

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

**ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES**

**№3
2026**

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

2026 • 3



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%2017489>; <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 (KRIIBV), 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

Aliuly A., Kaltayev A.

Aliuly A., Kaltayev A. Assessment of the Applicability of Similarity Laws for Centrifugal Pump Scaling Based on Hydrodynamic Modeling.....14

Baratov A.G., Sailaubek A., Serik A.S.

Synthesis and Investigation of a Narrow-Bandgap SrTaO₂N-Based Photocatalyst.....33

Nurbayev B., Dmitriyeva E., Kemelbekova A.

Modern Methods of Selective Lithium Leaching from Spent Lithium-Ion Batteries.....45

Seitov A., Amanzholov T.

Comparative Analysis of One-Dimensional Physical-Hydrodynamic Models of Centrifugal Flow in an Impeller for Mineralized Media.....60

Syzdykova A.M., Serikbayev N.S., Kutum B.B.

Local Kodama-Type Transformations and Integrability Limits of the Extended Fifth-Order Korteweg-de Vries Equation.....83

Ualikhanova U.A., Ussipkyzy T., Altayeva G.S., Razina O.V.

Calculation of the Screened $f(T)$ Gravity Model.....101

Zhadyranova A.A., Tsyba P.Yu., Ismail U.K., Yerzhan B.

Divergence-Free Deceleration Parameter, Kinematic Constraints from DESI DR2 and Cosmic Chronometers.....123

Zhenishan K., Bekov S.S., Syzdykova A.M.

The Influence of Gaussian Process Parameters on Reconstructing the Hubble Constant.....146

CHEMISTRY

Amangeldi B., Zhanikulov N., Taimasov B., Aitureev M., Dauletiyarov M.

Research of the Firing Processes and Whiteness of White Cement Clinkers.....155

Baisalova G.Zh., Bauyrzhanova G.B., Niyaz G.A., Taltenov A.A., Ainabayev A.A.

Study of the Chemical Composition of Ethanol Extracts of Lady's Mantle by Gas Chromatography-Mass Spectrometry.....169

Bishimbaev V.K., Kapsalyamov B.A.

Hydrogeochemical Indicators of Sulfuric-Acid Uranium Leaching Impact on Groundwater in Shieli and Zhanakorgan Districts.....183

Darmenbayeva A.S., Aubakirova R.A. Nurgaliyeva D.A., Abylkassova G.E., Abilmazhinova G.A.

Structural and Morphological Features of Polymer-Metal Functional Materials.....205

Dyusebaeva M.A., Berganayeva A.E., Ibragimova N.A., Utaraliev D.M., Berganayeva G.E.

Green synthesis of silver nanoparticles using the n-butanol fraction of Galega officinalis L.....223

Dyussembekova S.B., Utarova D.A., Kuspanov Zh.B., Daulbayev Ch.B., Abdikarimova U.A. Investigation of the Effect of SrTiO ₃ Heat Treatment on the Photocatalytic Efficiency of the \ Decomposition of an Amphoteric Antibiotic.....	239
Issayeva U.B., Akhmetova G.S., Praliyev K.D., Malmakova A.E., Seilkhanov T.M. 1-Benzyl-4-(p-Fluorobenzoyloxyimino)Piperidine Hydrochloride as a Candidate for an Anti-Infective Agent.....	252
Kamunur K., Yskak M., Mussapyrova L. Effect of Chemical Modification of Sodium Lignosulfonate on Flotation Properties in the Barite – Calcite System.....	264
Kononov A., Kamunur K., Mussapyrova L., Assylkhanova D., Batkal A. Obtaining and Studying the Inorganic Flocculant Al–Fe–Mn Based on Modified Bentonite.....	276
Kurmangaliyeva A.1, Akhmetova F.2, Kareshova Zh.1, Iskakov R. PDMA-Modified Tagan Bentonite for Hydrogen Production in Catalytic Conversion of Hydrocarbons.....	292
Kurtebayeva A.A., Silvia Álvarez-Torrellas., Noor Haida Mohd Kaus., Gomes H.T., Kalmakhanova M.S. Corn-Cob-Derived Fe-Modified Activated Carbons for Paracetamol and Sulfamethoxazole Removal by Adsorption and Oxidative Treatment.....	307
Nadirov R.K., Nurtazina N.D., Ryskaliyeva R.G. Response Surface Modelling and Optimisation of Ilmenite Flotation Using a Modified Lignosulphonate Reagent.....	334
Nefedov A.N., Taikenova A.T., Imashev B.K., Nurislamov R.M., Leontyeva X. Quantum Computing in the Modeling of Corrosion Processes.....	350
Nurkenov O.A., Fazylov S.D., Syzdykov A.K., Kabiyeva S.K., Zhaslan R.K. Synthesis and Structural Study of 3,5-Dimethylisoxazole Sulfone Derivatives with Secondary Amines.....	365
Orazbekova R.S., Tungatarova S.A., Baizhumanova T.S., Kaumenova G.B., Zhumabek M. Influence of Reaction Mixture Composition in Steam Reforming of Bioethanol on a High-Entropy Oxide Catalyst.....	382
Ryskaliyeva R.G., L.K. Beisembayeva, Osserov T.B. Hydrocyclone Classification of Balkhash Processing Plant Tailings.....	398
Sass A.S., Torlopov I.I., Rakhmetova K.S., Kenzin E.N., Zhurinov M. Formation and Maturation of Phosphate Coatings on Steel from an Alcohol-Based Phosphating Solution.....	418
Sdikova G.Zh., Dalabayeva N.S., Balkembay A.S., Sarova N.B., Zhaltyrbayeva N.K. Effect of Electrolyte Formulation on the Characteristics of Zinc-Based Electroplated Coatings.....	435
Seitkaliyeva N., Kussainova G., Zhursumbayeva M., Mohamad Ibrahim M.N., Abdiyev K. Study of the Flocculation Properties of Itaconic Acid-Based Copolymers.....	448

Sergazina S.M., Nurmukhanbetova N.N., Ostretsova I.B., Kamze A.R., Kassenova N.B. Comprehensive Assessment of Natural Drinking Water Quality and Statistical Analysis of Physicochemical Parameters.....	460
Talgatkyzy A., Nazhipkyzy M., Otenov A., Seitkazinova A., Issanbekova A. Wood Waste-Derived Organosolv Lignin-Based Carbon Nanofibers For Energy Storage Applications.....	475
Toktabayeva A.K., Makhayeva D.N., Rakhmetullayeva R.K., Rvaidarova G.O., Issenova G.D. Synthesis, Structure, and Physicochemical Properties of Sulfur-Containing Composites Based on Aniline, p-Phenylenediamine, Phenol, and Formaldehyde.....	498
Yeshmanova G.B., Smagulov D.U. Effect of Silicon-Based Particles on the Formation and Composition of PEO Coatings.....	517
Zhortarova A.A., Kubicek V., Ibrayev M.K., Panshina S.Y., Seidakhmetova R.B. N-Phosphorylation of Aminothiazoles and Amino-Thiadiazoles with P(III)- and P(V)-Reagents: Synthesis, Structure, and Biological Activity.....	538
Zhussupova A., Tyumentseva O., Antonyuk V. Comparative Study of the Kinetics and Energy Characteristics of Planetary Milling of Copper Smelting Dump Slag and Granulated Lead-Smelting Slag.....	552

МАЗМҰНЫ

ФИЗИКА

Әлиұлы А., Калтаев А.

Гидродинамикалық модельдеу негізінде ортадан тепкіш сорғыларды масштабтауда ұқсастық заңдарының қолданылуын бағалау.....14

Баратов А.Ғ., Сайлаубек А., Серік А.С.

SrTaO_2N негізіндегі тар тыйым салынған аймақты фотокатализаторды алу және зерттеу.....33

Нұрбаев Б., Дмитриева Е., Кемелбекова А.

Пайдаланылған литий-ионды аккумуляторлардан литийді селективті шаймалаудың заманауи әдістері.....45

Сейтов А.Н., Аманжолов Т.Е.

Минералданған орталарға арналған жұмыс дөңгелегіндегі ортадан тепкіш ағыстың бірөлшемді физикалық–гидродинамикалық модельдерін салыстырмалы талдау.....60

Сыздыкова А.М., Серикбаев Н.С., Кутум Б.Б.

Кенетейлген бесінші ретті Кортевег-де Фриз тендеуінің локалды кодам типті түрлендіруі мен интегралдану шектері.....83

Уалиханова У.А., Үсіпқызы Т., Алтаева Г.С., Разина О.В.

Экрандалған $f(T)$ – гравитация моделінің есебі.....101

Жадыранова А.А., Цыба П.Ю., Исмаил Ү.Қ., Ержан Б.

Дивергенциясыз бәсеңдеу параметрі, DESI DR2 және космикалық хронометрлер деректері бойынша кинематикалық шектеулер.....123

Жеңіскан Қ., Беков С.С., Сыздыкова А.М.

Хаббл тұрақтысын реконструкциялауға Гаусстық процестер параметрлерінің әсері.....146

ХИМИЯ

Амангелді Б., Жаникулов Н., Таймасов Б., Айтүреев М., Даулетияров М.

Ақ цемент клинкерлерінің күйдіру процестерін және ақтығын зерттеу.....155

Байсалова Г.Ж., Бауыржанова Г.Б., Нияз Г.А., Талтенов А.А., Айнабаев А.А.

Газ хроматография-масс-спектрометрия әдісімен кәдімгі теңгежапырақ өсімдігінің этанолды сығындыларының химиялық құрамын зерттеу.....169

Бишимбаев В.К., Капсаямов Б.А.

Шиелі және Жаңақорған аудандарындағы уранды күкірт қышқылымен шаймалаудың жер асты суларына әсерінің гидрогеохимиялық көрсеткіштері.....183

Дарменбаева А.С., Аубакирова Р.А., Нурғалиева Д.А., Абылкасова Г.Е., Абилямжинова Г.А.

Полимер-металл функционалдық материалдардың құрылымдық-морфологиялық ерекшеліктері.....205

Дюсебаева М.А., Берганаева А.Е., Ибрагимова Н.А., Утаралиев Д.М., Берганаева Г.Е.

Galega officinalis L. өсімдігінің N-бутанолдық фракциясы арқылы күміс нанобөлшектерін жасыл синтездеу.....223

Дюсембекова С.Б., Утарова Д.А., Құспанов Ж.Б., Даулбаев Ч.Б., Әбдікәрімова Ұ.Ә. Термиялық өңделген SrTiO ₃ фотокатализаторларының екідайлы антибиотикті тиімді ыдыратуын зерттеу.....	239
Исаева Ұ.Б., Ахметова Г.С., Пірәлиев Қ.Ж., Малмакова А.Е., Сейлханов Т.М. Жұқпалы ауруларға қарсы кандидат ретінде 1-бензил-4-(П-фторбензоилоксиимино) пиперидин гидрохлориді.....	252
Қамүнұр Қ., Ысқақ М., Мусапирова Л. Барит–кальцит жүйесіндегі натрий лигносульфонатының флотациялық қасиеттеріне химиялық модификацияның әсері.....	264
Кононов А., Қамүнұр Қ., Мусапирова Л., Асылханова Д., Батқал А. Модификацияланған бентонит негізіндегі Al–Fe–Mn бейорганикалық флокулянтын алу және зерттеу.....	276
Қурманғалиева А.1, Ахметова Ф., Карешова Ж., Исаков Р. Көмірсутектердің каталитикалық конверсиясы арқылы сутек алуға арналған ПДМА-модификацияланған таған бентониті.....	292
Қуртебаева А.А., Álvarez-Torrellas S., Noor Haida Mohd Kaus., Gomes H.T., Калмаханова М.С. Жүгері собықтарынан алынған темірмен модификацияланған белсендірілген көмірлермен парацетамол мен сульфаметоксазолды адсорбциялық-тотығу жолымен жою.....	307
Надиров Р.К., Нуртазина Н.Д., Рыскалиева Р.Г. Модификацияланған лигносульфонатты реагентті қолдану арқылы ильменит флотациясының жауап бетін модельдеу және оңтайландыру.....	334
Нефедов А.Н., Тайекенова А.Т., Имашев Б.К., Нурисламов Р.М., Леонтьева К.А. Коррозиялық процестерді модельдеудегі кванттық есептеулер.....	350
Нүркенов О.А., Фазылов С.Д., Сыздықов А.К., Қабиева С.Қ., Жаслан Р.К. Екіншілік аминдермен 3,5-диметилизоксазолдың сульфотуындыларын синтездеу және құрылымдық зерттеу.....	365
Оразбекова Р.С., Тунгатарова С.А., Байжұманова Т.С., Кауменова Г.Б., Жұмабек М. Жоғары энтропиялық оксид катализаторы қатысында биоэтанолдың бу риформингісіне реакциялық қоспа құрамының әсері.....	382
Рыскалиева Р.Г., Бейсембаева Л.К., Осеров Т.Б. Балқаш байыту фабрикасының байыту қалдықтарын гидроциклондық классификациялау.....	398
Сасс А.С., Торлопов И.И., Рахметова К.С., Кензин Э.Н., Жұрынов М. Спирт негізіндегі фосфаттау ерітіндісінен болат бетінде фосфатты жабындардың қалыптасуы және жетілуі.....	418
Сдикова Г.Ж., Далабаева Н.С., Балкембай А.С., Сарова Н.Б., Жалтырбаева Н.К. Мырыш негізіндегі гальваникалық қаптамалардың қасиеттеріне электролит құрамының әсері.....	435

Сейтқалиева Н., Құсаинова Г., Жүрсімбаева М., Мохамад Ибрагим М.Н., Әбдиев Қ. Итакон қышылы негізіндегі сополимерлердің флокуляциялық қасиеттерін зерттеу.....	448
Сергазина С.М., Нұрмұханбетова Н.Н., Острцова И.Б., Камзе А.Р., Касенова Н.Б. Табиғи ауыз су сапасын кешенді бағалау және физика-химиялық көрсеткіштерге статистикалық талдау.....	460
Талгатқызы Ә., Нажиқызы М., Өтенов Ә., Сейтқазинаева Ә., Исанбекова А. Ағаш қалдықтарынан алынған органосольв лигнин негізіндегі көміртеккі талшықтарды энергия сақтау жүйелерінде қолдану.....	475
Тоқтабаева Ә.Қ., Махаева Д.Н., Рахметуллаева Р.Қ., Рвайдарова Г.О., Исенова Г.Д. Анилин, п-фенилендиамин, фенол және формальдегид негізіндегі күкіртқұрамды композиттердің синтезі, құрылымы және физика-химиялық қасиеттері.....	498
Ешманова Г.Б., Смағұлов Д.У. Кремний негізіндегі бөлшектердің ПЭО жабындарының қалыптасуы мен құрамына әсері.....	517
Жортарова А.А., Kubicek V., Ибраев М.Қ., Паньшина С.Ю., Сейдахметова Р.Б. Р(III) және Р(V) реагенттерімен аминотиазолдар мен аминок-тиадиазолдарды N-фосфорлирлеу: синтезі, құрылымы және биологиялық белсенділігі.....	538
Жусупова А., Тюменцева О., Антонюк В. Үйінді мыс балқыту шлагы мен қорғасын балқытудың түйіршіктелген шлагын планетарлық ұнтақтау кинетикасы мен энергетикасын салыстырмалы зерттеу.....	552

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА

Әлиұлы А., Калтаев А.

Оценка применимости законов подобия при масштабировании центробежных насосов на основе гидродинамического моделирования.....14

Баратов А.Г., Сайлаубек А., Серік А.С.Получение и исследование узкозонного фотокатализатора на основе SrTaO_2N33**Нұрбаев Б., Дмитриева Е., Кемелбекова А.**

Современные методы селективного выщелачивания лития из отработанных литий-ионных аккумуляторов.....45

Сейтов А.Н., Аманжолов Т.Е.

Сравнительный анализ одномерных физико-гидродинамических моделей центробежного течения в рабочем колесе для минерализованных сред.....60

Сыздыкова А.М., Серикбаев Н.С., Кутум Б.Б.

Локальные преобразование типа кодамы и пределы интегрируемости расширенного уравнения Кортевега-де Фриза пятого порядка.....83

Уалиханова У.А., Усипкызы Т., Алтаева Г.С., Разина О.В.Расчёт экранированной модели $f(T)$ – гравитации.....101**Жадыранова А.А., Цыба П.Ю., Исмаил У.Қ., Ержан Б.**

Дивергентно-свободный параметр замедления, кинематические ограничения по данным DESI DR2 и космических хронометров.....123

Женискан К., Беков С.С., Сыздыкова А.М.

Влияние параметров Гауссового процесса на реконструкцию постоянной Хаббла.....146

ХИМИЯ

Амангелди Б., Жаникулов Н., Таймасов Б., Айтурсев М., Даулетияров М.

Исследование процессов обжига и белизны клинкеров белых цементов.....155

Байсалова Г.Ж., Бауыржанова Г.Б., Нияз Г.А., Талтенов А.А., Айнабаев А.А.

Изучение химического состава этанольных экстрактов манжетки обыкновенной методом газ хроматографии-масс-спектрометрии.....169

Бишимбаев В.К., Капсалямов Б.А.

Гидрогеохимические индикаторы воздействия сернокислотного выщелачивания урана на подземные воды районов Шиели и Жанакоргана.....183

Дарменбаева А.С., Аубакирова Р.А., Нургалиева Д.А., Абылкасова Г.Е., Абилямажинова Г.А.

Структурно-морфологические особенности полимер-металлических функциональных материалов.....205

Дюсебаева М.А., Берганаева А.Е., Ибрагимова Н.А., Утаралиев Д.М., Берганаева Г.Е. Зеленый синтез серебряных наночастиц с использованием N-бутанольной фракции Galega officinalis L.....	223
Дюсембекова С.Б., Утарова Д.А., Куспанов Ж.Б., Даулбаев Ч.Б., Абдикаримова У.А. Исследование влияния термической обработки SrTiO ₃ на фотокаталитической эффективности разложения амфотерного антибиотика.....	239
Исаева У.Б., Ахметова Г.С., Пралиев К.Д., Малмакова А.Е., Сейлханов Т.М. Гидрохлорид 1-бензил-4-(п-фторбензоилоксиимино) пиперидина в качестве кандидата в противомикробное средство.....	252
Қамұнұр Қ., Ысқақ М., Мұсапирова Л. Влияние химической модификации лигносульфоната натрия на его флотационные свойства в системе барит–кальцит.....	264
Кононов А., Қамұнұр Қ., Мұсапирова Л., Асылханова Д., Батқал А. Получение и исследование неорганического флокулянта Al–Fe–Mn на основе модифицированного бентонита.....	276
Курмангалиева А., Ахметова Ф., Карешова Ж., Исаков Р. ПДМА-модифицированный таганский бентонит для получения водорода при каталитической конверсии углеводородов.....	292
Қуртебаева А.А., Álvarez-Torrellas S., Noor Haida Mohd Kaus., Gomes H.T., Калмаханова М.С. Модифицированные железом активированные угли из кукурузных початков для адсорбционно-окислительного удаления парацетамола и сульфаметоксазола.....	307
Надиров Р.К., Нуртазина Н.Д., Рыскалиева Р.Г. Моделирование поверхности отклика и оптимизация флотации ильменита с использованием модифицированного лигносульфонатного реагента.....	334
Нефедов А.Н., Тайекенова А.Т., Имашев Б.К., Нурисламов Р.М., Леонтьева К.А. Квантовые вычисления в моделировании коррозионных процессов.....	350
Нуркенов О.А., Фазылов С.Д., Сыздыков А.К., Кабиева С.К., Жаслан Р.К. Синтез и структурное исследование сульфопроизводных 3,5-диметилизоксазола совторичными аминами.....	365
Оразбекова Р.С., Тунгатарова С.А., Байжұманова Т.С., Кауменова Г.Б., Жұмабек М. Влияние состава реакционной смеси в паровом риформинге биоэтанола на высокоэнтропийном оксидном катализаторе.....	382
Рыскалиева Р.Г., Бейсембаева Л.К., Осеров Т.Б. Гидроциклонная классификация хвостов обогащения Балхашской обогажительной фабрики.....	398
Сасс А.С., Торлопов И.И., Рахметова К.С., Кензин Э.Н., Журинов М. Формирование и созревание фосфатных покрытий на стали из фосфатирующего раствора на основе спирта.....	418

Сдикова Г.Ж., Далабаева Н.С., Балкембай А.С., Сарова Н.Б., Жалтырбаева Н.К. Влияние состава электролита на свойства гальванических покрытий на основе цинка.....	435
Сейткалиева Н., Кусаинова Г., Журсумбаева М., Мохамад Ибрагим М.Н., Абдиев К. Исследование флокулирующих свойств сополимеров на основе итаконовой кислоты.....	448
Сергазина С.М., Нурмуханбетова Н.Н., Острцова Н.Б., Камзе А.Р., Касенова Н.Б. Комплексная оценка качества природной питьевой воды и статистический анализ физико-химических показателей.....	460
Талгаткызы А., Нажипкызы М., Отенов А., Сейтказинова А., Исанбекова А. Углеродные волокна на основе органосольв лигнина, полученного из древесных отходов, для применения в системах хранения энергии.....	475
Токтабаева А.К., Махаева Д.Н., Рахметуллаева Р.К., Рвайдарова Г.О., Исенова Г.Д. Синтез, структура и физико-химические свойства серосодержащих композитов на основе анилина, п-фенилендиамина, фенола и формальдегида.....	498
Ешманова Г.Б., Смагулов Д.У. Влияние частиц на основе кремния на формирование и состав ПЭО покрытий.....	517
Жортарова А.А., Kubicek V., Ибраев М.К., Панышина С.Ю., Сейдахметова Р.Б. N-фосфорилирование аминотиазолов и аминок-тиадиазолов с помощью реагентов Р(III) и Р(V): синтез, структура и биологическая активность.....	538
Жусупова А., Тюменцева О., Антонюк В. Сравнительное исследование кинетики и энергетики планетарного измельчения отвального медеплавильного шлака и гранулированного шлака свинцовой плавки.....	553

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 3.
Number 359 (2026), 552-570

<https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.492>

UDC: 622.73
IRSTI: 52.45.15

©Zhussupova A.^{1,2}, Tyumentseva O.¹, Antonyuk V.¹, 2026.

¹Institute of Combustion Problems, Almaty, Kazakhstan;

²Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.

*E-mail: valant39@mail.ru

COMPARATIVE STUDY OF THE KINETICS AND ENERGY CHARACTERISTICS OF PLANETARY MILLING OF COPPER SMELTING DUMP SLAG AND GRANULATED LEAD-SMELTING SLAG

Zhussupova Aisulu — Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher, Institute of Combustion Problems; Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: zh.aisulu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3012-0145>;

Tyumentseva Olesya — Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher, Institute of Combustion Problems, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: tyumentseva@knu.kazatomprom.kz, <https://orcid.org/0009-0006-9302-1610>;

Antonyuk Valeriy — Senior Researcher, Institute of Combustion Problems, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: valant39@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6171-1250>.

Abstract. This study presents a comparative investigation of the kinetics and energy characteristics of planetary milling of copper smelting dump slag and granulated lead smelting slag with different structural and physicomachanical properties. Grinding was performed in a Fritsch Pulverisette 5 planetary ball mill by varying the grinding time, drum filling degree, and ball-to-material mass ratio. Particle size distribution was determined by laser diffraction, while particle morphology was examined using scanning electron microscopy. Copper smelting slag with a dense fayalite–magnetite matrix exhibited higher hardness and Bond work index and was ground more slowly, with a pronounced decrease in grinding rate after 10 min. In contrast, granulated slag, owing to its predominantly glassy structure and quenching cracks, underwent mainly brittle fracture and reached the required fineness at substantially lower energy consumption. Analysis of the technological factors showed the following order of significance: grinding time > ball-to-material mass ratio > drum filling degree. Pareto analysis identified rational disintegration ranges of 15–16 kWh/t at $D_{50} \approx 80 \mu\text{m}$ for copper smelting slag and 8–10 kWh/t at $D_{50} \approx 40\text{--}50 \mu\text{m}$ for granulated slag. SEM analysis confirmed the differences in the fracture mechanisms of the investigated materials. The results demonstrate the need for an individual selection of grinding

conditions considering the structural characteristics of each slag type and can be used to develop energy-efficient technological schemes for metallurgical slag processing.

Keywords: copper smelting slag, granulated lead smelting slag, planetary grinding, grinding kinetics, Bond work index, Pareto analysis

Funding: *This research was conducted as part of the targeted funding program for the project IRN BR28712667, titled “Development of innovative technologies for processing industrial waste from the mining and metallurgical industry to improve efficiency and reduce environmental impact”.*

For citations: Zhussupova A., Tyumentseva O., Antonyuk V. Comparative Study of the Kinetics and Energy Characteristics of Planetary Milling of Copper Smelting Dump Slag and Granulated Lead-Smelting Slag. *Academic Journal of Physical and Chemical Sciences*. 2026. No.3. Pp. 552-570. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.492>

©Жусупова А.^{1,2}, Тюменцева О.¹, Антонюк В.¹, 2026.

¹Жану проблемалары институты, Алматы, Қазақстан;

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан.

*E-mail: valant39@mail.ru

ҮЙІНДІ МЫС БАЛҚЫТУ ШЛАГЫ МЕН ҚОРҒАСЫН БАЛҚЫТУДЫҢ ТҮЙІРШІКТЕЛГЕН ШЛАГЫН ПЛАНЕТАРЛЫҚ ҰНТАҚТАУ КИНЕТИКАСЫ МЕН ЭНЕРГЕТИКАСЫН САЛЫСТЫРМАЛЫ ЗЕРТТЕУ

Жусупова Айсұлу — химия ғылымдарының кандидаты, жетекші ғылыми қызметкер, Жану проблемалары институты; Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: zh.aisulu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3012-0145>;

Тюменцева Олеся — химия ғылымдарының кандидаты, жетекші ғылыми қызметкер, Жану проблемалары институты, Алматы, Қазақстан, E-mail: otyumentseva@knu.kazatomprom.kz, <https://orcid.org/0009-0006-9302-1610>;

Антонюк Валерий — аға ғылыми қызметкер, Жану проблемалары институты, Алматы, Қазақстан, E-mail: valant39@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6171-1250>.

Аннотация. Жұмыста құрылымдық күйі мен физика-механикалық қасиеттері бойынша ерекшеленетін үйінді мыс балқыту шлагы мен қорғасын балқытудың түйіршіктелген шлагын планетарлық ұнтақтау кинетикасы мен энергетикасына салыстырмалы зерттеу жүргізілді. Ұнтақтау Fritsch Pulverisette 5 планетарлық шарлы диірменінде ұнтақтау уақытын, барабанның материалмен толтырылу дәрежесін және «шарлар : материал» массалық қатынасын өзгерту арқылы жүзеге асырылды. Ұнтақтау өнімдерінің гранулометриялық құрамы лазерлік дифракция әдісімен анықталды, ал бөлшектердің морфологиясы сканерлеуші электрондық микроскопия әдісімен зерттелді. Тығыз фаялит-магнетитті матрицасы бар үйінді мыс балқыту шлагының қаттылығы мен Bond жұмыстық

индексі жоғары болуына байланысты баяу ұнтақталатыны және 10 минуттан кейін ұнтақтау процесінің айқын баяулайтыны анықталды. Түйіршіктелген шлак негізінен шыны тәрізді құрылымы мен жедел салқындату нәтижесінде түзілген жарықшақтардың болуына байланысты морт сыну механизмі бойынша бұзылып, қажетті дисперстілікке айтарлықтай төмен энергия шығындарымен жетеді. Технологиялық факторлардың әсерін талдау олардың маңыздылығының келесі ретін көрсетті: ұнтақтау уақыты > «шарлар : материал» массалық қатынасы > барабанның толтырылу дәрежесі. Парето-талдау нәтижелері бойынша дезинтеграцияның ұтымды аймақтары анықталды: мыс балқыту шлағы үшін $D_{50} \approx 80$ мкм кезінде $15\text{--}16$ кВт·сағ/т, ал түйіршіктелген шлак үшін $D_{50} \approx 40\text{--}50$ мкм кезінде $8\text{--}10$ кВт·сағ/т. СЭМ-талдау нәтижелері зерттелген материалдардың бұзылу механизмдеріндегі айырмашылықтарды растады. Анықталған заңдылықтар шлак шикізатының әрбір түрінің құрылымдық ерекшеліктерін ескере отырып, ұнтақтау режимдерін жеке таңдаудың қажеттілігін көрсетеді. Алынған нәтижелер кенді дайындаудың ұтымды параметрлерін таңдауда және металлургиялық шлактарды қайта өңдеудің энергия тиімді технологиялық сұлбаларын әзірлеуде қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: мыс балқыту шлағы, қорғасын балқытудың түйіршіктелген шлағы, планетарлық ұнтақтау, ұнтақтау кинетикасы, Bond жұмыстық индексі, Парето-талдау

©Жусупова А.^{1,2}, Тюменцева О.¹, Антонюк В.¹, 2026.

¹Институт проблем горения, Алматы, Казахстан;

²Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан.

*E-mail: valant39@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ ПЛАНЕТАРНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ОТВАЛЬНОГО МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА И ГРАНУЛИРОВАННОГО ШЛАКА СВИНЦОВОЙ ПЛАВКИ

Жусупова Айсулу — кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем горения; Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,
E-mail: zh.aisulu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3012-0145>;

Тюменцева Олеся — кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем горения, Алматы, Казахстан,
E-mail: otyumentseva@knu.kazatomprom.kz, <https://orcid.org/0009-0006-9302-1610>;

Антонюк Валерий — старший научный сотрудник, Институт проблем горения, Алматы, Казахстан,
E-mail: valant39@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6171-1250>.

Аннотация. В работе проведено сравнительное исследование кинетики и энергетики планетарного измельчения отвального медеплавильного шлака и гранулированного шлака свинцовой плавки, различающихся структурным состоянием и физико-механическими свойствами. Измельчение осуществляли в

планетарной шаровой мельнице Fritsch Pulverisette 5 при варьировании времени помола, степени заполнения барабана материалом и массового соотношения «шары: материал». Гранулометрический состав продуктов определяли методом лазерной дифракции, а морфологию частиц исследовали методом сканирующей электронной микроскопии. Установлено, что отвальный медеплавильный шлак с плотной фаялит-магнетитовой матрицей характеризуется более высокой твёрдостью и индексом работы Bond и измельчается медленнее, причём после 10 мин помола наблюдается выраженное замедление процесса. Гранулированный шлак вследствие преимущественно стекловидной структуры и наличия закалочных трещин разрушается преимущественно хрупко и достигает требуемой дисперсности при существенно меньших энергетических затратах. Анализ влияния технологических факторов показал следующую последовательность их значимости: время помола > массовое соотношение «шары : материал» > степень загрузки барабана. По результатам Парето-анализа определены рациональные области дезинтеграции: 15–16 кВт·ч/т при $D_{50} \approx 80$ мкм для медеплавильного шлака и 8–10 кВт·ч/т при $D_{50} \approx 40$ –50 мкм для гранулированного шлака. Результаты СЭМ-анализа подтвердили различие механизмов разрушения исследуемых материалов. Установленные закономерности демонстрируют необходимость индивидуального выбора режимов измельчения с учётом структурных особенностей каждого типа шлакового сырья. Полученные результаты могут быть использованы при выборе рациональных параметров рудоподготовки и разработке энергоэффективных технологических схем переработки металлургических шлаков.

Ключевые слова: медеплавильный шлак, гранулированный шлак свинцовой плавки, планетарное измельчение, кинетика измельчения, индекса работы Bond, Парето-анализ

Введение. Ежегодно мировая цветная металлургия генерирует около 60 млн т шлаков (Gholizadeh Vayghan et al., 2021; Van De Sande et al., 2020). Значительная их часть депонируется в отвалах, однако содержание меди, цинка, свинца и сопутствующих редких металлов в этих материалах нередко сопоставимо с бедными первичными рудами, разрабатываемыми в настоящее время. На фоне роста цен на цветные металлы, постепенного истощения богатых первичных месторождений и ужесточения экологических требований к хранению отходов переработка накопленных металлургических шлаков становится всё более экономически и экологически обоснованной (Phiri et al., 2022; Phiri et al., 2021).

Обязательным первым переделом любой схемы переработки является измельчение. Именно оно определяет степень раскрытия рудных включений и поглощает, по различным оценкам, 30–50 % совокупных энергозатрат процесса (Adewuyi et al., 2020; Góralczyk et al., 2020; Ballantyne and Powell, 2014). Для шлаков, в отличие от природных руд, структура и физико-механические свойства целиком определяются условиями охлаждения расплава, а не природной минерацией. Отвальные медеплавильные шлаки обычно характеризуются плотной и твёрдой железосиликатной матрицей, представленной преимущественно фаялитом,

магнетитом и пироксенами. Ценные металлические и сульфидные фазы нередко тонко вкраплены в эту матрицу, что требует тонкого измельчения для их достаточного раскрытия; при этом медленное охлаждение способствует укрупнению кристаллов и может улучшать измельчаемость и последующее разделение (Li et al., 2021; Tsunazawa et al., 2019; Mohamadi Nasab et al., 2022). Напротив, быстрое водяное охлаждение расплава подавляет кристаллизацию и способствует формированию преимущественно аморфной стекловидной структуры. Возникающие при резком температурном градиенте термические напряжения обеспечивают разрушение струи расплава и образование гранулированного материала (Lin et al., 2016; Deng et al., 2016; Wang and Erdenebold, 2020). Последнее обуславливает хрупкий характер разрушения и существенно меньшие удельные энергозатраты на измельчение. Таким образом, два шлака одной металлургической системы, различающиеся лишь режимом охлаждения, могут потребовать принципиально разных подходов к рудоподготовке.

Измельчаемость металлургических шлаков изучалась преимущественно в связи с их применением в качестве вяжущих и минеральных компонентов цементных материалов. В таких исследованиях шлак обычно измельчают до десятков микрометров, а эффективность процесса оценивают по гранулометрическому составу, остатку на контрольном сите и достигаемой удельной поверхности (Zhao et al., 2016; Dai et al., 2019; Petrakis et al., 2019; Sun et al., 2022). Ряд работ посвящён механоактивации шлаков для интенсификации щелочной активации и геополимеризации (Wang et al., 2022; Abed et al., 2022; Biricik et al., 2021). Применительно к гидрометаллургической переработке, где оптимальный диапазон дисперсности существенно шире (50–200 мкм), а ключевым критерием является соотношение достигаемой крупности и удельных энергозатрат, работ значительно меньше. При этом в большинстве исследований рассматривается один тип шлака без сопоставления с материалом иного структурного состояния, что не позволяет выявить универсальные закономерности и выработать обоснованные критерии выбора режимов помола для конкретного сырья.

Индекс работы измельчения Bond широко применяется для сравнительной оценки сопротивления минерального сырья измельчению. Однако его значение зависит от крупности питания и продукта, параметров испытания и механизма разрушения материала, поэтому одного индекса недостаточно для полного описания кинетики измельчения стекловидных шлаков. Разрушение аморфных материалов при этом существенно зависит от структурной неоднородности, остаточных напряжений и распределения предсуществующих дефектов (García et al., 2021). Это делает актуальным прямое экспериментальное сравнение кинетики и энергетики измельчения структурно различных шлаков в идентичных условиях с количественной идентификацией рациональных точек дезинтеграции.

В настоящей работе проведено сравнительное исследование кинетики и энергетики планетарного помола медеплавильного отвального шлака и гранулированного шлака свинцовой плавки, различающихся структурным состоянием и характером разрушения. На основе трёхфакторного плана

эксперимента с варьированием времени помола, степени загрузки и соотношения «шары : материал» установлена иерархия технологических параметров; методом Парето-анализа определены рациональные режимы измельчения для каждого материала. Данные сканирующей электронной микроскопии продуктов помола использованы для верификации предложенной механистической интерпретации наблюдаемых закономерностей.

Материалы и методы. В работе использовали два техногенных материала: отвалы медеплавильные шлаки Балхашского медеплавильного завода и гранулированные шлаки свинцовой плавки АО “Казцинк”. Оба материала предварительно дробили до крупности –5 мм и высушивали при 105 °С в течение 4 ч.

Для сравнительной оценки физико-механических свойств исходных материалов определяли интегральную твёрдость, показатель ударного разрушения (Drop-Weight Index, DWi) и индекс ударного дробления Bond (CWi). Интегральную твёрдость оценивали методом царапания по шкале Мооса. Ударную прочность определяли методом падающего груза с оценкой удельной энергии разрушения образца; значение DWi выражали в кВт·ч/т. Индекс CWi определяли методом ударного разрушения Bond, основанным на энергии, необходимой для разрушения отдельных частиц материала. Полученные показатели использовали для сравнительной оценки сопротивления двух типов шлака механическому разрушению.

Измельчение проводили на планетарной шаровой мельнице *Fritsch Pulverisette 5 Classic Line* (Fritsch GmbH, Германия) с корундовыми барабанами объёмом 500 мл и корундовыми мелющими телами при частоте вращения солнечного диска 300 об/мин в режиме сухого помола. Условия измельчения варьировали по трём факторам: время помола (5–15 мин), степень заполнения барабана материалом (25 и 35 % объёма) и массовое соотношение шары : материал (B/P ratio 3:1, 5:1, 7:1). Матрица планирования включала 24 опыта для медеплавильного и 24 опытов для гранулированного шлака. Удельный расход энергии (кВт·ч/т) рассчитывали из потребляемой мощности по встроенному ваттметру и массы переработанного материала.

Гранулометрический состав определяли методом лазерной дифракции на анализаторе Mastersizer 2000E (Malvern, Великобритания) в режиме сухого диспергирования (давление воздуха 2,0 бар). Регистрировали характеристические диаметры D_{10} , D_{50} и D_{90} ; каждое измерение повторяли трижды и усредняли.

Морфологию частиц продуктов измельчения исследовали на сканирующем электронном микроскопе Phenom XL G2 Desktop SEM (Thermo Fisher Scientific, Нидерланды) в режиме обратноотражённых электронов (BSD) при ускоряющем напряжении 10–15 кВ, рабочем расстоянии 6,6 мм и давлении в камере 0,10 Па (Low Vacuum). Увеличение варьировали от $\times 890$ до $\times 8200$.

Влияние технологических факторов на гранулометрические характеристики D_{50} и D_{90} оценивали методом дисперсионного анализа (ANOVA) с использованием аддитивной модели главных эффектов. В качестве факторов рассматривали время

помола, степень заполнения барабана материалом и массовое соотношение «шары : материал». Количественный вклад каждого фактора определяли как отношение соответствующей суммы квадратов к общей сумме квадратов отклика, выраженное в процентах. Статистическую значимость факторов оценивали при уровне значимости $p < 0,05$. Рациональные режимы измельчения определяли построением фронта Парето в координатах « D_{50} – удельное энергопотребление».

Результаты и обсуждение. *Физико-механические свойства шлаков.* Сравнительная оценка исследуемых материалов выявила выраженные различия в их структурном состоянии, обусловленные условиями формирования и охлаждения. Отвальный медеплавильный шлак характеризуется более плотной и неоднородной структурой, тогда как гранулированный шлак свинцовой плавки, полученный при быстром охлаждении расплава, отличается более выраженными признаками хрупкого разрушения. Эти различия непосредственно проявляются в особенностях их измельчения и рассматриваются далее на основании кинетических, энергетических и морфологических данных. Указанные различия отражаются в измеренных физико-механических характеристиках (таблица 1).

Таблица 1. Физико-механические свойства исследуемых шлаков.

Показатель	Медеплавильный отвальный шлак	Гранулированный шлак свинцовой плавки
Интегральная твёрдость (по Моосу)	$6,5 \pm 0,4$	$4,4 \pm 0,3$
Ударная прочность (Drop-Weight Index), кВт·ч/т	$26,0 \pm 3,2$	$14,0 \pm 2,5$
Индекс работы измельчения Bond (CWi), кВт·ч/т	$14,8 \pm 1,1$	$9,2 \pm 0,9$

Медеплавильный шлак характеризуется существенно более высокой твёрдостью (6,5 против 4,4), ударной прочностью (26,0 против 14,0 кВт·ч/т) и индексом работы измельчения Bond (14,8 против 9,2 кВт·ч/т). Высокие значения для этого материала объясняются плотной кристаллической матрицей, в которой фаялит и магнетит образуют сросшийся каркас с прочными ковалентно-ионными связями и низкой пористостью. Энергия, подводимая при ударе, в значительной степени диссипирует за счёт пластической деформации и трения по границам зёрен, а не расходуется на образование новой поверхности, что делает материал вязким и трудноизмельчаемым.

Гранулированный свинцовый шлак демонстрирует противоположное поведение. Резкое охлаждение при грануляции «замораживает» в стекловидной матрице остаточные термические напряжения и систему микротрещин, понижая энергию зарождения и распространения трещин. Вследствие этого материал разрушается преимущественно хрупко, по существующим дефектам, а удельные затраты на дезинтеграцию оказываются почти вдвое ниже. Таким образом, ещё на стадии входных испытаний термическая история однозначно предопределяет принадлежность материала к одному из двух контрастных

классов измельчаемости, что служит отправной точкой для последующего анализа кинетики и энергоэффективности.

Кинетика измельчения шлаков в шаровой мельнице. Кинетика измельчения изучалась при варьировании времени помола и постоянстве остальных параметров (степень заполнения мельницы материалом 30 % рабочего объёма, В/Р ratio 5:1). Изменение характеристических диаметров частиц приведено в таблицах 2 и 3.

Таблица 2. Изменение гранулометрических показателей медеплавильного шлака при измельчении в шаровой мельнице.

Время измельчения, мин	D_{10} , мкм	D_{50} , мкм	D_{90} , мкм
0 (питание)	40	220	480
2	28	160	340
5	20	115	250
10	15	80	180
15	12	68	145
20	10	60	130

Таблица 3. Изменение гранулометрических показателей гранулированного шлака при измельчении в шаровой мельнице.

Время измельчения, мин	D_{10} , мкм	D_{50} , мкм	D_{90} , мкм
0 (питание)	25	140	320
2	18	95	210
5	12	60	140
8	9	45	110
10	8	38	95
15	6	32	80

Анализ данных выявляет принципиально различную кинетику разрушения двух материалов. Для медеплавильного шлака характерно замедленное снижение характеристических размеров: при переходе от исходного питания к 10 минутам помола медианный диаметр D_{50} уменьшается с 220 до 80 мкм, тогда как дальнейшее измельчение (15–20 минут) приводит лишь к ограниченному снижению D_{50} до 60–68 мкм. Показатель D_{90} демонстрирует аналогичную тенденцию: основное уменьшение наблюдается в первые 10 минут (с 480 до 180 мкм), после чего скорость измельчения резко падает. Это отражает высокую прочность и плотную структуру фаялит-магнетитовой матрицы, в которой ударное разрушение эффективно лишь на ранних стадиях, после чего процесс переходит в область медленного истирания.

Для гранулированного свинцового шлака процесс протекает значительно быстрее. Уже через 5 минут D_{50} снижается более чем в два раза (с 140 до 60 мкм), а к 10 минутам достигает 38 мкм; дальнейшее измельчение (до 15 минут) даёт лишь незначительный прирост тонкой фракции (до 32 мкм). Характер кривых указывает на выраженную хрупкость и стекловидную природу гранул, разрушающихся преимущественно по трещинам охлаждения, и на достижение области технологически рациональной дисперсности при относительно малых

временах обработки. Сопоставление двух серий подтверждает необходимость индивидуального выбора режимов измельчения и удельного энергопотребления для каждого типа отходов.

Влияние технологических факторов и оптимизация режимов помола. Для количественной оптимизации режимов измельчения на планетарной шаровой мельнице Fritsch Pulverisette 5 Classic Line была составлена матрица планирования эксперимента с варьированием трёх технологических факторов: времени помола (5–15 мин), степени заполнения мельницы материалом (25 и 35 % рабочего объёма) и массового соотношения «шары : материал» (B/P ratio 3:1, 5:1, 7:1). В качестве откликов фиксировали медианный диаметр D_{50} , диаметр D_{90} , удельный расход энергии и производительность. Результаты для медеплавильного и гранулированного шлаков приведены в таблицах 4 и 5 соответственно.

Таблица 4. Результаты оптимизационных опытов по измельчению медеплавильного шлака.

№ опыта	Время, мин	Загрузка, % об.	B/P ratio	D_{50} , мкм	D_{90} , мкм	Уд. расход энергии, кВт·ч/т	Производительность, кг/ч
1	5	25	3:1	118	256	8,5	362
2	5	25	5:1	107	233	9,3	345
3	5	25	7:1	96	209	10,0	328
4	5	35	3:1	135	294	7,5	442
5	5	35	5:1	123	268	8,1	421
6	5	35	7:1	111	241	8,8	400
7	8	25	3:1	97	215	13,0	249
8	8	25	5:1	88	195	14,1	237
9	8	25	7:1	76	169	15,3	225
10	8	35	3:1	112	247	11,4	304
11	8	35	5:1	102	225	12,4	289
12	8	35	7:1	92	202	13,4	275
13	10	25	3:1	82	184	15,9	208
14	10	25	5:1	74	167	17,3	198
15	10	25	7:1	67	151	18,7	188
16	10	35	3:1	94	212	14,0	254
17	10	35	5:1	86	193	15,2	242
18	10	35	7:1	77	173	16,4	230
19	15	25	3:1	70	148	22,9	150
20	15	25	5:1	63	135	24,9	143
21	15	25	7:1	57	121	26,9	136
22	15	35	3:1	80	171	20,1	184
23	15	35	5:1	73	155	21,9	175
24	15	35	7:1	66	140	23,6	166

Таблица 5. Результаты оптимизационных опытов по измельчению гранулированного шлака.

№ опыта	Время, мин	Загрузка, % об.	B/P ratio	D_{50} , мкм	D_{90} , мкм	Уд. расход энергии, кВт·ч/т	Производительность, кг/ч
1	5	25	3:1	61	143	5,9	428
2	5	25	5:1	56	130	6,4	407
3	5	25	7:1	50	117	6,9	387
4	5	35	3:1	71	165	5,2	523

№ опыта	Время, мин	Загрузка, % об.	В/P ratio	D ₅₀ , мкм	D ₉₀ , мкм	Уд. расход энергии, кВт·ч/т	Производительность, кг/ч
5	5	35	5:1	64	150	5,6	498
6	5	35	7:1	58	135	6,0	473
7	8	25	3:1	46	113	8,9	294
8	8	25	5:1	42	102	9,7	280
9	8	25	7:1	38	92	10,5	266
10	8	35	3:1	53	130	7,9	359
11	8	35	5:1	48	118	8,5	342
12	8	35	7:1	43	106	9,2	325
13	10	25	3:1	39	97	10,9	246
14	10	25	5:1	35	88	11,9	234
15	10	25	7:1	32	80	12,8	222
16	10	35	3:1	45	112	9,6	300
17	10	35	5:1	41	102	10,4	286
18	10	35	7:1	37	92	11,3	272
19	15	25	3:1	33	82	15,7	178
20	15	25	5:1	30	74	17,1	169
21	15	25	7:1	27	67	18,5	161
22	15	35	3:1	38	94	13,8	217
23	15	35	5:1	34	86	15,1	207
24	15	35	7:1	31	77	16,3	196

Таблица 6. Результаты дисперсионного анализа влияния технологических факторов на гранулометрические характеристики продуктов измельчения.

Материал	Показатель	Фактор	Вклад, %	F	p
Медеплавильный шлак	D ₅₀	Время помола	74,96	415,00	<0,001
		В/P ratio	13,64	113,25	<0,001
		Степень загрузки	10,38	172,38	<0,001
	D ₉₀	Время помола	75,36	422,08	<0,001
		В/P ratio	13,59	114,13	<0,001
		Степень загрузки	10,04	168,68	<0,001
Гранулированный шлак	D ₅₀	Время помола	81,95	416,65	<0,001
		В/P ratio	9,71	74,04	<0,001
		Степень загрузки	7,23	110,30	<0,001
	D ₉₀	Время помола	77,94	436,48	<0,001
		В/P ratio	11,93	100,24	<0,001
		Степень загрузки	9,12	153,18	<0,001

Результаты дисперсионного анализа (таблица 6) показали статистически значимое влияние всех трёх исследованных факторов на гранулометрические характеристики D₅₀ и D₉₀ (p < 0,001). Для обоих типов шлака наибольший вклад в изменение гранулометрического состава вносило время помола, вторым по значимости фактором являлось массовое соотношение «шары : материал», а наименьший вклад оказывала степень загрузки барабана. Таким образом, для обоих исследованных материалов установлена одинаковая последовательность значимости факторов: время помола > массовое соотношение «шары : материал» > степень загрузки барабана.

Данные таблиц демонстрируют выраженное влияние всех трёх факторов и устанавливают их иерархию по значимости: время помола > В/Р ratio > степень загрузки. Время помола оказывает решающее воздействие - при его увеличении наблюдается устойчивое снижение D_{50} и D_{90} , однако градиент измельчения заметно ослабевает после 10 минут обработки, что согласуется с переходом материала в область медленной шлифовки, зафиксированным в кинетических опытах. Массовое соотношение «шары : материал» является вторым по значимости фактором: при В/Р 3:1 продукт получается более крупным из-за недостаточного числа мелющих тел, тогда как повышение до 7:1 обеспечивает минимальные значения D_{50} и D_{90} за счёт роста числа эффективных ударов.

Степень загрузки материалом оказывает противоречивое влияние, отражающее компромисс между дисперсностью и производительностью. При 25 % формируется более тонкий продукт благодаря большему числу результативных ударов мелющих тел; при 35 % происходит уплотнение загрузки, экранирование ударов и увеличение $D_{50}-D_{90}$ на 7–12 %, но одновременно существенно возрастает производительность. Ввиду противоречивости критериев оптимальный режим определялся как компромиссное состояние между степенью измельчения и удельным энергопотреблением, что потребовало перехода к анализу фронта Парето.

Парето-анализ энергоэффективности и рациональная точка дезинтеграции. Для каждого материала зависимость медианного диаметра частиц от удельного энергопотребления была построена по совокупности оптимизационных опытов с выделением фронта Парето — множества режимов, при которых невозможно одновременно уменьшить D_{50} и снизить энергозатраты (рисунки 1 и 2).

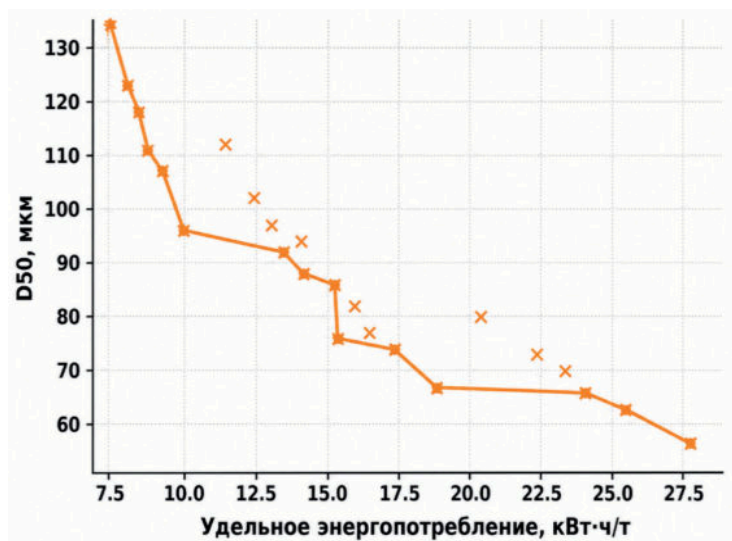


Рисунок 1. Зависимость медианного диаметра частиц (D_{50}) недеплавленного отвального шлака от удельного энергопотребления.

Для медеплавильного шлака (рисунок 1) фронт Парето характеризуется выраженным изменением соотношения между достигаемой дисперсностью и удельным энергопотреблением. В области низких энергозатрат (менее 10–12 кВт·ч/т) формируется сравнительно крупный продукт с D_{50} порядка 90–100 мкм и выше. При увеличении удельного энергопотребления до 15–16 кВт·ч/т наблюдается существенное снижение крупности частиц до D_{50} порядка 75–80 мкм. Дальнейшее уменьшение D_{50} сопровождается более выраженным ростом удельных энергозатрат. Таким образом, область около 15–16 кВт·ч/т при D_{50} порядка 75–80 мкм может рассматриваться как рациональная граница измельчения медеплавильного шлака.

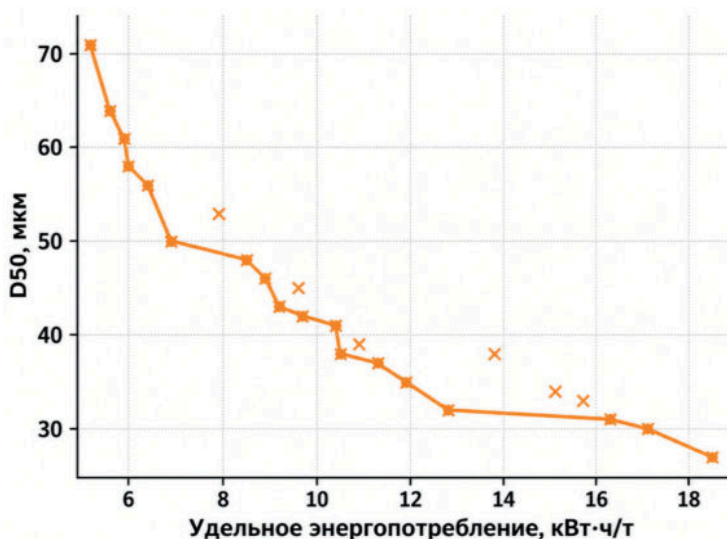


Рисунок 2. Зависимость медианного диаметра частиц (D_{50}) гранулированного шлака свинцовой плавки от удельного энергопотребления.

Для гранулированного свинцового шлака (рисунок 2) фронт Парето имеет качественно иной, плавный характер без выраженного плато: диапазон энергопотребления смещён в область низких значений (6–15 кВт·ч/т), а величины D_{50} лежат в интервале 30–70 мкм. Значительное уменьшение крупности достигается уже в области умеренного энергопотребления (8–10 кВт·ч/т), где D_{50} снижается до 40–50 мкм. Отсутствие резкого излома отражает хрупкое разрушение по системе трещин охлаждения, при котором подводимая энергия эффективно расходуется на образование новой поверхности на всём исследованном диапазоне.

Морфология частиц медеплавильного отвалного шлака после планетарного помола демонстрирует характерные черты вязко-абразивного механизма дезинтеграции (рисунки 3–5). Преобладающий тип частиц - неправильные угловатые агрегаты с сильно развитой шероховатой поверхностью и выраженным

ступенчатым рельефом, обусловленным последовательным скалыванием по границам фаялит-магнетитовых сростков. Поверхность частиц покрыта мелкодисперсной фракцией (субмикронные осколки), адгезионно удерживаемой в кавернах и на выступах, что свидетельствует о значительной роли поверхностного истирания в энергетическом балансе процесса.

Характерной особенностью является наличие ярких субмикронных включений на поверхности и в приповерхностном слое частиц, хорошо различимых в режиме обратноотражённых электронов (рисунок 3).

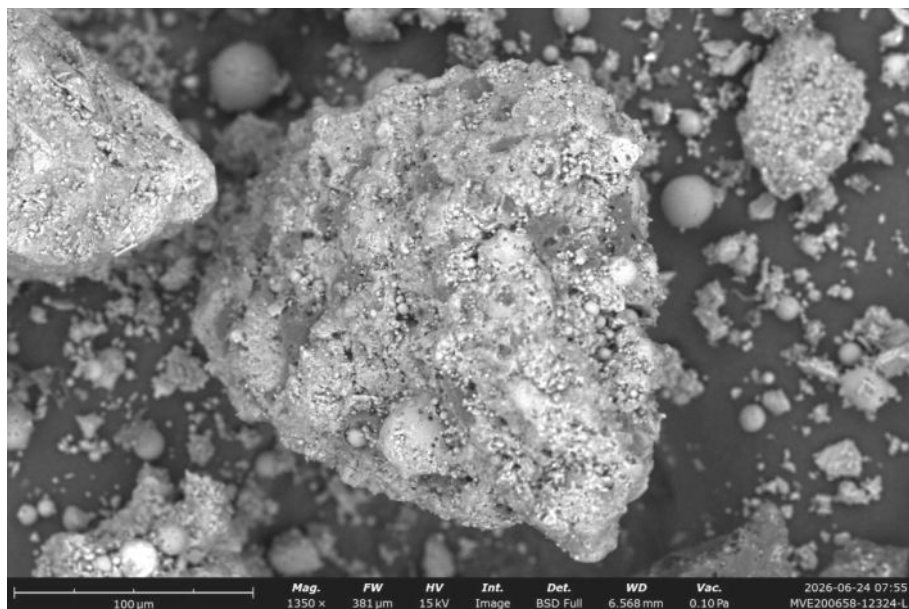


Рисунок 3. СЭМ-снимок (BSD, $\times 1350$) частиц медеплавильного отвального шлака после измельчения.

При более высоком увеличении (рисунок 4) отчётливо прослеживается иерархическая структура поверхности крупных частиц: первичный скол по межзёрненным границам обнажает кристаллографически ориентированные грани фаялита, тогда как между ними сохраняются участки стекловидной матрицы с характерным конхоидальным рельефом. Такое двойственное строение соответствует поликристаллической природе данного шлака и объясняет высокую энергоёмкость его тонкого измельчения: разрушение требует преодоления как межкристаллитных, так и транскристаллитных барьеров.

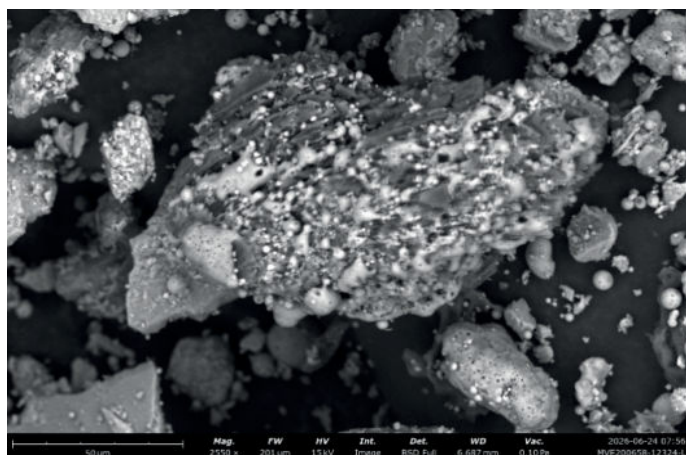


Рисунок 4. СЭМ-снимок (BSD, $\times 2550$) крупной частицы медеплавильного шлака.

На рисунке 5 представлен ансамбль частиц, отражающий типичное гранулометрическое состояние продукта после 10–15 мин помола.

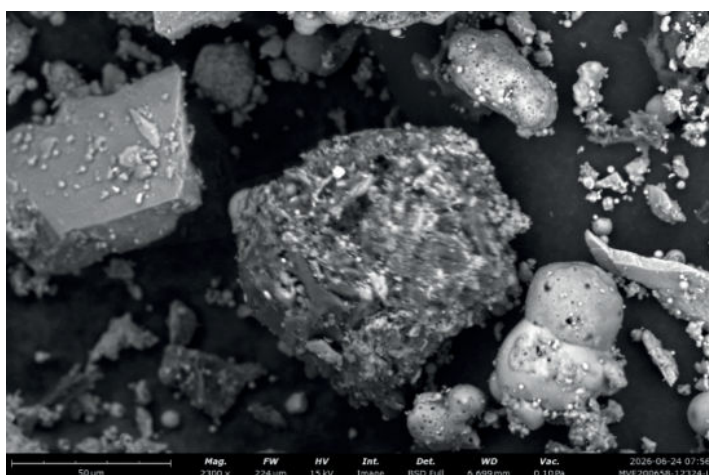


Рисунок 5. СЭМ-снимок (BSD, $\times 2300$) ансамбля частиц медеплавильного шлака.

Морфологическое разнообразие велико. Наряду с крупными (50–150 мкм) агрегатами неправильной формы присутствуют угловатые осколки средней крупности (10–50 мкм) и тонкодисперсная составляющая (< 10 мкм), представленная преимущественно изометричными частицами. Также наблюдаются отдельные сферические частицы, присутствующие в небольшом количестве. Их происхождение и фазовая природа в рамках настоящего исследования не определялись, поэтому они рассматриваются только как характерный морфологический элемент исследуемого материала.

Морфология частиц гранулированного свинцового шлака кардинально отличается от описанной выше и однозначно свидетельствует о хрупком механизме разрушения по системе трещин охлаждения (рисунки 6–8).

Преобладающая форма частиц - острые призматические и пластинчатые осколки с плоскими или слабоволнистыми поверхностями излома (рисунок 6).

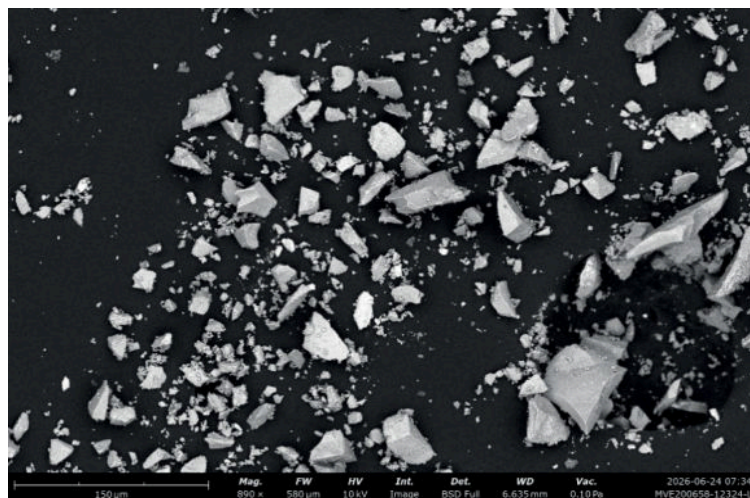


Рисунок 6. СЭМ-снимок (BSD, $\times 890$) ансамбля частиц гранулированного свинцового шлака после измельчения.

Гладкость поверхностей и отсутствие выраженного адгезионного мелкодисперсного слоя согласуются с преимущественно хрупким характером разрушения. Данное наблюдение соответствует низким значениям удельного энергопотребления при достижении D_{50} в диапазоне 40–60 мкм.

В BSD-режиме матрица частиц характеризуется преимущественно однородным серым контрастом (рисунок 7), что свидетельствует об относительно равномерном распределении компонентов с близкими средними атомными номерами. В отсутствие локального элементного и фазового анализа данное наблюдение рассматривается как морфологическая характеристика материала и не используется для однозначной идентификации отдельных фаз.

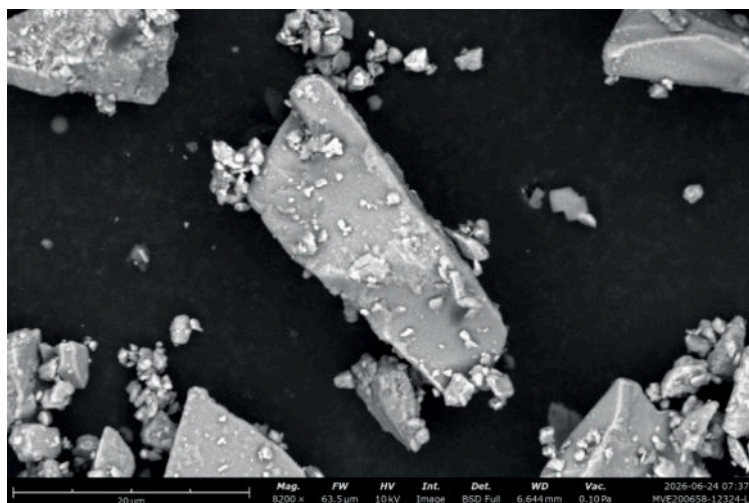


Рисунок 7. СЭМ-снимок (BSD, $\times 1850$) частиц гранулированного свинцового шлака.

Редкие яркие точечные включения могут быть идентифицированы как металлические микрокапли, захваченные расплавом в момент грануляции. Их количество значительно меньше, чем в медеплавильном шлаке, а размер не превышает 2–5 мкм, что обеспечивает потенциально лучшее вскрытие при тонком помоле.

На рисунке 8 при промежуточном увеличении прослеживается характерная ступенчатость поверхностей излома, отражающая неоднородный характер разрушения материала.

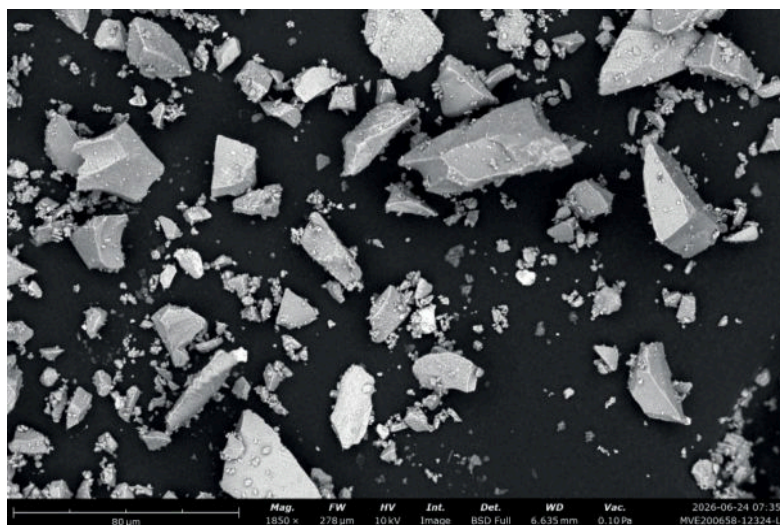


Рисунок 8. СЭМ-снимок (BSD, $\times 1850$) частиц гранулированного свинцового шлака.

Острые рёбра и пиннакулярный рельеф на гранях кристаллически-дефектных участков сочетаются с зеркально-гладкими плоскостями аморфной матрицы, подтверждая смешанный (кристаллически-стекловидный) характер материала. Отсутствие характерных для медеплавильного шлака полиминеральных агрегатов с плотной упаковкой зёрен объясняет принципиально иную кинетику измельчения данного материала.

Совокупность данных СЭМ-исследования подтверждает и визуализирует механистическую интерпретацию кинетических и энергетических закономерностей. Для медеплавильного отвального шлака характерен вязко-абразивный механизм с преобладанием поверхностного истирания на поздних стадиях помола: частицы сохраняют сложную гетерогенную морфологию, а их поверхность несёт следы многократных ударных и истирающих воздействий. Для гранулированного свинцового шлака доминирует хрупкое разрушение по предсуществующим закалочным трещинам с формированием правильных призматических осколков с гладкими поверхностями сколов - морфологический признак однократного разрушения без существенной пластической деформации.

Рациональные режимы измельчения. На основании анализа Парето-оптимальных сочетаний удельного энергопотребления и дисперсности определены рациональные режимы измельчения для каждого типа сырья. Для отвального медеплавильного шлака рациональным является режим с временем помола 8 мин, степенью заполнения барабана материалом 25 % рабочего объёма и массовым соотношением «шары : материал» 7:1. При данных условиях достигается медианный диаметр $D_{50} = 76$ мкм при удельном энергопотреблении 15,3 кВт·ч/т. Указанный режим соответствует установленной по результатам Парето-анализа рациональной области 15–16 кВт·ч/т при D_{50} порядка 75–80 мкм и обеспечивает компромисс между достигаемой дисперсностью и энергетическими затратами.

Для гранулированного шлака свинцовой плавки рациональным является режим с временем помола 8 мин, степенью заполнения барабана материалом 35 % рабочего объёма и массовым соотношением «шары : материал» 7:1. При данных условиях достигается медианный диаметр $D_{50} = 43$ мкм при удельном энергопотреблении 9,2 кВт·ч/т. Указанный режим соответствует установленной по результатам Парето-анализа рациональной области 8–10 кВт·ч/т при D_{50} порядка 40–50 мкм и позволяет получить тонкодисперсный продукт при умеренных энергетических затратах.

Заключение. Сравнительное исследование измельчаемости медеплавильного отвального и гранулированного свинцового шлаков выявило принципиальные различия в их поведении при планетарном помоле, обусловленные генезисом и структурным состоянием материалов.

Медеплавильный шлак с плотной поликристаллической фаялит-магнетитовой матрицей характеризуется высокими значениями твёрдости, ударной прочности и индекса Bond (14,8 кВт·ч/т против 9,2 кВт·ч/т для гранулированного шлака) и разрушается по вязко-абразивному механизму с выраженным замедлением

измельчения после 10 мин помола. Гранулированный свинцовый шлак с аморфной стекловидной структурой разрушается хрупко по закалочным трещинам и достигает технологически рациональной дисперсности при вдвое меньших удельных энергозатратах.

Парето-анализ установил рациональные точки дезинтеграции: для медеплавильного шлака - 15–16 кВт·ч/т ($D_{50} \approx 80$ мкм), для гранулированного - 8–10 кВт·ч/т ($D_{50} \approx 40$ –50 мкм). Среди варьируемых факторов определяющее влияние оказывает время помола, тогда как степень загрузки барабана является наименее значимым параметром. Морфология частиц по данным СЭМ подтверждает выявленные механизмы и наглядно отражает различие кинетических режимов двух материалов.

Результаты свидетельствуют о необходимости индивидуального подбора режимов измельчения для каждого типа шлакового сырья и могут быть использованы при проектировании энергоэффективных схем переработки шлаков.

References

- Abed M.H., Abbas I.S., Hamed M., Canakci H. (2022). Rheological, fresh, and mechanical properties of mechanochemically activated geopolymer grout: A comparative study with conventionally activated geopolymer grout. *Construction and Building Materials*. – Vol. 322. – P. 126338. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126338> (in Eng.).
- Adewuyi S.O., Ahmed H.A.M., Ahmed H.M.A. (2020). Methods of ore pretreatment for comminution energy reduction. *Minerals*. – Vol. 10. – No. 5. – P. 423. <https://doi.org/10.3390/min10050423> (in Eng.).
- Ballantyne G.R., Powell M.S. (2014). Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores. *Minerals Engineering*. – Vol. 65. – P. 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.05.017> (in Eng.).
- Biricik H., Kirgiz M.S., de Sousa Galdino A.G., Kenai S., Mirza J., Kinuthia J., Khatib J. (2021). Activation of slag through a combination of NaOH/NaS alkali for transforming it into geopolymer slag binder mortar-assessment the effects of two different Blaine fines and three different curing conditions. *Journal of Materials Research and Technology*. – Vol. 14. – P. 1569–1584. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.01> (in Eng.).
- Dai J., Wang Q., Xie C., Xue Y., Duan Y., Cui X. (2019). The effect of fineness on the hydration activity index of ground granulated blast furnace slag. *Materials*. – Vol. 12. – No. 18. – P. 2984. <https://doi.org/10.3390/ma12182984> (in Eng.).
- Deng L., Tan X., Tang C., Che D. (2016). A study on water-quenching waste heat recovery from molten slag of slag-tap boilers. *Applied Thermal Engineering*. – Vol. 108. – P. 538–545. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.169> (in Eng.).
- García G.G., Oliva J., Guasch E., Anticoi H., Coello-Velázquez A.L., Menéndez-Aguado J.M. (2021). Variability study of bond work index and grindability index on various critical metal ores. *Metals*. – Vol. 11. – No. 6. – P. 970. <https://doi.org/10.3390/met11060970> (in Eng.).
- Gholizadeh Vayghan A., Horckmans L., Snellings R., Peys A., Teck P., Maier J. et al. (2021). Use of treated non-ferrous metallurgical slags as supplementary cementitious materials in cementitious mixtures. *Applied Sciences*. – Vol. 11. – No. 9. – P. 4028. <https://doi.org/10.3390/app11094028> (in Eng.).
- Góralczyk M., Krot P., Zimroz R., Ogonowski S. (2020). Increasing energy efficiency and productivity of the comminution process in tumbling mills by indirect measurements of internal dynamics-an overview. *Energies*. – Vol. 13. – No. 24. – P. 6735. <https://doi.org/10.3390/en13246735> (in Eng.).
- Li T., Liu Y., Zhang S., Jiang M. (2021). Physicochemical, mineralogical liberation characteristics, and direct recovery of copper and iron from copper electric furnace slag. *Polish Journal of Environmental Studies*. – Vol. 30. – No. 3. – P. 2621–2630. <https://doi.org/10.15244/pjoes/126234> (in Eng.).

Lin B., Wang H., Zhu X., Liao Q., Ding B. (2016). Crystallization properties of molten blast furnace slag at different cooling rates. *Applied Thermal Engineering*. – Vol. 96. – P. 432-440. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.075> (in Eng.).

Mohamadi Nasab S., Shafiei Bafti B., Yarahmadi M.R., Mahmoudi Maymand M., Kamalabadi Khorasani J. (2022). Mineralogical properties of the copper slags from the SarCheshmeh smelter plant, Iran, in view of value recovery. *Minerals*. – Vol. 12. – No. 9. – P. 1153. <https://doi.org/10.3390/min12091153> (in Eng.).

Petrakis E., Karmali V., Bartzas G., Komnitsas K. (2019). Grinding kinetics of slag and effect of final particle size on the compressive strength of alkali activated materials. *Minerals*. – Vol. 9. – No. 11. – P. 714. <https://doi.org/10.3390/min9110714> (in Eng.).

Phiri T.C., Singh P., Nikoloski A.N. (2021). The potential for copper slag waste as a resource for a circular economy: A review-Part II. *Minerals Engineering*. – Vol. 172. – P. 107150. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.10715> (in Eng.).

Phiri T.C., Singh P., Nikoloski A.N. (2022). The potential for copper slag waste as a resource for a circular economy: A review-Part I. *Minerals Engineering*. – Vol. 180. – P. 107474. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107474> (in Eng.).

Sun Y., Chen M., Chen D., Liu S., Zhang X., Wu S. (2022). Laboratory preparation and performance characterization of steel slag ultrafine powder used in cement-based materials. *Sustainability*. – Vol. 14. – No. 22. – P. 14951. <https://doi.org/10.3390/su142214951> (in Eng.).

Tsunazawa Y., Liu C., Toi R., Okura T., Tokoro C. (2019). Crystal formation and growth by slow cooling for recovery of magnetite particles from copper smelting slag. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. – Vol. 128. – No. 4. – P. 248-255. <https://doi.org/10.1080/25726641.2018.1483793> (in Eng.).

Van De Sande J., Peys A., Hertel T., Rahier H., Pontikes Y. (2020). Upcycling of non-ferrous metallurgy slags: Identifying the most reactive slag for inorganic polymer construction materials. *Resources, Conservation and Recycling*. – Vol. 154. – P. 104627. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104627> (in Eng.).

Wang J.P., Erdenebold U. (2020). A study on reduction of copper smelting slag by carbon for recycling into metal values and cement raw material. *Sustainability*. – Vol. 12. – No. 4. – P. 1421. <https://doi.org/10.3390/su12041421> (in Eng.).

Wang Y., Wang X., Lou Y., Gao F., Wu W. (2022). Effect of mechanical activation on reaction mechanism of one-part preparation fly ash/slag-based geopolymer. *Advances in Cement Research*. – Vol. 34. – No. 9. – P. 412-426. <https://doi.org/10.1680/jadcr.21.00033> (in Eng.).

Zhao J., Wang D., Yan P., Li W. (2016). Comparison of grinding characteristics of converter steel slag with and without pretreatment and grinding aids. *Applied Sciences*. – Vol. 6. – No. 11. – P. 237. <https://doi.org/10.3390/app6110237> (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: September 29, 2026
Format: 70×90 1/16. 34.5 printed sheets. Order No. 3.

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