

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%3Cp%3Ehttps://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

Редакция ұжымы:

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

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

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

ӘБИЕВ Руфат, техника ғылымдарының докторы (биохимия), профессор, Санкт-Петербург мемлекеттік технологиялық институты «Химиялық және биотехнологиялық аппаратураны оңтайландыру» кафедрасының меңгерушісі, (Санкт-Петербург, Ресей), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602431781>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

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

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

САНГ-СУ Квак, PhD (биохимия, агрохимия), профессор, Корея Биология және биотехнология ғылыми-зерттеу институты (KRIBB), өсімдіктердің инженерлік жүйелері ғылыми-зерттеу орталығының бас ғылыми қызметкері, (Дэчон, Корея), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

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

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

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

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

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

ЖҮСІПОВ Марат Абжанұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, теориялық және ядролық физика кафедрасының профессоры, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602166928>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/566>

КОВАЛЕВ Александр Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, Украина ҰҒА академигі, Қолданбалы математика және механика институты (Донецк, Украина), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/65533963>

ТАКИБАЕВ Нұрғали Жабағұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24077239000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1671760>

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

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

ӘБІЛМАҒЖАНОВ Арлан Зайнуталлайұлы, химия ғылымдарының кандидаты, Д.В. Сокольский атындағы "Отын, катализ және электрохимия институты" АҚ Бас директорының бірінші орынбасары, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197468109>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES

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

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

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

Тақырыптық бағыты: физика, химия.

Мерзімділігі: жылына 4 рет.

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

Главный редактор:

ЖУРИНОВ Мурат Журинович, доктор химических наук, профессор, академик МАН и НАН РК, Генеральный директор НИИ нефтепереработки и нефтехимии (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960%3Cbr>https://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., Айтурсев 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., Абилямажинова 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., 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., Абильмажинова 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 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., Тайкенова 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., Нажибкизы 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), 276-291

<https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.476>

UDC: 628.349:66.067.124

IRSTI: 31.15.37

©Kononov A.¹, Kamunur K.^{1,2}, Mussapyrova L.^{1,2}, Assylkhanova D.^{1,2},
Batkal A.^{1,2*}, 2026.

¹Institute of Combustion Problems, Almaty, Kazakhstan;

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

*E-mail: abatkalova@mail.ru

OBTAINING AND STUDYING THE INORGANIC FLOCCULANT Al–Fe–Mn BASED ON MODIFIED BENTONITE

Kononov Anton — PhD student, Researcher, Institute of Combustion Problems, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: konan_hitech@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7500-2340>;

Kamunur Kaster — PhD, Associate Professor, Senior Researcher, Institute of Combustion Problems;
Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: kamunur.k@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-0013-1926>;

Mussapyrova Lyazzat — PhD, Leading researcher, Institute of Combustion Problems; Al-Farabi Kazakh
National University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: lyazzat.mussapyrova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9881-1324>;

Assylkhanova Dana — PhD student, Junior researcher, Institute of Combustion Problems; Al-Farabi
Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: dana.asylkhanova16@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9108-3600>;

Batkal Aisulu — PhD student, Researcher, Institute of Combustion Problems; Al-Farabi Kazakh National
University, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: abatkalova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2271-6953>.

Abstract. Clarification and thickening of industrial slurries and wastewater containing mineral suspensions and heavy metal ions are complicated by the high aggregation stability of fine particles, high ionic strength, and reduced efficiency of organic polyelectrolytes in acidic and highly mineralized solutions. In this study, an inorganic composite flocculant based on bentonite from the Saryagash deposit modified with polynuclear Al–Fe–Mn hydroxo complexes was developed and investigated. Based on thermodynamic analysis, a pH–T diagram describing the evolution of Al–Fe–Mn species was constructed, revealing three characteristic regions: aqua complexes, polynuclear hydroxo species, and hydroxide phases. The optimal synthesis conditions were determined to be pH ≈ 7 and 45 °C, under which stable polynuclear aluminum–iron–manganese hydroxo complexes with high flocculation activity are formed. The structural characteristics of the synthesized samples were investigated by FTIR spectroscopy and

A(t) spectrophotometry. At pH 7, the formation of Al–O and Fe–O bonds and partial incorporation of Mn into the hydroxo structures were observed, accompanied by faster coagulation and the formation of dense flocs. Coagulation–flocculation properties were evaluated by jar tests using model suspensions and a model slurry containing pyrite, quartz, kaolinite, Cu^{2+} , and Fe^{2+} ions. The optimal flocculant dosage was 125 mg/L, providing up to 91% clarification efficiency. The flocculant maintained high efficiency ($E \geq 85\%$) at $\text{pH} \geq 4.0$, reducing the consumption of neutralizing reagents and improving process economics. The proposed composite flocculant can be recommended for treating industrial wastewater and hydrometallurgical slurries of various compositions.

Keywords: wastewater, industrial pulps, clarification, inorganic flocculant, modified bentonite, polynuclear hydroxocomplexes, pH–T diagram

Funding: This research was conducted as part of the targeted funding program for the project IRN BR28713557, titled “Development of integrated technologies for processing ilmenite sands, barite ores and metal-containing waste to improve resource efficiency in the mining, metallurgical and construction industries of Kazakhstan”.

For citations: Kononov A., Kamunur K., Mussapyrova L., Assylkhanova D., Batkal A. Obtaining and Studying the Inorganic Flocculant Al–Fe–Mn Based on Modified Bentonite. *Academic Journal of Physical and Chemical Sciences*. 2026. No.3. Pp. 276–291. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.476>

©Кононов А.¹, Қамұнұр Қ.^{1,2}, Мусапирова Л.^{1,2}, Асылханова Д.^{1,2},
Батқал А.^{1,2*}, 2026.

¹Жану проблемалары институты, Алматы, Қазақстан;

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

*E-mail: abatkalova@mail.ru

МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН БЕНТОНИТ НЕГІЗІНДЕГІ Al–Fe–Mn БЕЙОРГАНИКАЛЫҚ ФЛОКУЛЯНТЫН АЛУ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ

Кононов Антон — PhD студент, ғылыми қызметкер, Жану проблемалары институты, Алматы, Қазақстан,

E-mail: konan_hitech@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7500-2340>;

Қамұнұр Қастер — PhD, қауымдастырылған профессор, жетекші ғылыми қызметкер, Жану проблемалары институты; Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: kamunur.k@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-0013-1926>;

Мусапирова Ляззат — PhD, жетекші ғылыми қызметкер, Жану проблемалары институты; Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: lyazzat.mussapyrova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9881-1324>;

Асылханова Дана — PhD студент, кіші ғылыми қызметкер, Жану проблемалары институты, Алматы, Қазақстан; Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: dana.asylkhanova16@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9108-3600>;

Батқал Айсұлу — PhD студент, ғылыми қызметкер, Жану проблемалары институты; Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: abatkalova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2271-6953>.

Аннотация. Құрамында аспалы минералдар мен ауыр металл иондары бар өнеркәсіптік целлюлозалар мен ағынды сулардың мөлдірленуі және қоюлануы ұсақ дисперсті бөлшектердің жоғары агрегативті тұрақтылығымен, ортаның айтарлықтай иондық беріктігімен және қышқылды және жоғары минералданған ерітінділердегі органикалық полиэлектролиттердің тиімділігінің төмендеуімен қиындайды. Бұл зерттеуде полиадролық Al-Fe-Mn гидроксо кешендерімен модификацияланған Сарыағаш кен орнынан алынған бентонит негізіндегі бейорганикалық композиттік флокулянт жасалды және зерттелді. Термодинамикалық талдауды қолдана отырып, Al-Fe-Mn кешендерінің тіршілік ету формаларының эволюциясының рН-Т диаграммасы құрылды, бұл үш сипаттамалық аймақты анықтауға мүмкіндік берді: су кешендер, полиадролық гидроксо формалары және гидроксид фазалары. Оңтайлы синтез жағдайлары $\text{pH} \approx 7$ және 45°C температура болып табылды, бұл жоғары флокуляциялық белсенділігі бар тұрақты полиадролық алюминий-темір-марганец гидроксо кешендерінің пайда болуына әкелді. Синтезделген үлгілердің құрылымдық ерекшеліктері ИҚ спектроскопия және A(t) спектрофотометриясын қолдана отырып зерттелді. рН 7 кезінде Al-O және Fe-O байланыстарының түзілуі, сондай-ақ Mn гидроксо формаларының құрылымына ішінара қосылуы байқалғаны, бұл коагуляция жылдамдығының және тығыз флокуляның түзілу тиімділігінің артуымен қатар жүретіні көрсетілді. Коагуляция-флокуляция қасиеттері модельдік суспензияларда және пирит, кварц, каолинит, сондай-ақ Cu^{2+} және Fe^{2+} иондары бар модельдік целлюлозада банка-тест әдісін қолдана отырып бағаланды. Оңтайлы флокулянт дозасы 125 мг/л болып табылды, бұл 91%-ға дейін тазарту әсеріне қол жеткізді. Флокулянт $\text{pH} \geq 4,0$ кезінде жоғары тиімділікті ($E \geq 85\%$) сақтайды, бейтараптандыратын реагенттердің шығынын азайтады және тазарту процесінің тиімділігін арттырады. Ұсынылған композиттік флокулянтты өнеркәсіптік ағынды суларды және әртүрлі құрамдағы гидрометаллургиялық шламдарды тазарту үшін ұсынуға болады.

Түйін сөздер: ағынды сулар, өнеркәсіптік целлюлозалар, тазарту, бейорганикалық флокулянт, модификацияланған бентонит, полинуклеарлы гидроксокомплекс, рН-Т диаграммасы

©Кононов А.¹, Қамүнұр Қ.^{1,2}, Мусапирова Л.^{1,2}, Асылханова Д.^{1,2},
Батқал А.^{1,2*}, 2026.

¹Институт проблем горения, Алматы, Казахстан;

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

*E-mail: abatkalova@mail.ru

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОРГАНИЧЕСКОГО ФЛОКУЛЯНТА Al-Fe-Mn НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕНТОНИТА

Кононов Антон — PhD студент, научный сотрудник, Институт проблем горения, Алматы, Казахстан,
E-mail: konan_hitech@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7500-2340>;

Қамүнұр Қастер — PhD, ассоциированный профессор, ведущий научный сотрудник, Институт



проблем горения; Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,
E-mail: kamunur.k@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-0013-1926>;

Мусапирова Ляззат — PhD, ведущий научный сотрудник, Институт проблем горения; Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

E-mail: lyazzat.mussapyrova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9881-1324>;

Асылханова Дана — PhD студент, младший научный сотрудник, Институт проблем горения; Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

E-mail: dana.asylkhanova16@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9108-3600>;

Баткал Айсулу — PhD студент, научный сотрудник, Институт проблем горения; Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

E-mail: abatkalova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2271-6953>.

Аннотация. Осветление и сгущение промышленных пульп и сточных вод, содержащих минеральные взвеси и ионы тяжёлых металлов, осложняется высокой агрегативной устойчивостью тонкодисперсных частиц, значительной ионной силой среды и снижением эффективности органических полиэлектролитов в кислых и высокоминерализованных растворах. В данной работе разработан и исследован неорганический композиционный флокулянт на основе бентонита Сарыагашского месторождения, модифицированного полиядерными гидроксокомплексами Al–Fe–Mn. На основе термодинамического анализа построена pH–T-диаграмма эволюции форм существования комплексов Al–Fe–Mn, позволившая выделить три характерные области: аквакомплексов, полиядерных гидроксоформ и гидроксидных фаз. Установлено, что оптимальные условия синтеза соответствуют $\text{pH} \approx 7$ и температуре 45°C , при которых формируются устойчивые полиядерные алюможелезо-марганцевые гидроксокомплексы с высокой флокуляционной активностью. Структурные особенности синтезированных образцов исследованы методами ИК-спектроскопии и спектрофотометрии A(t). Показано, что при pH 7 наблюдается образование связей Al–O и Fe–O, а также частичное включение Mn в структуру гидроксоформ, что сопровождается увеличением скорости коагуляции и эффективностью образования плотных флокул. Коагуляционно-флокуляционные свойства оценивали методом jar-test на модельных суспензиях и модельной пульпе, содержащей пирит, кварц, каолинит и ионы Cu^{2+} и Fe^{2+} . Установлено, что оптимальная доза флокулянта составляет 125 мг/л, при которой достигается эффект осветления до 91 %. Флокулянт сохраняет высокую эффективность ($E \geq 85\%$) при $\text{pH} \geq 4,0$, что позволяет снизить расход нейтрализующих реагентов и повысить экономичность процесса очистки. Предложенный композиционный флокулянт может быть рекомендован для очистки промышленных сточных вод и гидрометаллургических пульп различного состава.

Ключевые слова: сточные воды, промышленные пульпы, осветление, неорганический флокулянт, модифицированный бентонит, полиядерные гидроксокомплексы, pH–T-диаграмма

Введение. Современные процессы очистки сточных вод и технологических пульп, содержащих минеральные взвеси и ионы тяжёлых металлов, требуют эффективных флокулянтов с устойчивыми коагуляционно-адсорбционными свойствами (Moud et al., 2022). Подобные дисперсные системы образуются в

горно-металлургической, химической и энергетической отраслях - это хвостовые и осветляемые пульпы гидрометаллургических переделов, золошлаковые и металлургические стоки, кислые продуктивные и оборотные растворы. Их объединяет агрегативная устойчивость тонкодисперсной фазы, обусловленная отрицательным зарядом поверхности частиц, высокой ионной силой раствора и наличием коллоидной глинистой фракции, что препятствует самопроизвольному осаждению и затрудняет последующее обезвоживание и возврат воды (Jiang et al., 2021; Grenda et al., 2020; Manono et al., 2024).

Традиционно применяемые органические полиэлектролиты (например, полиакриламид) обеспечивают высокую эффективность при низкой минерализации, но чувствительны к pH, температуре и присутствию электролитов, а также могут вызывать вторичное загрязнение среды продуктами разложения (Guo et al., 2023; Sređić et al., 2020; Bahmani-Ghaedi et al., 2022). В этой связи перспективным направлением является разработка неорганических флокулянтов, основанных на сочетании алюмосиликатных матриц и полиядерных гидроксокомплексов металлов, обладающих повышенной термо- и структурной стабильностью.

Алюмосиликатные материалы (бентонит, цеолит, каолинит и др.) характеризуются развитой поверхностью, отрицательным зарядом и высокой ионообменной ёмкостью, что приводит к повышению адсорбции катионов и устойчивости во всём диапазоне pH (Milani et al., 2024; Abdullahi et al., 2024). Модификация таких матриц гидроксокомплексами Al, Fe и Mn создаёт дополнительно положительно заряженные активные центры, повышает плотность поверхностных связей Me–O–Si и обеспечивает мостиковый механизм флокуляции. В отличие от органических аналогов, подобные системы сохраняют активность при высокой ионной силе раствора, не подвержены биodeградации и могут производиться из местных минеральных ресурсов (Demos et al., 2025; Rahreima et al., 2026; Ebsa et al., 2023).

Наиболее распространёнными промышленными коагулянтами являются полиалюминиевые и алюможелезистые комплексы, обеспечивающие быстрое осветление, но нестабильные при хранении и изменении кислотности (Li et al., 2024; Kong et al., 2022). Эффективность указанных комплексов снижается в присутствии кремнезёма и зольных частиц. Введение алюмосиликатной основы позволяет стабилизировать гидроксокомплексы и расширить диапазон активности, однако составы таких гибридных систем пока не стандартизированы, а механизмы их действия изучены недостаточно (Zhang et al., 2023).

Цель настоящей работы заключалась в разработке и оптимизации неорганического флокулянта на основе модифицированных алюмосиликатов и полиядерных гидроксокомплексов металлов, обеспечивающего стабильную структуру и высокую эффективность осветления, с последующей проверкой его эффективности на модельной пульпе.

Материалы и методы. Синтез флокулянта: Синтез неорганического флокулянта проводили на основе алюмосиликатной матрицы - природного бентонита Сарыагашского месторождения (Туркестанская область), содержащего не менее

70 % монтмориллонита. Бентонит предварительно промывали дистиллированной водой, высушивали при 105 °С и измельчали в планетарной шаровой мельнице Pulverisette 6 (Fritsch, Германия) до порошкообразного состояния с размером частиц менее 63 мкм. Модификацию проводили водными растворами солей алюминия, железа и марганца (хлориды и сульфаты) при варьировании мольных соотношений $\text{Al:Fe:Mn} = 2:1:1$, $3:1:1$ и $4:1:1$. Растворы солей готовили при постоянном перемешивании, после чего вводили в суспензию бентонита ($\text{T:Ж} = 1:20$). Для регулирования pH использовали 0,5 М раствор NaOH. После достижения заданного значения pH систему перемешивали в течение одного часа, затем суспензии охлаждали, фильтровали, промывали дистиллированной водой до нейтрального pH и сушили при 60 °С.

Исследование структуры и активности: Параллельно с синтезом осуществляли контроль протекающих процессов и состава образующихся систем. Спектрофотометрические измерения мутности $A(t)$ при длине волны $\lambda = 750$ нм выполняли для фиксации момента начала образования коллоидных частиц и оценки устойчивости раствора во времени; по начальному наклону зависимости $1/A$ от времени оценивали относительную скорость коагуляции. ИК-спектры регистрировали на ИК-Фурье-спектрометре (Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany) в диапазоне $4000\text{--}400$ см^{-1} применяли для идентификации функциональных групп и связей металлов с гидроксильными и оксидными лигандами, а также для оценки степени полимеризации гидроксоформ. Коагуляционно-флокуляционную активность определяли методом пробной флокуляции (jar-test), включавшим три стадии: быстрое перемешивание (0–2 мин), медленное перемешивание (2–15 мин) и последующее отстаивание (15–30 мин).

Модельные системы: На этапе разработки активность синтезированных образцов оценивали на модельных суспензиях, имитирующих реальные стоки. В качестве дисперсной фазы использовали пульпу золотшлака с исходной мутностью 0,8–1,0 ед. ($\lambda = 750$ нм) при дозе флокулянта 100 мг/л. Для детальной оптимизации условий применения использовали модельную пульпу, воспроизводящую характеристики кислых сульфатных минералсодержащих пульп и стоков (сульфидно-силикатно-глинистая взвесь в сернокислой среде с ионами тяжёлых металлов). Состав модельной пульпы приведён в таблице 1.

Таблица 1. Компонентный состав модельной пульпы.

Компонент	Концентрация / содержание	Роль в системе
FeS_2 (пирит)	15 % масс.	Основной носитель тонкодисперсной взвеси; отрицательный ζ -потенциал
SiO_2 (кварц, <63 мкм)	10 % масс.	Инертная минеральная фракция; плохо оседает самостоятельно
Каолинит $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	5 % масс.	Коллоидная глинистая фракция; стабилизирует суспензию
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1,2 г/л (Cu^{2+})	Модельный ион тяжёлого металла
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,8 г/л (Fe^{2+})	Повышает ионную силу раствора

Компонент	Концентрация / содержание	Роль в системе
H ₂ SO ₄ (разб.)	pH 2,5–3,0	Рабочая кислотность среды
T : Ж	1 : 10 (базовый)	Типовое для хвостовых пульп

Твёрдую фазу готовили смешением тонкоизмельчённых порошков пирита FeS₂ (≤ 74 мкм), кварца SiO₂ (≤ 63 мкм) и каолинита (≤ 20 мкм) в массовом соотношении 3:2:1 в шаровой мельнице в течение 30 минут. Жидкую фазу готовили растворением CuSO₄·5H₂O (1,2 г/л) и FeSO₄·7H₂O (0,8 г/л) в дистиллированной воде; подкисление до заданного pH проводили покапельным добавлением 10 %-го раствора H₂SO₄ при контроле pH-метром. Пульпу получали введением твёрдой фазы в жидкую при T:Ж = 1:10 и гомогенизацией в течение 10 минут при 300 об/мин. Исходную мутность A₀ измеряли при $\lambda = 750$ нм; базовое значение составляло A₀ = 0,90–0,95 ед. Для серии по влиянию мутности соотношение T:Ж варьировали от 1:20 до 1:5, что давало A₀ в диапазоне 0,50–1,90 ед. Протокол испытаний приведён в таблице 2.

Таблица 2. Протокол испытаний флокулянта (jar-test).

Стадия	Режим перемешивания	Продолжительность
Быстрое перемешивание	200 об/мин	2 мин
Медленное перемешивание	40 об/мин	13 мин
Отстаивание	—	30 мин
Измерение A(t)	$\lambda = 750$ нм, каждые 2 мин	в течение всего опыта

Расчёт эффективности и матрица опытов: Эффект осветления рассчитывали по формуле $E = (A_0 - A_{30}) / A_0 \times 100 \%$, где A₀ - исходная оптическая плотность, A₃₀ - оптическая плотность надосадочной жидкости после 30 минут отстаивания. Оптимизацию условий применения на модельной пульпе проводили в трёх сериях: серия I (влияние дозы): доза 50–200 мг/л, pH 5,5, A₀ $\approx$ 0,92; серия II (влияние pH): pH 2,0–7,0, доза 125 мг/л, A₀ $\approx$ 0,91; серия III (влияние мутности): A₀ = 0,50–1,90 ед., pH 5,5, доза, оптимизированная по A₀.

Результаты и обсуждение. Термодинамический анализ форм существования комплексов Al–Fe–Mn: Для установления условий, благоприятных для образования активных центров флокулянта, была построена pH–T-диаграмма, визуализирующая теоретическую эволюцию форм существования комплексных частиц Al–Fe–Mn при изменении кислотности и температуры. Построение было основано на литературных данных о константах гидролиза, равновесиях образования полиядерных гидроксокомплексов и термодинамических переходах растворённых, коллоидных и твёрдых гидроксидных фаз (Giacobello et al., 2022; Furcas et al., 2024; Miranda et al., 2020). По оси абсцисс откладывали pH (4–10), по оси ординат - температуру (25–60 °C); диаграмма реализована в виде контурной pH–T-карты с тремя областями (рисунок 1).

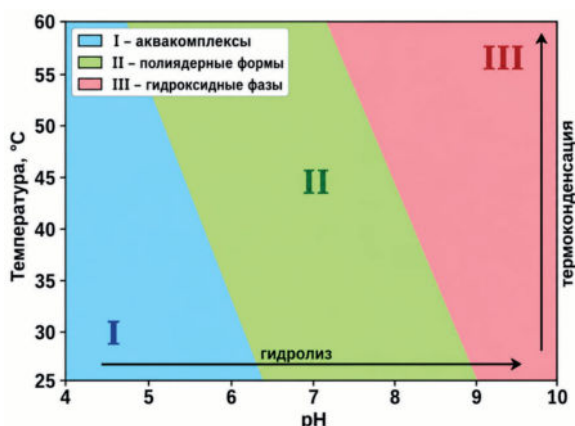


Рисунок 1. pH-T-диаграмма эволюции форм существования комплексных частиц в системе Al-Fe-Mn.

На основании анализа диаграммы выделены три характерные зоны. В первой зоне (I; $\text{pH} < 5$, $T < 30^\circ\text{C}$) преобладают аквакомплексы $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$, $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ и малые димеры, которым соответствует растворённое состояние с минимальной коагуляционной способностью. Вторая зона (II; $\text{pH} \approx 6-8$, $T \approx 40-50^\circ\text{C}$) отвечает формированию полиядерных гидроксокомплексов типа $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}^{7+}$ и смешанных алюможелезистых кластеров, устойчивых в коллоидной фазе и проявляющих высокую флокуляционную активность. В третьей зоне (III; $\text{pH} > 9$, $T > 55^\circ\text{C}$) образуются гидроксидные и оксигидроксидные фазы $\text{AlO}(\text{OH})$, $\text{FeO}(\text{OH})$, $\text{MnO}(\text{OH})$. На основе этого анализа были выбраны три режима синтеза: I - $\text{pH} 4$, 25°C (слабый гидролиз); II - $\text{pH} 7$, 45°C (полиядерные гидроксокомплексы); III - $\text{pH} 10$, 60°C (твёрдые гидроксидные фазы).

ИК - характеристика флокулянта: Для выявления закономерностей формирования структурных фрагментов флокулянта при изменении кислотности и температуры проведено исследование ИК-спектров образцов, синтезированных в режимах $\text{pH} 4$ и $\text{pH} 7$. ИК-спектр образца I ($\text{pH} 4$, 25°C) характеризуется широкими полосами поглощения в областях около 3400 и 1630 см^{-1} , соответствующих колебаниям $\text{O}-\text{H}$ и $\text{H}-\text{O}-\text{H}$ групп воды, и слабыми размытыми сигналами ниже 900 см^{-1} (рисунок 2). Это указывает на преобладание мономерных аквакомплексов $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ и $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ при незначительном участии гидроксоформ; в кислой среде система остаётся преимущественно растворённой, а коагуляционная способность минимальна.

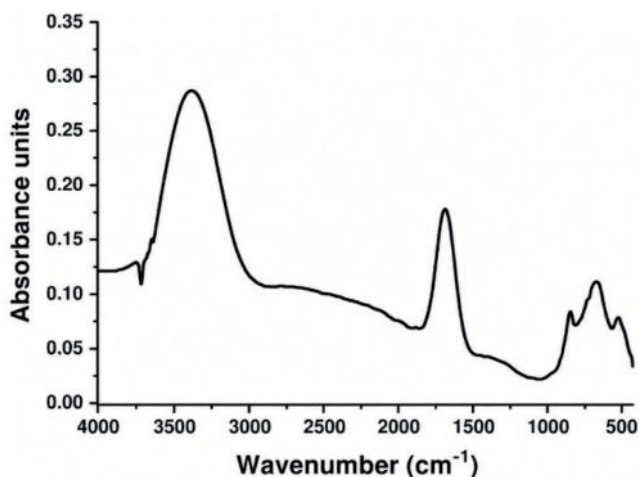


Рисунок 2. ИК-спектр флокулянта, синтезированного при pH 4.

В образце II (pH 7, 45 °C) наблюдается существенное изменение спектральной картины (рисунок 3): появляются выраженные полосы при 1070, 750 и 480–500 cm^{-1} , характерные для колебаний связей Al–O и Fe–O в структурах $\text{AlO}(\text{OH})$ и $\text{FeO}(\text{OH})$. Кроме того, проявляются слабые сигналы в областях 1360 и 870 cm^{-1} , соответствующие колебаниям C–O групп, что указывает на образование слоистых двойных гидроксидов (LDH) и частичное включение Mn в матрицу. Эти изменения отражают формирование полиядерных алюможелезистых гидроксокомплексов и сопровождаются повышением флокуляционной активности.

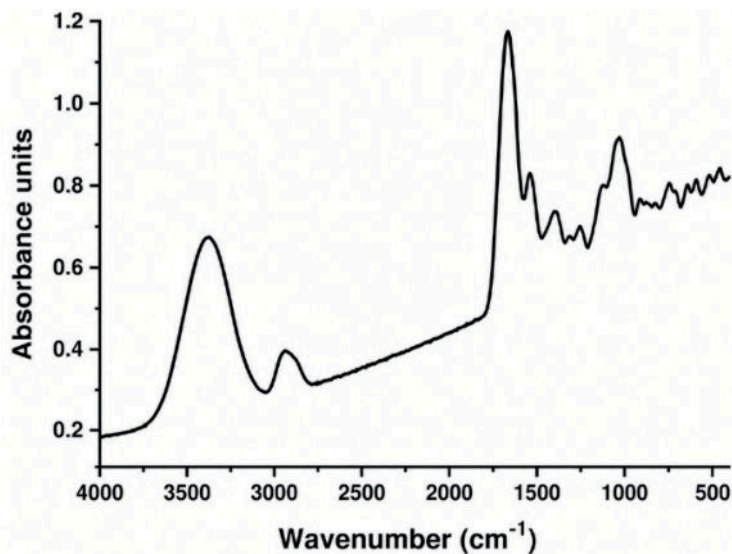


Рисунок 3. ИК-спектр флокулянта, синтезированного при pH 7.

Коагуляционно-флокуляционная активность синтезированных систем: Собственную устойчивость и коагуляционную активность синтезированных систем оценивали спектрофотометрически по изменению оптической плотности чистых растворов флокулянта во времени (без посторонних дисперсных частиц). Такой подход позволяет определить внутренние характеристики коллоидной системы - зарядовую стабильность и склонность к самоагрегации - и выбрать оптимальные условия синтеза. На рисунке 4 приведены кривые $A(t)$ для образцов, полученных при pH 4, 7 и 10.

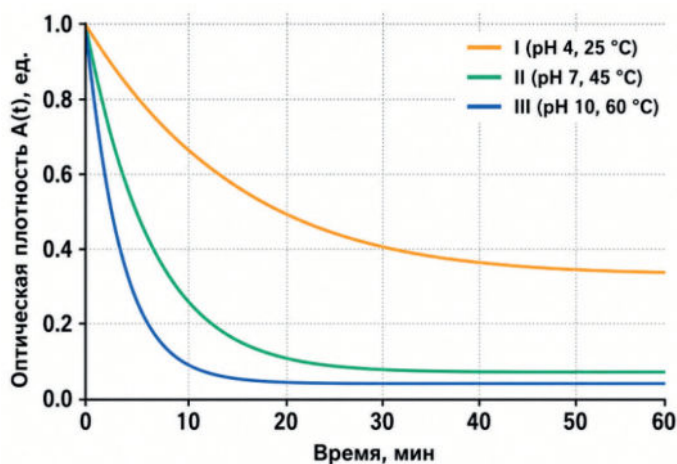


Рисунок 4. Изменение оптической плотности $A(t)$ растворов флокулянта при различных условиях синтеза (pH 4, 7, 10; $\lambda = 750$ нм).

Для образца I (pH 4, 25 °C) оптическая плотность снижается медленно и выходит на высокое плато ($\approx 0,35$), что соответствует устойчивому золю и слабой склонности к коагуляции. Для образца II (pH 7, 45 °C) наблюдается более быстрый спад $A(t)$ до 0,07–0,10, указывающий на активное образование флокул и эффективное осветление. Для образца III (pH 10, 60 °C) спад $A(t)$ максимально резкий — значение снижается до $\approx 0,05$ за несколько минут, что соответствует механизму осаждения увлечением, когда примеси захватываются в растущую гидроксидную матрицу. Для количественной оценки скорости коагуляции построены зависимости $1/A$ от времени (рисунок 5).

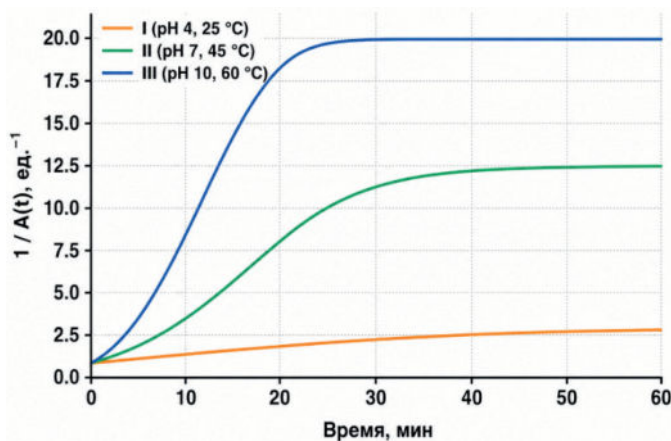


Рисунок 5. Зависимость $1/A$ от времени для оценки скорости коагуляции флокулянтов, синтезированных при различных условиях.

Начальный наклон кривых отражает кажущуюся константу скорости агрегации частиц: чем больше наклон, тем выше скорость. Наибольшие значения наблюдаются для образца III, промежуточные - для II, минимальные - для I, что соответствует последовательному возрастанию активности с ростом pH и температуры. Согласно визуальным наблюдениям, в кислой среде (pH 4) раствор остаётся прозрачным; при pH 7 формируется равномерно мутный золь, устойчивый в течение нескольких часов и состоящий из полиядерных алюможелезо-марганцевых гидроксоформ; при pH 10 образуется интенсивно оседающая суспензия с плотным осадком. Несмотря на максимальную скорость осаждения при pH 10, именно при $\text{pH} \approx 7$ достигается оптимальный баланс между устойчивостью и активностью: формируются устойчивые полиядерные комплексы, сохраняющие коллоидное состояние, но эффективно связывающие отрицательно заряженные частицы примесей. Таким образом, оптимальными условиями синтеза являются $\text{pH} \approx 7$ и $T = 45^\circ\text{C}$.

Испытания на модельных системах: Практическую эффективность синтезированных флокулянтов проверяли на модельных суспензиях, имитирующих реальные стоки (золошлаковые и металлургические частицы, исходная мутность 0,8–1,0 ед., доза 100 мг/л). На кривых $A(t)$ (рисунок 6) отчётливо наблюдается различие в скорости осветления: для флокулянта, синтезированного при pH 4, эффект выражен слабо, надосадочная жидкость остаётся мутной; при pH 7 происходит быстрое осветление и формирование плотных осадков; при pH 10 наблюдается мгновенное выпадение флокул, однако осадок остаётся рыхлым и удерживает часть примесей. Эти результаты подтверждают, что флокулянт, полученный при $\text{pH} \approx 7$ и $T = 45^\circ\text{C}$, проявляет наилучшие коагуляционно-флокуляционные свойства.

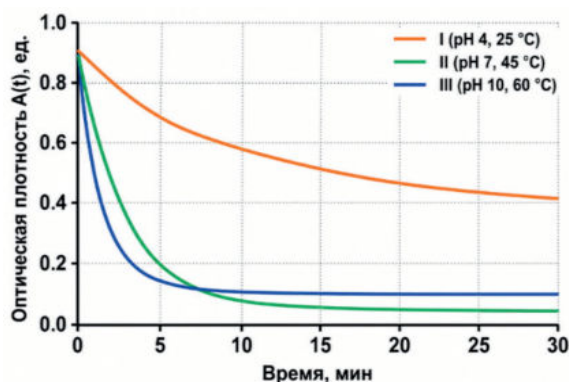


Рисунок 6. Изменение оптической плотности $A(t)$ модельных суспензий при различных условиях синтеза флокулянта ($\lambda = 750$ нм, jar-test).

Дальнейшую детальную оптимизацию условий применения проводили на модельной пульпе. Влияние дозы флокулянта изучали при pH 5,5 и $A_0 = 0,92$ ед. (таблица 3, рисунок 7).

Таблица 3. Влияние дозы флокулянта на осветление модельной пульпы (pH 5,5; $A_0 = 0,92$).

Доза, мг/л	A_0	A_{30}	Эффект, %
50	0,92	0,41	55
75	0,92	0,22	76
100	0,92	0,11	88
125	0,92	0,08	91
150	0,92	0,09	90
200	0,92	0,14	85

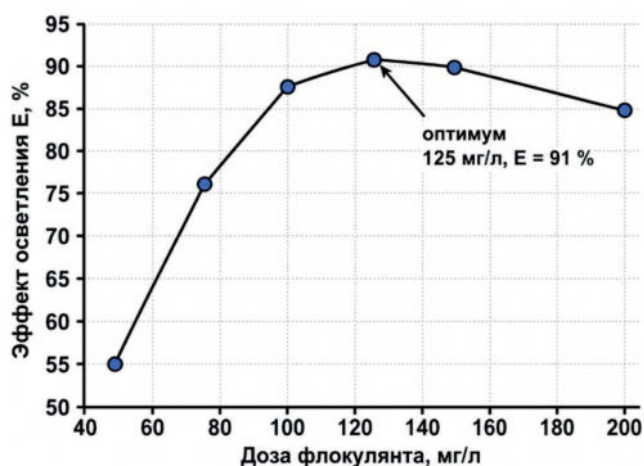


Рисунок 7. Зависимость эффекта осветления модельной пульпы от дозы флокулянта (pH 5,5; $A_0 = 0,92$).

Выраженный оптимум достигается при дозе 125 мг/л ($E = 91\%$). При дозе 50 мг/л хлопья образуются медленно и рыхло — активных центров недостаточно для мостикового связывания частиц. При дозах 150–200 мг/л наблюдается рестабилизация: избыточный флокулянт перезаряжает поверхность частиц, и эффект снижается до 85 %. Существенно, что уже при 125 мг/л формируется плотный, легко декантируемый осадок.

Влияние кислотности изучали при фиксированной дозе 125 мг/л (таблица 4, рисунок 8).

Таблица 4. Влияние pH среды на флокуляционную активность (доза 125 мг/л; $A_0 = 0,91$).

pH	A_0	A_{30}	Эффект, %
2,0	0,91	0,52	43
2,5	0,91	0,38	58
3,0	0,91	0,24	74
4,0	0,91	0,14	85
5,5	0,91	0,09	90
7,0	0,91	0,07	92

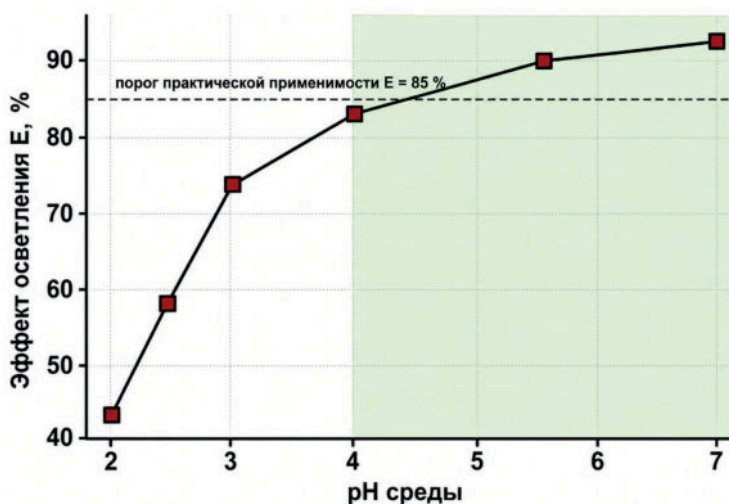


Рисунок 8. Зависимость эффекта осветления модельной пульпы от pH среды (доза 125 мг/л; $A_0 = 0,91$).

Флокулянт сохраняет активность $E \geq 85\%$ при $pH \geq 4,0$. При pH 2,0–2,5 полиадерные гидроксокомплексы частично разрушаются до мономерных аквакомплексов, не способных к мостиковому связыванию, что обуславливает низкий эффект (43–58 %). С практической точки зрения это означает, что нейтрализация среды лишь до pH 4,0–5,0 (вместо традиционного pH 7,0–8,0) уже обеспечивает $E \geq 85\%$, существенно снижая расход нейтрализующих реагентов.

Исследование влияния исходной мутности (таблица 5) показало стабильно высокий эффект осветления (89–91 %) в диапазоне $A_0 = 0,50$ –1,40 ед.; при $A_0 = 1,90$

ед. эффективность снижается до 85 % — граница практической применимости. Линейная зависимость оптимальной дозы от мутности позволяет применять простое правило масштабирования: доза (мг/л) $\approx 135 \times A_0$.

Таблица 5. Влияние исходной мутности на эффективность флокуляции (рН 5,5).

A_0 (исх. мутность)	Т:Ж	Доза, мг/л	A_{30}	Эффект, %
0,50	1:20	75	0,05	90
0,90	1:10	125	0,08	91
1,40	1:7	175	0,15	89
1,90	1:5	225	0,28	85

Таблица 6. Оптимальные условия применения флокулянта.

Параметр	Оптимальное значение	Допустимый диапазон
Доза флокулянта	125 мг/л	100–150 мг/л
рН перед введением флокулянта	5,5–7,0	4,0–7,0
Исходная мутность A_0 ($\lambda = 750$ нм)	$\leq 1,4$ ед.	до 1,9 ед.
Быстрое перемешивание	200 об/мин, 2 мин	150–250 об/мин
Медленное перемешивание	40 об/мин, 13 мин	30–60 об/мин
Время отстаивания	30 мин	20–45 мин
Эффект осветления E	≥ 90 %	85–92 %

Механизм флокуляции: Наблюдаемые закономерности объясняются коллоидно-химическим поведением системы. В кислой среде частицы минеральной взвеси несут отрицательный заряд поверхности; одноимённо заряженные частицы взаимно отталкиваются и в соответствии с теорией ДЛФО разделены энергетическим барьером, препятствующим их сближению и слипанию. Эффективность композиционного флокулянта обусловлена одновременным действием нескольких механизмов. Полиядерные гидроксокомплексы Al, Fe и Mn — прежде всего катион Кеггина $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$ - несут высокий положительный заряд и, адсорбируясь на отрицательно заряженных частицах, снижают ζ -потенциал и устраняют электростатический барьер. Крупная частица модифицированного бентонита, обладающая множеством активных центров, одновременно закрепляется на нескольких частицах, объединяя их в плотные хлопья по механизму мостиковой флокуляции. Комплексы железа и марганца образуют прочные координационные связи с окисленными участками поверхности минеральных частиц, усиливая закрепление флокулянта. В области рН 5,5–7,0 к этим механизмам добавляется осаждение увлечением; иными словами, образующиеся гидроксиды $Al(OH)_3$ и $Fe(OH)_3$ выпадают объёмными хлопьями и захватывают частицы при их осаждении.

Дозовая зависимость отражает баланс этих механизмов. При недостатке флокулянта заряд нейтрализуется лишь частично, хлопья получаются рыхлыми; при оптимальной дозе (100–125 мг/л) заряд скомпенсирован, а свободных активных центров достаточно для построения межчастичных мостиков; при избытке развивается рестабилизация - перезарядка поверхности и исчерпание свободных центров. рН-зависимость определяется устойчивостью полиядерных

форм: в сильноокислой среде они разрушаются до малоактивных мономеров, тогда как при $\text{pH} \geq 4$ стабилизируются, тем самым обеспечивается высокая эффективность процесса флокуляции.

Закключение. Разработан состав неорганического флокулянта на основе бентонита Сарыагашского месторождения, модифицированного полиядерными гидроксокомплексами Al-Fe-Mn , предназначенного для осветления промышленных пульп и сточных вод, содержащих минеральные взвеси и ионы тяжёлых металлов.

Построенная pH-T -диаграмма показала, что оптимальные условия формирования активных полиядерных гидроксоформ соответствуют $\text{pH} \approx 7$ и температуре 45°C . ИК-спектроскопические исследования подтвердили образование связей Al-O и Fe-O , а также частичное включение Mn в структуру флокулянта. Спектрофотометрический анализ показал повышение скорости коагуляции и эффективности флокуляции при данных условиях синтеза.

Испытания на модельных суспензиях и модельной пульпе подтвердили высокую эффективность разработанного флокулянта. Оптимальная доза составила 125 мг/л ($E = 91\%$) при рабочем диапазоне $100\text{--}150 \text{ мг/л}$; при превышении дозировки наблюдалась рестабилизация суспензии.

Установлено, что флокулянт сохраняет эффективность $E \geq 85\%$ при $\text{pH} \geq 4,0$, что позволяет отказаться от полной нейтрализации среды и снизить расход реагентов на $30\text{--}40\%$. Предложено правило масштабирования дозы: доза $\approx 135 \times A_0$, пригодное вплоть до $A_0 = 1,4$ ед.

References

- Abdullahi S. S. A., Mohammad R. E. A., Jagaba A. H., Musa H., Birniwa A. H. (2024). Natural, synthetic, and composite materials for industrial effluents treatment: a mini review on current practices, cost-effectiveness, and sustainability. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. – Vol. 9. – P. 100570. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2023.100570> (in Eng.).
- Bahmani-Ghaedi A., Hassanzadeh A., Sam A., Entezari-Zarandi A. (2022). The effect of residual flocculants in the circulating water on dewatering of Gol-e-Gohar iron ore. *Minerals Engineering*. – Vol. 179. – P. 107440. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107440> (in Eng.).
- Demoz A. (2025). Perspectives on development of nanofibrillated cellulose for mine waste tailings management. *Discover Applied Sciences*. – Vol. 7(11). – P. 1231. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07482-4> (in Eng.).
- Ebsa D. G. (2023). Defluoridation of drinking water by modified natural zeolite with Cationic surfactant, in the case of Ziway town, Ethiopia. *Cleaner Engineering and Technology*. – Vol. 12. – P. 100596. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100596> (in Eng.).
- Furcas F. E., Mundra S., Lothenbach B., Angst U. M. (2024). Speciation controls the kinetics of iron hydroxide precipitation and transformation at alkaline pH. *Environmental Science & Technology*. – Vol. 58(44). – P. 19851-19860. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c06818> (in Eng.).
- Giacobello F., Mollica-Nardo V., Foti C., Ponterio R. C., Saija F., Trusso S., Giuffrè O. (2022). Hydrolysis of Al^{3+} in aqueous solutions: experiments and ab initio simulations. *Liquids*. – Vol. 2(1). – P. 26-38. <https://doi.org/10.3390/liquids2010003> (in Eng.).
- Grenda K., Gamelas J. A., Arnold J., Cayre O. J., Rasteiro M. G. (2020). Evaluation of anionic and cationic pulp-based flocculants with diverse lignin contents for application in effluent treatment from the textile industry: flocculation monitoring. *Frontiers in chemistry*. – Vol. 8. – P. 5. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00005> (in Eng.).

Guo B., Zhan X., Jiang K., Xie H., Deng R. (2023). Flocculation behavior of ultrafine silica particles in acid leaching pulp by nonionic polymeric flocculants. *Minerals*. – Vol. 13(4). – P. 582. <https://doi.org/10.3390/min13040582> (in Eng.).

Jiang X., Li Y., Tang X., Jiang J., He Q., Xiong Z., Zheng H. (2021). Biopolymer-based flocculants: a review of recent technologies. *Environmental Science and Pollution Research*. – Vol. 28(34). – P. 46934-46963. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15299-y> (in Eng.).

Kong D., Zhou Z., Song S., Feng S., Lian M., Jiang R. (2022). Preparation of poly aluminum-ferric chloride (PAFC) coagulant by extracting aluminum and iron ions from high iron content coal gangue. *Materials*. – Vol. 15(6). – P. 2253. <https://doi.org/10.3390/ma15062253> (in Eng.).

Li W., Zhang P., Zhu X. (2024). Preparation and Application of Polyaluminum Ferric Sulfate from Red Mud: behaviors of leaching, polymerizing, and coagulation. *ACS Omega*. – Vol. 9(2). – P. 2468-2479. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07013> (in Eng.).

Manono M. S., Khan S. F., October L. L., Corin K. C. (2024). The effect of residual coagulants and flocculants in process water on the flotation performance of a selected Cu-Ni-PGM ore. *Minerals Engineering*. – Vol. 216. – P. 108850. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108850> (in Eng.).

Milani H. S., Rahmaninia M. (2024). Improved drainage of LNFC-reinforced recycled pulp and mechanical properties of end papers by the zeolite-chitosan microparticle drainage aid system. *BioResources*. – Vol. 19(1). – P. 84-102. <https://doi.org/10.15376/biores.19.1.84-102> (in Eng.).

Miranda R., Latour I., Blanco A. (2020). Understanding the efficiency of aluminum coagulants used in dissolved air flotation (DAF). *Frontiers in Chemistry*. – Vol. 8. – P. 27. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00027> (in Eng.).

Moud A. A. (2022). Polymer based flocculants: Review of water purification applications. *Journal of Water Process Engineering*. – Vol. 48. – P. 102938. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102938> (in Eng.).

Rahpeima S., Honarvar M., Khorasgani F. C. (2026). Removal of saponins from sugar factory wastewater using aluminum sulfate, ferric chloride, and natural zeolite coagulants. *International Journal of Energy and Water Resources*. – Vol. 10(1). – P. 14. <https://doi.org/10.1007/s42108-025-00444-x> (in Eng.).

Sredić S., Tankosić L., Tančić P., Nedić Z. (2020). Flocculation study of natural quartz sample using anionic polyacrylamide. *Contemporary Materials*. – Vol. 11(2). – P. 112-121. <https://doi.org/10.7251/COMEN2002112S> (in Eng.).

Zhang Y. (2023). Preparation and Application of Fe-Al-SiO₂ Poly-Coagulants for Removing Microcystis aeruginosa from Water. *Inorganics*. – Vol. 11(5). – P. 210. <https://doi.org/10.3390/inorganics11050210> (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*