

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

**ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES**

**№1
2026**

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

2026 • 1



**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 Oil refining and Petrochemistry Research Institute (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

KALIMOLDAYEV Maksat Nuradilovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detailuri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

ABILMAGZHANOV Arlan Zainutallaevich, PhD in Chemistry, 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=57197468109>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

EDITORIAL BOARD:

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 Tlekkabul Sabitovich, 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>

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 Жұрынулы, 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/author/detail.uri?authorId=6602177960>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

БАС РЕДАКТОРДЫҢ ОРЫНБАСАРЛАРЫ:

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

ӘБИЛМАҒЖАНОВ Арлан Зайнуталлайұлы, химия ғылымдарының кандидаты, Д.В. Сокольский атындағы «Жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ Бас директоры (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=57197468109>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

РЕДАКЦИЯ АЛҚАСЫ:

ӘДЕКЕНОВ Серғазы Мынжасарұлы, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, «Фитохимия» ғылыми-өндірістік орталығы» АҚ директоры (Қарағанды, Қазақстан), <https://www.scopus.com/author/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/author/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/author/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/author/detail.uri?authorId=57221375979>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/399768>

ТИГИНЯНУ Ион Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, академик, Молдова Ғылым академиясының президенті, Молдова техникалық университеті (Кишинев, Молдова), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=7006315935>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

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/author/detail.uri?authorId=59286321700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

БЕРСІМБАЕВ Рахметқажы Есендірұлы, биология ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті (Астана, Қазақстан), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=7004012398>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

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

БОШКАЕВ Қуантай Авғазыұлы, PhD теориялық және ядролық физика кафедрасының доценті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/author/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/author/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/author/detail.uri?authorId=55989741100>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30353742>

ЖҮСПІНОВ Марат Абжанұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, теориялық және ядролық физика кафедрасының профессоры, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/author/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/author/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/65533963>

ТАКИБАЕВ Нұрғали Жабағаұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/author/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/author/detail.uri?authorId=6701353063>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2023295>

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

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 агенттігінің 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 Научно-исследовательского института нефтепереработки и нефтехимии (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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>

АБИЛЬМАГЖАНОВ Арлан Зайнуталлаевич, кандидат химических наук, Генеральный директор 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>

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

БЕРСИМБАЕВ Рахметкажи Искендерович, 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 Авгазиевич, 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 Мухамбетали, 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 имени 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 Жабағевич, 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>

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>

CONTENTS

PHYSICS

Aimaganbetova Z.K., Kulshymbayev Y.A., Zhanturina N.N., Beketova G.K. First-principles calculation of the electronic properties of the Double Halide Perovskite $\text{Cs}_2\text{Ag}_{0.2}\text{Na}_{0.4}\text{In}_{0.6}\text{Ti}_{0.4}\text{Cl}_6$ based on the quantum ESPRESSO software.....	14
Amangeldinova S., Zhuniskhan S., Kalzhigitov N., Kurmangaliyeva V. Study of the cluster structure of ^5He and ^5Li mirror nuclei in two-cluster approximation.....	35
Chokin K., Otunchi Ye., Kozhahmetova A., Kasenova A., Shongalova A. Development and testing of a laboratory pyrometallurgical installation for recycling lithium-ion batteries.....	46
Issayeva A., Beisebayeva A., Madybekova G., Shynazbekova Sh., Issa A. Comparative analysis of physico-chemical characteristics of drinking, spring and natural water in the South Kazakhstan.....	65
Kim V.Yu., Aimuratov Y.K. Search for transient cosmic events by scanning the sky with wide-field telescopes.....	78
Koshtybayev T.B., Tatenov A.M., Aliyeva M.E., Tugelbaeva G.T., Zhanaliyeva G.Zh. Study of the electromagnetic field based on thermodynamics principles.....	89
Mukamedenkyzy V., Akberdiyev B. Numerical investigation of the effect of inclination angle on the stability of mechanical equilibrium in Ar–N ₂ binary gas mixtures.....	105
Myasnikova L.N., Uzakbaeva S.S., Shanina Z.K., Bekeshev A.Z. Kinetic properties of high-density polyethylene filled with chromium spinel powder.....	119
Nurbayev B.M., Dmitriyeva E.A., Kemelbekova A.E. The role of low-dimensional layered structures in enhancing the stability of tin-based perovskite materials.....	136
Sattinova Z., Ermakhanova F., Assilbekov B., Taimuratova L. Influence of various cooling conditions and heat transfer coefficients on solidification during the formation of beryllium ceramic products.....	149
Shestakova L.I., Serebryanskiy A.V., Spassyyuk R.R., Omarov Ch.T. Search for gas of comet-meteor origin in the inner Solar System: caii ion emission.....	165
Ualikhanova U., Tursynkazy F., Syzdykova A.M., Altayeva G.S., Altaibayeva A.B. Studying the amplitude of $f(T)$ gravitational waves using Bessel functions.....	179

Zhexenbayeva G.A., Nasirova D.M., Aimanova G.K., Shomshekova S.A. Photometric study of the symbiotic object V725 Tau.....	194
Zhusupova N.K., Zhadyranova A.A. Bounce cosmology in $f(T, \mathcal{T})$ gravity based on energy condition analysis.....	205
Ziyatbekova G., Abdimanapova P., Sagyntay O., Nurym A., Ilinov R. Using artificial intelligence to predict diseases based on medical data.....	225

CHEMISTRY

Almassov N.Zh., Zhumagaliyeva A.N., Duisenbekov S.E., Zhakiyev N.K. Design and optimization of hybrid renewable energy systems for hydrogen production in Kazakhstan.....	236
Amangeldi B., Zhanikulov N., Taimasov B., Aitureev M.M., Dauletiyarov M. Calculation of the Raw material composition for obtaining white Portland cement clinker.....	251
Baeshov A., Tashenov E.A., Atykhanova S.B., Koshkarbayeva Sh.T. Preparation of cadmium sulfide by electrochemical method using a composite sulfur-graphite electrode.....	267
Baisalova G.Zh., Azhikhanova Zh., Taltenov A.A., Kuzhatova P. Determination of the total phenolic content in perennial herbaceous plants of the flora of Kazakhstan.....	277
Darmenbayeva A.S., Rajasekharan R., Zhussipnazarova G.M., Mukazhanova Zh.B., Begenova B.E. Composites based on chitosan and cellulose: synthesis, properties, and application prospects.....	287
Erkasov R.Sh., Zhamkenova A.S., Sergazina S.M., Nurmukhanbetova N.N., Kassenova N.B. Halide-dependent modulation of hydrogen bonding in Mn(II) complexes with protonated acetamide: a QAIM, NCI, and energy decomposition study.....	304
Kalimoldina L.M., Shaikhova Zh.E., Kaliyeva B.K., Bubish Sh., Askarova Sh.K. The effect of silver nanoparticles on the germination of bean, lemon, tangerine and avocado seeds.....	320
Kurtebayeva A.A., Alvarez-Torrellas S., Gomes H.T., Orynbayev S.A., Kalmakhanova M.S. Activated-carbon-enhanced polymeric membranes for efficient elimination of emerging contaminants.....	334

Massenova A.T., Zhumakanova A.S., Torlopov I.I., Rakhmetova K.S., Abilmagzhanov A.Z. Optimization of the hierarchical zeolite ZSM-5 synthesis process by steam-assisted alkaline modification.....	350
Mutushev A.Zh., Nuraly A.M., Sanat A.S., Shaukharova M.A., Yessimsiitova Z.B. The effect of light-converting films on the accumulation of bioactive compounds and the quality of fruits.....	366
Nefedov A.N., Taikenova A.T. Current state of organic corrosion inhibitor application in oil refining.....	379
Omarov B.T., Altybayev Zh.M., Serikbayeva B.S. Production of biohumus by vermicomposting of organic wastes and study of its agroecological effectiveness.....	399
Rakhman D.M., Kappasuly A., Makhayeva D.N., Kazybayeva D.S., Irmukhametova G.S. Development and investigation of mucoadhesive hydrogels based on gellan–cysteine complexes.....	414
Sabyrzhanova A.E., Bolatkyzy N., Berganaeva G.E., Dyusebaeva M.A. Study of amino acids and fatty acids in the aerial part of <i>Plantago major</i>	428
Satayeva S., Akhmetova F., Urazova A., Aituganova S., Yerniyazova K. The influence of PEPA concentration on the physical, mechanical, and operational properties of ED-20 epoxy adhesives.....	439
Zamanbek A.Zh., Koshkarbayeva Sh.T., Satayev M.S. Methods of Obtaining Silver Nanoparticles and Antibacterial Properties.....	450
Zhortarova A.A., Salkeyeva L.K., Minayeva Ye.V., Ibrayev M.K., Fazylov S.D. New possibilities for the synthesis and phosphorylation of phosphonoacetic acid ester.....	462

МАЗМҰНЫ

ФИЗИКА

Аймағанбетова З.К., Құлшымбаев Е.А., Жантурина Н.Н., Бекетова Г.К. Quantum Espresso бағдарламасы негізінде Cs ₂ Ag _{0.2} Na _{0.4} In _{0.6} Ti _{0.4} Cl ₆ кос галогенді перовскиттің электрондық қасиеттерін бірінші принциптік есептеу.....	14
Амангелдинова С., Жүнісхан С., Калжигитов Н., Курманғалиева В. Екі кластерлік жуықтауда 5He және 5Li айналық ядроларының кластерлік құрылымын зерттеу.....	35
Чокин К., Отунчи Е., Кожаметова А., Касенова А., Шонғалова А. Литий-ионды аккумуляторларды қайта өндеуге арналған зертханалық пирометаллургиялық қондырғыны әзірлеу және сынау.....	46
Исаева А.Б., Бейсебаева А.С., Мадыбекова Г.М., Шиназбекова Ш.С., Иса А.Б. Сравнительный анализ физико-химических характеристик питьевой, родниковой и природной воды юга Казахстана.....	65
Ким В.Ю., Аймуратов Е.К. Кең бұрышты телескоптармен аспанды сканерлеу арқылы өтпелі ғарыштық оқиғаларды іздеу.....	78
Коштыбаев Т.Б., Татенов А.М., Алиева М.Е., Тугелбаева Г.Т., Жаналиева Г.Ж. Электромагниттік өрісті термодинамикалық бастамалар тұрғысында зерттеу.....	89
Мукамеденқызы В., Ақбердиев Б. Ar–N ₂ бинарлы газ қоспаларындағы механикалық тепе-теңдік тұрақтылығына қиғаш бұрыштың әсерін сандық зерттеу.....	105
Мясникова Л.Н., Узакбаева С.С., Шанина З.К., Бекешев А.З. Хром-шпинельді ұнтақ қосылған жоғары тығыздықты полиэтиленнің кинетикалық қасиеттері.....	119
Нұрбаев Б.М., Дмитриева Е.А., Кемелбекова А.Е. Қалайы негізіндегі перовскитті материалдардың тұрақтылығын арттырудағы төменөлшемді қабатты құрылымдардың рөлі.....	136
Саттинова З., Ермаханова Ф., Асылбеков Б., Таймуратова Л. Бериллий керамикалық бұйымдарын қалыптастыру кезінде әр түрлі салқындату жағдайлары мен жылу беру коэффициенттерінің қатаюға әсері.....	149
Шестакова Л.И., Серебрянский А.В., Спасюк Р.Р., Омаров Ш.Т. Күн жүйесінің ішкі аймағындағы комета-метеорлық тектегі газды іздеу: CaII иондарының жарқырауы.....	165

Уалиханова У.А., Тұрсынқазы Ф., Сыздықова А.М., Алтаева Г.С., Алтайбаева А.Б.
Бессель функцияларын пайдаланып $f(T)$ гравитациялық толқындардың
амплитудасын зерттеу.....179

Жексенбаева Г.А., Насирова Д.М., Айманова Г.К., Шомшекова С.А
V725 Тау симбиотикалық объектiсiн фотометрлiк зерттеу.....194

Жусупова Н.К., Жадыранова А.А.
Энергия шарттарын талдауға негiзделген $f(T, T)$ серпiлiс космологиясы.....205

Зиятбекова Г.З., Абдиманапова П.Б., Сағынтай О.А., Нұрым А.А., Ильинов Р.А.
Жасанды интеллект көмегiмен медициналық деректер бойынша
ауруларды болжау.....225

ХИМИЯ

Алмасов Н.Ж., Жумагалиева А.Н., Дүйсенбеков С.Е., Жакиев Н.К.
Қазақстанда сутегi өндiруге арналған гибрирдiк жаңартылатын энергия жүйелерiн
жобалау және оңтайландыру.....236

Амангелдi Б., Жаникулов Н., Таймасов Б., Айтуреев М., Даулетияров М.
Ақ портландцемент клинкерiн алу үшiн шикiзат шихта құрамын есептеу.....251

Баешов А., Ташенов Е.А., Атыханова С.Б., Кошкарбаева Ш.Т.
Композициялы күкiрт-графит электродын қолдану арқылы кадмий
сульфидiн электрохимиялық әдiспен алу.....267

Байсалова Г.Ж., Ажиханова Ж., Талтенов А.А., Құжатова П.
Қазақстан флорасындағы көпжылдық шөптесiн өсiмдiктердiң фенолдық
қосылыстарының жиынтық мөлшерiн анықтау.....277

**Дарменбаева А.С., Rajasekharan R., Жусипназарова Г.М., Мукажанова Ж.Б.,
Бегенова Б.Е.**
Хитозан және целлюлоза негiзiндегi композиттер: синтез, қасиеттерi және қолдану
перспективалары.....287

**Еркасов Р.Ш., Жамкенова А.С., Сергазина С.М., Нурмуханбетова Н.Н.,
Касенова Н.Б.**
Mn (II) кешендерiндегi сутектiк байланыстардың энергиясы мен табиғатына
галогеннiң әсерi: QTAIM, NCI және энергия декомпозициясы.....304

Калимолдина Л.М., Шаихова Ж.Е., Калиева Б.К., Бубиш Ш., Аскарова Ш.К.
Күмiс нанобөлшектерiнiң бұршақ, лимон, мандарин, авокадо тұқымдарының
өнуiне әсерi.....320

Қуртебаева А.А., Álvarez-Torrellas S., Gomes Н.Т., Орынбаев С.Ә., Калмаханова М.С. Алаңдаушылық тудыратын ластаушы заттарды тиімді жою үшін белсендірілген көмір полимерлі мембраналар.....	334
Масенова А.Т., Жұмақанова А.С., Торлопов И.И., Рахметова К.С., Абильмагжанов А.З. ZSM-5 иерархиялық цеолитін бумен сілтілі модификациялау арқылы алу процесін онтайландыру.....	350
Мутушев А.Ж., Нұралы Ә.М., Санат А.С., Шаукарова М.А., Есимситова З.Б. Жарық түрлендіретін пленкалардың биоактивті қосылыстардың жинақталуына және жеміс сапасына әсері.....	366
Нефедов А.Н., Тайекенова А.Т. Мұнай өңдеу өнеркәсібінде органикалық коррозия ингибиторларын қолданудың қазіргі жағдайы.....	379
Омаров Б.Т., Алтыбаев Ж.М., Серикбаева Б.С. Органикалық қалдықтарды вермикомпостинг арқылы биогумус өндіру және оның агроэкологиялық тиімділігін зерттеу.....	399
Рахман Д.М., Қаппасұлы Ә., Махаева Д.Н., Қазыбаева Д.С., Ирмухаметова Ғ.С. Геллан–цистеин кешендері негізінде мукоадгезиялық гидрогельдерді әзірлеу және зерттеу.....	414
Сабыржанова А.Е., Болатқызы Н., Берганаева Г.Е., Дюсебаева М.А. Plantago Major жер үсті бөлігінің құрамындағы амин қышқылдары мен май қышқылдарын зерттеу.....	428
Сатаева С., Ахметова Ф., Уразова А., Айтуганова С., Ерниязова К. ЭД-20 эпоксидті желімдерінің физика-механикалық және эксплуатациялық қасиеттеріне ПЭПА концентрациясының ықпалы.....	439
Заманбек А.Ж., Кошкарбаева Ш.Т., Сатаев М.С. Күміс нанобөлшектерінің алыну әдістері мен антибактериалдық қасиеттері.....	450
Жоргарова А.А., Салькева Л.К., Минаева Е.В., Ибраев М.К., Фазылов С.Д. Фосфоносірке қышқылының эфирін синтездеу мен фосфорландырудың жаңа мүмкіндіктері.....	462

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА

Аймаганбетова З.К., Кулшымбаев Е.А., Жантурина Н.Н., Бекетова Г.К. Расчет по первому принципу электронных свойств двойного галогенидного перовскита Cs ₂ Ag _{0.2} Na _{0.4} In _{0.6} Ti _{0.4} Cl ₆ на основе программы Quantum Espresso.....	14
Амангелдинова С., Жүнісхан С., Калжигитов Н., Курмангалиева В. Исследование кластерной структуры зеркальных ядер ⁵ He и ⁵ Li в двухкластерном приближении.....	35
Чокин К., Отунчи Е., Кожрахметова А., Касенова А., Шонгалова А. Разработка и испытания лабораторной пирометаллургической установки для переработки литий-ионных аккумуляторов.....	46
Исаева А.Б., Бейсебаева А.С., Мадыбекова Г.М., Шиназбекова Ш.С., Иса А.Б. Сравнительный анализ физико-химических характеристик питьевой, родниковой и природной воды юга Казахстана.....	65
Ким В.Ю., Аймуратов Е.К. Поиск транзиентных космических событий методом сканирования неба широкоугольными телескопами.....	78
Коштыбаев Т.Б., Татенов А.М., Алиева М.Е., Тугелбаева Г.Т., Жаналиева Г.Ж. Исследование электромагнитного поля на основе термодинамических принципов.....	89
Мукамеденкызы В., Акбердиев Б. Численное исследование влияния угла наклона на устойчивость механического равновесия в бинарной газовой смеси Ar–N ₂	105
Мясникова Л.Н., Узакбаева С.С., Шанина З.К., Бекешев А.З. Кинетические свойства высокоплотного полиэтилена с добавлением хром-шпинельного порошка.....	119
Нурбаев Б.М., Дмитриева Е.А., Кемелбекова А.Е. Роль низкоразмерных слоистых структур в повышении стабильности перовскитных материалов на основе олова.....	136
Саттинова З., Ермаханова Ф., Асылбеков Б., Таймуратова Л. Влияние различных условий охлаждения и коэффициентов теплопередачи на затвердевание при формировании бериллиевых керамических изделий.....	149

Шестакова Л.И., Серебрянский А.В., Спасюк Р.Р., Омаров Ш.Т. Поиск газа кометно-метеорного происхождения во внутренней области Солнечной Системы: Свечение ионов СаII.....	165
Уалиханова У.А., Турсынказы Ф., Сыздыкова А.М., Алтаева Г.С., Алтайбаева А.Б. Изучение амплитуды $f(T)$ гравитационных волн с использованием функций Бесселя.....	179
Жексенбаева Г.А., Насирова Д.М., Айманова Г.К., Шомшекеева С.А. Фотометрическое исследование симбиотического объекта V725 Tau.....	194
Жусупова Н.К., Жадыранова А.А. Космология отскока в $f(T, \mathcal{J})$ гравитации на основе анализа энергетических условий.....	205
Зиятбекова Г.З., Абдимананова П.Б., Сағынтай О.А., Нұрым А.А., Ильинов Р.А. Использование искусственного интеллекта для прогнозирования заболеваний на основе медицинских данных.....	225

ХИМИЯ

Алмассов Н.Ж., Жумагалиева А.Н., Дуйсенбеков С.Е., Жакиев Н.К. Проектирование и оптимизация гибридных возобновляемых источников энергии для производства водорода в Казахстане.....	236
Амангелді Б., Жаникулов Н., Таймасов Б., Айтуреев М., Даулетияров М. Расчёт состава сырьевой шихты для получения белого порландцементного клинкера.....	251
Башов А., Ташенов Е.А., Атыханова С.Б., Кошкарбаева Ш.Т. Получение сульфида кадмия электрохимическим методом с использованием композитного сера-графитового электрода.....	267
Байсалова Г.Ж., Ажиханова Ж., Талтенов А.А., Кужатова П. Определение суммы фенольных соединений в многолетних травянистых растениях флоры Казахстана.....	277
Дарменбаева А.С., Rajasekharan R., Жусиппазарова Г.М., Мукажанова Ж.Б., Бегенова Б.Е. Композиты на основе хитозана и целлюлозы: синтез, свойства и перспективы применения.....	287
Еркасов Р.Ш., Жамкенова А.С., Сергазина С.М., Нурмуханбетова Н.Н., Касенова Н.Б. Влияние галогена на энергетику и природу водородных связей в Mn(II): QTAIM, NCI и энергодекомпозиция.....	304

Калимолдина Л.М., Шаихова Ж.Е., Калиева Б.К., Бубиш Ш., Аскарлова Ш.К. Влияние наночастиц серебра на прорастание семян фасоли, лимона, мандарина, авокадо.....	320
Куртебаева А.А., Álvarez-Torrellas S., Gomes Н.Т., Орынбаев С.А., Калмаханова М.С. Полимерные мембраны с активированным углем для эффективного удаления загрязняющих веществ вызывающих обеспокоенность.....	334
Масенова А.Т., Жұмақанова А.С., Торлопов И.И., Рахметова К.С., Абильмагжанов А.З. Оптимизация процесса получения иерархического цеолита ZSM-5 паровой щелочной модификацией.....	350
Мутушев А.Ж., Нуралы А.М., Санат А.С., Шаукарова М.А., Есимсиитова З.Б. Влияние светопреобразующих плёнок на накопление биоактивных соединений и качество плодов.....	366
Нефедов А.Н., Тайекенова А.Т. Современное состояние применения органических ингибиторов коррозии в нефтепереработке.....	379
Омаров Б.Т., Алтыбаев Ж.М., Серикбаева Б.С. Получение биогумуса путем вермикомпостирования органических отходов и исследование его агроэкологической эффективности.....	399
Рахман Д.М., Қаппасұлы Ә., Махаева Д.Н., Казыбаева Д.С., Ирмухаметова Г.С. Разработка и исследование мукоадгезивных гидрогелей на основе комплексов геллан–цистеин.....	414
Сабыржанова А.Е., Болаткызы Н., Берганаева Г.Е., Дюсебаева М.А. Исследование аминокислот и жирных кислот в составе надземной части <i>Plantago Major</i>	428
Сатаева С., Ахметова Ф., Уразова А., Айтуганова С., Ерниязова К. Влияние концентрации ПЭПА на физические, механические и эксплуатационные свойства эпоксидных клеев ЭД-20.....	439
Заманбек А.Ж., Кошкарбаева Ш.Т., Сатаев М.С. Методы получения наночастиц серебра и антибактериальные свойства.....	450
Жоргарова А.А., Салькева Л.К., Минаева Е.В., Ибраев М.К., Фазылов С.Д. Новые возможности синтеза и фосфорилирования фосфонуксусного эфира.....	462

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 1.
Number 357 (2026), 46–64

<https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.404>

UDC: 669.018.4; 621.365.5
IRSTI: 53.37.19; 53.37.21; 31.29.00

©Chokin K.¹, Otunchi Ye.¹, Kozhahmetova A.², Kasenova A.²,
Shongalova A.^{1,3*}, 2026.

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

²Kazakh Agrotechnical University named after S. Seifullin, Astana, Kazakhstan;

³Pennsylvania State University, State College, United States of America.

*E-mail: shongalova.aigul@gmail.com

DEVELOPMENT AND TESTING OF A LABORATORY PYROMETALLURGICAL INSTALLATION FOR RECYCLING LITHIUM-ION BATTERIES

Chokin Kanat — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: k.chokin@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-9516-5400>;

Otunchi Yedil — master of technical sciences, engineer, Institute of Physics and technology, Almaty, Kazakhstan,

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

Kozhahmetova Aigul — Candidate of Law, Associate Professor, Kazakh Agrotechnical University named after S. Seifullin, Astana, Kazakhstan,

E-mail: a.kozhahmetova@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2813-1745>;

Kasenova Asiya — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Kazakh Agrotechnical University named after S. Seifullin, Astana, Kazakhstan,

E-mail: as.kasenova@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0853-6235>;

Shongalova Aigul — PhD, IPT senior researcher, Almaty, Kazakhstan,

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

Abstract. The development of a laboratory pyrometallurgical installation for recycling lithium-ion batteries (LIBs) represents a highly relevant research direction driven by the rapid expansion of battery production and, consequently, the growing volume of waste containing both valuable and hazardous components. This article examines the design, operating principles, and experimental validation of the installation created to model high-temperature processes involved in the thermal treatment of LIBs. The relevance of the study is supported by global trends: by 2030, the number of electric vehicles is expected to reach 140 million, which will result in millions of tons of spent batteries containing organic solvents, graphite, metal foils, and transition-metal oxides. Such waste requires safe and efficient recycling methods that enable the recovery of valuable materials while minimizing environmental risks.



The article provides a detailed description of the restored 10 kW, 30 kHz induction furnace equipped with a new water-cooled inductor and a graphite crucible. Calculations of crucible wall thickness based on skin-depth considerations are presented, along with the rationale for selecting materials for the thermal insulation assembly. The gas-cleaning system, consisting of a gas cooler and a wet scrubber designed to capture and neutralize pyrolysis and hydrolysis products – including HF and organic vapors – is described. Special attention is given to ensuring the tightness of the reaction chamber and maintaining an inert atmosphere, which is essential for preventing metal oxidation and degradation of the graphite crucible.

The experimental section includes verification of pyrometric temperature control accuracy and preliminary tests on the reduction of iron oxide (Fe_2O_3) at 1500 °C. The formation of metallic iron droplets confirms the correct operation of the installation and the effectiveness of the reduction processes. The article also discusses engineering solutions that ensure safe operation, such as a scissor-type lifting mechanism and an ejector-based air pump for creating vacuum and removing gases.

The developed installation has demonstrated its operability and suitability for studying pyrometallurgical recycling processes of LIBs, optimizing technological parameters, and developing environmentally safe methods for battery waste treatment. It also provides a foundation for further fundamental and applied research aimed at improving metal recovery efficiency and reducing the environmental impact of battery recycling.

Keywords: lithium-ion batteries, pyrometallurgical methods, pyrolysis, hydrolysis, high-temperature processing

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".*

For citations: *Chokin K., Otunchi Ye., Kozhahmetova A., Kasenova A., Shongalova A. Development and Testing of a Laboratory Pyrometallurgical Installation for Recycling Lithium-Ion Batteries. Academic Journal of Physical and Chemical Sciences. 2026. No.1. Pp. 46–64. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.404>*

©**Чокин К.¹, Отунчи Е.¹, Кожрахметова А.², Касенова А.²,
Шонғалова А.^{1,3*}, 2026.**

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

²С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Астана, Қазақстан;

³The Pennsylvania State University, Стейт колледж, Америка Құрама Штаттары.

*E-mail: shongalova.aigul@gmail.com

ЛИТИЙ-ИОНДЫ АККУМУЛЯТОРЛАРДЫ ҚАЙТА ӨНДЕУГЕ АРНАЛҒАН ЗЕРТХАНАЛЫҚ ПИРОМЕТАЛЛУРГИЯЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫНЫ ӨЗІРЛЕУ ЖӘНЕ СЫНАУ

Чокин Канат — физика-математика ғылымдарының докторы, аға ғылыми қызметкер, Алматы, Қазақстан,

E-mail: k.chokin@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-9516-5400>;

Отунчи Еділ — техника ғылымдарының магистрі, инженер, Алматы, Қазақстан,

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

Кожрахметова Айгүль — заң ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор (доцент), С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан,

E-mail: a.kozhakhmetova@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2813-1745>;

Касенова Асия — экономика ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан,

E-mail: as.kasеноva@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0853-6235>;

Шонғалова Айгүль — PhD, ФТИ аға ғылыми қызметкер, Алматы, Қазақстан,

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

Аннотация. Литий-ионды аккумуляторларды (ЛИА) қайта өңдеуге арналған зертханалық пирометаллургиялық қондырғыны әзірлеу аккумулятор өндірісінің қарқынды өсуіне және құрамында әрі құнды, әрі қауіпті компоненттері бар қалдықтардың көлемінің артуына байланысты өзекті ғылыми бағыт болып табылады. Бұл мақалада ЛИА-ны жоғары температурада термиялық өңдеу процестерін модельдеуге арналған қондырғының құрылымы, жұмыс принциптері және оның эксперименттік тексеру нәтижелері қарастырылады. Зерттеудің маңыздылығы жаһандық үрдістермен расталады: 2030 жылға қарай әлемде 140 миллионға жуық электр көлігі пайдаланылатыны болжануда, бұл органикалық еріткіштерді, графитті, металл фольгаларын және өтпелі металл оксидтерін қамтитын миллиондаған тонна аккумулятор қалдықтарының пайда болуына әкеледі. Мұндай қалдықтарды қауіпсіз әрі тиімді қайта өңдеу, бағалы материалдарды қалпына келтіру және экологиялық тәуекелдерді азайту үшін қажет.

Мақалада қуаты 10 кВт, жиілігі 30 кГц болатын, жаңартылып, жаңа су салқындатқыш индуктормен және графит тигельмен жабдықталған индукциялық пештің құрылымы егжей-тегжейлі сипатталған. Тигель қабырғасының қалыңдығын скин-қабат тереңдігін ескере отырып есептеу нәтижелері және температураға төзімді қоршау материалдарын таңдаудың негіздемесі келтірілген. Пиролиз және гидролиз өнімдерін, соның ішінде HF пен органикалық буларды

ұстауға және бейтараптандыруға арналған газ салқындатқышы мен дымқыл скрубберден тұратын газ тазарту жүйесі сипатталады. Реакциялық аймақтың герметикалығын қамтамасыз ету және инертті атмосфераны сақтау металдардың тотығуын және графит тигельдің бұзылуын болдырмау үшін аса маңызды екені атап өтіледі.

Эксперименттік бөлімде пирометриялық бақылаудың дәлдігін тексеру және 1500 °С температурада Fe_2O_3 темір оксидін тотықсыздандыру бойынша алдын ала тәжірибелер келтірілген. Металл темірдің түзілуі қондырғының дұрыс жұмыс істейтінін және тотықсыздану процестерінің тиімділігін дәлелдейді. Сондай-ақ, жабдықтың қауіпсіз жұмыс істеуін қамтамасыз ететін құрылымдық шешімдер, соның ішінде қайшы типті көтеру механизмі және эжекторлық ауа сорғысы газдары сипатталған.

Өзірленген қондырғы ЛИА-ны пирометаллургиялық қайта өңдеу процестерін зерттеуге, технологиялық режимдерді оңтайландыруға және аккумулятор қалдықтарын экологиялық қауіпсіз кәдеге жарату әдістерін әзірлеуге жарамдылығын көрсетті. Сонымен қатар, ол металдарды тиімді алу және қайта өңдеу кезіндегі экологиялық жүктемені азайтуға бағытталған іргелі және қолданбалы зерттеулерді жалғастыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: литий-ионды аккумуляторлар, пирометаллургиялық әдістер, пиролиз, гидролиз, жоғары температураны қайта өңдеу

©Чокин К.¹, Отунчи Е.¹, Кожяхметова А.², Касенова А.²,
Шонғалова А.^{1,3*}, 2026.

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

²Казахский агротехнический исследовательский университет
имени С. Сейфуллина;

³The Pennsylvania State University, Стейт колледж, Соединенные Штаты Америки.

*E-mail: shongalova.aigul@gmail.com

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Чокин Канат — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Алматы, Казахстан,

E-mail: k.chokin@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-9516-5400>;

Отунчи Еділ — магистр технических наук, инженер, Алматы, Казахстан,

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

Кожяхметова Айгуль — кандидат юридических наук, ассоциированный профессор (доцент), Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан,

E-mail: a.kozhakhmetova@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2813-1745>;

Касенова Асия — кандидат экономических наук, ассоциированный профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан,

E-mail: as.kasenova@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0853-6235>;

Шонгалова Айгуль — PhD, старший научный сотрудник ФТИ, Алматы, Казахстан,
E-mail: shongalova.aigul@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7352-9007>.

Аннотация. Разработка лабораторной пирометаллургической установки для переработки литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) представляет собой актуальное направление исследований, обусловленное стремительным ростом производства аккумуляторных систем и, как следствие, увеличением объемов отходов, содержащих ценные и одновременно опасные компоненты. В статье рассматриваются конструкция, принципы работы и результаты экспериментальной проверки созданной установки, предназначенной для моделирования высокотемпературных процессов термической переработки ЛИА. Актуальность исследования подтверждается глобальными тенденциями: по прогнозам, к 2030 году количество электромобилей достигнет 140 млн, что приведет к образованию миллионов тонн отработанных батарей, содержащих органические растворители, графит, металлические фольги и оксиды переходных металлов. Такие отходы требуют безопасной и эффективной переработки, позволяющей извлекать ценные материалы и минимизировать экологические риски. В статье подробно описана конструкция восстановленной индукционной печи мощностью 10 кВт и частотой 30 кГц, оснащенной новым водоохлаждаемым индуктором и графитовым тиглем. Представлены расчеты толщины тигля с учетом глубины скин-слоя, а также особенности выбора материалов для термостойкого окружения. Описана система газоочистки, включающая охладитель газов и мокрый скруббер, предназначенные для улавливания и нейтрализации продуктов пиролиза и гидролиза, включая HF и органические пары. Особое внимание уделено обеспечению герметичности реакционной зоны и поддержанию инертной атмосферы, что критически важно для предотвращения окисления металлов и разрушения графитового тигля. Экспериментальная часть включает тестирование точности пирометрического контроля и проведение предварительных опытов по восстановлению оксида железа Fe_2O_3 при 1500 °С. Образование металлических шариков железа подтверждает корректность работы установки и эффективность восстановительных процессов. Также описаны конструктивные решения, обеспечивающие безопасную эксплуатацию оборудования, включая подъемный механизм ножничного типа и эжекторный воздушный насос для создания разрежения и отвода газов. Созданная установка доказала свою работоспособность и пригодность для исследования пирометаллургических процессов переработки ЛИА, оптимизации технологических режимов и разработки экологически безопасных методов утилизации аккумуляторных отходов. Она открывает возможности для дальнейших фундаментальных и прикладных исследований, направленных на повышение эффективности извлечения металлов и снижение экологической нагрузки при переработке аккумуляторных батарей.

Ключевые слова: литий-ионные аккумуляторы, пирометаллургические методы, пиролиз, гидролиз, высокотемпературная переработка



Введение. В настоящее время изменение климата и злоупотребление природными ресурсами стали серьезными глобальными проблемами, которые нельзя игнорировать. Рост возобновляемой энергетики, электромобильного транспорта и портативных устройств привёл к стремительному увеличению производства литий-ионных аккумуляторов. Поскольку срок службы таких батарей обычно составляет 10–15 лет, в ближайшие годы ожидается значительный рост объёма отработанных ЛИА (Masias et.al., 2021) В будущем ожидается большой поток электромобилей с истекшим сроком службы (EOL): по прогнозам, к 2030 году 140 миллионов электромобилей будут находиться в эксплуатации по всему миру.

Во всём мире суммарный объём отходов в виде отработанных батарей достигает примерно 11 миллионов тонн (Thompson et.al., 2020). Если такие отработанные батареи не могут быть использованы повторно для хранения энергии второго срока службы, что приводит к задержке их утилизации, они фактически превращаются в опасные отходы, которые содержат легковоспламеняющиеся органические растворители, полимерные слои, графит, металлическую фольгу и оксиды переходных металлов, таких как Ni, Co, Mn, Fe, в дополнение к ионам лития (Meshram et.al., 2020). Хотя такой поток отработанных отходов может представлять серьезную проблему в области обращения с отходами, его можно превратить в хорошую возможность для вторичной переработки, что превратит отработанные отходы в ценный источник полезных материалов (Harper et.al., 2019). Существует множество движущих сил для вторичной переработки ЛИА, включая экологические, экономические и стратегические вопросы. Фактически, если предотвратить утилизацию опасных материалов, таких как легковоспламеняющиеся растворители электролита и канцерогенные металлы, такие как Ni и Co, можно также утилизировать материалы с высокой рыночной ценой, что делает истекшим сроком службы ЛИА особенно привлекательными с экономической точки зрения (An, 2019). Тем не менее, основная причина, стимулирующая переработку ЛИА, связана с сырьем, используемым в технологии ЛИА, среди которого Li, Co и натуральный графит, который включен в список важнейших сырьевых материалов на 2020 год (Beatriz et.al., 2018). Это означает, что эти материалы сочетают в себе высокую важность для экономики в плане технологического развития и повышенный риск поставок (Olivetti et.al., 2017). Однако извлечение таких ценных и критически важных материалов сопряжено с технологическими трудностями, поскольку ЛИА не стандартизированы ни по химическому составу катодов, ни по геометрическим формам и размерам, что приводит к чрезвычайно сложному набору материалов, которые сильно перемешаны друг с другом, что делает переработку ЛИА открытым процессом.

В настоящее время наиболее распространенным способом переработки аккумуляторных батарей являются процессы, основанные на пирометаллургии, которые заключаются в плавлении всей батареи при высоких температурах для получения сплава ценных металлов, таких как Ni, Co, Cu, который может быть дополнительно переработан в соли металлов высокой чистоты на

гидрометаллургических стадиях (Assefi et.al., 2020) однако литий попадает в шлак, который имеет малую экономическую ценность, так что литий не попадает обратно в аккумуляторную цепь. Метод вторичной переработки на основе гидрометаллургии является сравнительно новой стратегией переработки (хотя в некоторых случаях уже применяется в промышленности) и включает в себя выщелачивание, кристаллизацию, селективное осаждение и экстракцию растворителями для извлечения высококачественных однофазных солей металлов, особенно солей Co, Ni и Li. Следует отметить, что среди этих способов переработки в последнее время на исследовательском уровне изучаются “более экологичные” варианты некоторых операций.

Разработка лабораторной пирометаллургической установки.

Пирометаллургические методы переработки ЛИА являются одними из наиболее перспективных направлений, поскольку обеспечивают простоту технологического процесса, возможность переработки смешанных отходов и высокую степень извлечения металлов в сплав. Однако промышленное оборудование для таких процессов дорогостоящее и требует высокой энергоёмкости. Поэтому создание лабораторной установки с управляемыми параметрами нагрева имеет важное значение для проведения исследовательских работ, моделирования термохимических процессов и отработки технологических режимов.

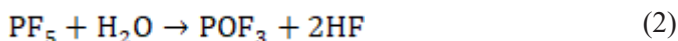
Пирометаллургическая обработка основана на высокотемпературном разложении органических составляющих и восстановлении металлических оксидов при воздействии интенсивного тепла.

Происходят различные химические реакции.

1. Разложение электролитной соли



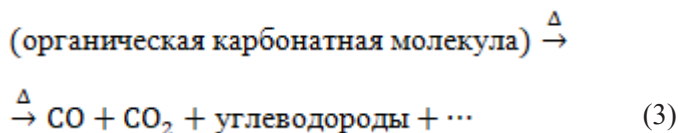
Гидролиз PF_5 (в присутствии влаги) даёт фосфорсодержащие окислы и HF:



Образование HF – одна из ключевых экологических проблем при термической переработке ЛИА, требует применения щелочных скрубберов.

2. Пиролиз органических растворителей

Органические карбонаты (например, этиленкарбонат EC, диметилкарбонат и др.) при нагреве разлагаются с образованием CO, CO₂ и углеводородов:



Продукты пиролиза – VOC, CO, CO₂ и смолы – улавливаются системой газоочистки и конденсации.

3. Окисление/сгорание углерода (анодный графит, восстановитель). При воздействии кислорода:



При частичном окислении (недостаток кислорода):



CO и CO₂ участвуют в восстановительных и окислительных балансах печи; CO может служить восстановителем оксидов.

4. Восстановление оксидов металлов углеродом

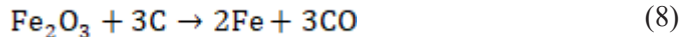
Для оксида кобальта:



Для оксида никеля:



Для оксида железа



5. Литиевые соединения часто переходят в оксид/карбонат:



Далее при наличии CO₂ возможна карбонатация:



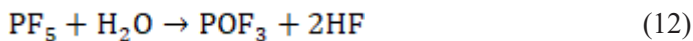
В пироксхемах литий обычно концентрируется в шлаке в виде Li₂O/Li₂CO₃ и затем извлекается гидрометаллургическими методами.

6. Обобщённые реакции образования силикатных/алюмосиликатных шлаков (пример для CaO и SiO₂):



Состав шлака определяется оксидами присутствующих неметаллических компонентов и влиянием флюсов. Шлак связывает Li и другие неметаллы.

7. Побочные реакции фторсодержащих соединений. Гидролиз продуктов PF₃ и фторорганики даёт HF:



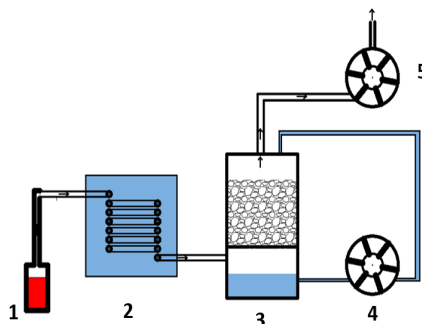
HF коррозионно активен и требует нейтрализации щёлочными растворами в скрубберах.

Выше представлены упрощённые стехиометрические схемы основных стадий. В реальном процессе одновременно идут десятки параллельных и последовательных реакций, а продукты пиролиза/восстановления зависят от состава шихты, атмосферы, температуры и времени выдержки. В результате образуется металлический сплав (в основном Ni–Co–Cu–Fe) и шлак, содержащий литий и алюминий. Основное преимущество пирометаллургии — технологическая простота и универсальность по составу исходного сырья (Zhang et.al., 2018). При температурах 700–1200 °С происходит разложение катодных материалов выделение кислорода и восстановление металлов (Yuan et.al., 2023).

Индукционный нагрев применяется для быстрого и равномерного прогрева шихты. По данным (Bermúdez et.al., 2025), (Davids et.al., 2024) использование индукционной плавки в графитовом тигле обеспечивает точный контроль температуры, минимизацию контакта расплава с воздухом и низкий уровень загрязнения. Индукционный нагрев основан на принципе электромагнитной индукции: переменное магнитное поле создаёт вихревые токи в проводнике, которые нагревают материал. Основные преимущества:

- высокая скорость нагрева и возможность тонкой настройки подводимой мощности;
- передача энергии к материалу осуществляется без прямого контакта;
- локализованный нагрев зоны обработки без использования внешних нагревательных элементов;
- возможность проведения процессов в контролируемой защитной атмосфере.

Ниже на рисунке 1 представлена схема изготовленной лабораторной пирометаллургической установки. Она состоит из следующих основных блоков.: индукционная печь с водяным охлаждением, нагревающая тигель 1, охладитель газов 2, мокрый скруббер 3, насосы для перекачки активной жидкости 4 и газов 5.



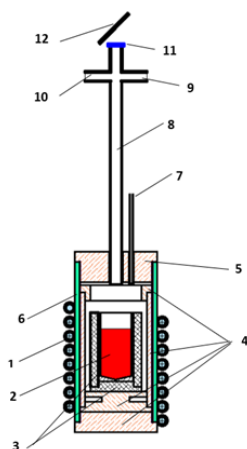
1 – графитовый тигель с образцом, 2 – охладитель газов, 3 – мокрый скруббер, 4 – насос для перекачки нейтрализующей жидкости, 5 – насос для откачки газов

Рисунок 1 – Схема лабораторной установки пирометаллургической плавки ЛИА

Процесс работы лабораторной установки: в индуктор печи помещается графитовый тигель в защитной оболочке 1. В тигле находится перерабатываемый материал. Тигель нагревается до температуры 1500-1600°C. Происходит реакция материала на температуру. В процессе этого выделяются различные газы, которые необходимо нейтрализовать и утилизировать (Metin et.al., 2025). Для этого они предварительно охлаждаются специальным устройством 2 и далее направляются в мокрый скруббер 3, где эти газы взаимодействуют с циркулирующим активным раствором и растворяются в нем. Раствор перекачивается химически стойким насосом 4. Откачка газов и все его движение по установке осуществляется насосом 5.

Ранее в Физико-техническом институте проводились работы по выплавке кремния методом алюмотермии в индукционных печах. Использовались большие печи с загрузкой более 30 кг. Для лабораторных работ нужны небольшие печи с загрузкой до 1 кг. В ходе поисковых мероприятий была обнаружена бывшая в эксплуатации индукционная печь мощностью 10 кВт и рабочей частотой 30 кГц, находившаяся в нерабочем состоянии. Диагностика показала выход из строя двух силовых полевых транзисторов, пробой двух конденсаторов, а также повреждение индуктора. После замены неисправных элементов силовой электроники и изготовления нового индуктора из медной трубки диаметром 10 мм установка была восстановлена. Проведённые тестовые испытания подтвердили её работоспособность и соответствие заявленным параметрам.

Для плавки ЛИА был изготовлен блок нагрева, один из вариантов которого показан на рисунке 2.



1-водоохлаждаемый индуктор, 2 – образец, 3 – графитовый тигель, 4 – элементы термостойкого окружения тигля, 5 – крышка, 6-кварцевый цилиндр, 7 – трубка для напуска инертных газов, 8 - трубка откачки газов, 9 – отвод для откачки газов, 10 – отвод для подачи, 11 – стекло, 12- зеркало
Рисунок 2 – Блок нагрева индукционной печи

Водоохлаждаемый индуктор внутренним диаметром 85 мм и высотой 120мм изготовлен из медной трубки диаметром 10 мм. Он нагревает графитовый тигель.

При изготовлении тигля необходимо знать его толщину t , которую можно оценить по глубине скин-слоя δ . В данном случае при частоте 30 кГц.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0\mu_r}} \quad (13)$$

где ρ – удельное сопротивление ($\Omega \cdot \text{м}$); $\omega = 2\pi f$ – круговая частота (рад/с); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; μ_r – относительная магнитная проницаемость (для графита ≈ 1).

Скин-слой показывает глубину проникновения индукционно-индуцированных токов. При толщине стенки t значительно больше δ основная часть джоулева нагрева будет сосредоточена во внешнем слое толщиной $\sim \delta$. Расчеты показывают, что толщина скин-слоя при частоте 30 кГц для типичного графита равна 9-13мм при:

$$(\rho \sim 1 - 2 \times 10^{-5} \text{ Ом}) \quad (14)$$

Значит:

- тонкая стенка 3–6 мм будет прогреваться почти полностью, но может быть слабее механически и быстрее разрушаться при тепловых шоках;
- стенка ~ 9 –15 мм окажется примерно в 1–1.5 скин-слоя — хорошие компромисс: большая часть нагрева близко к поверхности, но и достаточная прочность;
- толщина > 30 мм — токи в основном у поверхности, большая часть массы не участвует в нагреве, избыточный материал, ненужная теплоёмкость.

В распоряжении исследователей имелась графитовая трубка из старых запасов, диаметром 55 мм и толщиной стенки 10 мм. Проведённые расчёты показали, что данные геометрические параметры соответствуют требованиям, предъявляемым к заготовкам для изготовления тиглей, и обеспечивают их надлежащую термостойкость и механическую прочность. Из шамотного кирпича были сделаны элементы термостойкого окружения 4 и крышка 5. Для герметичности они были помещены в кварцевую трубку 6, которую обмотали тонким асбестовым шнуром, которую затем покрыли слоем высокотемпературного клея – жидкое стекло и замешанное в нем смесь высокотемпературной глины и тонкого порошка магнезии. Между графитовым тиглем и кварцем защитный слой из полосок шамота шириной 15–20 мм и толщиной 3 мм. Загрузка материала для плавки производится снятием крышки. Ниже, на рисунке 3, представлена фотография этой конструкции.



1- крышка, 2 – кварцевая трубка, 3 – графитовый тигель
Рисунок 3 – Фотография изготовленного узла нагрева

Выбор графитового тигля обусловлен его высокой теплопроводностью, химической стойкостью и устойчивостью к температурным колебаниям. При частоте 30 кГц нагрев, в основном, сосредоточен в стенках тигля, что обеспечивает мягкий и равномерный прогрев шихты.

Для предотвращения окисления графита внутренняя камера должна быть герметичной. По данным (Wang et.al., 2022), утечка воздуха даже на уровне 1–2% приводит к потере до 15% массы тигля за один цикл. Поэтому эффективное уплотнение и газовая защита — ключевой элемент конструкции. Между крышкой и герметичным нагреваемым кварцевым стаканом предусмотрена асбестовая прокладка, а также организация поддув нейтральных газов (аргон, азот) в пространство нагрева.

Узел нагрева является важным элементом пирометрической установки. Необходимо выбрать лучшую конструкцию. Для этого был изготовлен второй вариант термостойкого стакана, который состоял из вырезанных из шамотного кирпича колец, которые склеивали отмеченным выше температурным клеем. Снаружи шамотный стакан обматывался тонким слоем стеклоткани, поверх которого наносился высокотемпературный клей. Ниже на рисунке 4 показана данная конструкция.



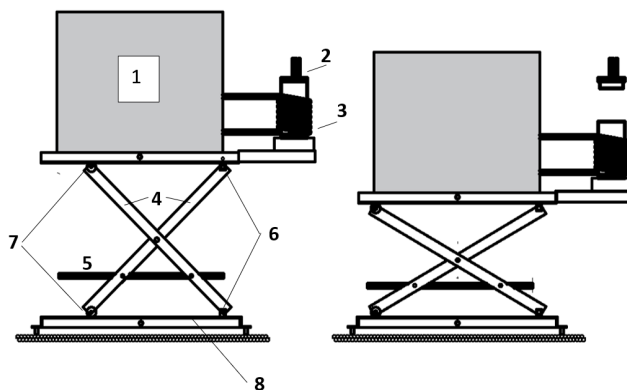
1- крышка, 2 – шамотный стакан, 3 – графитовый тигель
Рисунок 4 – Фотография изготовленного второго варианта узла нагрева

При переработке аккумуляторной массы особое внимание уделяется контролю атмосферы. Присутствие кислорода приводит к окислению восстановленных металлов, поэтому используется инертный газ (аргон, азот) или вакуум. В некоторых работах (Meng et.al., 2025) применяется восстановительная атмосфера CO/CO₂ для регулирования потенциала среды. Подача инертных газов производится через трубку 7 (рисунок 2). Откачка образовавшихся в процессе нагрева и плавки газов происходит через трубку 8 (рисунок 2), которая заканчивается тройником. Один отвод используется для вывода газов, через другой отвод можно подавать, например, кислород. Если в среде откачиваемых газов присутствуют атомы лития, то при взаимодействии их с кислородом образуются окислы, которые можно осадить и извлечь. В проведенных экспериментах этот отвод использовался для контроля давления в этой точке системы, регулируя скорости подачи инертных газов в реакционный объем и скорости откачки. Если это давление близко давлению окружающей атмосферы, то условия подсоса внешнего воздуха сводятся к минимуму. Третий отвод служит для контроля температуры. Он закрыт стеклом, а за ним установлено зеркало. С помощью оптического пирометра можно измерять температуру непосредственно в реакционной области. Известно, что это сделать термпарой при индукционном нагреве невозможно. На рисунке 5 показана фотография блок нагрева индукционной печи.



Рисунок 5 – Фотография блока нагрева индукционной печи

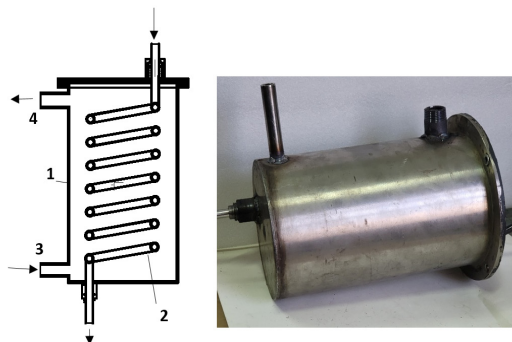
Температура выходящих газов может быть высокой. Поэтому эти газы транспортируются до охлаждающего устройства посредством металлических трубок (рисунок 5). В связи с этим отводящая трубка 7 фиксируется достаточно жестко. Снятие крышки 5 можно производить только путем опускания вниз кварцевого стакана со всей системой нагрева. Для этого было спроектировано подъемное устройство ножничного типа, которое перемещает стол с находящейся на нем индукционной печью строго вертикально. Схема представлена на рисунке 6.



1 – индукционная печь; 2 – крышка; 3 – нагревательный узел; 4 – ножничные рычаги; 5 – винт;
6 – неподвижные опоры с осью вращения; 7 – опорные катки; 8 – опорная рама
Рисунок 6 – Схема подъемного механизма ножничного типа для индукционной печи

Из рисунка 6 видно, что на опорной раме (8) установлены пары рычагов (4), посередине соединенные шарниром, которые служат ножками для расположенной сверху столешницы, с установленной на нее индукционной печи (1). С одной стороны, они крепятся к точкам вращения (6), с другой - оснащаются опорными роликами (7). При вращении винта 5 подвижные рычаги сходятся или расходятся. Соответственно индукционная печь поднимается, соединяя крышку 2 с нагревательным узлом 3, или опускается, разъединяя их. После того, как стол опустится, можно повернуть опорную плиту вместе с индукционной печью, а крышка остается на месте. Облегчается доступ к тиглю для загрузки или выгрузки материала.

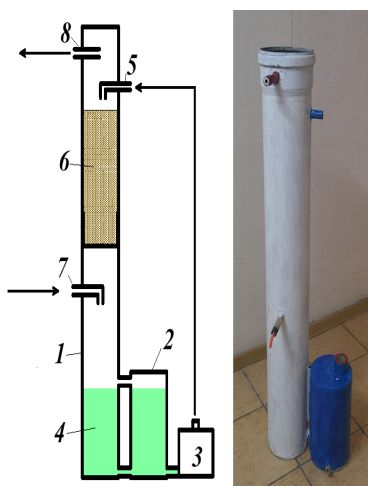
Охладитель газов. В процессе пирометаллургического передела ЛИА происходят реакции разложения и восстановления, сопровождаемые выделением вредных газов. Их необходимо удалять из объема реакции и утилизировать. Температура этих газов может составлять 1500°C. Поэтому их предварительно нужно охлаждать. Для этого служит охладитель газов, показанный на рисунке 7.



1 – корпус, 2- медная трубка в форме спирали, 3- подача воды, 4 – слив воды
Рисунок 7 – Сборочный чертеж и фотография изготовленного охладителя газов

Охлаждитель газов (рисунок 7) состоит из медной трубки 12 мм, скрученной в форме спирали (2), помещенную в металлический корпус, в которой циркулирует холодная вода. Горячий газ, проходя через трубку, контактирует с ее поверхностью, охлаждаясь. Кольцевое движение газа улучшает его взаимодействие со стенкой трубки за счет центробежной силы.

Мокрый скруббер. Для поглощения вредных газов в лабораторной установке используется мокрый скруббер насадочного типа, показанный на рисунке 8. Он состоит из корпуса (1), дополнительного бака (2), насоса (3) для перекачки рабочего раствора (4), который подается в патрубок (5) и орошает наполнитель (6), входа (7) неочищенного газа и выхода (8) очищенного газа.



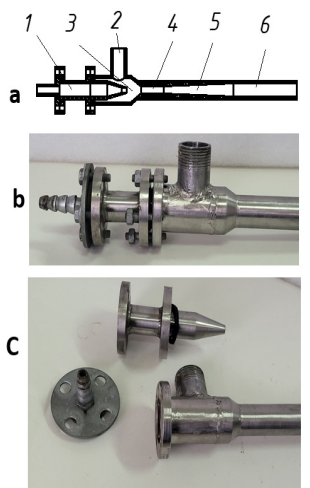
1 – корпус скруббера; 2 – дополнительный бак; 3 – насос; 4 – рабочий раствор; 5 – патрубок для подачи рабочего раствора; 6 – наполнитель; 7 – вход неочищенного газа; 8 – выход очищенного газа

Рисунок 8 – Схема и изготовленный мокрый скруббер насадочного типа

В качестве насадки используются как крупные тела с определенной геометрией, так и насыпные массы, состоящие из мелких элементов. В нашем случае мы применили насадку из дробленного шамота. Наполнитель насыпают на решетку с мелкими отверстиями круглой формы или пересекающимися под прямым углом прутьями. В процессе работы рабочая жидкость разбрызгивается над наполнителем и далее стекает по телам насадки. Газ движется на встречу, взаимодействует с разветвленной поверхностью тел наполнителя, омытых рабочим раствором.

Рабочий раствор это, как правило, щёлочь 3–10% (NaOH или KOH), pH поддерживают около 9–11. Контакт с жидкой средой значительно ускоряет выделение примесей из газового потока. Многие вещества хорошо растворяются в воде или реагируют с активными добавками. Даже непродолжительный контакт с жидкостью приводит к образованию раствора или растворимых продуктов химической реакции. Так происходит очистка газа.

Воздушный насос. Движение газа в установке от тигля до выхода из мокрого скруббера обусловлено разрежением, которое создает насос на конце цепочки аппаратов. Для лабораторной пирометаллургической установки был спроектирован и изготовлен струйный насос эжекторного типа, где нет движущихся частей. Он показан на рисунке 9. Сжатый воздух из институтской магистрали подается в эжекторное устройство (1), которое состоит из трубы с сужающимся соплом. Скорость воздуха в нем увеличивается и воздух поступает в смесительную камеру. Эжектор, работая по закону Бернулли, создаёт в сужающемся сечении пониженное давление, что вызывает подсос газа из скруббера через патрубок (2). В (3) два потока смешиваются и поступают в цилиндрическую трубку (4), которая переходит в диффузор (5) и далее в выходящую трубу (6).



1 – эжектор; 2 – патрубок подачи газа и мокрого скруббера; 3 – смесительная камера;
4 – цилиндрическая трубка; 5 – диффузор; 6 – выходящая труба

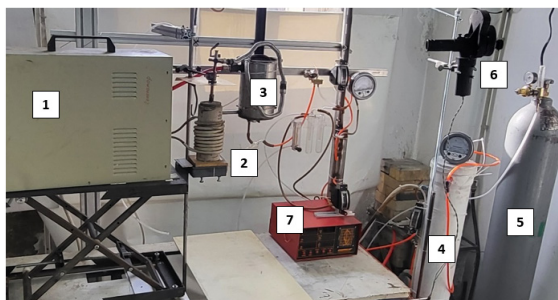
а) схема; б) фотографии изготовленного воздушного насоса в сборе; в) фотографии деталей воздушного насоса

Рисунок 9 – Схема, фотографии изготовленного воздушного насоса эжекторного типа в сборе и его деталей

Таким образом, эжектор передаёт энергию быстро движущегося первичного воздуха, поступающего из магистрали, всасываемому газу, который изначально имеет меньшую скорость. В количественном составе в выходящей трубе газа существенно меньше, чем воздуха. Важным преимуществом такого насоса для установки, в которой вырабатываются вредные газы в том, что если эти опасные для здоровья вещества не полностью поглощаются, то в этом насосе они смешиваются с воздухом и их концентрация на выходе устройства становится ниже ПДК. Кроме того, выход насоса представляет собой достаточно тонкую трубу диаметром 21 мм. В наружной стенке лаборатории было просверлено отверстие такого диаметра и в нее ввели выходную трубу насоса. Таким путем все выходящие из установки газы, разбавленные до низкой концентрации, выпускаются наружу здания. Тем

самым обеспечивается безопасная среда внутри лаборатории. Скорость откачки или разряжение после мокрого скруббера легко регулируется подачей воздуха с магистрали. Разряжение может достигать $-0,44$ Бар.

В результате проведенных работ были изготовлены отдельные блоки лабораторной пирометаллургической установки и произведен ее монтаж. Собранный установка показана на рисунке 10.



1 – блок индукционного нагрева на регулируемом подъемнике; 2 – узел нагрева в индукторе; 3 – охладитель газов; 4 – мокрый скруббер; 5 – баллон с аргоном для напуска в область графитового тигля; 6 – пирометр; 7 – измеритель состава газов

Рисунок 10 – Фотография изготовленной лабораторной пирометаллургической установки

Отбор газов для анализа их компонентного состава с использованием газоанализатора (7) осуществлялся в точке после охладителя и до мокрого скруббера, что обеспечивало корректность измерений и предотвращало попадание аэрозольных примесей в измерительный тракт. После завершения сборки лабораторной установки были проведены её тестовые испытания при различных температурных режимах. В частности, была проверена точность пирометрического контроля температуры. В качестве эталонного материала использовались фрагменты листовой меди, температура плавления которой составляет 1085 °С. При нагреве тигля до 1100 °С по показаниям пирометра последующее вскрытие подтвердило плавление меди, что свидетельствует о корректности температурных измерений.

Были выполнены предварительные эксперименты по восстановлению оксида железа Fe_2O_3 . В графитовый тигель загружались порошок оксида железа и кокс, после чего тигель нагревался до 1500 °С. Выдержка при данной температуре в течение 30 минут обеспечила протекание восстановительных процессов. По результатам вскрытия тигля на его дне были обнаружены шарики чугуна, что подтверждает успешность восстановления и работоспособность установки в высокотемпературных условиях.

Заключение. Проведённая работа продемонстрировала успешную разработку и экспериментальную проверку лабораторной пирометаллургической установки, предназначенной для исследования высокотемпературных процессов переработки литий-ионных аккумуляторов. Созданная система, включающая

индукционную печь мощностью 10 кВт, графитовый тигель, водоохлаждаемый индуктор, а также комплекс газоочистки с охладителем и мокрым скруббером, показала свою работоспособность и соответствие требованиям, предъявляемым к моделированию термохимических стадий переработки ЛИА. Проведённые тестовые испытания подтвердили точность температурного контроля и эффективность восстановительных процессов, что было продемонстрировано на примере восстановления оксида железа Fe_2O_3 при $1500^\circ C$.

Разработанная установка обеспечивает необходимые условия для безопасного проведения пирометаллургических экспериментов, включая поддержание инертной атмосферы, эффективное удаление и нейтрализацию газообразных продуктов пиролиза и гидролиза, а также защиту оборудования от коррозионно-активных соединений. Конструктивные решения, такие как применение графитового тигля, оптимизация толщины его стенок, использование эжекторного насоса и подъемного механизма, повышают надёжность и удобство эксплуатации установки.

Полученные результаты подтверждают, что предложенная лабораторная платформа является эффективным инструментом для изучения поведения материалов ЛИА при высокотемпературной обработке, оптимизации технологических режимов и оценки экологических аспектов пирометаллургической переработки. Установка открывает широкие возможности для дальнейших исследований, направленных на повышение степени извлечения ценных металлов, снижение образования вредных выбросов и разработку более устойчивых и экономически выгодных технологий утилизации аккумуляторных отходов.

Такой подход способствует формированию научной базы для создания промышленных решений нового поколения, ориентированных на экологическую безопасность и рациональное использование ресурсов в условиях растущего объёма отходов литий-ионных аккумуляторов.

References

- An L. (2019). Recycling of spent lithium-ion batteries. Processing Methods and Environmental Impacts. DOI:10.1007/978-3-030-31834-5. (in Eng.).
- Assefi M., Maroufi S., Yamauchi Y., & Sahajwalla V. (2020). Pyrometallurgical recycling of Li-ion, Ni–Cd and Ni–MH batteries: A minireview. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 24. – P. 26-31. DOI: 10.1016/j.cogsc.2020.01.005 (in Eng.).
- Beatriz V.L., Blengini G.A., Fabrice M., Cynthia L., Lucia M., Viorel N., & David P. (2018). Raw Materials Scoreboard. DOI: 10.2873/08258. (in Eng.).
- Bermúdez A., Crego O., Ferrín J.L., García B., Gómez D., Martínez I., & Salgado P. (2025). Multiphysics simulation of slag melting in an induction furnace for sustainable silicon production. Applied Mathematical Modelling, 145. – P. 116107. DOI: 10.1016/j.apm.2025.116107 (in Eng.).
- Davids M.W., Martin T.C., Fursikov P.V., Zhidkov M.V., Khodos I.I., Fashu S., & Lototsky M.V. (2024). Effect of preparation routes on the performance of a multi-component AB₂-type hydrogen storage alloy. Journal of Physics: Energy, 6(3). – P. 035005. DOI: 10.1088/2515-7655/ad5abe (in Eng.).
- Harper G., Sommerville R., Kendrick E., Driscoll L., Slater P., Stolkin R., & Anderson P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. nature, 575(7781). – P. 75-86. DOI:10.1038/S41586-019-1682-5.
- Masias A., Marcicki J., & Paxton W.A. (2021). Opportunities and challenges of lithium ion batteries in

automotive applications. *ACS energy letters*, 6(2). – P. 621-630. DOI: 10.1021/acscenergylett.0c02584 (in Eng.).

Meng W.U. (2025). Recycling technologies of spent lithium-ion batteries and future directions: A review. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 35(1). – P. 271-295. DOI:10.1016/S1003-6326(24)66679-3 (in Eng.).

Meshram P., Mishra A., & Sahu R. (2020). Environmental impact of spent lithium ion batteries and green recycling perspectives by organic acids–A review. *Chemosphere*, 242. – P. 125291. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125291 (in Eng.).

Metin M., Ünal M., & Gören H.A. (2025). Effect of applied load on adhesive wear and corrosive wear behaviours of two aluminium bronze (Cu-Al-Fe) alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 239(1). – P. 245-257. DOI: 10.1177/09544062241283 (in Eng.).

Olivetti E.A., Ceder G., Gaustad G.G., & Fu X. (2017). Lithium-ion battery supply chain considerations: analysis of potential bottlenecks in critical metals. *Joule*, 1(2). – P. 229-243. DOI:10.1016/j.joule.2017.08.019 (in Eng.).

Thompson D.L., Hartley J.M., Lambert S.M., Shiref M., Harper G.D., Kendrick E., & Abbott A.P. (2020). The importance of design in lithium ion battery recycling—a critical review. *Green Chemistry*, 22(22). – P. 7585-7603. DOI:10.1039/D0GC02745F. (in Eng.).

Wang J., Qi Z., Zhao Q., & Shih K. (2025). From Waste to Wealth: A Review of Eutectic Molten Salt Method for Direct Regeneration of Spent Lithium-Ion Battery. *Advanced Science*, 12(31), e04609. DOI: 10.1002/advs.202504609 (in Eng.).

Yuan Q., Zeng J., Sui Q., Wang Z., Xu S., Mao S., & Liu J. (2023). Thermodynamic and experimental analysis of lithium selectively recovery from spent lithium-ion batteries by in-situ carbothermal reduction. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5). – P. 111029. DOI: 10.1016/j.jece.2023.111029 (in Eng.).

Zhang X., Li L., Fan E., Xue Q., Bian Y., Wu F., & Chen R. (2018). Toward sustainable and systematic recycling of spent rechargeable batteries. *Chemical Society Reviews*, 47(19). – P. 7239-7302. DOI: 10.1039/C8CS00297E (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 16.03.2026.

Формат 60x88^{1/8}.

18,0 п.л. Заказ 1.