

**ISSN: 1991-346X (Print)**  
**ISSN: 2518-1726 (Online)**

**ACADEMIC JOURNAL  
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES**

**№1**  
**2026**

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

2026 • 1



CENTRAL ASIAN ACADEMIC  
RESEARCH CENTER



**ACADEMIC JOURNAL  
OF PHYSICAL AND  
CHEMICAL SCIENCES**

PUBLISHED SINCE JANUARY 1944

ALMATY, NAS RK

## EDITOR-IN-CHIEF

**ZHURINOV Murat Zhurinovich**, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of IAAS and NAS RK, General Director Oil refining and Petrochemistry Research Institute (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

## DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

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

**ABILMAGZHANOV Arlan Zainutallaevich**, PhD in Chemistry, General Director of JSC "Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry named after D.V. Sokolsky", (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197468109>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

## EDITORIAL BOARD:

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

**RAMAZANOV Tlekkabul Sabitovich**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701328029>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/13503476>

**ABIEV Rufat**, Doctor of Technical Sciences (Biochemistry), Professor, Head of the Department of Optimization of Chemical and Biotechnological Equipment, St. Petersburg State Technological Institute (St. Petersburg, Russia), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602431781>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

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

**TIGINYANU Ion Mihailovich**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician, President of the Academy of Sciences of Moldova, Technical University of Moldova (Chisinau, Moldova), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

**SANG SU Kwak**, PhD (Biochemistry, Agricultural Chemistry), Professor, Chief Scientist, Research Center for Plant Systems Engineering, Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology (KRIBB), (Daecheon, Korea), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

**BERSIMBAYEV Rakhmetkazhi Iskenderovich**, Doctor of Biological Sciences, Professor, Academician of NAS RK, L.N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004012398>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

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

**BOSHKAEV Kuantai Avgazyevich**, PhD, Associate Professor, Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54883880400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2080231>

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

**QUEVEDO Hernando**, Professor, National Autonomous University of Mexico (UNAM), Institute of Nuclear Sciences (Mexico City, Mexico), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30353742>

**ZHUSUPOV Marat Abzhanovich**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602166928>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/566>

**KOVALEV Alexander Mikhailovich**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of NAS of Ukraine, Institute of Applied Mathematics and Mechanics (Donetsk, Ukraine), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/65533963>

**TAKIBAEV Nurgali Zhabagaevich**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24077239000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1671760>

**KHARIN Stanislav Nikolaevich**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Kazakh-British Technical University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2023295>

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

## ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES.

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

Owner: «Central Asian Academic Research Center» LLP (Almaty).

The certificate of registration of a periodical printed publication in the Committee of Information of the Ministry of Information and Social Development of the Republic of Kazakhstan № KZ93VPY00121157 issued 05.06.2025

Thematic scope: *physics and chemistry*.

Periodicity: 4 times a year.

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

## БАС РЕДАКТОР

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

## БАС РЕДАКТОРДЫҢ ОРЫНБАСАРЛАРЫ:

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

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

## РЕДАКЦИЯ АЛҚАСЫ:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES

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

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

Ақпарат агенттігінің мерзімді баспасөз басылымын, ақпарат 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 МААН и НАН РК, Генеральный директор Научно-исследовательского института нефтепереработки и нефтехимии (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

## ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

**АБИЛЬМАГЖАНОВ Арлан Зайнуталлаевич**, кандидат химических наук, Генеральный директор АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197468109>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

**РАМАЗАНОВ Тлеккабул Сабитович**, (заместитель главного редактора), доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701328029>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/13503476>

**АБИЕВ Руфат**, доктор технических наук (биохимия), профессор, заведующий кафедрой «Оптимизация химической и биотехнологической аппаратуры», Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Санкт-Петербург, Россия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602431781>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

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

**ТИГИНЯНУ Ион Михайлович**, доктор физико-математических наук, академик, президент Академии наук Молдовы, Технический университет Молдовы (Кишинев, Молдова), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

**САНГ-СУ Квак**, доктор философии (PhD, биохимия, агрохимия), профессор, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский центр инженерных систем растений, Корейский научно-исследовательский институт бионауки и биотехнологии (KRIBB) (Дэчон, Корея), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

**БЕРСИМБАЕВ Рахметкажи Искендерович**, доктор биологических наук, профессор, академик НАН РК, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева (Астана, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004012398>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

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

**БОШКАЕВ Куантай Авгазиевич**, PhD, преподаватель, доцент кафедры теоретической и ядерной физики, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54883880400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2080231>

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

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

**ЖУСУПОВ Марат Абжанович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и ядерной физики, Казахский национальный университет имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602166928>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/566>

**КОВАЛЕВ Александр Михайлович**, доктор физико-математических наук, академик НАН Украины, Институт прикладной математики и механики (Донецк, Украина), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/65533963>

**ТАКИБАЕВ Нурғали Жабағевич**, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24077239000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1671760>

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

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

## ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES

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

Собственник: ТОО «Центрально-азиатский академический научный центр» (г. Алматы).

Свидетельство № KZ93VPY00121157 о повторной регистрации периодического печатного издания информационного агентства, информационного агентства и сетевого издания, выданное Республиканским государственным учреждением «Комитет информации» Министерства культуры и информации Республики Казахстан **05.06.2025**Тематическая направленность: *физика, химия*.

Периодичность: 4 раза в год.

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

CONTENTS

PHYSICS

**Aimaganbetova Z.K., Kulshymbayev Y.A., Zhanturina N.N., Beketova G.K.**  
First-principles calculation of the electronic properties of the Double Halide Perovskite  $\text{Cs}_2\text{Ag}_{0.2}\text{Na}_{0.4}\text{In}_{0.6}\text{Ti}_{0.4}\text{Cl}_6$  based on the quantum ESPRESSO software.....14

**Amangeldinova S., Zhuniskhan S., Kalzhigitov N., Kurmangaliyeva V.**  
Study of the cluster structure of  $^5\text{He}$  and  $^5\text{Li}$  mirror nuclei in two-cluster approximation.....35

**Chokin K., Otunchi Ye., Kozhahmetova A., Kasenova A., Shongalova A.**  
Development and testing of a laboratory pyrometallurgical installation for recycling lithium-ion batteries.....46

**Issayeva A., Beisebayeva A., Madybekova G., Shynazbekova Sh., Issa A.**  
Comparative analysis of physico-chemical characteristics of drinking, spring and natural water in the South Kazakhstan.....65

**Kim V.Yu., Aimuratov Y.K.**  
Search for transient cosmic events by scanning the sky with wide-field telescopes.....78

**Koshtybayev T.B., Tatenov A.M., Aliyeva M.E., Tugelbaeva G.T., Zhanaliyeva G.Zh.**  
Study of the electromagnetic field based on thermodynamics principles.....89

**Mukamedenkyzy V., Akberdiyev B.**  
Numerical investigation of the effect of inclination angle on the stability of mechanical equilibrium in Ar–N<sub>2</sub> binary gas mixtures.....105

**Myasnikova L.N., Uzakbaeva S.S., Shanina Z.K., Bekeshev A.Z.**  
Kinetic properties of high-density polyethylene filled with chromium spinel powder.....119

**Nurbayev B.M., Dmitriyeva E.A., Kemelbekova A.E.**  
The role of low-dimensional layered structures in enhancing the stability of tin-based perovskite materials.....136

**Sattinova Z., Ermakhanova F., Assilbekov B., Taimuratova L.**  
Influence of various cooling conditions and heat transfer coefficients on solidification during the formation of beryllium ceramic products.....149

**Shestakova L.I., Serebryanskiy A.V., Spassyuk R.R., Omarov Ch.T.**  
Search for gas of comet-meteor origin in the inner Solar System: caii ion emission.....165

**Ualikhanova U., Tursynkazy F., Syzdykova A.M., Altayeva G.S., Altaibayeva A.B.**  
Studying the amplitude of  $f(T)$  gravitational waves using Bessel functions.....179

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

## CHEMISTRY

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

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

## МАЗМҰНЫ

### ФИЗИКА

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

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

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

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

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

### ХИМИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

## ФИЗИКА

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

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

## ХИМИЯ

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

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

ACADEMIC JOURNAL  
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES  
ISSN 2224-5227  
Volume 1.  
Number 357 (2026), 350–365

<https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.425>

UDC: 665.6;66.097;541.128

IRSTI: 35.15.28, 61.51.17

©**Massenova A.T.\***, **Zhumakanova A.S.**, **Torlopov I.I.**, **Rakhmetova K.S.**,  
**Abilmagzhanov A.Z.**, 2026.

D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: [almasenova@mail.ru](mailto:almasenova@mail.ru)

## OPTIMIZATION OF THE HIERARCHICAL ZEOLITE ZSM-5 SYNTHESIS PROCESS BY STEAM-ASSISTED ALKALINE MODIFICATION

**Massenova Alma** — Doctor of Chemical Sciences, Chief Researcher, D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: [almasenova@mail.ru](mailto:almasenova@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2251-0549>;

**Zhumakanova Ardak** — Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher, D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: [zhumakanova62@mail.ru](mailto:zhumakanova62@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4983-4199>;

**Torlopov Ivan** — Junior Researcher, Sector of Design of Technological Processes, D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: [myndfrea@gmail.com](mailto:myndfrea@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-9660-6397>;

**Rakhmetova Kenzhegul** — Researcher, Sector of Modeling of Technological Processes, D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: [rahmetova\\_75@mail.ru](mailto:rahmetova_75@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2098-3169>;

**Abilmagzhanov Arlan** — Candidate of Chemical Sciences, First Deputy General Director, D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: [a.abilmagzhanov@gmail.com](mailto:a.abilmagzhanov@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2931-9640>.

**Abstract.** The work experimentally substantiates the conditions for producing hierarchical ZSM-5 zeolite by steam-assisted alkaline modification of a commercial zeolite in the presence of polyethylene glycol (PEG) in order to select reproducible treatment regimes that ensure controlled changes in structural characteristics while preserving the original framework. A series of experiments of ZSM-5 modification was carried out by varying the treatment time, PEG molecular weight, and the amount of NaOH. Structural changes were evaluated by X-ray diffraction and FTIR spectroscopy, and morphology was examined by scanning electron microscopy. It was established that increasing the treatment duration within the investigated range leads to a higher degree of framework disordering in ZSM-5 and enhances dissolution-recrystallization effects, while excessive modification time results in framework destruction. An increase in PEG molecular weight strengthens the modifying action of the medium and is manifested in



more pronounced structural and morphological changes, indicating the role of PEG as a soft templating agent. It was also found that increasing the NaOH amount intensifies structural disordering and, at excessive alkalinity, causes framework destruction due to desilication, as confirmed by a sharp change in elemental composition. The optimal parameter range was selected based on a balance between preserving crystallinity and forming secondary porosity and is as follows: recrystallization time 6 h, PEG-10000, 2 g NaOH. The obtained results may be used to identify mild regimes for hierarchical modification of specific high-silica zeolite systems.

**Keywords:** ZSM-5 zeolite; hierarchical structure; steam-assisted alkaline treatment; polyethylene glycol; soft templating agent

**Financing.** *The work was conducted with financial support from the target-funded program of MSHE RK, BR24992995, “Establishing scientific foundations for the development of new composite catalytic systems with improved properties based on transition and rare-earth metals”.*

**For citations:** *Massenova A.T., Zhumakanova A.S., Torloпов I.I., Rakhmetova K.S., Abilmagzhanov A.Z. Optimization of the Hierarchical Zeolite ZSM-5 Synthesis Process by Steam-Assisted Alkaline Modification. Academic Journal of Physical and Chemical Sciences. 2026. No.1. Pp. 350–365. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.425>*

©Масенова А.Т.\*, Жұмақанова А.С., Торлопов И.И., Рахметова К.С.,  
Абильмагжанов А.З., 2026.

Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты,  
Алматы, Қазақстан.

E-mail: [almasenova@mail.ru](mailto:almasenova@mail.ru)

## ZSM-5 ИЕРАРХИЯЛЫҚ ЦЕОЛИТІН БУМЕН СІЛТІЛІ МОДИФИКАЦИЯЛАУ АРҚЫЛЫ АЛУ ПРОЦЕСІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

**Масенова Алма** — химия ғылымдарының докторы, бас ғылыми қызметкер, Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты, Алматы, Қазақстан,  
E-mail: [almasenova@mail.ru](mailto:almasenova@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2251-0549>;

**Жұмақанова Ардақ** — химия ғылымдарының кандидаты, жетекші ғылыми қызметкер, Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты, Алматы, Қазақстан,  
E-mail: [zhumakanova62@mail.ru](mailto:zhumakanova62@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4983-4199>;

**Торлопов Иван** — кіші ғылыми қызметкер, Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты, Алматы, Қазақстан,  
E-mail: [myndfrea@gmail.com](mailto:myndfrea@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-9660-6397>;

**Рахметова Кенжегүл** — ғылыми қызметкер, Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты, Алматы, Қазақстан,  
E-mail: [rahmetova\\_75@mail.ru](mailto:rahmetova_75@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2098-3169>;

**Әбілмагжанов Арлан** — химия ғылымдарының кандидаты, Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институтының бас директоры, Алматы, Қазақстан,  
E-mail: [a.abilmagzhanov@gmail.com](mailto:a.abilmagzhanov@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2931-9640>.

**Аннотация.** Жұмыста бастапқы қаңқаны сақтай отырып, құрылымдық сипаттамалардың басқарылатын өзгеруін қамтамасыз ететін қайталанатын өңдеу режимдерін таңдау мақсатында полиэтиленгликоль (ПЭГ) қатысуымен Тауарлық цеолитті бумен сілтілі модификациялау арқылы ZSM-5 иерархиялық цеолитін алу шарттары эксперименталды түрде негізделген. ZSM-5 цеолитін өңдеу уақыты, PEG молекулалық массасы және NaOH мөлшері бойынша өзгерту бойынша бірқатар эксперименттер жүргізілді. Құрылымның өзгеруі рентгендік фазалық талдау және ИҚ-спектроскопия, морфология — сканерлеуші электронды микроскопия әдісімен бағаланды; процесс режимдерін бақылау үшін элементтік талдау деректері пайдаланылды. Зерттелген аралықта өңдеу ұзақтығының артуы ZSM-5 құрылымының реттелу дәрежесінің жоғарылауына және еру-қайта кристалдану әсерінің жоғарылауына әкелетіні анықталды, ал артық модификация уақыты раманың бұзылуына әкеледі. PEG молекулалық массасының жоғарылауы ортаның модификациялық әсерін күшейтеді және неғұрлым айқын құрылымдық және морфологиялық өзгерістерде көрінеді, бұл PEG-тің жұмсақ темплат агенті ретіндегі рөлін көрсетеді. NaOH мөлшерінің ұлғаюы құрылымның бұзылу дәрежесін күшейтеді және сілтінің артық болуымен десилиция арқылы қаңқаның бұзылуына әкелетіні анықталды, бұл элементтік құрамның күрт өзгеруімен расталады. Жоғары кремнийлі ZSM-5 үшін қышқыл сатысын енгізу кристалдылықтың жеделдетілген деградациясына байланысты практикалық емес екендігі бөлек көрсетілген. Параметрлердің оңтайлы диапазоны кристалдылықты сақтау мен қайталама кеуекті құрылымды қалыптастыру арасындағы тепе-теңдік бойынша таңдалды және келесідей: қайта кристалдану уақыты 6 сағат, PEG-10000, 2 г NaOH. Алынған нәтижелер белгілі бір жоғары кремнийлі цеолит жүйелерінің иерархиялық модификациясының жұмсақ режимдерін табу үшін пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: ZSM-5 цеолиті; иерархиялық құрылым; бу фазасындағы сілтілік өңдеу; полиэтиленгликоль; темплаттық агент

©Масенова А.Т.\*, Жұмақанова А.С., Торлопов И.И., Рахметова К.С.,  
Абильмагжанов А.З., 2026.

Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского,  
Алматы, Казахстан.

E-mail: almasenova@mail.ru

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ИЕРАРХИЧЕСКОГО ЦЕОЛИТА ZSM-5 ПАРОВОЙ ЩЕЛОЧНОЙ МОДИФИКАЦИЕЙ

**Масенова Алма** — доктор химических наук, главный научный сотрудник, Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского, Алматы, Казахстан,  
E-mail: almasenova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2251-0549>;

**Жумаканова Ардак** — кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского, Алматы, Казахстан,  
E-mail: zhumkanova62@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4983-4199>;



**Торлопов Иван** — младший научный сотрудник, Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского, Алматы, Казахстан,

E-mail: myndfrea@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9660-6397>;

**Рахметова Кенжегуль** — научный сотрудник, Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского, Алматы, Казахстан,

E-mail: rahmetova\_75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2098-3169>;

**Абилмагжанов Арлан** — кандидат химических наук, Генеральный директор Института топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского, Алматы, Казахстан,

E-mail: a.abilmagzhanov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2931-9640>.

**Аннотация.** В работе экспериментально обоснованы условия получения иерархического цеолита ZSM-5 методом парощелочной модификации товарного цеолита в присутствии полиэтиленгликоля (ПЭГ). Целью исследования являлся подбор воспроизводимых режимов обработки, обеспечивающих управляемое изменение структурных характеристик при сохранении исходного каркаса. Проведены серии экспериментов по модификации цеолита ZSM-5 с варьированием продолжительности обработки, молекулярной массы ПЭГ и количества NaOH. Изменения структуры оценивали методами рентгенофазового анализа и ИК-спектроскопии, морфологию - методом сканирующей электронной микроскопии, а для контроля режимов процесса использовали данные элементного анализа. Установлено, что увеличение продолжительности обработки в исследованном интервале приводит к возрастанию степени разупорядочения структуры ZSM-5 и усилению процессов растворения–перекристаллизации, тогда как чрезмерное увеличение времени модификации вызывает разрушение каркаса. Повышение молекулярной массы ПЭГ усиливает модифицирующее действие среды и проявляется в более выраженных структурных и морфологических изменениях, что указывает на роль ПЭГ как мягкого темплатообразующего агента. Показано, что увеличение количества NaOH повышает степень разупорядочения структуры и при избытке щелочи приводит к разрушению каркаса вследствие десилицирования, что подтверждается резким изменением элементного состава. Отдельно установлено, что введение кислотной стадии при обработке высококремнистого ZSM-5 нецелесообразно ввиду ускоренной дегградации кристалличности. Оптимальный диапазон параметров определен на основе баланса между сохранением кристалличности и формированием вторичной пористой структуры и включает следующие условия: время рекристаллизации - 6 ч, ПЭГ-10000, NaOH - 2 г. Полученные результаты могут быть использованы при разработке мягких режимов иерархической модификации высококремнистых цеолитных систем.

**Ключевые слова:** цеолит ZSM-5; иерархическая структура; паровая щелочная обработка; полиэтиленгликоль, темплатный агент

**Введение.** Иерархические цеолиты, сочетающие микропористую каркасную структуру с дополнительными транспортными мезо- и макропорами, сегодня рассматриваются как один из наиболее практичных путей модификации цеолитных

материалов в технологии катализаторов, позволяющих обеспечить высокие активность и селективность. Микропоры обеспечивают требуемые для катализа кислотно-основные активные центры, тогда как вторичная пористость снижает диффузионные ограничения, повышая доступность структуры цеолита и улучшая транспорт реагентов и продуктов. При этом эффективность такой модификации определяется не только самим фактом появления мезопор, но и согласованностью микропористой и мезопористой подсистем в составе общей пористой структуры. Последнее требует управляемых и воспроизводимых методик получения таких материалов при сохранении исходного каркаса и высокой кристалличности (Chen, et al., 2020; Lee, et al., 2024).

Подходы к созданию иерархических цеолитов условно делят на «восходящие» (bottom-up) и «нисходящие» (top-down). «Восходящие» методы нацелены на формирование иерархии еще на стадии синтеза за счет контролируемого роста кристаллов, самоорганизации или конструирования требуемой морфологии. Так, развитие получили концепции мезокристаллов и связанные с ними подходы к управлению многоуровневой организацией пористой структуры (Zeng, et al., 2025; Zhao, et al., 2017). Для цеолитов семейства MFI, включая ZSM-5, описаны решения, основанные на формировании тонких кристаллических «листов» или слоистых гибридов, что сокращает длину диффузионного пути и повышает внешнюю поверхность при сохранении каркасной природы (Jeon, et al., 2017; Zhang, et al., 2012). Дополнительно активно развиваются подходы с использованием затравок и «зеленые» варианты направленного синтеза, позволяющие получать иерархически организованные агрегаты нанокристаллов и задавать морфологию и пористость через подбор условий зародышеобразования и роста (Chen, et al., 2018; Zhang, et al., 2017). Достоинство «восходящих» стратегий - потенциально более тонкая настройка архитектуры пор и морфологии; ограничения - многостадийность, чувствительность к условиям модифицирования и значительно более сложная масштабируемость.

В рамках «нисходящих» стратегий иерархическая пористость формируется чаще всего через контролируемое растворение или травление отдельных компонентов каркаса и последующую перекристаллизацию или перестройку структуры. Наиболее распространенный вариант - щелочная обработка (десилицирование), которая может приводить к появлению мезопор и росту внешней поверхности. Однако в литературе подчеркивается, что «жесткость» режима (концентрация и количество щелочи, температура, время, состав среды) критически влияет на баланс между полезным формированием вторичной пористости и нежелательным разрушением кристаллической структуры цеолита: при избытке щелочи возрастает риск избыточного растворения и роста дефектности (Chal, et al., 2011; Verboekend, et al., 2012). Поэтому практическая ценность «нисходящих» методов иерархизации напрямую определяется поиском воспроизводимых режимов, позволяющих сохранить тип каркаса и избежать перехода в область разрушения структуры.

Важную роль в управлении процессами иерархизации играют темплатные

агенты и органические добавки, которые могут направлять формирование пористой архитектуры и стабилизировать промежуточные структурные состояния. В ряде работ показано, что направленное превращение цеолитов в иерархизированные структуры возможно при использовании органических агентов и/или ПАВ, позволяющих «конструировать» развитие мезопористости и контролировать морфологию (Na, et al., 2011). Для ZSM-5 описаны примеры получения мезопористых материалов с развитой трехмерной системой пор на основе самоорганизации катионных ПАВ, что демонстрирует возможность сочетать сохранение каркаса и формирование дополнительной мезопористой структуры (Singh, et al., 2014). Подходы темплатного наноструктурирования с использованием ПАВ рассматриваются как перспективный инструмент, применимый к различным цеолитным системам при корректном подборе условий (Al-Ani, et al., 2019).

Отдельного внимания заслуживает использование полиэтиленгликоля (ПЭГ) как мягкого структуронаправляющего и порообразующего компонента. Для кремнеземных материалов хорошо описано влияние молекулярной массы ПЭГ и условий синтеза на формирование пористой структуры и морфологии, что делает ПЭГ удобным регулятором пористости в водных системах (Яцковская, и др., 2013; Gorbunova, et al., 2014). Также имеются примеры применения ПЭГ, где последний ведет себя как мягкий темплатный агент, способный влиять на процессы растворения и последующей перекристаллизации и, как следствие, на итоговую структуру пор (Mardiana, et al., 2025). Это обуславливает актуальность разработки комбинированных схем модификации в присутствии ПЭГ, которые могли бы объединять технологичность пост-синтетических подходов и управляемость темплатного воздействия.

В настоящей работе приводятся результаты исследований по экспериментальному обоснованию режимов синтеза иерархических цеолитов посредством паровой обработки в присутствии ПЭГ на примере цеолита ZSM-5, обеспечивающих изменение его структурных характеристик при сохранении исходного цеолитного каркаса.

**Материалы и основные методы.** Для обоснования режимов синтеза иерархических цеолитов использовали цеолит ZSM-5 ( $\text{NH}_4$ -форма, Si:Al = 80, средний диаметр пор 0,54 нм, удельная поверхность 425 м<sup>2</sup>/г), а также материалы и реактивы, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Материалы, использовавшиеся при отработке методики рекристаллизации

Материал	Квалификация	Формула	НТД
Кислота лимонная	«ч.д.а.»	$\text{C}_3\text{H}_5\text{O}(\text{COOH})_3$	ГОСТ 3652-69
Натрия гидроокись	«х.ч.»	NaOH	ГОСТ 4328-77
Кислота лимонная	«ч.д.а.»	$\text{C}_3\text{H}_5\text{O}(\text{COOH})_3$	ГОСТ 3652-69
Полиэтиленгликоль-115	«имп.»	$\text{C}_{2n}\text{H}_{4n+2}\text{O}_{n+1}$	-
Полиэтиленгликоль-4000			
Полиэтиленгликоль-10000			

Аммоний азотнокислый	«х.ч.»	$\text{NH}_4\text{NO}_3$	ГОСТ 22867–77
Вода дистиллированная	-	$\text{H}_2\text{O}$	ГОСТ 6709–72

При синтезе использовалась методика, описанная в (Масенова, и др., 2025).

Исходные цеолиты обрабатывали следующим образом: навеску цеолита (5,0 г) помещали в воду (50 см<sup>3</sup>), pH суспензии довели до ~ 5,5–5,7 с помощью водного аммиака. Далее суспензию перемешивали с 10%-ной лимонной кислотой в течение 1 ч при комнатной температуре. После центрифугирования и промывки дистиллированной водой порошок отделяли и сушили 1 ч при комнатной температуре.

**Паровая щелочная обработка проводилась в следующем порядке:** цеолит суспендировали в растворе, содержащем 0,50 г NaOH и 2,60 г полиэтиленгликоля (ПЭГ). Смесь выдерживали в течение 8 ч при 80–100°C, для чего во избежание испарения воды использовали термостатируемую установку, составленную из колбы с магнитной мешалкой, соединенной с вертикальным холодильником.

Катионообменную обработку цеолита проводили для замены катиона цеолита с использованием азотнокислого аммония  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  с концентрацией 1 М в течение 1–2 ч при температуре 80°C.

После паровой и катионообменной обработки осуществляли отделение ПЭГ из маточного раствора, фильтрование осадка, сушка и прокаливание образцов. По окончании введения ПЭГ порошок отделяли двукратным фильтрованием горячего раствора на фильтре «Синяя лента», промывался и сушился в течение ночи. Для удаления ПЭГ образец прокаливали в печи при 450°C в течение 1 ч, затем температура в печи увеличивали до 550°C, образец выдерживали при этой температуре 2 ч.

Исходные и обработанные образцы исследовали рядом физико-химических методов:

- рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактографе ДРОН–4–07;
- ИК-спектроскопии (ИКС) на ИК-спектрометре Nicolet iS5;
- сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе JEOL JES–ME–3X.

**Результаты и обсуждение.** Известно, что в общем случае влияние кислотной обработки даже в отсутствие жестких условий модификации ведет к необратимым изменениям в структуре вплоть до ее разрушения. В этой связи предварительно было изучено влияние кислотной стадии в рамках комбинированного синтеза с целью проверки ее необходимости применительно к цеолиту марки ZSM–5.

По описанной выше методике были синтезированы три образца:

- без обработки лимонной кислотой перед щелочной и катионообменной стадиями;
- с обработкой лимонной кислотой в течение 0,5 ч;
- с обработкой лимонной кислотой в течение 1 ч.

Полученные образцы исследовались методами РФА и ИКС. Результаты исследования представлены на рисунках 1 и 2.

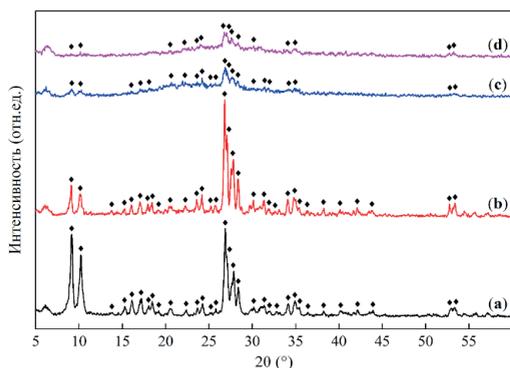


Рисунок 1 – Дифрактограммы образцов (a) исходного цеолита ZSM-5 и ZSM-5, обработанного: (b) без стадии с ЛК; (c) 0,5 ч ЛК; (d) 1 ч ЛК (◆ – ZSM-5)

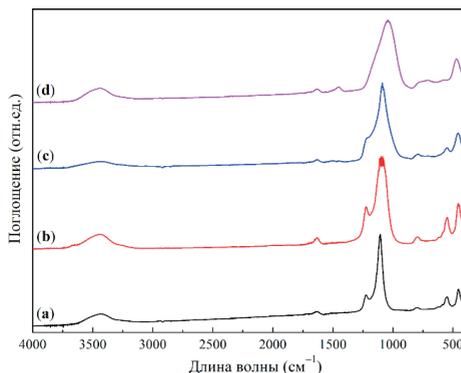


Рисунок 2 – ИК-спектры образцов (a) исходного цеолита ZSM-5 и ZSM-5, обработанного: (b) без стадии с ЛК; (c) 0,5 ч ЛК; (d) 1 ч ЛК

Все образцы (рисунок 1) представляют собой фазово-чистый цеолит ZSM-5 (JCPDS 43-322). Паровая кислотная обработка образцов цеолита ZSM-5 с использованием лимонной кислоты совместно с последующей щелочной обработкой приводит к значительной аморфизации структуры цеолита даже при малом времени обработки: пики уширяются, интенсивность их падает, значительно вырастает аморфный фон. Это подтверждается в том числе данными ИКС (рисунок 2), где также наблюдается значительное уширение полос поглощения в области  $1225 \text{ см}^{-1}$ , соответствующих колебаниям решетки цеолита. В связи с этим исходная методика модификации цеолита была модифицирована применительно к ZSM-5 путем исключения первичной стадии кислотной обработки.

Дальнейшее исследование влияния условий паровой щелочной обработки на характеристики получаемых иерархических цеолитов вели путем варьирования двух основных параметров:

- продолжительности обработки;
- типа прекурсора-темплатного агента (ПЭГ различной молекулярности);
- количества NaOH.

Дополнительно исследовалось влияние времени обработки на характеристики цеолита.

Результаты анализов исходного и обработанных образцов методами РФА и ИКС в зависимости от времени обработки и молекулярного числа ПЭГ представлены на рисунках 3–6 соответственно.

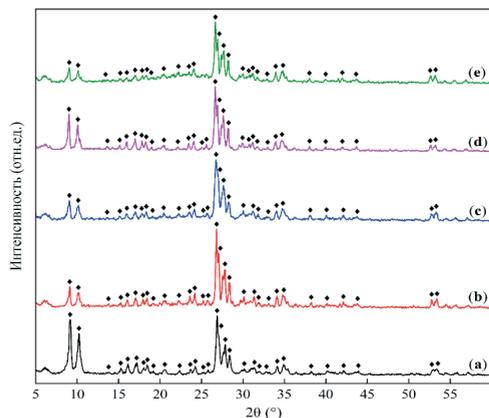


Рисунок 3 – Дифрактограммы образцов исходного цеолита ZSM-5 (a) и ZSM-5 после рекристаллизации: (b) 1 ч; (c) 2 ч; (d) 4 ч; (e) 6 ч (◆ – ZSM-5)

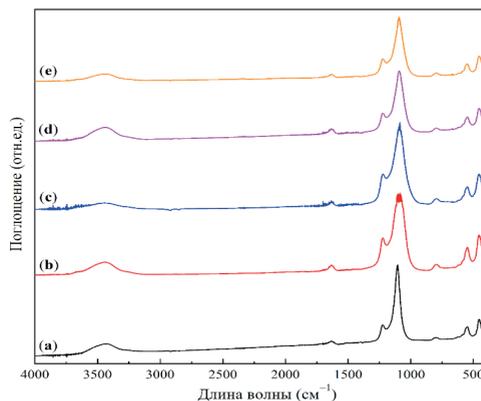


Рисунок 4 – ИК-спектры образцов исходного цеолита ZSM-5 (a) и ZSM-5 после рекристаллизации: (b) 1 ч; (c) 2 ч; (d) 4 ч; (e) 6 ч

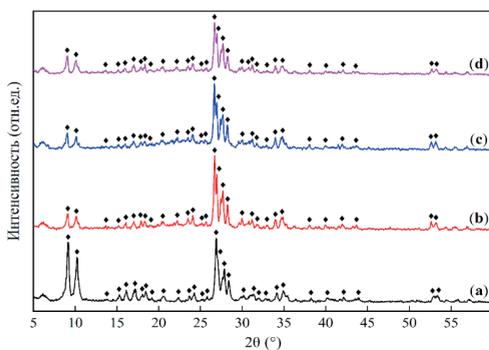


Рисунок 5 – Дифрактограммы образцов исходного ZSM-5 (a) и ZSM-5 после рекристаллизации в течение 6 ч с использованием: (b) ПЭГ-115; (c) ПЭГ-4000; (d) ПЭГ-10000 (◆ – ZSM-5)

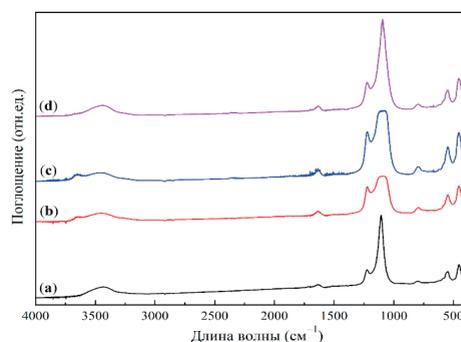


Рисунок 6 – ИК-спектры образцов исходного ZSM-5 (a) и ZSM-5 после рекристаллизации в течение 6 ч с использованием: (b) ПЭГ-115; (c) ПЭГ-4000; (d) ПЭГ-10000

На рисунках 3 и 5 представлены данные анализа исходных образцов методом РФА. Из этих данных можно утверждать, что обработка цеолита не привела к значительной аморфизации: на дифрактограммах не наблюдается явных изменений. Аналогично, ИК-спектры ZSM-5, модифицированного ПЭГ (рисунки 4 и 6) имеют полосы при 550, 788, 1105 и 1225  $\text{см}^{-1}$ , присущие каркасу цеолита ZSM-5. Ключевая полоса (валентные колебания пятичленного кольца) при 550  $\text{см}^{-1}$  не изменяется, что подтверждает сохранение каркаса цеолита при обработке, полос поглощения, присущих другим фазам, на спектре не наблюдается. Изменения полосы при 1225  $\text{см}^{-1}$  при варьировании молекулярного числа ПЭГ, вероятно, связаны с перепоглощением или соответствуют нежелательному процессу перехода фазы цеолита в кварц.

Микрофотографии СЭМ образцов ZSM-5 после парощелочной обработки в среде NaOH + ПЭГ представлены на рисунке 7.

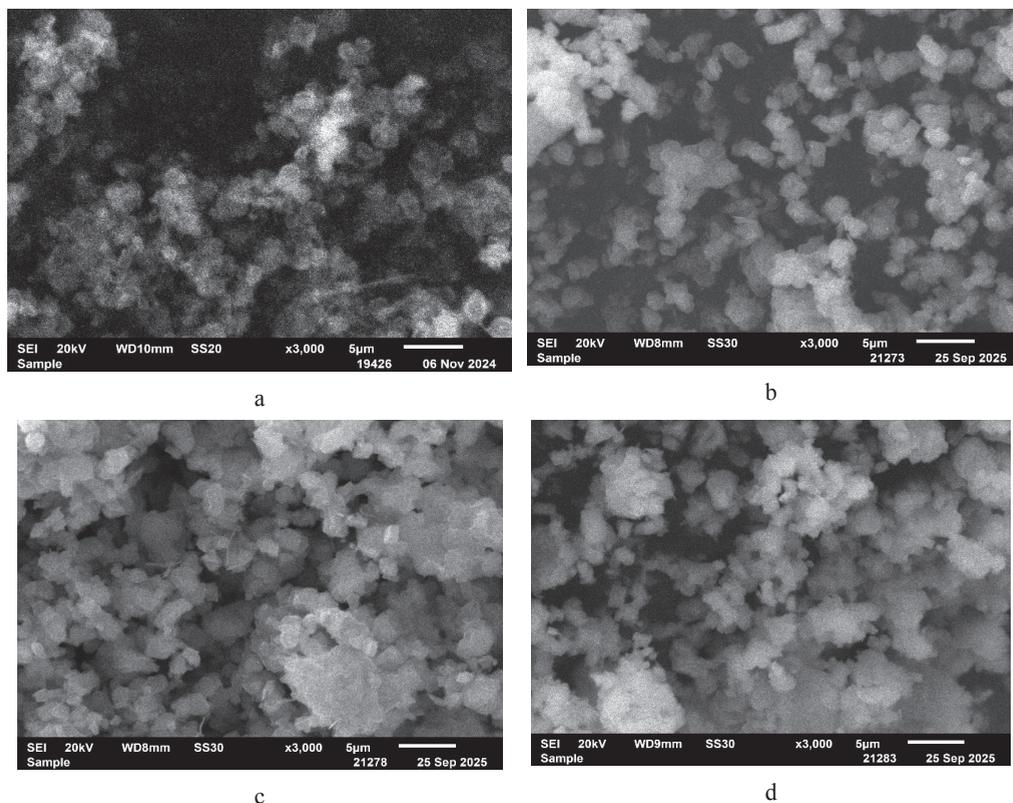


Рисунок 7 – Микрофотографии СЭМ образцов исходного ZSM-5 (а) и ZSM-5 после рекристаллизации с ПЭГ-4000: (b) 1 ч; (c) 2 ч; (d) 6 ч ( $\times 3000$ )

Результаты СЭМ (рисунок 7) демонстрируют последовательную смену различных процессов. При малом времени протекания рекристаллизации (1 ч) преобладает десилицирование богатых кремнием участков каркаса цеолита. Это ведет к частичному травлению внешних граней и раскрытию межкристаллитных просветов: агрегаты становятся более разобщенными ( $\sim 1-3$  мкм), границы зерен видны более четко, что дополнительно указывает на возникновение мезопористости при сохранении исходной микроструктуры цеолита.

При увеличении времени выдержки до 2 ч заметен вклад стадий растворения и последующей перекристаллизации, протекающей в присутствии ПЭГ, который действует как мягкий стабилизатор этого процесса. Растворенные фрагменты повторно оседают на гранях, что выражается в сглаживании и округлении агрегатов (2–5 мкм), появлении мелких наростов и росте внешней поверхности при умеренном развитии мезопор. Дальнейшее удлинение продолжительности обработки смещает баланс в направлении агломерации. На СЭМ это проявляется

уплотнением агрегатов (3–8 мкм) и уменьшением доли широких межчастичных каналов с экранированием устьев микропор.

При обработке данных РФА наблюдается разупорядочение структуры цеолита ZSM-5 по мере модификации, о чем свидетельствует сдвиг положений дифракционных максимумов в направлении больших значений.

Были получены линейные корреляции вида:

$$\Delta d = k \cdot d + l, \quad (1)$$

где  $k$ ,  $l$  – постоянные, зависящие от конкретных условий обработки образца.

Полученные корреляции использовали для количественной оценки степени разупорядочения структуры образцов, которую определяли как среднее значение относительного сдвига межплоскостных расстояний:

$$\left(\frac{\Delta d}{d}\right)_{\text{cp}} = k + \frac{l}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{d_i}\right), \quad (2)$$

где  $N$  – число использованных при корреляции величин межплоскостных расстояний.

Предложенный для анализа подход, сводящийся к описанию сдвигов межплоскостных расстояний в соответствии с (1) и (2), имеет следующий физический смысл:

- постоянная  $k$  соответствует изотропному искажению решетки, т.к. при ее изменении все межплоскостные расстояния изменяются одинаково;
- постоянная  $l$  отражает локальные искажения узлов решетки, т.е. сильнее проявляется с ростом угла дифракции.

Средний относительный сдвиг  $(\Delta d/d)_{\text{cp}}$  можно трактовать как величину, аналогичную среднему микронапряжению  $\varepsilon$ , которая рассчитывается при известной структуре кристаллов по методу Уильямсона – Холла (Himabindu, et al., 2021).

Полученные значения изменений среднего относительного сдвига от времени обработки представлены на рисунке 8, аналогичный график взаимосвязи относительного сдвига от молекулярности используемого ПЭГ при постоянном времени обработки приведен на рисунке 9.

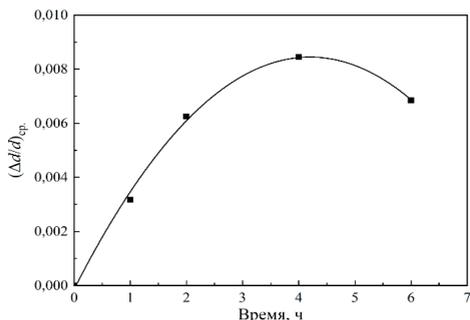


Рисунок 8 – Изменение среднего относительного сдвига межплоскостных расстояний от времени обработки цеолита ZSM-5 (ПЭГ-4000)

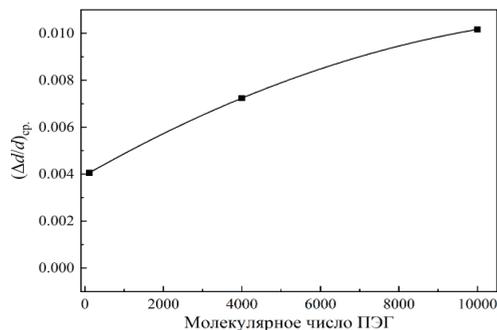


Рисунок 9 – Изменение среднего относительного сдвига межплоскостных расстояний от молекулярного числа ПЭГ (6 ч обработки)

Из представленных на рисунке 8 данных можно заключить следующую последовательность процессов по мере увеличения продолжительности щелочной обработки цеолита:

- в начальный момент времени структура исходного цеолита сохраняет свое высокоупорядоченное состояние;
- первые 2 ч наблюдается ускоренный рост степени разупорядочения структуры за счет десилицирования и набухания каналов при введении ПЭГ;
- при 4 ч обработки наблюдается максимум микронапряжений, обусловленный оптимальным сочетанием «раскрытых» каналов и остаточного каркаса, с максимальным объемом «новых» мезопор и плотностью дефектов;
- при превышении времени обработки 4 ч начинается стадия перерастворения: вероятно, начинается избыточное растворение поврежденных слоев. При этом часть дефектов теряется, что и обуславливает уменьшение количества микронапряжений (6 ч).

Оптимальная структура в данных условиях достигается при  $\sim 3-4$  ч обработки. Дальнейшая обработка при этом избыточна.

Рост молекулярного числа применяемого ПЭГ в пределах от 115 до 10000 (рисунок 9) ведет к росту микронапряжений по сдвигу межплоскостных расстояний. Это обусловлено тем, что чем длиннее цепь ПЭГ, тем больше его эффективный радиус и тем более он «распирает» каналы ZSM-5 при кислотном травлении. Объемные макромолекулы тормозят обратную рекристаллизацию, удерживая каркас в набухом состоянии, и одновременно экранируют поверхность, фокусируя растворение на локальных узлах каркаса. Это вызывает неравномерное расширение звеньев решетки и накопление дефектов, что проявляется как рост относительного смещения плоскостей (микронапряжений).

В соответствии с полученными данными в качестве оптимальной продолжительности синтеза было выбрано время 4 ч, тип темплатного агента – ПЭГ-10000.

Другим значимым параметром является концентрация NaOH, применяемая совместно с ПЭГ. В целях исследования влияния данного параметра были использованы различные дозы гидроксида натрия – от 1,0 до 4,0 г NaOH – при поддержании постоянного количества ПЭГ–10000 (2,6 г). Синтезированные образцы были исследованы методами РФА, ИКС и СЭМ. Результаты исследования методами РФА и ИКС представлены на рисунках 10 и 11.

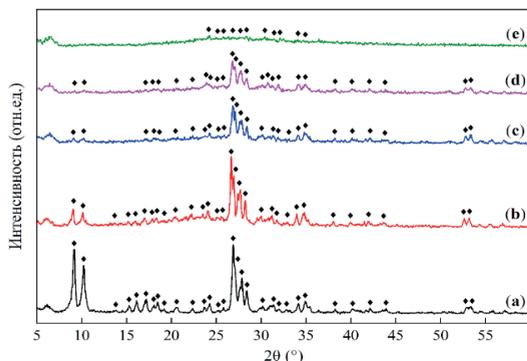


Рисунок 10 – Дифрактограммы образцов исходного ZSM-5 (а) и ZSM-5 с: (b) 0,5 г NaOH; (c) 1 г NaOH; (d) 2 г NaOH; (e) 4 г NaOH (♦ – ZSM-5)

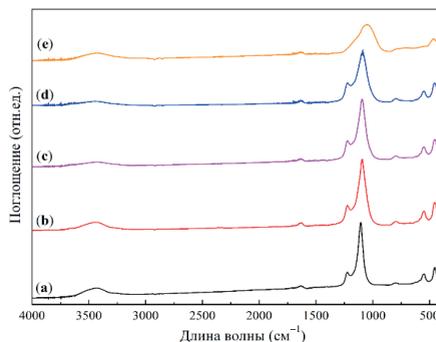


Рисунок 11 – ИК-спектры образцов исходного ZSM-5 (а) и ZSM-5 с: (b) 0,5 г NaOH; (c) 1 г NaOH; (d) 2 г NaOH; (e) 4 г NaOH

По результатам расчетов изменений межплоскостных расстояний по мере увеличения концентрации NaOH по формулам (1) и (2) было показано, что степень разупорядочения структуры увеличивается симбатно количеству щелочи с постепенным выходом на плато. В случае 4 г NaOH по РФА (рисунок 10) рефлекс фазы цеолита практически не наблюдаются, что связано с полным разрушением его структуры. Аналогичные результаты можно видеть на ИК-спектрах образцов (рисунок 11), где наблюдается полная аморфизация основной полосы при  $1225\text{ см}^{-1}$  с исчезновением второй полосы при  $1250\text{ см}^{-1}$ . Предположительно, аморфизация исходного каркаса обусловлена избыточным десилицированием структуры, что подтверждается данными элементного анализа СЭМ (таблица 2).

Таблица 2 – Элементный состав образцов при различном количестве вводимого NaOH по данным СЭМ, ПЭГ–10000 (до декатионирования)

Количество NaOH, г	Элемент, масс. %			
	O	Na	Al	Si
0,5	52,81	2,18	2,34	42,68
1,0	52,07	2,53	2,58	42,81
4,0	50,23	8,26	9,36	32,15

Можно видеть, что в случае 4 г NaOH в отличие от образцов, синтезированных с 0,5 и 1 г NaOH, наблюдается резкое уменьшение содержания кремния в составе

материала (от ~ 42,7% масс. до 32,15% масс.), что подтверждает описанный выше маршрут разрушения структуры цеолита.

Таким образом, по итогу проведенного исследования процесса модификации цеолитной структуры и его отдельных стадий на примере цеолита ZSM-5 были сформулированы оптимальные параметры процесса: 6 ч рекристаллизации, ПЭГ-10000, 2 г NaOH, 2 ч декатионирования. Все вышеуказанное позволяет утверждать, что предложенный метод иерархизации посредством рекристаллизации в щелочных условиях с использованием ПЭГ применим не только для ZSM-5, но и для цеолитов других структурных типов.

**Заключение.** Иерархизация цеолитов, заключающаяся в создании транспортных мезопор в микропористом каркасе цеолитных структур, рассматривается как один из наиболее доступных путей повышения эффективности таких катализаторов за счет снижения диффузионных ограничений при сохранении кислотно-основных центров. Для цеолита ZSM-5 актуальной задачей является подбор режимов такой обработки, которые потенциально обеспечат воспроизводимое изменение структурных характеристик без разрушения исходного каркаса, поскольку жесткие условия травления и избыток реагентов ведут к формированию аморфизованных фаз и потере кристалличности.

В настоящей работе экспериментально обоснованы режимы получения иерархического цеолита ZSM-5 из товарного цеолита данной марки при паровой щелочной обработке в присутствии ПЭГ. Показано, что включение предварительной кислотной стадии применительно к высококремнистому ZSM-5 приводит к выраженной аморфизации уже при малых временах воздействия, что подтверждается данными РФА и ИКС; в связи с этим кислотная обработка для данного цеолита признана нецелесообразной. Установлено, что при обработке в среде NaOH + ПЭГ при умеренных условиях каркас типа MFI сохраняется, а изменения морфологии по данным СЭМ соответствуют последовательности процессов мягкого десилицирования, затем растворения и перекристаллизации в присутствии ПЭГ, причем при усилении жесткости режима система стремится к агрегации и деградации своей структуры. Предложенный подход к оценке разупорядочения по сдвигам межплоскостных расстояний позволил количественно охарактеризовать влияние продолжительности обработки и природы темплатного агента. В частности, показано, что рост молекулярной массы ПЭГ усиливает структурные искажения, а увеличение количества NaOH монотонно повышает степень разупорядочения вплоть до разрушения каркаса при его избытке. По совокупности полученных данных сформулированы оптимальные параметры процесса, обеспечивающие воспроизводимую иерархизацию при сохранении исходного цеолитного каркаса. Полученные результаты могут быть использованы как основа для дальнейшего исследования протекания процессов иерархизации для конкретных высококремнистых цеолитных систем.

## References

- Al-Ani A., Haslam J.J., Mordvinova N.E., Lebedev O.I., Vicente A., Fernandez C., Zholobenko V. (2019) Synthesis of nanostructured catalysts by surfactant-templating of large-pore zeolites, *Nanoscale Advances*, 1:5:2029-2039. <https://doi.org/10.1039/C9NA00004F> (in Eng).
- Chal R., Gérardin C., Bulut M., van Donk S. (2011) Overview and industrial assessment of synthesis strategies towards zeolites with mesopores, *ChemCatChem*, 3:1:67–81. <https://doi.org/10.1002/cctc.201000158> (in Eng).
- Chen L., Xue T., Wu H., Wu P. (2018) Hierarchical ZSM-5 nanocrystal aggregates: Seed-induced green synthesis and its application in alkylation of phenol with tert-butanol, *RSC Advances*, 8:5:2751–2758. <https://doi.org/10.1039/C7RA12811H> (in Eng).
- Chen L.H., Sun M.H., Wang Z., Yang W., Xie Z., Su B.L. (2020) Hierarchically structured zeolites: from design to application, *Chemical Reviews*, 120:20:1:1194-11294. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00016> (in Eng).
- Gorbunova O.V., Baklanova O.N., Gulyaeva T.I., Trenikhin M.V., Drozdov V.A. (2014) Poly(ethylene glycol) as structure directing agent in sol-gel synthesis of amorphous silica, *Microporous and Mesoporous Materials*, 190:146–151. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.02.013> (in Eng).
- Himabindu B., Devi N.L., Kanth B.R. (2021) Microstructural parameters from X-ray peak profile analysis by Williamson–Hall models: A review, *Materials Today: Proceedings*, 47:4891–4896. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.256> (in Eng).
- Jeon M.Y., Kim D., Kumar P., Lee P.S., Rangnekar N., Bai P., Shete M., Elyassi B., Lee H.S., Narasimharao K., Basahel S.N., Al-Thabaiti S., Xu W., Cho H.J., Fetisov E.O., Thyagarajan R., DeJaco R.F., Fan W., Mkhoyan K.A., Siepmann J.I., Tsapatsis M. (2017) Ultra-selective high-flux membranes from directly synthesized zeolite nanosheets, *Nature*, 543:7647:690–694. <https://doi.org/10.1038/nature21421> (in Eng).
- Lee S., Park Y., Choi M. (2024) Cooperative interplay of micropores/mesopores of hierarchical zeolite in chemical production, *ACS Catalysis*, 14:3:2031–2048. <https://doi.org/10.1021/acscatal.3c05170> (in Eng).
- Mardiana S., Kusnadi A., Arcana I.M., Kadja G.T. (2025) Realizing mesoporous MRE zeolites using polyethylene glycol and their catalytic evaluation in palm oil and polyethylene cracking, *Results in Chemistry*, 15:102244. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102244> (in Eng).
- Massenova A., Zhumakanova A., Torlopov I., Rakhmetova K., Abilmagzhanov A. (2025) Ierarkhicheskie ceolity na osnove sinteticheskikh tseolitov ZSM-5, HY i BEA dlya alkilirovaniya aromaticeskikh uglevodородov [Hierarchical zeolites based on synthetic zeolites ZSM-5, HY and BEA for alkylation of aromatic hydrocarbons], *Academic Journal of Physical and Chemical Sciences*, 1:219–232. <https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.337> (in Russian)
- Na K., Jo C., Kim J., Cho K., Jung J., Seo Y., Messinger R.J., Chmelka B.F., Ryoo R. (2011) Directing zeolite structures into hierarchically nanoporous architectures, *Science*, 333:6040:328–332. <https://doi.org/10.1126/science.1204452> (in Eng).
- Singh B.K., Xu D., Han L., Ding J., Wang Y., Che S. (2014) Synthesis of single-crystalline mesoporous ZSM-5 with three-dimensional pores via the self-assembly of a designed triply branched cationic surfactant, *Chemistry of Materials*, 26:24:7183–7188. <https://doi.org/10.1021/cm503919h> (in Eng).
- Verboekend D., Vilé G., Pérez-Ramírez J. (2012) Mesopore formation in USY and beta zeolites by base leaching: selection criteria and optimization of pore-directing agents, *Crystal Growth & Design*, 12:6:3123–3132. <https://doi.org/10.1021/cg3003228> (in Eng).
- Yatskovskaya O.V., Baklanova O.N., Gulyaeva T.I., Drozdov V.A., Gorbunov V.A. (2013) Vliyanie molekulyarnoi massy polietilenglikolya na kharakteristiki poristoi struktury kremnezemnykh materialov [Effect of polyethylene glycol molecular weight on porous structure characteristics of silica materials], *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 49:2:223–223. <https://doi.org/10.7868/S0044185612060198> (in Russian)
- Zeng B.J., Wu S.M., Antonietti M., Janiak C., Terasaki O., Yang X.Y. (2025) Hierarchy design of zeolite mesocrystals, *Chemical Engineering Journal*, 159282. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159282> (in Eng).
- Zhang X., Liu D., Xu D., Asahina S., Cychosz K.A., Agrawal K.V., Al-Wahed Y., Bhan A., Al-Hashimi

S., Terasaki O., Thommes M., Tsapatsis M. (2012) Synthesis of self-pillared zeolite nanosheets by repetitive branching, *Science*, 336:6089:1684–1687. <https://doi.org/10.1126/science.1221111> (in Eng).

Zhang H., Zhang H., Zhao Y., Shi Z., Zhang Y., Tang Y. (2017) Seeding bundle-like MFI zeolite mesocrystals: A dynamic, nonclassical crystallization via epitaxially anisotropic growth, *Chemistry of Materials*, 29:21:9247–9255. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b03121> (in Eng).

Zhao Y., Zhang H., Wang P., Xue F., Ye Z., Zhang Y., Tang Y. (2017) Tailoring the morphology of MTW zeolite mesocrystals: Intertwined classical/nonclassical crystallization, *Chemistry of Materials*, 29:8:3387–3396. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b03813> (in Eng).

## **Publication Ethics and Publication Malpractice in the journals of the Central Asian Academic Research Center LLP**

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

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

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

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

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

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the Central Asian Academic Research Center LLP.

The Editorial Board of the Central Asian Academic Research Center LLP will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

**[www.nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz)**

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

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

Ответственный редактор *А. Ботанқызы*

Редакторы: *Д.С. Аленов, Т. Апендиев*

Верстка на компьютере *Г.Д. Жадырановой*

Подписано в печать 16.03.2026.

Формат 60x88<sup>1</sup>/<sub>8</sub>.

18,0 п.л. Заказ 1.