

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>

ТИГИНЬАНУ 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), (Джэон, 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 Amino-thiazoles 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., Абильмажинова 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
Қамұнұр Қ., Ысқақ М., Мусапирова Л. Барит–кальцит жүйесіндегі натрий лигносульфонатының флотациялық қасиеттеріне химиялық модификацияның әсері.....	264
Кононов А., Қамұнұр 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., Сейтқазинаова Ә., Исанбекова А. Ағаш қалдықтарынан алынған органосольв лигнин негізіндегі көміртекті 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
Қурманғалиева 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 Н.Т., 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., Жумабек 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), 398-417

<https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.483>

UDC: 622.765

IRSTI: 52.45.15

©Ryskaliyeva R.G.^{1,2}, Beisembayeva L.K.^{1,2}, Osserov T.B.¹, 2026.

¹Institute of Combustion Problems, Almaty, Kazakhstan;

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

*E-mail: x_tios_x@mail.ru

HYDROCYCLONE CLASSIFICATION OF BALKHASH PROCESSING PLANT TAILINGS

Ryskaliyeva Roza — Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Combustion Problems; Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: roza12_11_64@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9591-1477>;

Beisembayeva Luisa — Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Combustion Problems; Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: beisembaeva_l@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7529-673X>;

Osserov Timur — PhD, Leading Researcher, Institute of Combustion Problems, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: x_tios_x@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6724-0496>.

Abstract. This study investigates the hydrocyclone classification of aged copper ore beneficiation tailings from the Balkhash Concentrating Plant (Kazakhstan) to determine rational parameters for the separation and processing of technogenic raw materials. Experiments were conducted using a laboratory hydrocyclone with a diameter of 39 mm at feed pressures of 0.10–0.80 MPa and solid contents of 5–20 wt.%. Particle size distribution was determined by laser diffraction, while elemental composition was analyzed by X-ray fluorescence and atomic absorption spectroscopy. Feed pressure was identified as the main factor affecting classification efficiency, with a rational range of 0.60–0.70 MPa. An intermediate operating pressure of 0.65 MPa was selected to investigate the effect of solid content. The highest classification performance was achieved at 7–9 wt.% solids: separation sharpness was 1.70–1.71, fine particle misplacement into the underflow was 11.5–11.8%, and coarse particle loss into the overflow was 6.6–6.8%. The median particle size D_{50} was 65–68 μm for the underflow and 16–17 μm for the overflow. At 9 wt.% solids, 68.7% of copper was concentrated in the overflow, with a concentration coefficient of $K = 1.22$. The copper mass balance closure was 100.3%. These results confirm the effectiveness of hydrocyclone classification as a preliminary separation stage for technogenic tailings. The resulting underflow and overflow products can be considered for subsequent flotation

upgrading and hydrometallurgical copper recovery, respectively, demonstrating the practical potential of the proposed approach for processing accumulated copper ore beneficiation tailings.

Keywords: hydrocyclone, copper ore tailings, classification, particle size distribution, copper balance

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: Ryskaliyeva R.G., L.K. Beisembayeva, Osserov T.B. Hydrocyclone Classification of Balkhash Processing Plant Tailings. *Academic Journal of Physical and Chemical Sciences*. 2026. No.3. Pp. 398-417. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.483>

©Рыскалиева Р.Г.^{1,2}, Бейсембаева Л.К.^{1,2}, Осеров Т.Б.¹, 2026.

¹Жану проблемалары институты, Алматы, Қазақстан;

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

*E-mail: x_tios_x@mail.ru

БАЛҚАШ БАЙЫТУ ФАБРИКАСЫНЫҢ БАЙЫТУ ҚАЛДЫҚТАРЫН ГИДРОЦИКЛОНДЫҚ КЛАССИФИКАЦИЯЛАУ

Рыскалиева Роза — химия ғылымдарының кандидаты, доцент, жетекші ғылыми қызметкер, Жану проблемалары институты; Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: roza12_11_64@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9591-1477>;

Бейсембаева Луиза — химия ғылымдарының кандидаты, доцент, жетекші ғылыми қызметкер, Жану проблемалары институты; Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: beisembayeva_l@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7529-673X>;

Осеров Тимур — PhD доктор, жетекші ғылыми қызметкер, Жану проблемалары институты, Алматы, Қазақстан, E-mail: x_tios_x@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6724-0496>.

Аннотация. Жұмыста Балқаш байыту фабрикасының (Қазақстан) мыс кендерін байытудан түзілген ұзақ уақыт сақталған қалдықтарын гидроциклондық классификациялау техногендік шикізатты бөлудің және одан әрі қайта өңдеудің рационалды параметрлерін анықтау мақсатында зерттелді. Тәжірибелер диаметрі 39 мм зертханалық гидроциклонда қоректендіру қысымы 0,10–0,80 МПа және қатты фазаның мөлшері 5–20 % болған жағдайда жүргізілді. Өнімдердің гранулометриялық құрамы лазерлік дифракция әдісімен анықталды, ал элементтік құрамы рентгенофлуоресценттік және атомдық-абсорбциялық талдау әдістерімен зерттелді. Классификациялау тиімділігін анықтайтын негізгі фактор қоректендіру қысымы екені белгіленді. Қысымның рационалды

диапазоны 0,60–0,70 МПа құрады. Қатты фаза мөлшерінің әсерін егжей-тегжейлі зерттеу үшін 0,65 МПа аралық жұмыс қысымы таңдалды. Классификациялаудың ең жоғары көрсеткіштеріне қатты фазаның мөлшері 7–9 % болған кезде қол жеткізілді: бөлу өткірлігі 1,70–1,71, ұсақ фракцияның құмды өнімге өтуі 11,5–11,8 %, ал ірі фракцияның төгінді өнімге жоғалуы 6,6–6,8 % құрады. Құмды өнім бөлшектерінің медиандық өлшемі D_{50} 65–68 мкм, ал төгінді өнімнің D_{50} 16–17 мкм болды. Қатты фазаның мөлшері 9 % болған таңдалған режимде мыстың 68,7 %-ы төгінді өнімде шоғырланды, концентрация коэффициенті $K = 1,22$ құрады. Мыстың материалдық балансының сәйкестігі 100,3 % болды. Алынған нәтижелер гидроциклондық классификациялаудың техногендік қалдықтарды алдын ала бөлу сатысы ретіндегі тиімділігін растайды және алынған өнімдерді олардың құрамындағы бағалы компоненттерді кейіннен гидрометаллургиялық жолмен бөліп алу және флотациялық байыту объектілері ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Нәтижелер жинақталған қалдықтарды қайта өңдеу үшін практикалық маңызға ие.

Түйін сөздер: гидроциклон, мыс кендерін байыту қалдықтары, классификациялау, гранулометриялық құрам, мыс балансы

©Рыскалиева Р.Г.^{1,2}, Бейсембаева Л.К.^{1,2}, Осеров Т.Б.¹, 2026.

¹Институт проблем горения, Алматы, Казахстан;

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

*E-mail: x_tios_x@mail.ru

ГИДРОЦИКЛОННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ БАЛХАШСКОЙ ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ

Рыскалиева Роза — кандидат химических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт проблем горения; Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан, E-mail: roza12_11_64@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9591-1477>;

Бейсембаева Луиза — кандидат химических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт проблем горения; Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан, E-mail: beisembaeva_l@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7529-673X>;

Осеров Тимур — PhD, ведущий научный сотрудник, Институт проблем горения, Алматы, Казахстан,

E-mail: x_tios_x@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6724-0496>.

Аннотация. В работе исследована гидроциклонная классификация лежалых хвостов обогащения медных руд Балхашской обогатительной фабрики (Казахстан) с целью определения рациональных параметров разделения и последующей переработки техногенного сырья. Эксперименты проводились на лабораторном гидроциклоне диаметром 39 мм при давлении питания 0,10–0,80 МПа и содержании твердой фазы 5–20 %. Гранулометрический состав продуктов определяли методом лазерной дифракции, элементный состав исследовали методами рентгенофлуоресцентного и атомно-абсорбционного анализа. Установлено, что основным фактором, определяющим эффективность

классификации, является давление питания. Рациональный диапазон давления составил 0,60–0,70 МПа. Для детального исследования влияния содержания твердой фазы выбрано промежуточное рабочее давление 0,65 МПа. Наиболее высокие показатели классификации достигнуты при содержании твердой фазы 7–9 %: острота разделения составила 1,70–1,71, утечка мелочи в пески – 11,5–11,8 %, потеря крупной фракции в сливе – 6,6–6,8 %. Медианный размер частиц D_{50} песков составил 65–68 мкм, сливного продукта – 16–17 мкм. При выбранном режиме с содержанием твердой фазы 9 % в сливе сосредоточено 68,7 % меди при коэффициенте концентрации $K = 1,22$. Сходимость материального баланса меди составила 100,3 %. Полученные результаты подтверждают эффективность гидроциклонной классификации как стадии предварительного разделения техногенных хвостов и позволяют рассматривать полученные продукты в качестве объектов последующего гидрометаллургического извлечения и флотационного дообогащения содержащихся в них ценных компонентов медного сырья. Результаты имеют практическое значение для переработки накопленных хвостов.

Ключевые слова: гидроциклон, хвосты обогащения медных руд, классификация, гранулометрический состав, баланс меди

Введение. Техногенные хвосты обогатительных фабрик представляют собой значительный источник минерального сырья, накопленного в результате длительной эксплуатации горнодобывающих предприятий. По мировым оценкам, в хвостохранилищах сосредоточено от 5 до 20 % металла от исходного содержания в переработанной руде, а суммарный объем накопленных хвостов в глобальном масштабе превышает несколько десятков миллиардов тонн (Hann et al., 2021; Bilal et al., 2022; Kursunoglu et al., 2025). Балхашская обогатительная фабрика (Казахстан) является одним из крупнейших медеплавильных комплексов Центральной Азии; объем накопленных лежалых хвостов обогащения медных руд составляет десятки миллионов тонн (Shevko et al., 2015; Baibatsha et al., 2019; Baibatsha et al., 2021). Несмотря на относительно низкое содержание меди в отходах зрелой горнодобывающей промышленности (приблизительно 0,08–0,12 %), накопленные антропогенные отходы представляют значительный промышленный и экономический интерес как потенциальный источник этого металла. Это особенно актуально в нынешних условиях, когда мировые цены на медь постепенно растут, а запасы высококачественных, легко перерабатываемых руд сокращаются. Соответственно, переработка этих отходов рассматривается не только как метод повышения ценности антропогенного сырья, но и как перспективный путь для повторного извлечения ценных компонентов.

Экологический аспект придает этому вопросу дополнительную важность. Длительное хранение мелкодисперсных сульфидсодержащих материалов в отходах способствует развитию процессов кислотного выщелачивания. В результате растворенные соединения тяжелых металлов могут мигрировать в окружающую среду, в частности, проникая в грунтовые воды и негативно влияя на соседние территории (Mackay et al., 2018; Santander et al., 2015).

При переработке лежалых хвостов возникают определенные технологические трудности, обусловленные изменением свойств материала в процессе длительного хранения. Одной из основных особенностей является высокое содержание тонкодисперсных частиц: более 80 % материала имеет размер менее 50 мкм. Перечисленные факторы оказывают заметное влияние на эффективность последующего извлечения ценных компонентов, поэтому перед гидрометаллургической переработкой или флотационным обогащением требуется предварительная классификация материала (Antonijević et al., 2008; Bakalarz et al., 2019; Dadzie et al., 2025). Гидроциклонная классификация является одним из наиболее производительных и энергоэффективных методов разделения тонкодисперсных суспензий и широко применяется в практике переработки техногенного сырья (Tyumentseva et al., 2026; Yang et al., 2026; Narasimha et al., 2025; Wang et al., 2026). Принцип действия гидроциклона основан на использовании центробежных сил, возникающих при тангенциальной подаче суспензии, что обеспечивает разделение частиц по крупности и плотности без применения движущихся механических элементов. Однако применение гидроциклонов для переработки тонкодисперсных хвостов с высоким содержанием глинистых фракций требует тщательной оптимизации режимных параметров - давления питания и концентрации твердой фазы, - поскольку реологические свойства таких суспензий существенно отличаются от свойств суспензий из свежеизмельченного материала.

Вместе с тем эффективное управление процессом классификации и выбор рациональной схемы дальнейшей переработки продуктов невозможны без комплексной характеристики химического состава исходного материала и разделенных фракций. Гранулометрическая классификация в гидроциклоне не является нейтральной относительно химического состава продуктов: медьсодержащие минеральные частицы, как правило, концентрируются в определенных гранулометрических классах в зависимости от степени раскрытия и плотности минералов-носителей. Элементный анализ исходного питания, песков и слива позволяет установить баланс распределения меди и сопутствующих элементов по продуктам гидроциклонирования, рассчитать коэффициенты концентрации и извлечения, а также обоснованно определить направление каждого продукта - на гидрометаллургическое выщелачивание или флотационное доизвлечение. Без таких данных оценка технологической эффективности классификации остается неполной, поскольку высокая острота гранулометрического разделения сама по себе не гарантирует рационального распределения ценного компонента между продуктами.

Целью настоящей работы является оптимизация режимных параметров гидроциклонной классификации лежалых хвостов обогащения медных руд Балхашской ОФ, включая установление зависимости гранулометрических и химических характеристик продуктов от давления питания и содержания твердой фазы в суспензии. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: (1) определение химического и минералогического состава исходных

хвостов методами рентгенофлуоресцентного (РФА) и атомно-абсорбционного (ААС) анализа; (2) установление рабочего диапазона параметров классификации; (3) исследование влияния давления питания и концентрации пульпы на показатели разделения; (4) составление баланса распределения меди и основных элементов по продуктам классификации при выбранном рабочем режиме.

Материалы и методы. Объектом исследования служили лежалые хвосты обогащения медных руд Балхашской обогатительной фабрики (Казахстан). Перед приготовлением суспензий материал высушивали и дезагрегировали. Рабочие суспензии готовились при содержании твердой фазы 5, 7, 9, 10, 11, 13, 15 и 20 % массовых.

Классификацию проводили на лабораторном гидроциклоне цилиндрического типа с тангенциальной подачей суспензии и осевым отводом сливного продукта (рисунок 1).



а – общий вид установки на площадке; б – конструкция гидроциклона на каркасной раме с прозрачной кварцевой цилиндрической трубкой.

Рисунок 1. Гидроциклон для разделения компонентов хвостов обогащения медных руд.

Цилиндрическая секция изготовлена из прозрачной кварцевой трубки (внешний диаметр 45 мм, толщина стенки 3 мм, длина 450 мм), что обеспечивало визуальный контроль структуры вихревого потока и устойчивости воздушного столба в ходе экспериментов. Угол конуса составлял 15-18°, диаметр сливного патрубка - 20 мм, пескового - 25 мм. Общая высота установки - 130 см. Подача суспензии осуществлялась центробежным насосом через трубопровод диаметром 30 мм из накопительной емкости в режиме циркуляции.

Давление питания варьировалось в диапазоне 0,10-0,80 МПа и контролировалось манометром. После выхода системы на стационарный режим выполнялся одновременный отбор проб песков и сливов. Экспериментальные

исследования проводили последовательно в несколько этапов. На первом этапе была выполнена базовая серия из 12 опытов при давлениях питания 0,10; 0,20; 0,30 и 0,50 МПа и содержании твердой фазы 5, 10 и 20 %. На втором этапе для уточнения влияния давления при фиксированном содержании твердой фазы 10 % были проведены дополнительные опыты при давлениях 0,60; 0,70 и 0,80 МПа. По результатам данного этапа рациональным был определен диапазон давления 0,60-0,70 МПа. На третьем этапе для уточнения влияния содержания твердой фазы было выбрано промежуточное рабочее давление 0,65 МПа, находящееся в пределах установленного рационального диапазона. При данном давлении проводили эксперименты при содержании твердой фазы 5, 7, 9, 11, 13 и 15 %.

Гранулометрический анализ отобранных проб выполнялся методом лазерной дифракции. Исходное питание характеризовалось преимущественно тонкодисперсным составом: более 80 % частиц имели крупность менее 50 мкм. Для каждой пробы определялись характеристические диаметры D_{10} , D_{50} и D_{90} , а также строились дифференциальные и кумулятивные кривые распределения по размерам частиц. Массовые выходы продуктов рассчитывались по результатам взвешивания после фильтрации и сушки; материальный баланс считался удовлетворительным при замыкании 99,0-100,5 %. Эффективность классификации оценивалась по четырем критериям: относительной остроте разделения, утечке мелочи в пески, потере крупности в сливе и медианному диаметру D_{50} каждого продукта. Воспроизводимость выбранного рабочего режима проверялась тремя независимыми повторными опытами с расчетом среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации.

Элементный анализ исходного материала и продуктов классификации (пески, слив) проводился двумя взаимодополняющими методами. Содержание основных порообразующих компонентов (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3) определялось методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) на энергодисперсионном спектрометре; навеска пробы составляла 5 г, измельченной до крупности менее 74 мкм. Содержание меди (Cu) и цинка (Zn) определялось методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) после кислотного разложения пробы в смеси HNO_3 - HCl (3:1) при температуре 120 °С. Каждое определение выполнялось в двух повторностях; расхождение между параллельными анализами не превышало 3 % отн. Предел обнаружения по меди методом ААС составлял 0,001 %, что обеспечивало надежное определение при содержаниях 0,02 % и выше.

Баланс распределения меди по продуктам классификации рассчитывался по формуле: $\varepsilon = (\gamma \times \beta) / \alpha \times 100 \%$, где ε - извлечение меди в продукт, %; γ - массовый выход продукта, %; β - содержание меди в продукте, %; α - содержание меди в исходном питании, %. Сходимость баланса считалась удовлетворительной при отклонении суммарного извлечения от 100 % не более чем на ± 2 % абс. Для оценки обогащения тонкой фракции по меди рассчитывался коэффициент концентрации $K = \beta_{\text{сл}} / \alpha$, где $\beta_{\text{сл}}$ - содержание меди в сливе.

Для количественной оценки остроты разделения использовали показатель, обратный несовершенству разделения:

$$S = \frac{I}{I} = \frac{2d_{50}}{d_{75} - d_{25}}$$

где S - безразмерный показатель остроты разделения; I - несовершенство разделения; d_{25} , d_{50} и d_{75} - размеры частиц, для которых доля перехода в песковый продукт по кривой разделения составляет соответственно 25, 50 и 75 %.

Утечку мелочи в пески и потери крупной фракции в сливе определяли как долю соответствующего класса исходного питания, поступившую в ненадлежащий продукт классификации. Для расчета использовали контрольную границу крупности d_0 ; к мелкому классу относили частицы размером $d < d_0$, к крупному - $d \geq d_0$.

Утечку мелочи в пески рассчитывали по формуле:

$$L_m = \frac{\gamma_n \cdot x_{n, < d_0}}{x_{неч, < d_0}} \times 100 \%$$

Потери крупной фракции в сливе рассчитывали по формуле:

$$L_k = \frac{\gamma_{сл} \cdot x_{сл, \geq d_0}}{x_{неч, \geq d_0}} \times 100 \%$$

где L_m и L_k - утечка мелочи в пески и потери крупной фракции в сливе соответственно, %; γ_n и $\gamma_{сл}$ - массовые выходы песков и слива по сухому твердому; $x_{п, < d_0}$ и $x_{исх, < d_0}$ - массовые доли мелкого класса в песках и исходном питании; $x_{сл, \geq d_0}$ и $x_{исх, \geq d_0}$ - массовые доли крупного класса в сливе и исходном питании.

Контрольная граница крупности составляла 50 мкм.

Результаты и обсуждение. Определение рабочего диапазона параметров. Для формирования сравнительной базы и определения перспективных направлений оптимизации проведено 12 предварительных опытов, в ходе которых давление питания изменяли в пределах 0,10-0,50 МПа при содержании твердой фазы 5, 10 и 20 %. Во всех опытах обеспечивался устойчивый гидродинамический режим.

Подача суспензии осуществлялась тангенциальным способом в гидроциклон цилиндрикоконической конструкции с диаметром корпуса 39 мм и углом конусной части 15-18°. Сливной продукт выводился через осевой патрубок диаметром 20 мм, тогда как песковая фракция удалялась через нижний патрубок диаметром 25 мм. Режим работы считался установившимся спустя 3-5 минут после стабилизации давления, после чего одновременно производился отбор проб сливного и пескового продуктов.

Таблица 1. Массовые выходы продуктов классификации при базовых режимах.

№ опыта	Тв., %	P, МПа	Выход песков, %	Выход сливов, %	Баланс, %
1	5	0,10	24,8	75,6	100,4
2	5	0,20	28,7	70,9	99,6
3	5	0,30	32,5	66,8	99,3
4	5	0,50	38,1	61,2	99,3
5	10	0,10	26,3	73,1	99,4
6	10	0,20	30,4	68,9	99,3
7	10	0,30	34,8	64,6	99,4
8	10	0,50	40,2	59,1	99,3
9	20	0,10	27,9	71,8	99,7
10	20	0,20	32,1	67,0	99,1
11	20	0,30	36,4	62,7	99,1
12	20	0,50	42,0	57,5	99,5

Полученные данные по массовым выходам (таблица 1) свидетельствуют о наличии устойчивой зависимости между давлением питания и распределением продуктов разделения. При повышении давления с 0,10 до 0,50 МПа выход песковой фракции возрастал от 24,8-27,9 % до 38,1-42,0 % независимо от содержания твердой фазы в суспензии. Наблюдаемая тенденция обусловлена увеличением интенсивности центробежных сил, что способствует более эффективному удержанию крупных частиц в периферийной области гидроциклона и их последующему выводу в песковый продукт. Значения материального баланса, находившиеся в пределах 99,1-100,4 %, подтверждают достоверность экспериментальных данных и корректность процедуры пробоотбора.

Влияние содержания твердой фазы на выход песков выражено слабее по сравнению с воздействием давления питания. Так, при $P = 0,30$ МПа увеличение содержания твердого с 5 до 20 % приводит к росту выхода песков лишь на 3,9 п.п. (с 32,5 до 36,4 %). Это указывает на то, что в рассматриваемой конструкции гидроциклона давление является основным параметром, определяющим процесс разделения. На рисунке 2 видно, что с повышением давления кривые выходов песков и сливов расходятся симметрично, при этом их суммарное значение остается близким к 100 %.

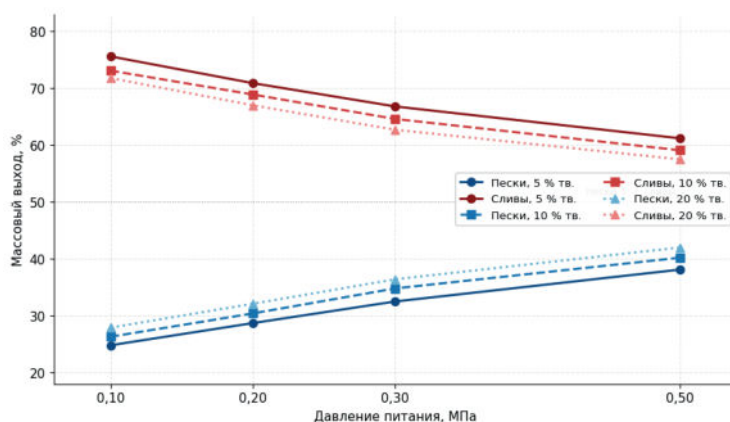


Рисунок 2. Изменение массового выхода продуктов классификации при различном давлении питания.

Независимо от содержания твердой фазы характер изменения кривых оставался близким, что указывает на влияние давления во всех случаях.

Анализ гранулометрического состава продуктов (таблица 2) показал стабильное разделение фракций при всех исследованных режимах.

Таблица 2. Гранулометрические характеристики и показатели эффективности классификации.

№	Тв., %	P, МПа	D ₅₀ п., мкм	D ₅₀ сл., мкм	Острота	Утечка мелочи, %	Потеря крупн., %
1	5	0,10	82	22	1,45	18,0	9,5
2	5	0,20	74	19	1,55	15,5	8,0
3	5	0,30	68	17	1,65	13,0	7,2
4	5	0,50	60	14	1,70	11,5	6,8
5	10	0,10	90	25	1,40	19,5	10,5
6	10	0,20	82	22	1,51	17,0	9,1
7	10	0,30	75	20	1,62	14,5	8,0
8	10	0,50	68	17	1,65	13,0	7,5
9	20	0,10	98	28	1,35	21,0	11,5
10	20	0,20	90	25	1,45	18,5	10,0
11	20	0,30	82	23	1,55	16,0	9,0
12	20	0,50	75	20	1,60	14,0	8,2

D₅₀ песков в 3,1-4,7 раза превышает D₅₀ сливов: при P = 0,10 МПа и C = 5 % соотношение составляет 82/22 = 3,7; при P = 0,50 МПа и C = 5 % - 60/14 = 4,3. Таким образом, повышение давления не только сдвигает оба продукта в область меньших диаметров, но и увеличивает степень их разделения.

Увеличение содержания твердой фазы при фиксированном давлении приводит к укрупнению обоих продуктов. При P = 0,30 МПа D₅₀ песков возрастает от 68 мкм (5 % тв.) до 82 мкм (20 % тв.), D₅₀ сливов - от 17 до 23 мкм. Причина - рост

эффективной вязкости пульпы, сглаживающий градиенты скоростей в вихревом потоке и смещающий гидродинамическую границу разделения в сторону более крупных частиц.

Рисунок 3 демонстрирует двухуровневую структуру результатов, где группа кривых D_{50} песков (размер частиц 60-98 мкм) и группа D_{50} сливов (размер частиц 14-28 мкм) четко разделены промежутком более 40 мкм независимо от условий.

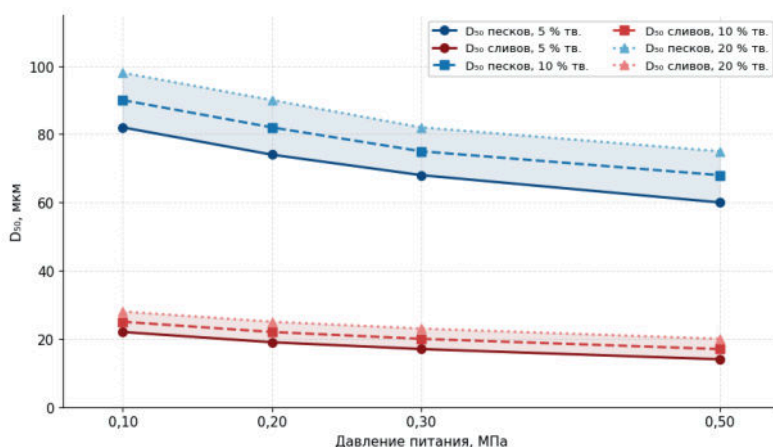


Рисунок 3. Медианный диаметр D_{50} песков и сливов в зависимости от давления питания.

На рисунке 4 показана взаимосвязь основных параметров процесса: с увеличением давления возрастает острота разделения, тогда как утечка мелких частиц постепенно снижается.

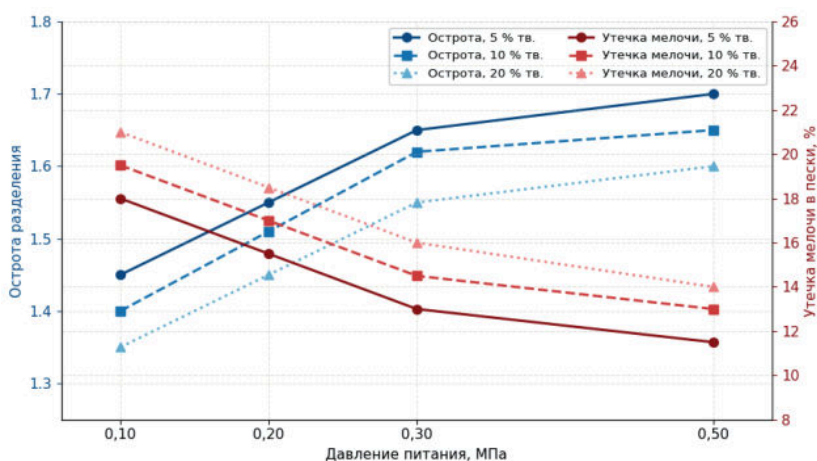


Рисунок 4. Острота разделения (левая ось) и утечка мелочи в пески (правая ось) в зависимости от давления питания.

Это исключает компромиссный характер оптимизации - оба критерия улучшаются в одном направлении. Вместе с тем при давлении 0,50 МПа наклон кривых остроты заметно уменьшается, указывая на замедление прироста эффективности и возможное наличие точки перегиба при более высоких давлениях.

Гранулометрические распределения продуктов при выбранном режиме базовой серии представлены на рисунке 5.

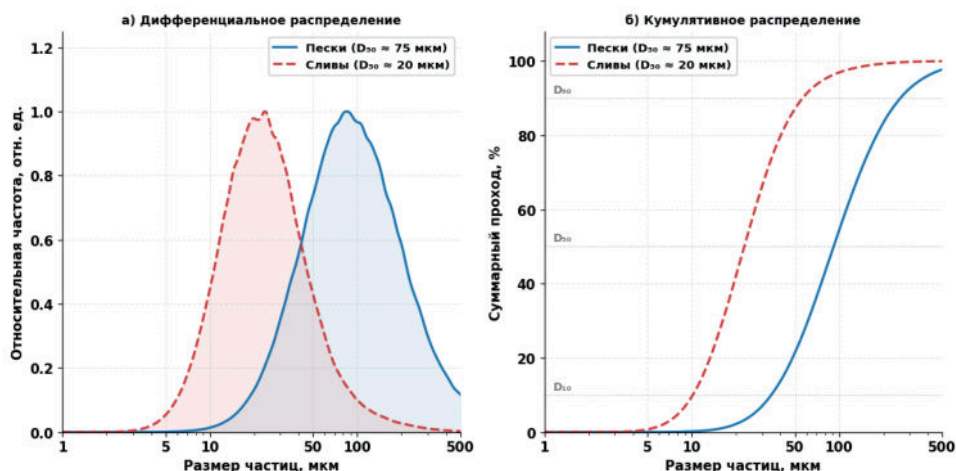


Рисунок 5. Гранулометрические распределения продуктов при выбранном режиме базовой серии.

Дифференциальные кривые (рисунок 5а) имеют выраженную асимметрию с правым хвостом, характерную для полидисперсных техногенных материалов. Максимум распределения песков приходится на область 60-90 мкм; в области 150-200 мкм прослеживается слабое плечо, обусловленное присутствием единичных крупных агрегатов. Для сливов максимум смещен в зону 12-25 мкм, а плечо при 40-60 мкм отражает долю переходных частиц, не завершивших разделение. Кумулятивные кривые (рисунок 5б) демонстрируют четкое разнесение продуктов: D_{10} , D_{50} и D_{90} песков составляют приблизительно 25, 75 и 190 мкм, для сливов - 5, 20 и 60 мкм соответственно. Крутизна кумулятивной кривой сливов выше, что указывает на более узкое распределение тонкодисперсного продукта.

Результаты базовой серии показывают, что повышение давления питания в исследованном диапазоне 0,10-0,50 МПа сопровождается последовательным улучшением показателей классификации. Наиболее высокие показатели в пределах базовой серии получены при давлении 0,50 МПа: острота разделения достигает 1,60-1,70 в зависимости от содержания твердой фазы, при одновременном снижении утечки мелочи в пески и потери крупной фракции в слив. Вместе с тем достижение выраженного максимума эффективности в исследованном диапазоне не установлено: снижение наклона кривых на рисунке 3 при повышении давления

не свидетельствует об однозначном выходе показателей на плато. В связи с этим для уточнения влияния давления были проведены дополнительные эксперименты в диапазоне 0,60-0,80 МПа. Кроме того, использованный в базовой серии шаг по содержанию твердой фазы (5, 10 и 20 %) оказался слишком крупным для точного определения рационального диапазона, поскольку переход от 10 к 20 % сопровождается существенным изменением реологических свойств пульпы. Поэтому влияние содержания твердой фазы было дополнительно исследовано с меньшим шагом варьирования.

Влияние повышенного давления питания на эффективность классификации. Анализ базовых экспериментов (раздел 3.1) показал, что при давлении 0,50 МПа наклон кривых остроты разделения заметно снижается, однако точка перегиба достигнута не была. Для установления верхней границы эффективной работы гидроциклона проведена дополнительная серия опытов при давлениях 0,60, 0,70 и 0,80 МПа. Концентрация твердой фазы зафиксирована на уровне 10 % как наиболее представительном для промышленных условий переработки хвостов.

Все прочие условия оставались неизменными.

Данные таблицы 3 свидетельствуют о том, что при переходе от 0,50 к 0,60-0,70 МПа показатели продолжают улучшаться, однако прирост существенно замедляется. D_{50} песков снижается с 68 до 62 мкм - всего на 9 %, тогда как в базовом диапазоне 0,10-0,50 МПа аналогичное снижение составляло 24 %.

Таблица 3. Показатели классификации в расширенном диапазоне давлений ($C = 10$ % тв.).

Р, МПа	Пески, %	D_{50} п., мкм	D_{50} сл., мкм	Острота	Утечка мелочи, %	Потеря крупн., %
0,50	40,2	68	17	1,65	13,0	7,5
0,60	42,8	64	16	1,67	12,4	7,2
0,70	44,1	62	15	1,68	12,1	7,1
0,80	44,9	61	15	1,67	12,3	7,3

Схожая картина наблюдается для D_{50} сливов: значение уменьшается с 17 до 15 мкм и при 0,70-0,80 МПа стабилизируется.

Острота разделения достигает максимума при 0,70 МПа (1,68) и при дальнейшем повышении давления до 0,80 МПа незначительно снижается до 1,67. Одновременно утечка мелочи при 0,80 МПа незначительно возрастает (12,3 % против 12,1 % при 0,70 МПа). Эти два факта в совокупности указывают на наступление точки перегиба - режима, за которым дальнейшее повышение давления перестает улучшать качество разделения.

При давлении 0,80 МПа визуально фиксировалась нестабильность факела песков - периодические пульсации с частотой 2-4 с⁻¹. Это свидетельствует о том, что при чрезмерно высоком давлении усиление центробежного поля начинает нарушать устойчивость вихревого ядра, что ухудшает избирательность разделения и воспроизводимость результатов.

На рисунке 6 отчетливо видны три зоны поведения системы.

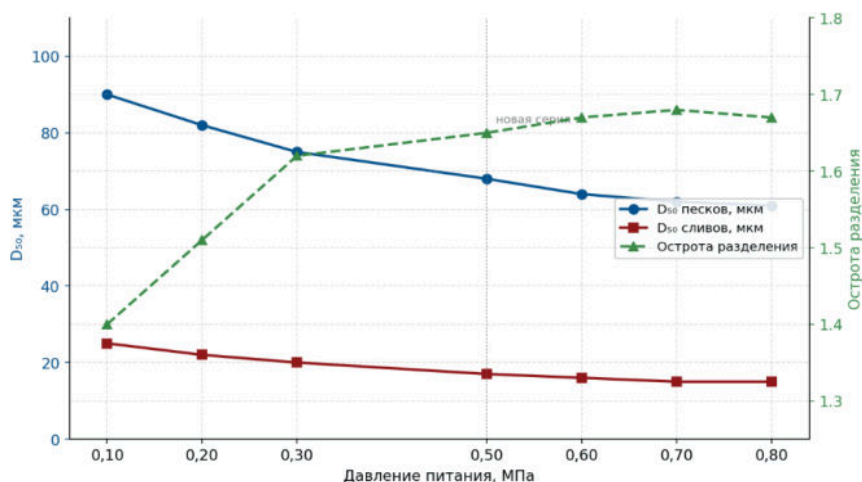


Рисунок 6. D₅₀ продуктов классификации и острота разделения в расширенном диапазоне давлений питания (C = 10 % тв.; вертикальная линия отделяет базовую серию от новой).

В диапазоне 0,10-0,30 МПа все показатели изменяются интенсивно - кривые имеют выраженный наклон. В диапазоне 0,30-0,60 МПа темп улучшения замедляется, но остается положительным. При давлениях 0,70-0,80 МПа кривые D₅₀ и остроты выходят на плато, а при 0,80 МПа острота незначительно снижается.

Таким образом, по результатам проведенных экспериментов рациональный диапазон давления питания составляет 0,60-0,70 МПа. В этом диапазоне достигаются близкие значения основных показателей классификации: острота разделения составляет 1,67-1,68, утечка мелочи в пески - 12,1-12,4 %, а потеря крупной фракции в сливе - 7,1-7,2 %. При повышении давления до 0,80 МПа дальнейшего улучшения показателей не наблюдается: острота разделения незначительно снижается до 1,67, а утечка мелочи возрастает до 12,3 %. Поэтому для последующей серии экспериментов по уточнению влияния содержания твердой фазы было выбрано промежуточное рабочее давление 0,65 МПа, находящееся в пределах установленного рационального диапазона 0,60-0,70 МПа.

Уточнение оптимального содержания твердой фазы. В ранее проведенных исследованиях были использованы дискретные значения содержания твердой фазы со значительными интервалами: 5, 10 и 20 %. Однако этот подход оказался недостаточным для точного определения оптимального диапазона, поскольку переход от 10 % к 20 % приводил к значительным изменениям в реологических свойствах пульпы. Для более детального анализа была проведена дополнительная серия экспериментов при фиксированном рабочем давлении 0,65 МПа, выбранном как промежуточное значение в пределах установленного рационального диапазона 0,60-0,70 МПа. Содержание твердой фазы варьировали

от 5 до 15 % с шагом 2 %. Выбор данного диапазона концентраций связан с технологическими особенностями процесса. Суспензии с содержанием твердого менее 5 % характеризуются избыточной разбавленностью, что не соответствует типичным производственным условиям. В то же время при концентрациях выше 15 % начинают преобладать реологические эффекты, и эффективность центробежного разделения снижается.

Анализ данных, представленных в таблице 4, показывает, что наиболее высокие показатели классификации достигаются при содержании твердой фазы 7-9 %.

Таблица 4. Показатели классификации при варьировании концентрации твердой фазы ($P = 0,65$ МПа).

С, % тв.	Пески, %	D_{50} п., мкм	D_{50} сл., мкм	Острота	Утечка мелочи, %	Потеря крупн., %
5	42,1	63	15	1,68	12,2	7,0
7	42,8	65	16	1,70	11,8	6,8
9	43,5	68	17	1,71	11,5	6,6
11	43,9	72	18	1,69	12,0	6,9
13	44,2	77	20	1,65	13,2	7,5
15	44,6	84	23	1,58	15,4	8,6

При $C = 9$ % достигается максимальная острота разделения (1,71) и минимальная утечка мелочи в пески (11,5 %) и потеря крупности в сливе (6,6 %). При переходе к 11 % и выше все три показателя монотонно ухудшаются: при $C = 15$ % острота снижается до 1,58, утечка мелочи возрастает до 15,4 %, потеря крупности - до 8,6 %. Одновременно D_{50} песков закономерно возрастает с концентрацией - от 63 мкм при $C = 5$ % до 84 мкм при $C = 15$ %. Это объясняется тем, что при высокой нагрузке по твердому увеличение вязкости пульпы смещает гидродинамическую границу разделения в сторону более крупных частиц, тогда как тонкие фракции хуже выносятся в слив и частично переходят в пески. D_{50} сливов при этом возрастает с 15 до 23 мкм.

Из рисунка 7 видно расширение межпродуктового зазора по D_{50} с ростом концентрации твердого: при $C = 5$ % разность D_{50} песков и сливов составляет 48 мкм, при $C = 15$ % - 61 мкм.

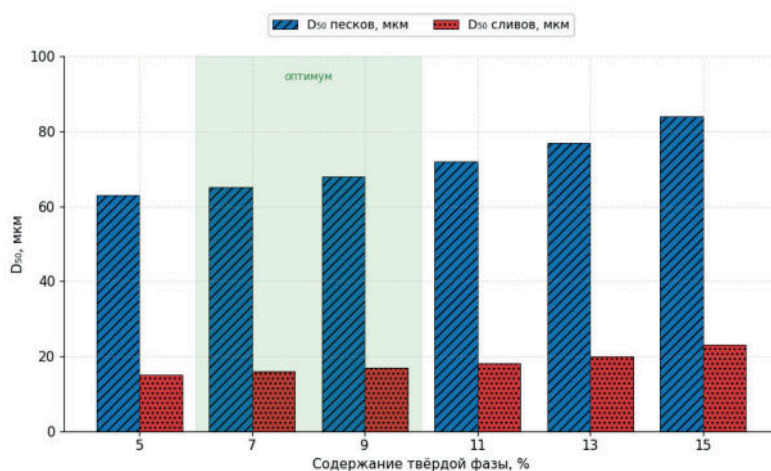


Рисунок 7. D_{50} песков и сливов в зависимости от содержания твердой фазы ($P = 0,65$ МПа; зеленая область - оптимальный диапазон).

Однако это расширение достигается за счет укрупнения обоих продуктов, а не за счет улучшения избирательности разделения, что подтверждается снижением остроты.

На рисунке 8 отчетливо виден куполообразный характер зависимости остроты разделения с максимумом при $C = 9\%$ и одновременно минимум утечки мелочи в том же диапазоне 7-9 %.

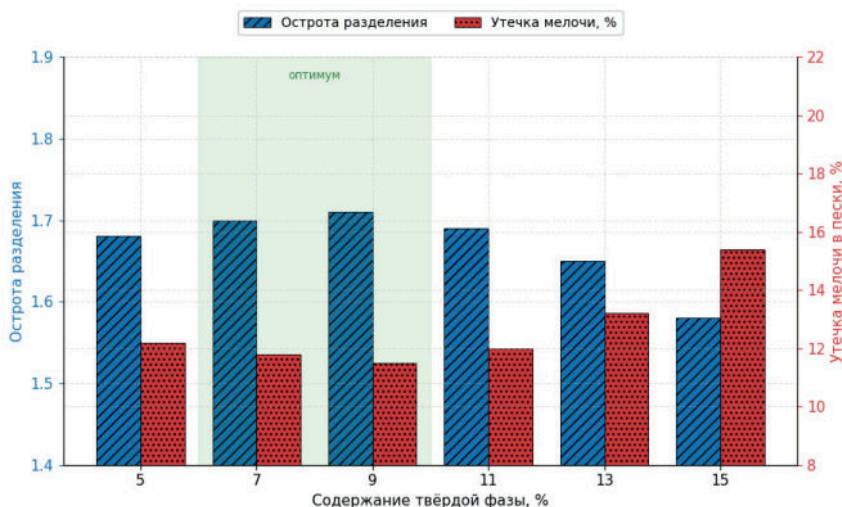


Рисунок 8. Острота разделения и утечка мелочи в зависимости от содержания твердой фазы ($P = 0,65$ МПа).

Это свидетельствует о том, что при данной концентрации реологические свойства пульпы наиболее благоприятны для формирования устойчивого вихревого ядра: вязкость достаточно высока для стабилизации потока, но недостаточна для сглаживания градиентов скоростей.

Рисунок 9 показывает, что выход песков монотонно возрастает с концентрацией (42,1-44,6 %), тогда как потеря крупности в сливе имеет минимум при $C = 9 \%$ (6,6 %) и резко возрастает при $C \geq 13 \%$.

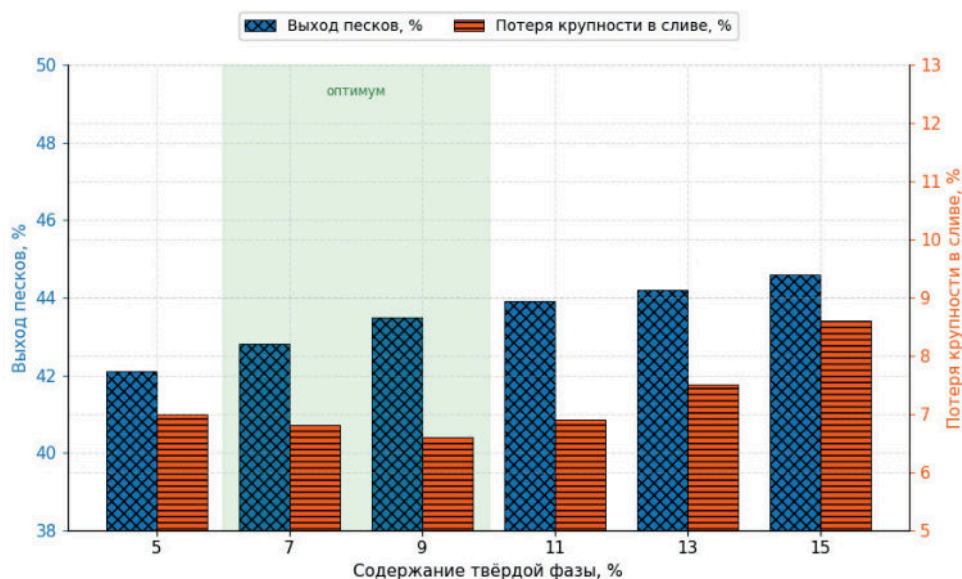


Рисунок 9. Выход песков и потеря крупности в сливе в зависимости от содержания твердой фазы ($P = 0,65$ МПа).

По совокупности исследованных показателей наиболее высокие результаты при выбранном рабочем давлении 0,65 МПа достигаются при содержании твердой фазы 7-9 %: острота разделения составляет 1,70-1,71, утечка мелочи - 11,5-11,8 %, потеря крупной фракции - 6,6-6,8 %, D_{50} песков - 65-68 мкм, D_{50} сливов - 16-17 мкм.

Элементный состав и баланс распределения меди по продуктам классификации. Для оценки перераспределения ценного компонента между продуктами гидроциклонирования были отобраны пробы исходного материала, песков и слива при выбранном рабочем режиме ($P = 0,65$ МПа, $C = 9 \%$ тв.) и подвергнуты элементному анализу методами РФА и ААС. Результаты анализа основных компонентов представлены в таблице 5.

Таблица 5. Элементный состав исходного материала и продуктов классификации при выбранном рабочем режиме ($P = 0,65$ МПа, $C = 9$ % тв.).

Компонент	Исходный, %	Пески, %	Слив, %	Метод
SiO ₂	58,4	62,1	55,3	РФА
Al ₂ O ₃	11,7	10,9	12,4	РФА
Fe ₂ O ₃	8,3	7,8	8,9	РФА
CaO	4,6	4,3	4,9	РФА
MgO	3,2	3,0	3,4	РФА
SO ₃	5,8	6,2	5,5	РФА
Cu	0,102	0,074	0,124	AAC
Zn	0,043	0,036	0,048	AAC

Данные таблицы 5 подтверждают силикатный характер матрицы хвостов: SiO₂ является доминирующим компонентом (58,4 %) с подчиненной ролью Al₂O₃ (11,7 %) и Fe₂O₃ (8,3 %). Содержание меди в исходном материале составляет 0,102 %, что соответствует нижней границе уровня, декларированного при описании объекта исследования (0,08-0,12 %). Примечательно, что в пески переходит материал с пониженным содержанием меди (0,074 %), тогда как слив обогащается до 0,124 %, что свидетельствует о концентрировании медьсодержащих частиц в тонкодисперсной фракции. Коэффициент концентрации меди в сливе относительно исходного составляет $K = 0,124 / 0,102 = 1,22$.

Таблица 6. Баланс распределения меди по продуктам классификации ($P = 0,65$ МПа, $C = 9$ % тв.).

Продукт	Выход, %	Cu, %	Извлечение Cu, %	K конц.
Исходный	100,0	0,102	100,0	1,00
Пески	43,5	0,074	31,6	0,73
Слив	56,5	0,124	68,7	1,22
Сумма / баланс	100,0	-	100,3 %	-

Результаты распределения меди (таблица 6) показывают, что в оптимальном режиме классификации основная часть металла переходит в сливной продукт: при выходе 56,5 % в нем сосредоточено 68,7 % меди. В песковую фракцию при выходе 43,5 % переходит 31,6 % Cu. Сходимость материального баланса составила 100,3 %, что находится в пределах допустимой погрешности (± 2 %) и подтверждает достоверность аналитических данных.

Значение коэффициента концентрации меди в сливе ($K = 1,22$) указывает на некоторое обогащение тонкодисперсной фракции. Это связано с тем, что медьсодержащие сульфидные минералы в большей степени сосредоточены в мелких классах крупности, характеризующихся развитой поверхностью раскрытия и высокой удельной поверхностью частиц. С учетом полученных результатов песковый продукт с содержанием меди 0,074 % и слив с содержанием Cu 0,124 % могут рассматриваться в качестве объектов последующих исследований по

флотационному дообогащению и гидрометаллургическому извлечению меди соответственно.

Заключение. На основании проведенных исследований установлены рациональные условия гидроциклонной классификации отходов обогащения медных руд Балхашской обогатительной фабрики. Установлено, что ключевым параметром, определяющим эффективность процесса, является давление питания. Повышение давления сопровождается улучшением показателей классификации, при этом рациональный диапазон давления составляет 0,60-0,70 МПа. При дальнейшем повышении давления до 0,80 МПа улучшения показателей не наблюдается, а также фиксируется нестабильность факела песков. Содержание твердой фазы оказывает менее выраженное, но существенное влияние: наиболее высокие показатели достигаются в диапазоне 7-9 %, тогда как при содержании твердой фазы выше 11 % усиление реологических эффектов приводит к ухудшению селективности разделения.

Для исследования влияния содержания твердой фазы было выбрано промежуточное рабочее давление $P = 0,65$ МПа, находящееся в пределах установленного рационального диапазона. При данном давлении наиболее высокие показатели классификации достигнуты при содержании твердой фазы $C = 7-9$ %: D_{50} песков составляет 65-68 мкм, D_{50} сливов - 16-17 мкм, острота разделения - 1,70-1,71, утечка мелочи в пески - 11,5-11,8 %, потеря крупной фракции в сливе - 6,6-6,8 %. Воспроизводимость выбранного режима подтверждена тремя независимыми опытами ($CV \leq 1,23$ %). Полученные результаты показывают эффективность гидроциклонной классификации для разделения техногенных хвостов по крупности и перераспределения меди между продуктами классификации. Сливной и песковый продукты могут рассматриваться как объекты для последующих исследований по гидрометаллургическому извлечению и флотационному дообогащению ценных компонентов соответственно.

References

- Antonijević M.M., Dimitrijević M.D., Stevanović Z.O., Serbula S.M., Bogdanovic G.D. (2008). Investigation of the Possibility of Copper Recovery from the Flotation Tailings by Acid Leaching. *Journal of Hazardous Materials*. – Vol. 158(1). – P. 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.063> (in Eng.).
- Baibatsha A., Bekbotayeva A., Turysbekova G., Bektai E., Omarova G. (2021). Geological and Mineralogical Study of Ore Tailings for Bio-Leaching. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. – Vol. 9(3). – P. 921-937. <https://doi.org/10.21533/pen.v9.i3.900> (in Eng.).
- Baibatsha A.A.B., Omarova G.M., Baibatchayeva Z.T. (2019). Tailings Are a Reliable Source of Mineral Reserves (Kazakhstan). *Conference of the Arabian Journal of Geosciences*. – Cham: Springer International Publishing. – P. 381-383. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72547-1_81 (in Eng.).
- Bakalarz A. (2019). Chemical and Mineral Analysis of Flotation Tailings from Stratiform Copper Ore from Lubin Concentrator Plant (SW Poland). *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. – Vol. 40(6). – P. 437-446. <https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1667778> (in Eng.).
- Bilal M., Park I., Horn V., Ito M., Hassan F.U., Jeon S., Hiroyoshi N. (2022). The Challenges and Prospects of Recovering Fine Copper Sulfides from Tailings Using Different Flotation Techniques: A Review. *Minerals*. – Vol. 12(5). – P. 586. <https://doi.org/10.3390/min12050586> (in Eng.).
- Dadzie R.A., Zanin M., Skinner W., Addai-Mensah J., Asamoah R., Abaka-Wood G.B. (2025).

Reprocessing of Sulphide Flotation Tailings for Copper Recovery: Characterisation. *Minerals*. – Vol. 15(6). – P. 649. <https://doi.org/10.3390/min15060649> (in Eng.).

Hann D. (2021). Copper Tailings Reprocessing. *Materials and Geoenvironment*. – Vol. 68. – P. 7-16. <https://doi.org/10.2478/rmzmag-2021-0002> (in Eng.).

Kursunoglu S. (2025). A Review on the Recovery of Critical Metals from Mine and Mineral Processing Tailings: Recent Advances. *Journal of Sustainable Metallurgy*. – Vol. 11(3). – P. 2023-2050. <https://doi.org/10.1007/s40831-025-01126-y> (in Eng.).

Mackay I., Mendez E., Molina I., Videla A.R., Cilliers J.J., Brito-Parada P.R. (2018). Dynamic Froth Stability of Copper Flotation Tailings. *Minerals Engineering*. – Vol. 124. – P. 103-107. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.005> (in Eng.).

Narasimha M., Mainza A.N., Mandakini P. (2025). A Classification Model Concept for Multi-Component Hydrocyclone Performance. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. – Vol. 134(4). – P. 203-219. <https://doi.org/10.1177/25726641251357075> (in Eng.).

Santander M., Valderrama L. (2019). Recovery of Pyrite from Copper Tailings by Flotation. *Journal of Materials Research and Technology*. – Vol. 8(5). – P. 4312-4317. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.07.041> (in Eng.).

Shevko V.M., Karataeva G.E., Serzhanov G.M., Badikova A.D., Abzhanova A.S. (2015). Complex Processing Tailings of the Balkhash Concentrating Factory. *Biosciences Biotechnology Research Asia*. – Vol. 12(3). – P. 2411-2419. <https://doi.org/10.13005/bbra/1918> (in Eng.).

Tyumentseva O., Kamunur K., Mussapyrova L., Batkal A., Beisembayeva L., Nadirov R. (2026). Microfluidic Pre-Concentration of Metals from Fine Flotation Tailings. *Minerals*. – Vol. 16(4). – P. 355. <https://doi.org/10.3390/min16040355> (in Eng.).

Wang X., Yang X., Ren R., Lu S., Tu Y. (2026). Performance Simulation and Optimization of a Novel Wing-Type Multi-Stage Hydrocyclone for Efficient Mineral Particle Separation. *Chemical Engineering Research and Design*. – Vol. 226. – P. 177-194 <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2025.12.044> (in Eng.).

Yang X., Liu Q., Zhou B., Li Z., Xing Y., Gui X. (2026). Research Prospects of Fine Particle Flotation Collision Theory: Integration and Transcendence of Energetics and Collision Mechanics Paradigms. *Minerals Engineering*. – Vol. 236. – P. 109928. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109928> (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*