhanova U.A., Kurban Y.Y., Syzdykova A.M., Altayeva G.S., Altaibayeva A.B. Breaking the degeneracy between metric and teleparallel gravity theories through multi-messenger gravitational-wave astronomy.....	119
Zhadyranova A.A., Yerzhan B. Dynamics of bounce regimes in modified teleparallel gravity.....	134
Zhusupova N.K. Application of machine learning methods in the analysis of gravitational waves and cosmological models.....	151

CHEMISTRY

Aubakirov Ye., Akhmetova F., Tashmukhambetova Zh., Toshtay K., Amantaiuly K. Conversion of Polymer Waste into Synthetic Fuel via Modification of Taizhuzhen Zeolite with Tungsten Salts.....	164
Auyeshov A.P., Eskibayeva Ch.Z., Ibrayeva A.M., Alzhanov K.B., Dikanbayeva A.K. Physicochemical study of serpentinite waste and phosphoric acid products.....	175
Bayeshova A.K., Bayeshov A., Tuleshova E.Zh. Reduction of copper ions by zinc in the presence of titanium(iv) ions in sulfuric acid solutions.....	188

Fazylov S.D., Syzdykov A.K., Pustolaikina I.A., Kazhmuratova A.T., Tazhibay A.M. Production of α -, β -, γ -oligosaccharide clathrate cytosine complexes.....	200
Jalmakhanbetova R.I., Yelshibayeva A.M., Zhumagaliyeva Zh.Zh., Mukusheva G.K. Terpenoid compounds of <i>Artemisia terrae-albae</i> growing in the Turkestan Region of Kazakhstan.....	213
Kapizov O.S., Mukhanov D.K., Dzheldybaeva I.M., Seisenov E.B., Akimbayeva A.B. Sustainable recycling of ferrosilicon machining chips from metallurgical plants into high-performance silicon–carbon anodes.....	228
Massalimova B.K. Wastewater treatment methods for heavy metal removal: production of activated carbon from biomass.....	244
Nurtai Zh., Orynassar R., Aimaganbetova Z.K., Zhanturina N.N. Simulation of kinetic parameters of vinyl ester resin samples with diatomite and dimethyl methylphosphonate fillers.....	272
Sagyntayeva A., Zhanikulov N., Sudarev E., Kaiyrbaeva M., Zhakipbayev B. Research on the quality of raw materials for obtaining gypsum-cement-pozzolanic composite material.....	286
Satayeva S., Yermukhanova S., Urazova A., Mendygaliyeva A., Sabitov B. Obtaining benzene by photocatalytic oxidation of toluene.....	302
Sdikova G.Zh., Dalabayeva N.S., Sarova N.B., Muhtar T.Zh., Zhaltirbayeva N.K. Efficiency of phosphorus-containing inhibitors in protecting steel against corrosion.....	315
Shaimardan M., Azhikhanova Z., Abutalip M., Toktarbaiuly O. Isolation and Characterization of lignin from <i>Phlomis tuberosa</i> L. biomass via acid treatment.....	329
Yesimsiitova Z.B., Seisenova A., Oryngaliyeva S.Zh., Sanuar A., Manap K.R. Obtaining carbonized materials from rice husk using a mobile pyrolysis plant for energy applications.....	338
Zhetenova M.S., Suleimenova M.Sh., Nuraly A.M., Mutushev A.Zh., Kalimoldina L.M. Development and research of carotenoid-containing extracts obtained from plant raw materials.....	353
Zhortarova A.A., Kubicek V., Salkeyeva L.K., Ibrayev M.K., Seidakhmetova R.B. Synthesis and investigation of biological activity of 1,3-Bis(4-Phenylthiazol-2-yl)-2,4-Bis(N,N- Diethylamino)-1,3-Diaza-2,4-Diphosphétidine.....	367
Zhumabek M., Tungatarova S.A., Murzin D.Yu., Baizhumanova T.S. Structural and catalytic properties of SCS-derived Co–Al–Mg–Mn catalysts in dry reforming of methane.....	383

МАЗМҰНЫ

ФИЗИКА

Қоштыбаев Т.Б., Алиев Ш., Алиева Е.М., Жавлиева А.Т. Күшті электромагниттік өрістегі плазманың кинетикалық теориясына коварианттық көзқарас.....	13
Кемелбекова А., Шонғалова А., Бондарь Е., Отунчи Е. Пайдаланылған литий-ионды аккумуляторларды қайта өңдеу технологиялары: экологиялық әсері, алынатын өнімдер және болашақ даму бағыттары.....	25
Қойлық Н.О., Байымбетова Г.А., Дәлелханқызы А., Қаптағай Г.А., Примкулова Ж.Е. Бірдей бөлшектер үшін фермионды динамикалы-симметриялық модельді ықшамдау және оны бозондық кеңістікке бейнелеу.....	38
Масақ Б., Ағыл-Мұсапар О., Амангелдинова С., Курманғалиева В., Сноу М. Нейтрондық интерферометрия негізінде юкава типті қысқа-қашықтықтағы өзара әсерлесулерге шектеулер қою.....	60
Нұрбаев Б.М., Дмитриева Е.А. Қалайы негізіндегі перовскиттер.....	70
Нуртазина А.С., Жубаев А.К. Дисперстілігі жоғары охраның эпоксидті композиттердің кинетикалық сипаттамаларына ықпалын зерттеу.....	92
Шоканов А.К., Хамраев Ш.И., Смихан Е.А. Ұшқыш күл негізіндегі трассерлердің мессбауэрлік зерттеулері.....	103
Уалиханова У.А., Құрбан Е.Е., Сыздыкова А.М., Алтаева Г.С., Алтайбаева А.Б. Көп арналы гравитациялық-толқындық астрономия арқылы метрикалық және телепараллельді гравитация теорияларының айырмашылығын зерттеу.....	119
Жадыранова А.А., Ержан Б. Модификацияланған телепараллель гравитациядағы серпіліс режимдерінің динамикасы.....	134
Жусупова Н.К. Машиналық оқыту әдістерін гравитациялық толқындар мен космологиялық модельдерді талдауда қолдану.....	151

ХИМИЯ

Аубакиров Е., Ахметова Ф., Ташмұхамбетова Ж., Тоштай Қ., Амантайұлы Қ. Тайжүзген цеолитін вольфрам тұздарымен модификациялау арқылы полимер қалдықтарын синтетикалық отынға түрлендіру.....	164
Ауешов А.П., Ескибаева Ч.З., Ибраева А.М., Алжанов К.Б., Диканбаева А.К. Серпентинит қалдықтарының фосфор қышқылымен әрекеттесу өнімдерінің физика-химиялық зерттелуі.....	175

Башова А.К., Башов А.Б., Түлешова Э.Ж.

Мыс иондарын күкіртқышқылды ерітінділерде титан (IV) иондары қатысында мырышпен тотықсыздандыру.....188

Фазылов С.Д., Сыздықов А.К., Пустолайкина И.А., Қажмұратова А.Т., Тәжібай А.М.
Цитизиннің α -, β -, γ -олигосахаридтермен клатраттыкешендерін алу.....200

Джалмаханбетова Р.И., Елшібаева А.М., Жумагалиева Ж.Ж., Мукушева Г.К.
Қазақстанның Түркістан өңірінде өсетін *Artemisia terrae-albae* терпеноидты қосылыстары.....213

Капизов О.С., Муханов Д.К., Желдыбаева И.М., Сейсенев Е.Б., Акимбаева А.Б.
Металлургиялық зауыттардың ферросилиций жоңқаларын жоғары өнімді кремний-көміртекті анодтарға тұрақты қайта өңдеу.....228

Масалимова Б.К.

Ауыр металдардан ағын суларды жою әдістері: биомассада белсендендірілген көміртек алу.....244

Нуртай Ж., Орынбасар Р.О., Аймағанбетова З.К., Жантурина Н.Н.

Диатомит пен диметил метилфосфонат толтырғыштары бар винилэфир шайыр үлгілерінің кинетикалық параметрлерінің модельдеу.....272

Сағынтаева А., Жаниқұлов Н., Сударев Е., Қайырбаева М., Жакипбаев Б.

Гипс-цемент-пуццоланды композициялық материал алу үшін қажетті шикізаттардың сапасын зерттеу.....286

Сатаева С., Ермуханова С., Уразова А., Мендығалиева А., Сабитов Б.

Толуолдың фотокаталитикалық тотығуы арқылы бензол алу.....302

Сди́кова Г.Ж., Далабаева Н.С., Сарова Н.Б., Мұхтар Т.Ж., Жалтырбаева Н.К.

Фосфор ингибиторлардың болаттың жемірілуіне қарсы тиімділігі.....315

Шаймардан М., Ажиханова Ж., Әбутәліп М., Тоқтарбайұлы О.

Phlomis Tuberosa L. өсімдігі биомассасынан лигнинді қышқылдық өңдеу арқылы бөліп алу және сипаттау.....329

Есимсиитова З.Б., Сейсенова А., Орынғалиева С.Ж., Сануар А., Манап К.Р.

Энергиялық қолдану үшін жылжымалы пиролиз қондырғысын пайдалану арқылы күріш қауызынан көміртекті материалдар алу.....338

Жетенова М.С., Сүлейменова М.Ш., Нұралы Ә.М., Мутушев А.Ж., Калимолдина Л.М.

Өсімдік шикізатынан алынған құрамында каротиноид бар сығындыларды әзірлеу және зерттеу.....353

Жортарова А.А., Kubicek V., Салькева Л.К., Ибраев М.К., Сейдахметова Р.Б.
1,3-бис(4-фенилтиазол-2-ил)-2,4-бис(N,N-диэтиламино)-1,3-диазо-2,4-дифосфетидиннің
синтезі және биологиялық белсенділігін зерттеу.....367

Жұмабек М., Тунгатарова С.А., Мурзин Д.Ю., Байжуманова Т.С.
SCS әдісімен дайындалған Co–Al–Mg–Mn катализаторларының метанның құрғақ
реформингіндегі құрылымдық және каталитикалық қасиеттері.....383

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА

Коштыбаев Т.Б., Алиев Ш., Алиева М.Е., Жавлиева А.Т.

Ковариантный подход к кинетической теории плазмы в сильном электромагнитном поле.....13

Кемелбекова А., Шонгалова А., Бондарь Е., Отунчи Е.

Технологии переработки отработанных литий-ионных аккумуляторов: экологическое воздействие, получаемые продукты и будущие направления развития.....25

Қойлық Н.О., Баймбетова Г.А., Дәлелханқызы А., Қаптағай Г.Ә., Примкулова Ж.Е.

Упрощение фермионной динамико-симметрической модели для идентичных частиц и её отображение в бозонное пространство.....38

Масақ Б., Ағыл-Мұсапар О., Амангелдинова С., Курмангалиева В., Сноу М.

Ограничения на юкавовские короткодействующие взаимодействия на основе нейтронной интерферометрии.....60

Нурбаев Б.М., Дмитриева Е.А.

Перовскиты на основе олова.....70

Нуртазина А.С., Жубаев А.К.

Исследование влияния высокодисперсной охры на кинетические характеристики эпоксидных композитов.....92

Шоканов А.К., Хамраев Ш.И., Смихан Е.А.

Мёссбауэровские исследования трассеров на основе летучей золы.....103

Уалиханова У.А., Курбан Е.Е., Сыздыкова А.М., Алтаева Г.С., Алтайбаева А.Б.

Разрешение вырождения метрических и телепараллельных теорий гравитации посредством многоканальной гравитационно-волновой астрономии.....119

Жадыранова А.А., Ержан Б.

Динамика отскоковых режимов в модифицированной телепараллельной гравитации.....134

Жусупова Н.К.

Применение методов машинного обучения при анализе гравитационных волн и космологических моделей.....151

ХИМИЯ

Аубакиров Е., Ахметова Ф., Ташмухамбетова Ж., Тоштай К., Амантайулы К.

Конверсия полимерных отходов в синтетическое топливо путем модификации цеолита тайжугзен солями вольфрама.....164

Ауешов А.П., Ескибаева Ч.З., Ибраева А.М., Алжанов К.Б., Диканбаева А.К. Физико-химическое исследование продуктов взаимодействия серпентинитовых отходов и фосфорной кислоты.....	175
Баешова А.К., Баешов А.Б., Тулешова Э.Ж. Восстановление ионов меди цинком в присутствии ионов титана (IV) в растворах серной кислоты.....	188
Фазылов С.Д., Сыздыков А.К., Пустолайкина И.А., Кажмуратова А.Т., Тажибай А.М. Получение α -, β -, γ -олигосахаридных клатратных комплексов цитизина.....	200
Джалмаханбетова Р.И., Елшыбаева А.М., Жумагалиева Ж.Ж., Мукушева Г.К. Терпеноидные соединения <i>Artemisia terrae-albae</i> , произрастающего в Туркестанском регионе Казахстана.....	213
Капизов О.С., Муханов Д.К., Желдыбаева И.М., Сейсенов Е.Б., Акимбаева А.Б. Устойчивая переработка стружки ферросилиция металлургических заводов в высокопроизводительные кремний-углеродные аноды.....	228
Масалимова Б.К. Методы очистки сточных вод от тяжелых металлов: получение активированного угля из биомассы.....	244
Нуртай Ж., Орынбасар Р.О., Аймаганбетова З.К., Жантурина Н.Н. Моделирование кинетических параметров образцов винилэфирных смол с наполнителями из диатомита и диметилметилфосфоната.....	272
Сагынтаева А., Жаникулов Н., Сударев Е., Кайырбаева М., Жакипбаев Б. Исследование качества сырья для получения гипсо-цементно-пущофанового композиционного материала.....	286
Сатаева С., Ермуханова С., Уразова А., Мендыгилиева А., Сабитов Б. Получение бензола методом фотокаталитического окисления толуола.....	302
Сдикова Г.Ж., Далабаева Н.С., Сарова Н.Б., Мухтар Т.Ж., Жалтырбаева Н.К. Эффективность фосфорсодержащих ингибиторов против коррозии стали.....	315
Шаймардан М., Ажиханова Ж., Абуталип М., Токтарбай О. Выделение и характеристика лигнина из биомассы <i>Phlomis Tuberosa</i> L. с помощью кислотной обработки.....	329
Есимсиитова З.Б., Сейсенова А., Орынгалиева С.Ж., Сануар А., Манап К.Р. Получение карбонизированных материалов из рисовой шелухи с использованием мобильной пиролизной установки для энергетических применений.....	338

**Жетенова М.С., Сулейменова М.Ш., Нуралы А.М., Мутушев А.Ж.,
Калимолдина Л.М.**

Разработка и исследование каротиноидсодержащих экстрактов, полученных
из растительного сырья.....353

Жортарова А.А., Kubicek V., Салькева Л.К., Ибраев М.К., Сейдахметова Р.Б.

Синтез и исследование биологической активности 1,3-бис(4-фенилтиазол-2-ил)-2,4-
бис(N,N-диэтиламино)-1,3-диазо-2,4-дифосфетидина.....353

Жумабек М., Тунгатарова С.А., Мурзин Д.Ю., Байжуманова Т.С.

Структурные и каталитические свойства Co–Al–Mg–Mn катализаторов, приготовленных
методом SCS, для сухого риформинга метана.....383

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 2.
Number 358 (2026), 25–37

<https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.435>

UDC: 621.355.2; 628.4
IRSTI: 31.15.23; 31.29.00

©Kemelbekova A.^{1,2*}, Shongalova A.^{1,2}, Bondar E.¹, Otunchi Ye.¹, 2026.

¹Institute of Physics and Technology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan;

²The Pennsylvania State University, State College, United States of America.

*E-mail: a.kemelbekova@satbayev.university

RECYCLING TECHNOLOGIES FOR SPENT LITHIUM-ION BATTERIES: ENVIRONMENTAL IMPACT, RECOVERED PRODUCTS, AND FUTURE DEVELOPMENT TRENDS

Kemelbekova Ainagul — PhD, Senior Researcher, Institute of Physics and Technology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; The Pennsylvania State University, State College, United States of America,

E-mail: a.kemelbekova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-4813-8490>;

Shongalova Aigul — PhD, Senior Researcher, Institute of Physics and Technology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; The Pennsylvania State University, State College, United States of America,

E-mail: shongalova.aigul@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7352-9007>;

Bondar Ekaterina — PhD, Senior Researcher, Institute of Physics and Technology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: katebondar111@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6745-5462>;

Otunchi Yedil — Master of Technical Sciences, Engineer, Institute of Physics and Technology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: e.otunchi@satbayev.university, <https://orcid.org/0009-0006-4361-8099>.

Abstract. The widespread use of lithium-ion batteries (LIBs), particularly driven by the rapid growth of the electric vehicle industry, is expected to lead to a sharp increase in the volume of spent batteries in the near future. Improper disposal of such batteries may result in environmental pollution, accumulation of heavy metals, and the loss of valuable resources. Commercial LIBs contain high-value metals such as lithium, cobalt, nickel, manganese, copper, and aluminum, as well as flammable organic electrolytes and fluorinated salts, which complicates their safe processing.

Currently, pyrometallurgical, hydrometallurgical, and direct regeneration methods for LIB recycling are being extensively studied. Pyrometallurgy enables the recovery of metals in alloy form, while hydrometallurgy focuses on obtaining high-purity ionic solutions. From these solutions, cobalt, nickel, lithium, and other metals can be recovered through electrolysis or chemical precipitation and subsequently used to synthesize new materials. Recent studies have demonstrated the high efficiency of

resynthesizing cathode materials such as LiCoO_2 , $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$, and LiFePO_4/C using precursors derived from spent LIBs.

However, the recycling sector faces several challenges: the structural diversity of batteries, complex module assembly, material mixing, lack of standardization, and safety concerns. Additionally, the development of cobalt-free cathode materials may reduce the economic viability of some traditional recycling methods. To improve future LIB recycling systems, it is necessary to standardize battery sorting and labeling, design batteries with recyclability in mind, strengthen regulatory frameworks, and implement environmentally safe technologies. Establishing an efficient recycling system will help conserve resources, reduce environmental impact, and support the transition toward a circular economy.

Keywords: lithium-ion batteries, electrolytes, recycling technologies, waste management, greenhouse gas emissions (GHG)

Financing. *The work was supported by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under the program BR28712683 "Development of technology to reduce energy consumption and waste without compromising efficiency in the processing of lithium-ion batteries" and the authors acknowledge the Center for International Programs "Bolashak".*

For citations: *Kemelbekova A., Shongalova A., Bondar E., Otunchi Ye. Recycling Technologies for Spent Lithium-Ion Batteries: Environmental Impact, Recovered Products, and Future Development Trends. Academic Journal of Physical and Chemical Sciences. 2026. No.2. Pp. 25–37. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.435>*

©Кемелбекова А.^{1,2*}, Шонғалова А.^{1,2}, Бондарь Е.¹, Отунчи Е.¹, 2026.

¹Физика-техникалық институты, Satbayev University, Алматы, Қазақстан;

²The Pennsylvania State University, Стейт колледж, Америка Құрама Штаттары.

*E-mail: a.kemelbekova@satbayev.university

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ЛИТИЙ-ИОНДЫ АККУМУЛЯТОРЛАРДЫ ҚАЙТА ӨНДЕУ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ: ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ӘСЕРІ, АЛЫНАТЫН ӨНІМДЕР ЖӘНЕ БОЛАШАҚ ДАМУ БАҒЫТТАРЫ

Кемелбекова Айнагуль — PhD, аға ғылыми қызметкер, Физика-техникалық институты, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; The Pennsylvania State University, Стейт колледж, Америка Құрама Штаттары,

E-mail: a.kemelbekova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-4813-8490>;

Шонғалова Айгуль — PhD, аға ғылыми қызметкер, Физика-техникалық институты, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; The Pennsylvania State University, Стейт колледж, Америка Құрама Штаттары,

E-mail: shongalova.aigul@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7352-9007>;

Бондарь Екатерина — PhD, аға ғылыми қызметкер, Физика-техникалық институты, Satbayev University, Алматы, Қазақстан,

E-mail: katebondar111@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6745-5462>;



Отунчи Еділ — техника ғылымдарының магистрі, инженер, Физика-техникалық институты, Satbayev University, Алматы, Қазақстан,
E-mail: e.otunchi@satbayev.university, <https://orcid.org/0009-0006-4361-8099>.

Аннотация. Литий-ионды аккумуляторлардың (ЛИА) кеңінен таралуы, әсіресе электр көліктері индустриясының қарқынды дамуы, жақын болашақта пайдаланылған аккумуляторлардың көлемінің күрт артуына әкеледі. Мұндай аккумуляторларды дұрыс кәдеге жаратпау қоршаған ортаның ластануына, ауыр металдардың жиналуына және бағалы ресурстардың ысырап болуына себеп болуы мүмкін. Коммерциялық ЛИА құрамында литий, кобальт, никель, марганец, мыс, алюминий сияқты жоғары құнды металдармен қатар, жанғыш органикалық электролиттер мен фторқұрамды тұздар бар, бұл оларды қауіпсіз өндеуді күрделендіреді.

Қазіргі таңда ЛИА-ны қайта өндеудің пирометаллургиялық, гидро-металлургиялық және тікелей регенерация әдістері кеңінен зерттелуде. Пирометаллургия металдарды қорытпа түрінде бөліп алуға мүмкіндік берсе, гидрометаллургия жоғары тазалықтағы иондық ерітінділер алуға бағытталған. Бұл ерітінділерден кобальт, никель, литий және басқа металдар электролиз немесе химиялық тұндыру арқылы бөлініп, жаңа материалдар синтездеуге қолданылады. Соңғы зерттеулер пайдаланылған ЛИА-дан алынған прекурсорлар негізінде LiCoO_2 , $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$, LiFePO_4/C сияқты катод материалдарын қайта синтездеудің жоғары тиімділігін көрсетті.

Алайда қайта өндеу саласы бірқатар қиындықтарға тап: аккумуляторлардың конструкциялық әртүрлілігі, модульдердің күрделі құрастырылуы, материалдардың араласуы, стандарттардың болмауы және қауіпсіздік мәселелері. Сонымен қатар, кобальтсыз катод материалдарының дамуы кейбір дәстүрлі қайта өндеу әдістерінің экономикалық тиімділігін төмендетуі мүмкін. Болашақта ЛИА-ны қайта өндеу жүйесін жетілдіру үшін аккумуляторларды сұрыптау мен таңбалауды стандарттау, қайта өндеуге ыңғайлы дизайн жасау, заңнамалық базаны күшейту және экологиялық қауіпсіз технологияларды енгізу қажет. Тиімді қайта өндеу жүйесін құру ресурстарды үнемдеуге, экологиялық жүктемені азайтуға және айналмалы экономика қағидаттарын жүзеге асыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: литий-ионды аккумуляторлар, электролиттер, қайта өндеу технологиялары, қалдықтарды басқару, парниктік газдар шығарындылары (GHG)

©Кемелбекова А.^{1,2*}, Шонғалова А.^{1,2}, Бондарь Е.¹, Отунчи Е.¹, 2026.

¹Физико-технический институт, Satbayev University, Алматы, Казахстан;

²The Pennsylvania State University, Стейт колледж, Соединенные Штаты Америки.

*E-mail: a.kemelbekova@satbayev.university

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОТРАБОТАННЫХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ: ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, ПОЛУЧАЕМЫЕ ПРОДУКТЫ И БУДУЩИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

Кемелбекова Айнагуль — PhD, старший научный сотрудник, Физико-технический институт, Satbayev University, Алматы, Казахстан; The Pennsylvania State University, Стейт колледж, Соединенные Штаты Америки,

E-mail: a.kemelbekova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-4813-8490>;

Шонғалова Айгуль — PhD, старший научный сотрудник, Физико-технический институт, Satbayev University, Алматы, Казахстан; The Pennsylvania State University, Стейт колледж, Соединенные Штаты Америки,

E-mail: shongalova.aigul@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7352-9007>;

Бондарь Екатерина — PhD, старший научный сотрудник, Физико-технический институт, Satbayev University, Алматы, Казахстан,

E-mail: katebondar111@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6745-5462>;

Отунчи Еділ — магистр технических наук, инженер, Физико-технический институт, Satbayev University, Алматы, Казахстан,

E-mail: e.otunchi@satbayev.university, <https://orcid.org/0009-0006-4361-8099>.

Аннотация. Широкое распространение литий-ионных аккумуляторов (ЛИА), особенно в условиях стремительного развития индустрии электрического транспорта, в ближайшие годы приведёт к значительному увеличению объёмов образующихся отработанных аккумуляторов. Неправильная утилизация ЛИА может стать причиной загрязнения окружающей среды, накопления тяжёлых металлов и нерационального использования ценных ресурсов. Коммерческие литий-ионные аккумуляторы содержат литий, кобальт, никель, марганец, медь, алюминий и другие ценные металлы, а также горючие органические электролиты и фторсодержащие соли, что существенно усложняет процессы их безопасной переработки. В настоящее время активно развиваются пирометаллургические, гидрометаллургические методы и технологии прямой регенерации материалов ЛИА. Пирометаллургический подход позволяет извлекать металлы в виде сплавов, тогда как гидрометаллургические процессы обеспечивают получение высокочистых ионных растворов. Из таких растворов кобальт, никель, литий и другие металлы могут быть выделены методом химического осаждения или электролиза и использованы для синтеза новых функциональных материалов. Результаты современных исследований свидетельствуют о высокой эффективности повторного синтеза катодных материалов, включая LiCoO_2 , $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ и LiFePO_4/C , на основе прекурсоров, полученных из отработанных аккумуляторов. Несмотря на достигнутый прогресс, отрасль переработки ЛИА сталкивается с рядом проблем, среди которых конструкционное разнообразие аккумуляторов, сложность демонтажа модульных систем, смешение различных материалов,

недостаточная стандартизация и вопросы безопасности. Кроме того, переход к катодным материалам с пониженным содержанием кобальта может снизить экономическую эффективность традиционных технологий переработки. В перспективе развитие отрасли требует стандартизации систем маркировки и сортировки аккумуляторов, проектирования конструкций, ориентированных на последующую переработку, совершенствования нормативно-правовой базы и внедрения экологически безопасных технологий. Создание эффективной системы переработки литий-ионных аккумуляторов позволит обеспечить рациональное использование ресурсов, снизить экологическую нагрузку и будет способствовать реализации принципов циркулярной экономики.

Ключевые слова: литий-ионные батареи, электролиты, технологии переработки, управление отходами, выбросы парниковых газов (GHG)

Кіріспе. Электр көлігі индустриясының қарқынды дамуына байланысты литий-ионды аккумуляторларға деген сұраныс үздіксіз өсіп келеді. Соның нәтижесінде жақын болашақта үлкен көлемдегі литий-ионды аккумуляторлар қызмет ету мерзімін аяқтап, кәдеге жарату мәселелерін күрделендіріп, қоршаған орта мен энергия үнемдеуге айтарлықтай зиян келтіруі мүмкін. Қазіргі коммерциялық литий-ионды аккумуляторлар құрамында ауыспалы валентті металл оксидтері немесе фосфаттар, алюминий, мыс, графит, зиянды литий тұздары бар органикалық электролиттер, полимерлі сепараторлар және пластик немесе металл корпусстар болады (Aaltonen et al., 2017). Пайдаланылған литий-ионды аккумуляторларды дұрыс кәдеге жаратпау қоршаған ортаның ластануына және бағалы ресурстардың ысырап болуына әкелуі ықтимал. Сондықтан соңғы жылдары мұндай аккумуляторларды қайта өңдеу мәселесіне назар арта бастады. Алайда энергия тығыздығы жоғары, қауіпсіздігі арттырылған және бағасы қолжетімді литий-ионды аккумуляторларға деген сұранысқа байланысты олардың материалдық құрамы үнемі өзгеріп, әртараптанып отырады. Бұл жағдай пайдаланылған аккумуляторларды қайта өңдеу процесін күрделендіреді.

Бұл мақалада пайдаланылған литий-ионды аккумуляторларды қайта өңдеу саласындағы соңғы жетістіктерге шолу беріледі: қайта өңдеу процестерінің дамуы, қайта өңдеу нәтижесінде алынатын өнімдер және қайта өңдеудің экологияға әсері қарастырылады.

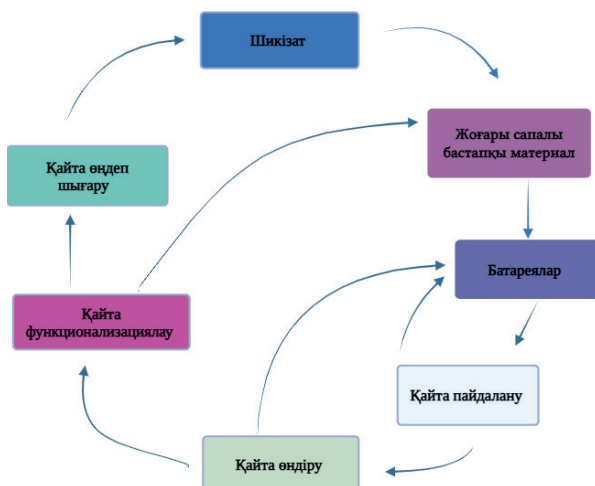
Соңғы бірнеше жылда энергия тығыздығы мен қуат шығару мүмкіндігі жоғары жаңа электрод материалдарының дамуына байланысты ЛИА қолдану аясы электр көліктеріне (ЭК) дейін кеңейді (Shakoor et al., 2023, Wang et al., 2022, Kaaya et al., 2022). ЭК нарығы енді ғана қарқын алып келе жатқанын және ЭК аккумуляторларының қызмет ету мерзімі ТЭ-де қолданылатын аккумуляторларға қарағанда ұзағырақ болатынын ескерсек, алдағы бірнеше жылда ЭК-ден шыққан жарамсыз ЛИА көлемі аса күрделі кәдеге жарату мәселесін туындатпауы мүмкін (Corbus et al., 1995, Rantho, 2017). Алайда ЭК-ден жаппай шығарылатын пайдаланылған ЛИА-ның ресурс үнемдеу мен қоршаған ортаны қорғауға әсерін алдын ала болжауымыз қажет және оларды басқару үшін қандай шараларды қазірден бастап қабылдау керектігін түсіну маңызды.

ЛИА катодтан, анодтан, сепаратордан, электролиттен, сыртқы қаптамадан және тығыздағыш бөлшектерден тұрады. Қазіргі коммерциялық ЛИА-ларда катод материалы ретінде әртүрлі литий-құрамды оксидтер мен фосфаттар қолданылады: LiCoO_2 , LiMn_2O_4 , LiFePO_4 , $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$ (NCM) және зерттеу нәтижелері бойынша катод материалдары нарығының жартысынан астамын LiCoO_2 және $\text{LiNi}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{O}_2$ құраған, ал олардың құрамында қауіпті ауыр металл – кобальт бар (Tong et al., 2019).

Сонымен қатар, органикалық электролиттерде жанғыш органикалық еріткіштер мен фтор-құрамды литий тұздары сияқты зиянды заттар болады (Idrees et al., 2019). Сондықтан ЛИА-ны тұрмыстық қоқысқа тікелей тастау ауыр экологиялық ластануға әкеледі. Бұдан бөлек, ЛИА құрамында Li, Co, Ni, Cu, Al сияқты жоғары құнды металдар бар. Олардың ішінде Co мен Li сирек кездеседі және салыстырмалы түрде қымбат, ал олардың ЛИА-дағы мөлшері тиісінше 5–15 wt.% және 2–7 wt.% құрайды, бұл табиғи кендердегі мөлшерден әлдеқайда жоғары (Labbé et al., 2012, Vega-Muratalla et al., 2024).

Осы айтылғандарға сүйене отырып, пайдаланылған ЛИА-ны қайта өңдеу аса маңызды, және толыққанды қайта өңдеу жүйесін құру үшін тиісті технологиялар мен нормативтік талаптар әзірленуі қажет. Шын мәнінде, қорғасын-қышқылды аккумуляторларды қайта өңдеу жүйесі жақсы жолға қойылған және ол белгілі бір тәжірибе мен бағыт-бағдар бере алады. Мысалы, АҚШ-та қорғасын-қышқылды аккумуляторлардың шамамен 99% қайта өңделеді, бұл тіпті шиналар, қағаз, алюминий банкілері, әйнек сияқты күнделікті қалдықтардың кез келген түрінен жоғары көрсеткіш болып табылады (Thompson et al., 2020). Алайда қорғасын-қышқылды аккумуляторлар мен ЛИА құрамдық жағынан айтарлықтай ерекшеленеді. Біріншісінде аккумулятор массасының ~60%-ы қорғасыннан тұрады және оны бөлшектегеннен кейін басқа компоненттерден оңай ажыратуға болады (Pillot, 2017). Ал ЛИА-да қолданылатын материалдардың әртүрлілігі қайта өңдеу процесін әлдеқайда күрделендіреді.

Литий-ионды аккумулятордың (1-сурет) өмірлік циклі пайдаланылған ЛИА-ны кәдеге жаратуға күрделілікті айқындайды, себебі қайта қолдану, қайта өндірілген материалдарды батареяларда пайдалану, сондай-ақ катодты стехиометриялық қоспалар арқылы батарея сапасындағы материал ретінде қайта өңдеуге дейінгі регенерация сияқты аралық бағыттар бар. ЛИА өндірісі мен оларды қайта өңдеуге қатысты егжей-тегжейлі экологиялық бағалау жүргізіліп, қоршаған ортаға ең көп зиян келтіретін және парниктік газдар шығарындыларына ең көп үлес қосатын нақты технологиялық операцияларды анықтау қажеттілігі көрсетілді.



Сурет 1. Литий-ионды аккумулятордың өмірлік циклі.

Зерттеу материалдары. Зерттеу нысаны ретінде литий-ионды аккумуляторлардың (LIBs) әртүрлі катодтық материалдары қарастырылды. Қазіргі уақытта кеңінен қолданылатын катодтық материалдарға литий-темір-фосфат (LFP), литий-никель-марганец-кобальт оксиді (NMC), литий-марганец оксиді (LMO) және литий-кобальт оксиді (LCO) жатады. Бұл материалдар аккумуляторлардың электрохимиялық сипаттамаларын анықтап қана қоймай, олардың өндірісі мен қайта өңдеу процестерінің қоршаған ортаға әсеріне де ықпал етеді. Литий-ионды аккумуляторларды (LIBs) өндіру барысында суресурстарының ластануы, атмосфераға зиянды заттардың шығарылуы, сондай-ақ қатты қалдықтардың түзілуі орын алуы мүмкін, бұл адам денсаулығына да, қоршаған ортаға да айтарлықтай зиян келтіреді. Мұндай аккумуляторларға сұраныстың тұрақты өсуіне байланысты олардың өндірісімен байланысты парниктік газдар (GHG) шығарындылары маңызды экологиялық мәселе ретінде қарастырылуда. Жүргізген зерттеу нәтижелері бойынша (Lin et al., 2020) кеңінен қолданылатын үш түрлі катод материалдары үшін GHG шығарындылары бағаланған. Олардың мәліметтері бойынша, 28 кВт·сағ сыйымдылығы бар LFP, NMC және LMO катодты аккумуляторларын өндіру кезінде тиісінше 3061 кг CO₂-экв, 2912 кг CO₂-экв, және 2705 кг CO₂-экв парниктік газдары бөлінеді. Экономикалық тұрғыдан тиімді және кең таралғанына қарамастан, LCO катодтары жалпы GHG шығарындыларының шамамен 80% құрайды.

Өндіріс барысында бөлінетін газдардың құрамы шамамен: 40% көміртек тотығы (CO), 20% көмірқышқыл газы (CO₂), 30% сутек (H₂), сондай-ақ <3% сутек фториді (HF) және шамамен 7% көмірсутектерден тұрады. Келесі 1 – кестеде әлемнің әртүрлі елдерінде орналасқан компаниялардың қолданыстағы коммерциялық қайта өңдеу технологияларын және олардың қайта өңдейтін батарея түрлерін, сондай-ақ алынатын соңғы өнімдерді салыстырмалы түрде шолу жасалған.

Кесте 1. Коммерциялық процесс және батареяларды қайта өңдеумен айналысатын компаниялар.

Процесс	Компания (Атауы және Орналасқан Жері)	Шикізат	Нәтиже	Сілтеме
Гидро-металлургия	IPGNA Ent. (Recupyl), Франция	Батареялардың барлық түрі	LiCoO ₂ және Co(OH) ₂	Ellis, Mirza (2011)
	Sumitomo-Sony, Жапония	ЛИА	Co(OH) ₂	Saloojee, Lloyd (2015)
	Тохсо, Канада	Li, Ni-негізіндегі батареялар	LiCoO ₂	Saloojee, Lloyd (2015)
Пиро-металлургия	Eurodieuze, Франция	Батареялардың барлық түрі	Ni, Cd және болат	Kushnir (2015)
	Zimaval, Франция	Zn, Mn, Hg негізіндегі батареялар	Zn және Mn	Ellis, Mirza (2011)
	Dowa, Жапония	Батареялардың барлық түрі	Ni, Co	Ellis, Mirza (2011)
	Umicore, Бельгия	ЛИА және Ni-MH	Co және Ni	Saloojee, Lloyd (2015)
	Nippon Recycling center, Жапония	Ni-Cd, Ni-MH, ЛИА	Ni, Co, Cd, Al, Cu	Ellis, Mirza (2011)
	INMETCO, АҚШ	Ni - Cd	Cd, Ni, Zn	Saloojee, Lloyd (2015)
Пиро-гидро-металлургия	Glencore Plc., Швейцария	ЛИА және электр көліктері	Cu, Ni, Zn, Li	Saloojee, Lloyd (2015)

Әлемнің көптеген елдерінде аккумуляторларды қайта өңдеумен айналысатын лицензияланған кәсіпорындар жұмыс істейді. Литий-ионды батареяларды (LIBs) қайта өңдеуге маманданған негізгі компанияларға Accures, Umicore, Batrec AG, Sony-Sumitomo, Тохсо және басқа да фирмалар жатады. Өнеркәсіптік және зертханалық деңгейде батареяларды қайта өңдеудің басты мақсаты кобальт, литий, никель және марганец сияқты металдарды қалпына келтіру. Литий-ионды аккумуляторларды қайта өңдеу Ni-Cd және Ni-Mn батареяларына қарағанда әлдеқайда кең таралған (Ellis et.al., 2011).

LIBs құрамындағы жетілдірілген химиялық жүйелер қайта өңдеу үдерісін экологиялық тұрғыдан тиімді етеді, себебі оларда қауіпті заттар аз мөлшерде болады және қайта өңдеу үшін пирометаллургияға қарағанда гидрометаллургиялық әдістерді қолдануға мүмкіндік береді. Ресурстарды тиімді пайдаланумен қатар, қайта өңдеу тікелей экологиялық пайда әкеледі. Мысалы, LMO типті литий-ионды аккумулятордың өмірлік цикліндегі GHG шығарындылары бастапқы шикізат орнына қайта өңделген катод, алюминий және мыс қолданылған жағдайда 50%-ға дейін азаюы мүмкін (Dunn et al., 2012). Литий-ионды аккумуляторларда қолданылатын әртүрлі катодтық материалдардың металлдық құрамының айтарлықтай өзгеретінін көрсетеді: LiCoO₂ жүйелерінде кобальттың массалық үлесі өте жоғары болса, NCM типті материалдарда никель мен марганецтің үлесі басым. Бұл деректер катод химиясының эволюциясын, яғни кобальтқа тәуелділікті

азайтып, никельге бай, экологиялық қауіпі төмен жүйелерге көшу үрдісін айқын көрсетеді. Сонымен қатар, литийдің үлесі барлық материалдарда шамамен тұрақты деңгейде сақталып, қайта өңдеу стратегияларын жоспарлауда маңызды параметр болып табылады.

Өмірлік циклді бағалау (LCA) нәтижелері пирометаллургия және гидрометаллургия арқылы өндірілген батарея материалдарын бастапқы шикізатпен салыстырғанда, пирометаллургиялық өндірістің электр энергиясын көбірек тұтынатынын, сондай-ақ өте ұсақ қатты бөлшектер (PM2.5) және органикалық ұшпа қосылыстар (VOC) шығарындыларын гидрометаллургияға қарағанда екі есе көп бөлетінін көрсетеді (Arambarri et al., 2019).

Батарея жүйелерінің өмірлік циклін және экологиялық әсерін бағалауда аса маңызды параметр батареядағы материалдардың химиялық формасы. Әдетте Ni, Co, Cd, Mn, Zn сияқты элементтердің уыттылығы олардың қоршаған ортада оңай миграциялануымен байланысты қарастырылады. Алайда батарея өндірушілері химиялық құрамды жиі өзгертіп отырады, бұл қалпына келтірілген материалдарды жаңа жүйелерге енгізуді қиындатады. Мысалы, Ni-Cd батареяларында қолданылатын негізгі қосылыс нашар еритін кадмий оксиді, бірақ токсикологиялық әдебиеттерде көбіне жоғары еритін кадмий хлориді негізге алынады. Сол сияқты, пайдаланылған LIBs құрамындағы MnO_2 және Mn_3O_4 (марганец), $ZnMn_2O_4$ (мырыш), $LiNiO_2$ (никель) фазалары қалыпты температура мен қысымда оңай ерімейді, сондықтан олардың экологиялық әсерін бағалауда бұл фактор міндетті түрде ескерілуі тиіс.

Литий-ионды аккумуляторлардың қызмет ету мерзімі әдетте 3-4 жыл, немесе орта есеппен 1000 цикл (Chen et al., 2018).

Нәтижелер мен талқылаулар. Макродеңгейдегі қайта өңдеу үдерісін талдау барысында негізгі техникалық мәселелердің бірі батарея жинақтарын, модульдерді және жеке элементтерді қауіпсіз әрі тиімді бөлшектеу екендігі анықталды. Қызмет көрсету мерзімі ішінде механикалық беріктікті қамтамасыз ету қажеттілігіне қарамастан, конструкция қайта өңдеу кезеңінде оңай ашуға мүмкіндік беретін шешімдерді де қарастыруы тиіс.

Зерттеу нәтижелері батареяларды бөлшектеу кезінде металл құралдарды қолдану қысқа тұйықталу қаупін арттыратынын және ішкі компоненттердің қызуы мен тұтануына әкелуі мүмкін екенін көрсетті. Сондықтан қайта өңдеу үдерісінің қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін электр өткізбейтін құралдар мен арнайы бөлшектеу технологияларын қолдану ұсынылады. Бұл мәселе әсіресе өнеркәсіпте кеңінен пайдаланылатын призматикалық және цилиндрлік литий-ионды элементтер үшін өзекті болып табылады, себебі олардың конструкциялық ерекшеліктері бөлшектеу кезінде қосымша қауіпсіздік шараларын талап етеді. Көптеген зерттеу топтары модульдер мен батарея жинақтарын бөлшектеу жұмыстарын ақылды роботтар арқылы орындау қажет деген пікірде. Мұны жинақ деңгейінде жүзеге асыруға болады, бірақ әртүрлі жинақ конструкциялары, бекіткіштер мен желімдердің көптігі бұл процесті қиындатады. Жинақтардың пішіндері мен конфигурациялары өндірушілер арасында ғана емес, бір

өндірушінің өз модельдерінде де айтарлықтай өзгереді. Элементтің форматына карамастан, әдетте бірнеше элемент модульге біріктіріледі, бірақ элемент саны мен тізбектей/параллель қосылу конфигурациялары өте әртүрлі. Көп жағдайда модуль ішіндегі элементтер бір-біріне тұрақты түрде бекітіледі және техникалық қызмет көрсету кезінде бөлшектеуге арналмаған. Жалпы алғанда, қызмет көрсету немесе бөлшектеу тұрғысынан алғанда, тоғыз түрлі біріктіру технологиясы анықталған, олардың барлығы тұрақты қосылу әдістері болып табылады, сондықтан оларды ажырату көбіне деструктивті процесс болуы мүмкін.

Модульдер арасындағы қосылыстар әдетте қызмет көрсетуге ыңғайлырақ және бұрандалы немесе моментпен тартылатын қосылыстарды, сондай-ақ арнайы механикалық қысу арқылы бекітілетін push-fit типті қосылыстарды қолдануы мүмкін. Мұндай қосылыстардың қайталанатын сенімділігі модульдерді қызмет көрсету кезінде оңай ауыстыруға және өмірлік цикл соңында бөлшектеуді жеңілдетуге мүмкіндік береді. Элемент деңгейінде стандарттау әлдеқайда қиын, себебі цилиндрлік, rouch және призматикалық элементтер кеңінен қолданылады. Жақында жүргізілген зерттеулерде электродтар арасындағы полимерлі сепараторды элементтің белсенді компоненттерін ажырату әдісі ретінде қолдануға болатыны көрсетілді. Li және әріптестері жасаған құрылғы вакуумды конвейер, қысқыштар және бірнеше скримерлер арқылы анодты, катодты және сепараторды ажыратуға мүмкіндік береді.

Пайдаланылған ЛИА-ны қайта өңдеу нәтижесінде алынатын өнімдер. Батареяларды қайта өңдеу процесінің соңғы кезеңінде пайдаланылған ЛИА құрамындағы металл құндылықтары қорытпалар, шлактар, ерітінділер және тұнбалар сияқты басқа заттарға айналады. Мысалы, пирометаллургиялық өңдеуден кейін литий, алюминий және темірдің бір бөлігі шлаққа өтеді, ал бұл шлақ бетон өндірісінде пайдалы толтырғыш ретінде қолданылуы мүмкін; ал мыс, кобальт, никель және темірдің бір бөлігінен тұратын қорытпа кейіннен бөлініп, тазартылып, қайта қолдануға жарамды таза металдарға айналады.

Гидрометаллургиялық процесте шаймалау кезеңінен кейін құрамында әртүрлі иондар бар ерітінді алынады, оны металдар, химиялық реагенттер, жаңа электрод материалдары және басқа функционалдық материалдар сияқты құнды өнімдерге өңдеуге болады.

Металдар және химиялық заттар. Әдетте таза металдар шаймалау ерітіндісінен электрохимиялық тұндыру арқылы алынады. Мысалы, ғылыми-зерттеу жұмыстарында пайдаланылған ұялы телефон батареяларынан таза кобальтты электрохимиялық әдіспен және $\text{Li-Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}_2$ қалдық материалынан таза никельді электролиз арқылы бөліп алған. Электрохимиялық шаймалау және кейінгі электролиз арқылы 99.2% кобальт, 99.5% мыс және 96% электролиттік марганец диоксидін (EMD) өндіргені жайлы мақалаларда мәліметтер кездеседі. Қалдық LiCoO_2 шаймалау ерітіндісінен 99.5% тазалықтағы кобальтты электролиз арқылы қалпына келтірген. Алынған металдар кейін қорытпа жасауға немесе химиялық шикізат ретінде өңдеуге жіберіледі.

Пайдаланылған ЛИА-дан химиялық шикізат алу үшін тиімді тәсіл шаймалау

ерітіндісінен тікелей жоғары тазалықтағы, жоғары қосылған құны бар химиялық қосылыстарды синтездеу. Қазіргі зерттеулер таза металдарды алудан гөрі әртүрлі қосылыстарды тікелей синтездеуге көбірек бағытталған. Мысалы, алынатын қосылыстар:

Кобальт қосылыстары: $\text{CoC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Co}(\text{OH})_2$, $\text{Co}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, CoCO_3 , $\text{Co}_2(\text{PO}_4)_2$, $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

Никель қосылыстары: $\text{Ni}(\text{OH})_2$, NiCl_2 , $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

Литий қосылыстары: Li_2CO_3 , Li_3PO_4 .

Басқа өнімдер: CuSO_4 , MnO_2 , $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, FeCl_3 , Ni–Co–Mn гидроксидтері.

Бұл химиялық заттардың көпшілігі жоғары тазалыққа ие және қосымша тазартуды қажет етпей-ақ жаңа материалдар өндірісінде шикізат ретінде қолданылуы мүмкін.

Электрод материалдары. Жоғарыда айтылғандай, пайдаланылған ЛИА-ның катод материалдарындағы литий, кобальт, никель, марганец, темір сияқты металдарды қайта өңдеу арқылы жоғары тазалықта қалпына келтіруге болады. Соңғы жылдары көптеген ауыспалы валентті металл оксидтері ЛИА үшін әлеуетті анод материалдары ретінде де қарастырылуда. Сондықтан пайдаланылған ЛИА-дан қалпына келтірілген металл құндылықтары жаңа электрод материалдарын синтездеуге арналған маңызды шикізат көзі бола алады.

Микродеңгейдегі қайта өңдеу мәселелері. Электролиттен, сепаратордан және қаптамадан бөлінгеннен кейін, құрамында негізгі құндылық шоғырланған электрод материалдарын олардың жеке компоненттеріне ажырату қажет. Қайта өңдеудегі негізгі кедергі — ток жинағыш пен белсенді материал арасындағы интерфейсті ажырату. Байланыстырғыштың (binder) маңыздылығы көбіне ескерілмейді. Мұнда екі түрлі бұзылу механизмі бар:

1. Ток жинағыш пен белсенді материал арасындағы адгезиялық байланысты бұзу;
2. белсенді бөлшектер арасындағы когезиялық байланысты бұзу.

Органикалық еріткіштер байланыстырғышты еріту үшін лиганд ретінде қолданылуы мүмкін, ал сілтілік лигандтар алюминийді ойып (etching) жібереді. Сулы тотықтырғыш қышқылдар мыс пен алюминийді тотықтырып, металл оксидтерін де еріте алады. Ток жинағыш материалдарының ойылуы кейінгі өңдеу сатыларында қиындық тудырады, себебі металл оксидтерінің мыс немесе алюминиймен ластануы қайта қалпына келтірілген катод материалдарының өнімділігіне кері әсер етеді.

Алайда суға еритін қоспаларды дұрыс таңдау және бөлу процесін оңтайландыру жасыл еріткіштерді қолдана отырып, жақсы бөлінген және таза қалдық ағындарын алуға мүмкіндік береді. Мұндай бөлу әдістерімен анод пен катодты қысқа циклді қайта өңдеу мүмкін. Сулы жүйелерде графитті қайта өңдеп, оңай қайта қолдануға болады, бірақ катод материалын қайта пайдаланар алдында көбіне релитация (қайта литиймен қанықтыру) немесе «сауықтыру» қадамы қажет, әйтпесе оның меншікті сыйымдылығы жеткіліксіз болады.

Қосымша жеңілдету ретінде ток жинағыш пен белсенді материал арасында

байланыстырғышты қажет етпейтін жаңа электрод конструкцияларын қарастыруға болады. Бұл жаңа идея емес: бастапқы сілтілік цилиндрлік батареялар мұны ұзақ уақыттан бері қолданып келеді және электрод ретінде ток жинағыштарға тығыздалған белсенді ұнтақтарды пайдаланады. Алайда бұл тәсіл әлі литий-ионды жүйелерге енгізілмеген және болашақ зерттеулер үшін перспективалы бағыт болуы мүмкін.

Қорытынды мен ұсыныстар. Электр көліктерінің өндірісінің айтарлықтай артуы жақын болашақта көптеген пайдаланылған литий-ионды аккумуляторлардың (ЛИА) пайда болуына әкеледі. Оларды дұрыс қайта өңдеу өте маңызды, өйткені олардың құрамында бағалы металдар мен зиянды заттар бар. Пайдаланылған ЛИА-дан металл құндылықтарын қалпына келтіруге бағытталған көптеген қайта өңдеу процестері әзірленді, олардың кейбірі тіпті өнеркәсіптік деңгейде жүзеге асырылуда.

Идеал қайта өңдеу процесі пайдаланылған ЛИА-ның барлық компоненттерін төмен энергия шығынымен және қоршаған ортаны ластамай қалпына келтіруге қабілетті болуы тиіс. Қазіргі уақытта мұндай талаптарға сәйкес келетін технологиялар бойынша белгілі бір ғылыми жетістіктер бар. Алайда ЛИА құрамындағы материалдардың әртүрлілігіне байланысты олардың барлығы күрделі өңдеу сатыларын немесе қымбат реагенттерді қажет етеді. Сондықтан анағұрлым тиімді қайта өңдеу технологияларын дамыту үшін әлі де көп күш жұмсау қажет.

Сонымен қатар, ЛИА қайта өңдеу индустриясы бірнеше басқа қиындықтарға да тап болады. Біріншіден, қорғасын-қышқылды аккумуляторлардан айырмашылығы, ЛИА технологиясы мен химиясы үнемі өзгеріп отырады, ал қайта өңдеу технологиялары бұл өзгерістерге ілесе алмай келеді. Мысалы, егер катодтар кобальтсыз материалдардан жасалса, пирометаллургиялық процесс экономикалық тұрғыдан тиімсіз болуы мүмкін.

Екіншіден, ЛИА қайта өңдеу индустриясы дамыған сайын қайта өңдеу ағынында аккумулятор түрлерінің араласуы мәселесі туындауы мүмкін. Мысалы, кейбір шағын электр көліктері немесе электр велосипедтері үшін ЛИА мен қорғасын-қышқылды аккумуляторлар геометриялық жағынан өзара алмастырылатын етіп жасалуы мүмкін. Бұл ЛИА-ның қорғасын балқыту пештеріне қате жіберілуіне әкеліп, өрт, жарылыс және ластану қаупін тудырады.

Үшіншіден, ЛИА қайта өңдеуге қатысты толыққанды заңдар, ережелер және стандарттар жүйесі жоқ. Мұндай жүйе қайта өңдеу процесін стандарттап, пайдаланылған ЛИА-ны қауіпсіз жинауды, тасымалдауды және өңдеуді қамтамасыз етер еді.

References

- Aaltonen M., Peng C., Wilson B.P., Lundström M. (2017). Leaching of metals from spent lithium-ion batteries. *Recycling*. – No. 2(4). – P. 20. DOI:10.3390/recycling2040020 (in Eng.).
- Arambarri J., Hayden J., Elkurdy M., Meyers B., Hamatth Z.S.A., Abbassi B., Omar W. (2019). Lithium-ion car batteries: Present analysis and future predictions. *Environmental Engineering Research*. – No. 24(4). – P. 699-710. DOI:10.4491/eer.2018.383 (in Eng.).

Chen W.S., Ho H.J. (2018). Recovery of valuable metals from lithium-ion batteries NMC cathode waste materials by hydrometallurgical methods. *Metals*. – No. 8(5). – P. 321. DOI:10.3390/met8050321 (in Eng.).

Corbus D., & Hammel C.J. (1995). Current status of environmental, health, and safety issues of lithium polymer electric vehicle batteries (No. NREL/TP-463-7540). National Renewable Energy Lab., Golden, CO (United States). (in Eng.).

Dunn J.B., Gaines L., Kelly J.C., Gallagher K.G. (2016). Life cycle analysis summary for automotive lithiumion battery production and recycling. *REWAS 2016: Towards Materials Resource Sustainability*. – P. 73-79. DOI:10.1002/9781119275039.ch11 (in Eng.).

Ellis T.W., Mirza A.H. (2014). Battery recycling: defining the market and identifying the technology required to keep high value materials in the economy and out of the waste dump. *Research Gate*. – P. 1188-1204. (in Eng.).

Idrees, M., Liu, L., Batool, S., Luo, H., Liang, J., Xu, B., Kong, J. (2019). Cobalt-doping enhancing electrochemical performance of silicon/carbon nanocomposite as highly efficient anode materials in lithium-ion batteries. *Engineered Science*. – No. 6(5). – P. 64-76. DOI: 10.30919/es8d798 (in Eng.).

Kaya M. (2022). Lityum İyon Pil Geri Dönüşüm Teknolojileri. *Circular Economy*. – No. 1(2). DOI:10.1016/j.ccc.2022.100015 (in Eng.).

Kushnir D. (2015). Lithium-ion battery recycling technology 2015. Current state and future prospects. – P. 1-56. (in Eng.).

Labbé J.F., Daw G. (2012). Panorama 2011 du marché du lithium (Doctoral dissertation, Bureau de recherches géologiques et minières [BRGM]; Centre d'Economie de la Sorbonne. <https://shs.hal.science/halshs-00809298v1> (in Eng.).

Lim, M. K., Lai, M., Wang, C., & Lee, Y. (2022). Circular economy to ensure production operational sustainability: A green-lean approach. *Sustainable Production and Consumption*. – No. 30. – P. 130-144. DOI:10.1016/j.spc.2021.12.001 (in Eng.).

Lin J., Li L., Fan E., Liu C., Zhang X., Cao H., Chen R. (2020). Conversion mechanisms of selective extraction of lithium from spent lithium-ion batteries by sulfation roasting. *ACS applied materials & interfaces*. – No. 12(16). – P. 18482-18489. DOI: 10.1021/acsami.0c00420 (in Eng.).

Pillot C. (2017). The rechargeable battery market and main trends 2016–2025. In *Proceedings of the 33rd Annual International Battery Seminar & Exhibit*, Fort Lauderdale, FL, USA. – Vol. 20. – P. 1-45. (in Eng.).

Rantho M.N. (2017). Synthesis and characterization of vanadium disulfide nanosheets and carbonized iron cations adsorbed onto polyaniline for high-performance supercapacitor applications. University of Pretoria (South Africa). (in Eng.).

Saloojee F., Lloyd J. (2015). Lithium battery recycling process. Department of Environmental Affairs Development Bank of South Africa (Project No. DB-074 (RW1/1016)). – No. 27(0). (in Eng.).

Shakoor N., Adeel M., Ahmad M.A., Zain M., Waheed U., Javaid R.A., Rui Y. (2023). *Environmental Science and Ecotechnology*. DOI: 10.1016/j.ese.2023.100252 (in Eng.).

Thompson D.L., Hartley J.M., Lambert S.M., Shiref M., Harper G.D., Kendrick E., Abbott A.P. (2020). Cutting-edge research for a greener sustainable future. *Green Chem*. – No. 22. – P. 7571-7581. DOI:10.1039/D0GC01831G (in Eng.).

Tong H., Zhou Q., Zhang B., Wang X., & Yao Y. (2019). A novel core-shell structured nickel-rich layered cathode material for high-energy lithium-ion batteries. *Engineered Science*. – No. 8(5). – P. 25-32. DOI: 10.30919/es8d502 (in Eng.).

Vega-Muratalla V.O., Ramírez-Márquez C., Lira-Barragán L.F., Ponce-Ortega J.M. (2024). Review of lithium as a strategic resource for electric vehicle battery production: Availability, extraction, and future prospects. *Resources*. – No. 13(11). – P. 148. DOI: 10.3390/resources13110148 (in Eng.).

Publication Ethics and Publication Malpractice in the journals of the «Central Asian Academic Research Center» LLP (Almaty)

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the work described has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct (http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf). To verify originality, your article may be checked by the originality detection service Cross Check <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Requirements for articles design for publication in the journal are available on the websites:

www.nauka-nanrk.kz

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

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

Managing Editor: T. Apendiev
Editors: D.S. Alenov, A. Shormakova
Computer layout: G.D. Zhadyranova

Signed for print: June 22, 2026
Format: 70×90 1/16. 24.5 printed sheets. Order No. 2.

*«Central Asian Academic Research Center» LLP
Almaty, Shevchenko Street, 28*