

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

**ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES**

**№3
2026**

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

2026 • 3



ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES

PUBLISHED SINCE JANUARY 1944

ALMATY, NAS RK

Editor-in-Chief:

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

Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES.

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

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

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

Thematic scope: *physics and chemistry*.

Periodicity: 4 times a year.

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

Бас редактор:

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

Редакция ұжымы:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES

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

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

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

Тақырыптық бағыты: физика, химия.

Мерзімділігі: жылына 4 рет.

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

Главный редактор:

ЖУРИНОВ Мурат Журинович, доктор химических наук, профессор, академик МАН и НАН РК, Генеральный директор НИИ нефтепереработки и нефтехимии (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960%3Cp%3Ehttps://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

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

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

САНГ-СУ Квак, доктор философии (PhD, биохимия, агрохимия), профессор, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский центр инженерных систем растений, Корейский научно-исследовательский институт бионауки и биотехнологии (KRIBB), (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 Жабағаевич, 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., Kabiyeve 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.

SnTaO₂N негізіндегі тар тыйым салынған аймақты фотокатализаторды алу және зерттеу.....33

Нұрбаев Б., Дмитриева Е., Кемелбекова А.

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

Сейтов А.Н., Аманжолов Т.Е.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ХИМИЯ

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

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

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

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

Бишимбаев В.К., Капсаямов Б.А.

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

Дарменбаева А.С., Аубакирова Р.А., Нурғалиева Д.А., Абылкасова Г.Е., 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., Сейтқазынова Ә., Исанбекова А. Ағаш қалдықтарынан алынған органосольв лигнин негізіндегі көміртекті талшықтарды энергия сақтау жүйелерінде қолдану.....	475
Тоқтабаева Ә.Қ., Махаева Д.Н., Рахметуллаева Р.Қ., Рвайдарова Г.О., Исенова Г.Д. Анилин, п-фенилендиамин, фенол және формальдегид негізіндегі күкіртқұрамды композиттердің синтезі, құрылымы және физика-химиялық қасиеттері.....	498
Ешманова Г.Б., Смағұлов Д.У. Кремний негізіндегі бөлшектердің ПЭО жабындарының қалыптасуы мен құрамына әсері.....	517
Жортарова А.А., Kubicek V., Ибраев М.Қ., Паньшина С.Ю., Сейдахметова Р.Б. P(III) және P(V) реагенттерімен аминотиазолдар мен аминок-тиадиазолдарды N-фосфорлирлеу: синтезі, құрылымы және биологиялық белсенділігі.....	538
Жусупова А., Тюменцева О., Антонюк В. Үйінді мыс балқыту шлагы мен қорғасын балқытудың түйіршіктелген шлагын планетарлық ұнтақтау кинетикасы мен энергетикасын салыстырмалы зерттеу.....	552

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА

Әлиұлы А., Калтаев А.

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

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

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

Сейтов А.Н., Аманжолов Т.Е.

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

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

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

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

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

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

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

ХИМИЯ

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

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

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

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

Бишимбаев В.К., Капсалямов Б.А.

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

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

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

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

Сдикова Г.Ж., Далабаева Н.С., Балкембай А.С., Сарова Н.Б., Жалтырбаева Н.К. Влияние состава электролита на свойства гальванических покрытий на основе цинка.....	435
Сейткалиева Н., Кусаинова Г., Журсумбаева М., Мохамад Ибрагим М.Н., Абдиев К. Исследование флокулирующих свойств сополимеров на основе итаконовой кислоты.....	448
Сергазина С.М., Нурмуханбетова Н.Н., Острцова Н.Б., Камзе А.Р., Касенова Н.Б. Комплексная оценка качества природной питьевой воды и статистический анализ физико-химических показателей.....	460
Талгаткызы А., 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), 382-397

<https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.482>

UDC: 661.961.621;547.262;544.478

IRSTI: 61;87.53.15;32.21

©Orazbekova R.S.^{1,2*}, Tungatarova S.A.^{1,2}, Baizhumanova T.S.^{1,2}, Kaumenova G.B.², Zhumabek M.², 2026.

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;

²D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan.

*E-mail: raushanorazbekova14@gmail.com

INFLUENCE OF REACTION MIXTURE COMPOSITION IN STEAM REFORMING OF BIOETHANOL ON A HIGH-ENTROPY OXIDE CATALYST

Orazbekova Raushan — PhD student, Junior Researcher, D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry; al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: raushanorazbekova14@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-2704-5148>;

Tungatarova Svetlana — Doctor of Chemical Sciences, Professor, D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry; al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: tungatarova58@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6005-747X>;

Baizhumanova Tolkyn — Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry; al-Farabi Kazakh National University Almaty, Kazakhstan,

E-mail: baizhuma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9851-2642>;

Kaumenova Gulnar — PhD, Senior Researcher, D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: kaumenova.gulnar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6448-6607>;

Zhumabek Manaphan — PhD, Senior Researcher, D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: manapkhana_86@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2026-0577>.

Abstract. Hydrogen production from renewable bioethanol is a promising area of low-carbon energy. The development of active and stable catalysts that ensure high hydrogen yields with minimal coke formation is crucial for enhancing the efficiency of this process. This paper examines the structural and textural characteristics and catalytic properties of a high-entropy oxide catalyst synthesized by the Pechini method in the conversion of ethanol with steam. Fresh and spent catalysts were characterized using transmission electron microscopy, low-temperature N₂ adsorption-desorption, and thermogravimetric analysis. The synthesized material exhibits a developed porous structure with a specific surface area of 96 m²/g, a total pore volume of 0.27 cm³/g, and a predominant pore diameter of 2.5–3.0 nm. Temperature and the C₂H₅OH:H₂O volume



ratio significantly influence the catalytic performance. At 700–800 °C, ethanol conversion reaches 100% for all reaction mixture compositions studied. The maximum H_2 yield (87.39%) was obtained at 800 °C and $C_2H_5OH:H_2O = 3:1$. This ratio is characterized by the most intense coke formation—0.328 mg/(g•h). Increasing the water content to $C_2H_5OH:H_2O = 1:4$ reduces the coke formation rate to 0.145 mg/(g•h). TEM analysis of the spent catalyst revealed the formation of filiform and tubular carbon structures. The obtained results demonstrate the high activity of the high-entropy oxide catalyst and indicate the need to optimize the composition of the reaction mixture to achieve a balance between high hydrogen yield and catalyst resistance to coke formation.

Keywords: high-entropy oxide catalyst, bioethanol, hydrogen, steam reforming of ethanol

Funding: This work was supported by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under grant AP26198717.

For citations: 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. *Academic Journal of Physical and Chemical Sciences*. 2026. No.3. Pp. 382-397. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.482>

©Оразбекова Р.С.^{1,2*}, Тунгатарова С.А.^{1,2}, Байжұманова Т.С.^{1,2}, Кауменова Г.Б.², Жумабек М.², 2026.

¹эл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан;

²Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты, Алматы, Қазақстан.

*E-mail: raushanorazbekova14@gmail.com

ЖОҒАРЫ ЭНТРОПИЯЛЫҚ ОКСИД КАТАЛИЗАТОРЫ ҚАТЫСЫНДА БИОЭТАНОЛДЫҢ БУ РИФОРМИНГІСІНЕ РЕАКЦИЯЛЫҚ ҚОСПА ҚҰРАМЫНЫҢ ӘСЕРІ

Оразбекова Раушан — PhD докторант, кіші ғылыми қызметкер, Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты; эл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: raushanorazbekova14@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-2704-5148>;

Тунгатарова Светлана — химия ғылымдарының докторы, профессор, Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты; эл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: tungatarova58@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6005-747X>;

Байжұманова Толқын — химия ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, жетекші ғылыми қызметкер, Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты; эл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: baizhuma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9851-2642>;

Кауменова Гульнар — PhD, аға ғылыми қызметкер, Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты, Алматы, Қазақстан,

E-mail: kaumenova.gulnar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6448-6607>;

Жумабек Манапхан — PhD, аға ғылыми қызметкер, Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты, Алматы, Қазақстан,

E-mail: manapkhan_86@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2026-0577>.

Аннотация. Жаңартылатын биоэтанолдан сутегі өндіру төмен көміртекті энергия үшін перспективті, болашағы жарқын салалардың бірі болып табылады. Бұл процестің тиімділігін арттыру үшін кокс түзілуін минималды нәтижеге алып келетін, жоғары сутегі өнімділігін қамтамасыз ететін, белсенді және тұрақты катализаторларды әзірлеу өте маңызды. Бұл жұмыста этанолды бумен конверсиялау кезінде Печини әдісімен синтезделген жоғары энтропиялық оксид катализаторының құрылымдық және текстуралық сипаттамалары мен каталитикалық қасиеттері қарастырылды. Жаңа және пайдаланылған катализаторлар трансмиссиялық электронды микроскопия, төмен температуралы N_2 адсорбция-десорбция және термогравиметриялық талдау арқылы сипатталды. Синтезделген материал $96 \text{ м}^2/\text{г}$ меншікті беткі ауданы, $0,27 \text{ см}^3/\text{г}$ жалпы кеуек көлемі және $2,5\text{--}3,0 \text{ нм}$ басым кеуек диаметрі бар дамыған кеуекті құрылымды көрсетеді. Температура және $C_2H_5OH:H_2O$ көлемдік қатынасы каталитикалық өнімділікке айтарлықтай әсер етеді. $700\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$ температурада зерттелген барлық реакция қоспасының құрамы үшін этанолдың конверсиясы 100% -ға жетеді. H_2 максималды шығымы ($87,39\%$) $800 \text{ }^\circ\text{C}$ температурада және $C_2H_5OH:H_2O = 3:1$ температурада алынды. Бұл қатынас кокс түзілуінің ең қарқындылығымен сипатталады — $0,328 \text{ мг}/(\text{г}\cdot\text{сағ})$. Су мөлшерін $C_2H_5OH:H_2O = 1:4$ дейін арттыру кокс түзілу жылдамдығын $0,145 \text{ мг}/(\text{г}\cdot\text{сағ})$ дейін төмендетеді. Пайдаланылған катализатордың ТЭМ талдауы жіп тәрізді және түтікшелі көміртекті құрылымдардың түзілгенін анықтады. Алынған нәтижелер жоғары энтропиялық оксид катализаторының жоғары белсенділігін көрсетеді және жоғары сутегі шығымдылығы мен катализатордың кокс түзілуіне төзімділігі арасындағы тепе-теңдікке қол жеткізу үшін реакция қоспасының құрамын оңтайландыру қажеттілігін көрсетеді.

Түйін сөздер: жоғары энтропиялық оксид катализаторы, биоэтанол, сутегі, этанолдың бу риформингі

©Оразбекова Р.С.^{1,2*}, Тунгатарова С.А.^{1,2}, Байжұманова Т.С.^{1,2}, Кауменова Г.Б.², Жумабек М.², 2026.

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

²Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского, Алматы, Казахстан.

*E-mail: raushanorazbekova14@gmail.com

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА РЕАКЦИОННОЙ СМЕСИ В ПАРОВОМ РИФОРМИНГЕ БИОЭТАНОЛА НА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОМ ОКСИДНОМ КАТАЛИЗАТОРЕ

Оразбекова Раушан — PhD докторант, младший научный сотрудник, Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского; Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,



E-mail: raushanorazbekova14@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-2704-5148>;

Тунгатарова Светлана — доктор химических наук, профессор, Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского; Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

E-mail: tungatarova58@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6005-747X>;

Байжуманова Толкын — кандидат химических наук, ассоциированный профессор, ведущий научный сотрудник, Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского; Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

E-mail: baizhuma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9851-2642>;

Кауменова Гульнар — PhD, старший научный сотрудник, Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского, Алматы, Казахстан,

E-mail: kaumenova.gulnar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6448-6607>;

Жумабек Манапхан — PhD, старший научный сотрудник, Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского, Алматы, Казахстан,

E-mail: manapkhan_86@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2026-0577>.

Аннотация. Получение водорода из возобновляемого биоэтанола является перспективным направлением низкоуглеродной энергетики. Разработка активных и устойчивых катализаторов, обеспечивающих высокий выход водорода при минимальном коксообразовании, имеет важное значение для повышения эффективности данного процесса. В работе исследованы структурно-текстурные характеристики и каталитические свойства высокоэнтропийного оксидного катализатора, синтезированного методом Печини, в процессе превращения этанола с водяным паром. Свежий и отработанный катализаторы охарактеризованы методами трансмиссионной электронной микроскопии, низкотемпературной адсорбции–десорбции N_2 и термогравиметрического анализа. Синтезированный материал характеризуется развитой пористой структурой с удельной площадью поверхности $96 \text{ м}^2/\text{г}$, общим объемом пор $0,27 \text{ см}^3/\text{г}$ и преимущественным диаметром пор $2,5\text{--}3,0 \text{ нм}$. Установлено существенное влияние температуры и объемного соотношения $C_2H_5OH_2O$ на каталитические показатели. При $700\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$ конверсия этанола достигает 100% для всех исследованных составов реакционной смеси. Максимальный выход H_2 , составляющий $87,39 \%$, достигнут при $800 \text{ }^\circ\text{C}$ и соотношении $C_2H_5OH_2O = 3:1$. Вместе с тем при данном соотношении наблюдается наиболее интенсивное коксообразование со скоростью $0,328 \text{ мг}/(\text{г}\cdot\text{ч})$, тогда как увеличение содержания воды до $C_2H_5OH_2O = 1:4$ снижает этот показатель до $0,145 \text{ мг}/(\text{г}\cdot\text{ч})$. ТЕМ-анализ отработанного катализатора выявил образование нитевидных и трубчатых углеродных структур. Полученные результаты свидетельствуют о высокой каталитической активности синтезированного высокоэнтропийного оксида и показывают, что регулирование состава реакционной смеси является ключевым фактором достижения оптимального соотношения между выходом водорода и устойчивостью катализатора к коксообразованию.

Ключевые слова: высокоэнтропийный оксидный катализатор; биоэтанол; водород; паровая конверсия этанола

Введение. Прогнозируется, что водород станет важнейшим элементом энергетического баланса в ближайшие годы, способствуя развитию

низкоуглеродной экономики. При производстве из биомассы он является устойчивым топливом и энергетическим носителем с большим потенциалом для ускорения энергетического перехода. Таким образом, производство водорода методом паровой конверсии биоэтанола, полученного из биомассы, является многообещающей стратегией, поскольку оно может привести к более высоким выходам и чистоте водорода, чем другие процессы производства водорода из биомассы. (Anil et al., 2022). Биоэтанол особенно привлекателен в качестве сырья, получаемого из биомассы, благодаря своим характеристикам: высокой плотности энергии, возможности транспортировки с использованием существующей инфраструктуры, низкой токсичности, высокой стабильности и простоте хранения (Pal et al., 2022).

Биоэтанол — возобновляемый носитель водорода, получаемый в основном из обильных источников биомассы путем анаэробного брожения без выбросов парниковых газов на протяжении всего жизненного цикла. (Grandis et al., 2024). Его низкая цена, удобная транспортировка, простота хранения и высокие показатели безопасности делают его сырьем для производства водорода, привлекающим большое внимание. Как показано в таблице 1, паровой риформинг (1) (Sanchez et al., 2020), частичное окисление (2) (Levikhin et al., 2023) и окислительный паровой риформинг (3) (Pio et al., 2021) являются наиболее распространенными способами производства водорода из этанола. Теоретически, 1 моль этанола может произвести 6 моль водорода путем парового риформинга, и эффективность производства водорода является самой высокой среди общих реакций превращения этанола в водород, поэтому паровой риформинг является наиболее предпочтительной реакцией для производства водорода. Однако некоторые побочные реакции являются сильными эндотермическими реакциями, а некоторые эндотермические условия несовместимы с основной реакцией (уравнения 4-7), нарушая термическое равновесие реакционной системы из-за различий в термодинамических свойствах по сравнению с основной реакцией. В результате разработка термически стабильных катализаторов риформинга имеет решающее значение для инициирования и облегчения основной реакции (Mattos et al., 2012).

Таблица 1. Пути получения водорода из реакции паровой конверсии этанола.

Реакция	Уравнение	ΔH_{298}° (kJ mol ⁻¹)	
Паровый риформинг	$C_2H_5OH + 3 H_2O \rightarrow 2CO_2 + 6H_2$	157.0	1
Частичное окисление	$C_2H_5OH + 3/2 O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2$	-552.0	2
Окислительный паровой риформинг	$C_2H_5OH + (3-2x) H_2O + xO_2 \rightarrow 2CO_2 + (6-2x)H_2$	-68.5	3
Деметанирование	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	206.2	4
Конверсия водяного газа	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	-41.02	5
Дегидрирование	$C_2H_5OH \rightarrow CH_3CHO + H_2$	17.36	6
Разложение	$C_2H_5OH \rightarrow CO + CH_4 + H_2$	33.16	7

Важной проблемой парового риформинга этанола является разработка высокоэффективных и устойчивых к коксообразованию катализаторов. В целом, катализаторы для парового риформинга этанола состоят из активных металлических компонентов и оксидной подложки. Высокоэнтропийные оксиды (ВЭО) считаются перспективными катализаторами нового поколения благодаря высокой термической стабильности, развитой системе кислородных вакансий, высокой подвижности решеточного кислорода и синергетическому взаимодействию компонентов, что обеспечивает их повышенную каталитическую активность и устойчивость к дезактивации по сравнению с традиционными оксидными материалами (Pan et al., 2023; Chen et al., 2020; Sun et al., 2021).

Катализаторы на основе перовскитов $\text{LaNi}_{0.38}\text{B}_{0.62}\text{O}_{3-\delta}$ ($\text{B} = \text{Ti}, \text{Al}, \text{Fe}$) продемонстрировали высокую активность в паровой конверсии этанола, при этом катализатор $\text{LaNi}_{0.38}\text{Ti}_{0.62}\text{O}_{3-\delta}$, восстановленный при 750 °C, обеспечил стабильную работу в течение 100 ч без признаков дезактивации благодаря сильному взаимодействию металл–носитель, высокой концентрации кислородных вакансий и низкой скорости коксообразования. (Correa-Muriel et al., 2025). Впервые показано, что высокоэнтропийный шпинельный оксид $(\text{CoCrFeNiAl})_3\text{O}_4$ является высокостабильным катализатором паровой конверсии этанола, обеспечивая выход H_2 81%, селективность по H_2 85% и стабильную работу в течение 55 ч при 600 °C благодаря самореорганизации структуры, образованию кислородных вакансий и высокой устойчивости к спеканию. (Wang et al., 2023). Анализ литературных данных показывает, что наиболее перспективными направлениями разработки катализаторов для паровой конверсии этанола являются создание многокомпонентных оксидных систем с высокой кислородной подвижностью, развитым взаимодействием металл–носитель и повышенной устойчивостью к коксообразованию. В связи с этим в настоящей работе в качестве объекта исследования выбран высокоэнтропийный оксидный катализатор синтезированный методом Печини.

Материалы и основные методы. В качестве исходного сырья использовали биоэтанол, полученный путем переработки отходов пшеницы на предприятии «Bio Operations» (г. Тайынша, Республика Казахстан). Согласно паспорту качества, соответствующему международным стандартам, объемная доля этилового спирта в образце составляла 99,98 %. Перед проведением каталитических испытаний биоэтанол смешивали с деионизированной водой, изменяя объемное соотношение компонентов $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O}$ (3:1, 1:1, 1:3 и 1:4).

Высокоэнтропийный оксидный катализатор был синтезирован методом Печини с использованием в качестве прекурсоров нитратов металлов $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3$, $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$, $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$, $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ и $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$. На всех стадиях синтеза реакционную смесь непрерывно перемешивали. Вначале лимонную кислоту растворяли в этиленгликоле при температуре 60–80 °C, после чего раствор охлаждали до комнатной температуры и последовательно вводили рассчитанные количества нитратов металлов. После полного растворения солей в систему при непрерывном перемешивании по каплям добавляли

этилендиамин, обеспечивающий протекание процесса поликонденсации и образование полимерной сетки. Полученную однородную смесь выдерживали при перемешивании в течение 2 ч, затем нагревали до 200 °С с постепенным удалением растворителя до образования вязкой полимерной массы. Дальнейший нагрев сопровождался термическим разложением органической матрицы с образованием твердого углеродсодержащего остатка, который после охлаждения измельчали в агатовой ступке и подвергали прокаливанию на воздухе при 700 °С в течение 2 ч. Мольное соотношение компонентов при синтезе составляло: лимонная кислота : этиленгликоль : этилендиамин : ΣMe = 3,75 : 11,25 : 3,75 : 1.

Удельную площадь поверхности синтезированных образцов определяли методом Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ) на автоматическом анализаторе физической адсорбции ASAP 2400 (Micromeritics Instrument Corp., США). Измерения проводили по изотермам адсорбции азота при температуре жидкого азота (77 К). Перед выполнением анализа образцы подвергали предварительной дегазации при 150 °С в течение 4 ч в вакууме 1×10^{-3} Торр ($\approx 0,1$ Па) для удаления адсорбированных примесей и влаги. Расчет удельной площади поверхности осуществляли по экспериментально полученным изотермам адсорбции.

Свежий и отработанный синтезированный катализатор был исследован высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопией (ТЕМ). Дифракционные картины наблюдались с помощью дифрактометра Bruker Advance D8 с источником $\text{CuK}\alpha$ (диапазон 2θ 20–85°, шаг 0,05 и время накопления 3 с). Изображения высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии (ВРПЭМ) приготовленных образцов были получены с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM-2200FS (JEOL Ltd., Япония, ускоряющее напряжение 200 кВ, разрешение решетки 1 Å), оснащенного корректором Cs и спектрометром EDX (JEOL Ltd., Япония). Минимальный диаметр пятна для пошагового линейного или картирующего элементного EDX-анализа составлял ~ 1 нм с шагом около 1,5 нм.

Термогравиметрический анализ (ТГА) проводили с использованием прибора SDT650 TA, оснащенного 90-мкл алюминиевой чашкой для образцов. Около 5 мг образцов нагревали в потоке воздуха 100 мл/мин от комнатной температуры до 800 °С со скоростью 10 °С/мин и выдерживали в течение 6 с. Результаты, полученные для отработанного катализатора, сравнивали с результатами для свежего.

Каталитические свойства высокоэнтропийных оксидных катализаторов исследовали на проточной каталитической установке ПКУ-1. Образец помещали в кварцевый реактор внутренним диаметром 20 мм и длиной 410 мм. Испытания проводили в температурном диапазоне 400–800 °С с интервалом 100 °С. Общий расход реакционной смеси поддерживали на уровне 100 мл/мин, а подачу жидкого сырья осуществляли со скоростью 0,1 мл/мин. После достижения заданной температуры катализатор выдерживали в потоке реагентов 10 мин до установления стационарного режима, после чего выполняли онлайн-анализ газообразных продуктов методом газовой хроматографии. Аналогичная процедура повторялась для каждой последующей температуры. Качественный и количественный

анализ жидких продуктов реакции проводили на газовом хроматографе Agilent Technologies 6890N, оснащенном пламенно-ионизационным детектором (FID), с использованием стандартной методики определения кислородсодержащих органических соединений (оксигенатов).

Конверсия этанола $X(\text{EtOH})$, % и выход водорода $Y(\text{H}_2)$, % были рассчитаны по формулам:

$$X_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} = \frac{F_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{\text{вход}}} - F_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{\text{выход}}}}{F_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{\text{вход}}}} * 100\% \quad (6)$$

$$Y(\text{H}_2) = \frac{F_{\text{H}_2}}{F_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{\text{вход}}}} * 100\% \quad (7)$$

Результаты. Для комплексной характеристики свежего и отработанного синтезированных катализаторов применяли методы БЭТ, высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии с EDX-анализом и термогравиметрического анализа. Эти методы позволили оценить удельную поверхность, структурно-морфологические и элементные характеристики образцов, а также их термическое поведение и изменения после эксплуатации.

ТЕМ-изображения свежего высокоэнтропийного оксидного катализатора (Рисунок 1) демонстрируют формирование развитой агрегированной наноструктуры. При уменьшении увеличения (масштабная метка 100 нм) наблюдаются агрегаты неправильной формы размером от нескольких десятков до нескольких сотен нанометров, образованные более мелкими первичными наночастицами. Периферийные области агрегатов характеризуются более рыхлой морфологией, благодаря чему отдельные наночастицы визуализируются более отчетливо.

При высоком увеличении (масштабная метка 10 нм) выявляется тонкодисперсная структура материала. Первичные частицы имеют преимущественно неправильную или близкую к округлой форму и характерные размеры порядка нескольких нанометров. Частицы находятся в тесном контакте и формируют протяженные агрегированные структуры. Наблюдаемая неоднородность ТЕМ-контраста может быть связана преимущественно с различиями локальной толщины образца и перекрыванием наночастиц.

Полученные ТЕМ-данные свидетельствуют о формировании в свежем высокоэнтропийном оксидном катализаторе высокодисперсной наноструктуры с выраженной агрегацией первичных частиц. При этом на исследованных участках не обнаружено значительного количества обособленных крупных частиц, что указывает на отсутствие выраженного укрупнения отдельных компонентов катализатора. Для подтверждения однородности распределения катионов и формирования высокоэнтропийной оксидной матрицы данные ТЕМ

целесообразно рассматривать совместно с результатами STEM-EDX картирования и структурного анализа.

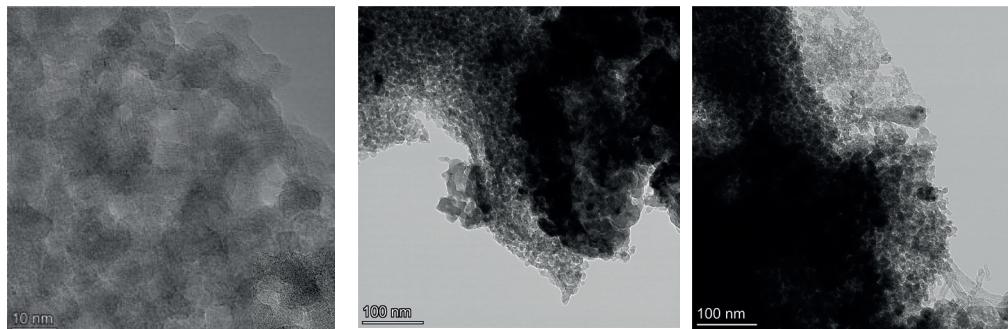


Рисунок 1. ТЕМ изображения свежего высокоэнтروпийного оксидного катализатора.

ТЕМ-изображения отработанного высокоэнтропийного оксидного катализатора после каталитических испытаний при объемном $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O} = 3:1$ представлены на рисунке. 2. После реакции материал сохраняет выраженную агрегированную морфологию: наблюдаются крупные электронно-плотные агломераты неправильной формы размером порядка сотен нанометров, состоящие из более мелких частиц.

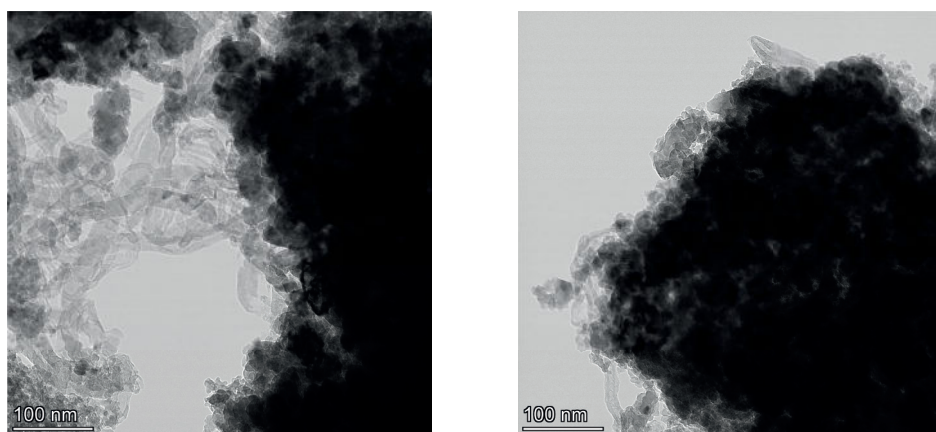


Рисунок 2. ТЕМ изображения отработанного высокоэнтропийного оксидного катализатора при $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O} = 3:1$.

Характерной особенностью отработанного образца является присутствие на периферии агрегатов протяженных нитевидных и трубчатых образований нанометрового диаметра. Наиболее отчетливо они наблюдаются на первом ТЕМ-изображении, где формируют развитую переплетенную структуру

между агрегатами катализатора. По морфологическим признакам данные образования могут быть отнесены к нитевидным углеродным отложениям, в том числе структурам типа углеродных нанотрубок, сформировавшимся в процессе каталитического превращения этанола. Сопоставление со свежим образцом показывает, что после каталитических испытаний при $C_2H_5OH:H_2O = 3:1$ наряду с сохранением агрегированной наноструктуры оксидной матрицы происходит образование углеродсодержащих отложений. Их появление может быть связано с протеканием побочных реакций, приводящих к формированию углерода в условиях относительно высокого содержания этанола в исходной реакционной смеси. При этом ТЕМ-изображения указывают преимущественно на структурированный нитевидный/трубчатый характер углеродных отложений, а не только на образование бесформенного углеродного слоя.

Результаты количественного энергодисперсионного рентгеноспектрального анализа (EDX) свидетельствуют о присутствии в составе высокоэнтропийного оксидного катализатора всех запланированных элементов (Таблица 2). Наибольшая массовая доля приходится на Al (34,32 мас.%), Mg (17,86 мас.%) и La (16,80 мас.%), тогда как содержание Cr, Pr, Fe, Mn, Co и Ni составляет 7,22, 6,75, 5,24, 5,12, 3,72 и 2,98 мас.% соответственно. Полученные данные подтверждают формирование многокомпонентной высокоэнтропийной оксидной композиции, включающей щелочноземельные, переходные и редкоземельные элементы. Наблюдаемое распределение концентраций компонентов соответствует заданной рецептуре синтеза и указывает на успешное включение всех катионов в состав оксидной матрицы без признаков существенной сегрегации отдельных элементов.

Таблица 2. EDX результаты высокоэнтропийного оксидного катализатора.

Катализатор	Элемент (%)								
	Mg	Al	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	La	Pr
ВЭО	17,86	34,32	7,22	5,12	5,24	3,72	2,98	16,8	6,75

На рисунке 3 представлена изотерма адсорбции–десорбции N_2 высокоэнтропийного оксидного катализатора. Наличие петли гистерезиса свидетельствует о развитии мезопористой составляющей структуры и протекании капиллярной конденсации в порах. Постепенное увеличение адсорбированного объема с ростом относительного давления P/P_0 указывает на неоднородность пористой структуры. Рост адсорбции в области высоких относительных давлений может быть связан с заполнением более крупных мезопор и межчастичных пустот, сформированных агрегатами наночастиц.

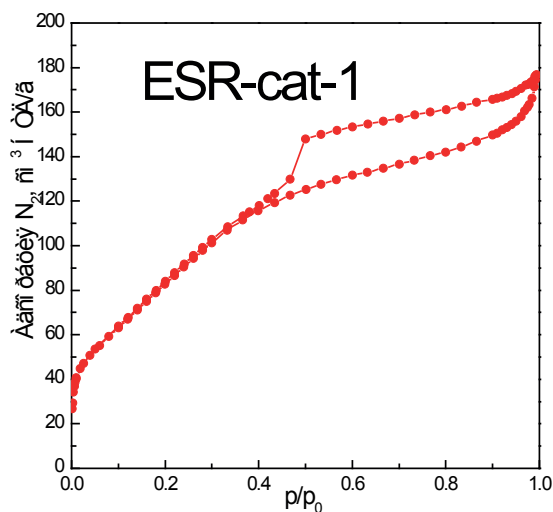


Рисунок 3. N_2 изотерма адсорбции/десорбции ВЭО катализатора.

Согласно данным таблицы 3, высокоэнтропийный оксидный катализатор, синтезированный методом Печини, характеризуется развитой пористой структурой. Удельная площадь поверхности составляет $96 \text{ м}^2/\text{г}$, общий объем пор — $0,27 \text{ см}^3/\text{г}$, а объем микропор — $0,14 \text{ см}^3/\text{г}$. Характерный диаметр пор находится в диапазоне $2,5\text{--}3,0 \text{ нм}$, соответствующем области мелких мезопор. Полученные параметры свидетельствуют о формировании развитой микро-/мезопористой структуры, обеспечивающей доступ реагентов к поверхности катализатора и потенциальным активным центрам.

Таблица 3. Текстуальные параметры высокоэнтропийного оксидного катализатора.

Образец	Площадь поверхности ($\text{м}^2\text{г}^{-1}$)	Объем пор ($\text{см}^3\text{г}^{-1}$)	Объем микропор ($\text{см}^3\text{г}^{-1}$)	Диаметр пор (нм)
Катализатор, синтезированный методом Печини	96	0.27	0.14	2.5-3

Обсуждение. Термогравиметрический анализ отработанных высокоэнтропийных оксидных катализаторов показал, что интенсивность образования углеродных отложений существенно зависит от объемного соотношения $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O}$ в реакционной смеси (Таблица 4). Наибольшая скорость коксообразования была установлена для катализатора, испытанного при $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O} = 3:1$, и составила $0,328 \text{ мг}/(\text{г}\cdot\text{ч})$. С увеличением содержания воды в исходной смеси наблюдалось последовательное снижение данного показателя: до $0,217 \text{ мг}/(\text{г}\cdot\text{ч})$ при соотношении $1:1$, $0,154 \text{ мг}/(\text{г}\cdot\text{ч})$ при $1:3$ и $0,145 \text{ мг}/(\text{г}\cdot\text{ч})$ при $1:4$.

Таблица 4. Результаты ТГА высокоэнтропийного оксидного катализатора.

№	$C_2H_5OH:H_2O$ (объемное соотношение)	Объем катализатора в реакторе (мл)	Масса катализатора в реакторе (г)	Отложения кокса (мг/г·час)
1	3:1	2	1,414	0,328
2	1:1	2	1,405	0,217
3	1:3	2	1,412	0,154
4	1:4	2	1,404	0,145

При изменении соотношения $C_2H_5OH:H_2O$ от 3:1 до 1:4 скорость накопления углеродных отложений уменьшилась приблизительно на 56 %. Особенно заметное снижение наблюдается при переходе от смеси, обогащенной этанолом (3:1), к эквимольному по объему соотношению 1:1. Дальнейшее увеличение содержания воды также способствует уменьшению коксообразования, однако изменение становится менее выраженным: значения для соотношений 1:3 и 1:4 достаточно близки — 0,154 и 0,145 мг/(г·ч), соответственно.

Полученная зависимость свидетельствует о том, что повышение содержания водяного пара способствует подавлению накопления углеродных отложений на поверхности катализатора. Вероятно, присутствие избытка воды способствует удалению углеродсодержащих поверхностных интермедиатов и их газификации с образованием CO и CO₂, тем самым ограничивая дальнейший рост углеродной фазы. В условиях повышенного содержания этанола ($C_2H_5OH:H_2O=3:1$), напротив, процессы образования углеродсодержащих продуктов протекают более интенсивно, что приводит к максимальной скорости накопления кокса.

Результаты ТГА согласуются с данными ТЕМ отработанного катализатора при $C_2H_5OH:H_2O = 3:1$, на поверхности которого наблюдаются выраженные нитевидные и трубчатые углеродные образования. Таким образом, совокупность ТЕМ и термогравиметрических данных показывает, что увеличение доли воды в исходной смеси является эффективным фактором снижения коксообразования и, следовательно, может способствовать повышению устойчивости высокоэнтропийного оксидного катализатора к углеродной дезактивации.

В таблице 5 представлены значения конверсии этанола в зависимости от температуры реакции и объемного соотношения $C_2H_5OH:H_2O$. Полученные результаты показывают высокую каталитическую активность исследуемого высокоэнтропийного оксидного катализатора во всем диапазоне составов исходной смеси. Повышение температуры оказывает выраженное положительное влияние на степень превращения этанола. При 400 °С конверсия C_2H_5OH составляет 59,67–70,65 % в зависимости от состава реакционной смеси. Максимальное значение при данной температуре (70,65 %) наблюдается при $C_2H_5OH:H_2O = 3:1$, тогда как минимальное (59,67 %) соответствует соотношению 1:3. Таким образом, даже при относительно низкой температуре 400 °С катализатор обеспечивает значительную степень превращения этанола. Повышение температуры до 500 °С приводит к резкому увеличению конверсии. Для соотношений 3:1 и 1:4 достигается полная конверсия этанола (100 %), тогда как при 1:1 и 1:3 она составляет 98,47 и 87,5 %

соответственно. При 600 °С полная конверсия наблюдается уже для составов 3:1, 1:3 и 1:4, а для смеси 1:1 значение достигает 99,41 %. Начиная с 700 °С этанол полностью конвертируется при всех исследованных соотношениях $C_2H_5OH:H_2O$, и 100%-ная конверсия сохраняется при 800 °С.

Таблица 5. Влияние температуры и объемного соотношения $C_2H_5OH:H_2O$ на конверсию этанола на высокоэнтропийном оксидном катализаторе.

№	$C_2H_5OH:H_2O$ (объемное соотношение)	$X_{C_2H_5OH}, 400^\circ C$ (%)	$X_{C_2H_5OH}, 500^\circ C$ (%)	$X_{C_2H_5OH}, 600^\circ C$ (%)	$X_{C_2H_5OH}, 700^\circ C$ (%)	$X_{C_2H_5OH}, 800^\circ C$ (%)
1	3:1	70,65	100	100	100	100
2	1:1	68,96	98,47	99,41	100	100
3	1:3	59,67	87,5	100	100	100
4	1:4	64,92	100	100	100	100

Следовательно, исследуемый высокоэнтропийный оксидный катализатор характеризуется высокой активностью в превращении этанола, обеспечивая практически полную его конверсию уже при 500–600 °С для большинства исследованных составов смеси и полную конверсию независимо от соотношения $C_2H_5OH:H_2O$ при температурах ≥ 700 °С.

Несмотря на достижение практически полной конверсии этанола при повышенных температурах, выход водорода существенно зависит от состава исходной смеси и температуры реакции (таблица 6). Во всех исследованных случаях повышение температуры сопровождается увеличением Y_{H_2} , однако наиболее высокие значения наблюдаются для смеси, обогащенной этанолом, $C_2H_5OH:H_2O = 3:1$. При 400 °С выход H_2 остается сравнительно низким и составляет от 1,11 до 10,82 %. Максимальное значение (10,82 %) наблюдается при соотношении 3:1, а увеличение содержания воды приводит к его снижению до 6,35 % при 1:1, 1,19 % при 1:3 и 1,11 % при 1:4. Особенно значительное увеличение выхода водорода наблюдается при повышении температуры до 500 °С. При $C_2H_5OH:H_2O = 3:1$ значение Y_{H_2} возрастает до 66,19 %, тогда как при 1:1, 1:3 и 1:4 оно составляет соответственно 34,86, 22,70 и 10,57 %. При дальнейшем повышении температуры выход H_2 продолжает увеличиваться. При 700 °С значения достигают 76,74; 67,38; 41,68 и 42,61 % для соотношений 3:1, 1:1, 1:3 и 1:4 соответственно. Максимальный выход водорода, 87,39 %, достигается при 800 °С и $C_2H_5OH:H_2O = 3:1$. При той же температуре для соотношения 1:1 выход H_2 составляет 73,36 %, тогда как при повышенном содержании воды (1:3 и 1:4) значения существенно ниже и практически одинаковы — 53,45 и 53,73 %, соответственно.

Таблица 6. Влияние температуры и объемного соотношения $C_2H_5OH:H_2O$ на выход водорода на высокоэнтропийном оксидном катализаторе.

№	$C_2H_5OH:H_2O$ (объемное соотношение)	Y_{H_2} , 400°C (%)	Y_{H_2} , 500°C (%)	Y_{H_2} , 600°C (%)	Y_{H_2} , 700°C (%)	Y_{H_2} , 800°C (%)
1	3:1	10,82	66,19	70,64	76,74	87,39
2	1:1	6,35	34,86	38,70	67,38	73,36
3	1:3	1,19	22,70	25,75	41,68	53,45
4	1:4	1,11	10,57	20,41	42,61	53,73

Таким образом, в исследованном диапазоне условий повышение температуры способствует существенному увеличению выхода водорода. В отличие от конверсии этанола, которая при 700–800 °C достигает 100 % независимо от состава исходной смеси, выход H_2 остается сильно зависимым от соотношения $C_2H_5OH:H_2O$. Это свидетельствует о том, что полное превращение этанола не обязательно сопровождается его преимущественным превращением в водород, а изменение состава реакционной смеси влияет на распределение продуктов и вклад параллельных реакционных маршрутов.

Исследуемый высокоэнтропийный оксидный катализатор характеризуется высокой активностью в превращении этанола. С повышением температуры конверсия C_2H_5OH возрастает и при 700–800 °C достигает 100 % для всех исследованных соотношений $C_2H_5OH:H_2O$. При этом выход водорода существенно зависит от состава реакционной смеси. Максимальное значение Y_{H_2} (87,39 % при 800 °C) получено при $C_2H_5OH:H_2O = 3:1$, тогда как при увеличении содержания воды до соотношений 1:3 и 1:4 выход H_2 снижается до 53,45 и 53,73 % соответственно.

Повышенное содержание этанола одновременно способствует более интенсивному коксообразованию. Максимальная скорость накопления углеродных отложений (0,328 мг/(г·ч)) наблюдается при $C_2H_5OH:H_2O = 3:1$. С увеличением доли воды данный показатель последовательно снижается до 0,217, 0,154 и 0,145 мг/(г·ч) для соотношений 1:1, 1:3 и 1:4 соответственно. Таким образом, увеличение содержания воды от 3:1 до 1:4 снижает интенсивность коксообразования примерно на 56 %, что может быть связано с более эффективным удалением и газификацией поверхностных углеродсодержащих интермедиатов в присутствии водяного пара.

Полученные результаты согласуются с ТЕМ-анализом отработанного катализатора при $C_2H_5OH:H_2O = 3:1$, выявившим нитевидные и трубчатые углеродные образования. В целом результаты свидетельствуют о компромиссе между высоким выходом H_2 и устойчивостью катализатора к коксообразованию: соотношение 3:1 обеспечивает максимальный выход водорода, но одновременно характеризуется наиболее интенсивным накоплением углеродных отложений.

Заключение. Исследован высокоэнтропийный оксидный катализатор, синтезированный методом Печини, и установлена взаимосвязь между его структурно-текстурными характеристиками и каталитическими свойствами в процессе превращения этанола. Полученный материал характеризуется

развитой пористой структурой с удельной площадью поверхности $96 \text{ м}^2/\text{г}$, общим объемом пор $0,27 \text{ см}^3/\text{г}$ и преимущественным диаметром пор $2,5\text{--}3,0 \text{ нм}$. ТЕМ-анализ свежего катализатора показал формирование агрегированной структуры, состоящей из высокодисперсных наночастиц. При $700\text{--}800^\circ\text{C}$ достигается 100%-ная конверсия этанола для всех исследованных соотношений $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O}$, а максимальный выход H_2 ($87,39\%$) наблюдается при 800°C и соотношении 3:1. Вместе с тем эти условия характеризуются максимальной скоростью коксообразования ($0,328 \text{ мг}/(\text{г}\cdot\text{ч})$), тогда как увеличение содержания воды до $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O} = 1:4$ снижает данный показатель до $0,145 \text{ мг}/(\text{г}\cdot\text{ч})$, то есть примерно на 56% . ТЕМ-анализ отработанного катализатора при соотношении 3:1 выявил образование нитевидных и трубчатых углеродных отложений. Таким образом, разработанный высокоэнтропийный оксидный катализатор сочетает развитую пористую структуру и высокую каталитическую активность, однако выбор оптимального соотношения этанол/вода должен учитывать компромисс между высоким выходом H_2 и устойчивостью катализатора к коксообразованию.

References

- Anil S., Indrāja S., Singh R., Appari S., Roy B. (2022). A review on ethanol steam reforming for hydrogen production over $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ and Ni/CeO_2 based catalyst powders. *International Journal of Hydrogen Energy*. – Vol. 47. – P. 8177–8213. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.183> (in Eng.).
- Chen H., Sun Y., Yang Sh., Wang H., Dmowski W., Egami T., Dai Sh. (2020). Self-regenerative noble metal catalysts supported on high-entropy oxides. *Chem. Commun.* – Vol. 56 (95). – P. 15056-15059. <https://doi.org/10.1039/d0cc05860b> (in Eng.).
- Correa-Muriel D., Osorio-Vargas P., Rodríguez-Aguado E., Cecilia A. J., Rodríguez-Castellón E., Casella M.L., Lick I.D., (2025). Highly stable Ni catalysts exsolved from LaNiBO_3 -based perovskites (B = Ti, Al and Fe) for H_2 production by catalytic steam reforming ethanol: Effect of B site nature. *Applied Catalysis A: General*. – Vol. 706. – P. 120495. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2025.120495> (in Eng.).
- Grandis A., Fortirer J.d.S., Pagliuso D., Buckeridge M.S. (2024). Scientific Research on Bioethanol in Brazil: History and Prospects for Sustainable Biofuel. *Sustainability*. – Vol. 16. – P. 4167. <https://doi.org/10.3390/su16104167> (in Eng.).
- Levikhin A.A., Boryaev A.A. (2023). High-temperature reactor for hydrogen production by partial oxidation of hydrocarbons. *International Journal of Hydrogen Energy*. – Vol. 48. – Issue 72. – P. 28187-28204. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.459> (in Eng.).
- Mattos L.V., Jacobs G.D., Burtron H., Noronha F.B. (2012). Production of Hydrogen from Ethanol: Review of Reaction Mechanism and Catalyst Deactivation. *Chemical Reviews*. – Vol. 112(7). <https://doi.org/10.1021/cr2000114> (in Eng.).
- Pal D.B., Singh A., Bhatnagar A. (2022). A review on biomass-based hydrogen production technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*. – Vol. 47. – P. 1461-1480. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.124> (in Eng.).
- Pan Y., Liu J., Tu T., Wang W., Zhang G. (2023). High-entropy oxides for catalysis: A diamond in the rough. *Chemical Engineering Journal*. – Vol. 451. – Part 2. – P. 138659. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138659> (in Eng.).
- Pio G., Ruocco C., Palma V., Salzano E. (2021). Detailed kinetic mechanism for the hydrogen production via the oxidative reforming of ethanol. *Chemical Engineering Science*. – Vol. 237. – P. 116591. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116591> (in Eng.).
- Sanchez N., Ruiz R., Hacker V., Cobo M. (2020) Impact of bioethanol impurities on steam reforming for hydrogen production: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. – Vol. 45. – Issue 21. – P. 11923-11942. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.159> (in Eng.).

Sun Y., Dai Sh. (2021). High-entropy materials for catalysis: A new frontier. *Science Advances*. 7, eabg1600. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abg1600> (in Eng.).

Wang C., Liu W., Liao M., Weng J., Shen J., Chen Y., Du Y. (2023). Novel nano spinel-type high-entropy oxide (HEO) catalyst for hydrogen production using ethanol steam reforming. *Nanoscale*. – Vol. 15. – P. 8619-8632. <https://doi.org/10.1039/d2nr07195a> (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*