

**ACADEMIC SCIENTIFIC
JOURNAL OF CHEMISTRY**

ISSN: 2224-5286 (Print)
ISSN: 2518-1491 (Online)

**№3
2026**

ISSN 2518-1491 (Online),
ISSN 2224-5286 (Print)



ACADEMIC SCIENTIFIC JOURNAL OF CHEMISTRY

3 (468)

JULY – SEPTEMBER 2026

PUBLISHED SINCE JANUARY 1947
PUBLISHED 4 TIMES A YEAR

ALMATY

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:

ADEKENOV Sergazy Mynzhasarovich (deputy editor-in-chief) 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>

AGABEKOV Vladimir Enokovich (deputy editor-in-chief), doctor of chemistry, professor, academician of NAS of Belarus, honorary director of the Institute of Chemistry of new materials (Minsk, Belarus) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004624845>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/28920574>

STRNAD Miroslav, head of the laboratory of the Institute of Experimental Botany of the Czech Academy of Sciences, professor (Olomouc, Czech Republic), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=36789185000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/18379>

BURKITBAYEV Mukhambetkali, doctor of chemistry, professor, academician of NAS RK, (Almaty, Kazakhstan) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/691218>

HOHMANN Judith, head of the department of pharmacognosy, faculty of Pharmacy, University of Szeged, director of the interdisciplinary center for Life sciences (Szeged, Hungary), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004457196>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/15630788>

ROSS Samir, Ph.D, professor, school of Pharmacy, National Center for scientific research of Herbal Products, University of Mississippi (Oxford, USA), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7401610128>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/47926269>

KHUTORYANSKY Vitaly, Ph.D, pharmacist, professor at the University of Reading (Reading, England), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=35606915700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/221621>

TELTAYEV Bagdat Burkhanbayuly, doctor of technical sciences, professor, academician of NAS RK, (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506225641>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/72161>

PHARUK Asana Dar, professor at Hamdard al-Majid college of Oriental medicine, faculty of Oriental medicine, Hamdard University (Karachi, Pakistan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55884056900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1796996>

FAZYLOV Serik Drakhmetovich, doctor of chemistry, professor, academician of NAS RK, deputy director of the Institute of Organic Synthesis and Coal Chemistry (Karaganda, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701472056>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1541357>

ZHOROBEKOVA Sharipa Zhorobekovna, doctor of chemistry, professor, academician of NAS of Kyrgyzstan, Institute of Chemistry and chemical technology of NAS KR (Bishkek, Kyrgyzstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602652060>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/31723468>

KHALIKOV Jurabay Khalikovich, doctor of chemistry, professor, academician of the Academy of Sciences of Tajikistan, V.I. Nikitin Institute of Chemistry AS RT (Tajikistan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603735641>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/9567106>

FARZALIEV Vagif Medzhid ogly, doctor of chemistry, professor, academician of NAS of Azerbaijan (Azerbaijan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6601962486>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/21617033>

GARELIK Hemda, PhD in chemistry, president of the department of Chemistry and Environment of the International Union of Pure and Applied Chemistry (London, England), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56010090400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/29866743>

ACADEMIC SCIENTIFIC JOURNAL OF CHEMISTRY

ISSN 2518-1491 (Online),

ISSN 2224-5286 (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 № **KZ23VPY00121156**, issued 05.06.2025

Thematic scope: *organic chemistry, inorganic chemistry, catalysis, electrochemistry and corrosion, pharmaceutical chemistry and technology.*

Periodicity: 4 times a year.

<http://chemistry-technology.kz/index.php/en/arhiv>

© «Central Asian Academic Research Center» LLP, 2026

Бас редактор:

ЖҰРЫНОВ Мұрат Жұрынұлы, химия ғылымдарының докторы, профессор, ХФАҚ және ҚР ҰҒА академигі, Мұнай өңдеу және мұнай-химиясы ғылыми-зерттеу институтының бас директоры (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=66021779606>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

Редакция алқасы:

ӘДЕКЕНОВ Серғазы Мыңжасарұлы (бас редактордың орынбасары), 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>

АГАБЕКОВ Владимир Енокович (бас редактордың орынбасары), химия ғылымдарының докторы, профессор, Беларусь ҰҒА академигі, Жаңа материалдар химиясы институтының құрметті директоры (Минск, Беларусь), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004624845>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/28920574>

СТРНАД Мирослав, профессор, Чехия ғылым академиясының Эксперименттік ботаника институтының зертхана меңгерушісі (Оломоуц, Чехия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=36789185000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/18379>

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/691218>

ХОХМАНН Джудит, Сегед университетінің Фармацевтика факультетінің Фармакогнозия кафедрасының меңгерушісі, Жаратылыстану ғылымдарының пәнаралық орталығының директоры (Сегед, Венгрия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004457196>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/15630788>

РОСС Самир, PhD, Миссисипи университетінің Өсімдік өнімдерін ғылыми зерттеу ұлттық орталығы, Фармация мектебінің профессоры (Оксфорд, АҚШ), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7401610128>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/47926269>

ХУТОРЯНСКИЙ Виталий, философия докторы (PhD, фармацевт), Реддинг университетінің профессоры (Реддинг, Англия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=35606915700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/221621>

ТЕЛТАЕВ Бағдат Бұрханбайұлы, техника ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506225641>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/72161>

ФАРУК Асана Дар, Хамдар аль-Маджида Шығыс медицина колледжінің профессоры, Хамдард университетінің Шығыс медицина факультеті (Карачи, Пәкістан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55884056900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1796996>

ФАЗЫЛОВ Серік Драхметұлы, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Органикалық синтез және көмір химиясы институты директорының ғылыми жұмыстар жөніндегі орынбасары (Қарағанды, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701472056>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1541357>

ЖОРОБЕКОВА Шарипа Жоробекқызы, химия ғылымдарының докторы, профессор, Қырғызстан ҰҒА академигі, ҚР ҰҒА Химия және химиялық технология институты (Бішкек, Қырғызстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602652060>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/31723468>

ХАЛИКОВ Джурабай Халикович, химия ғылымдарының докторы, профессор, Тәжікстан ҒА академигі, В.И. Никитин атындағы Химия институты (Душанбе, Тәжікстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603735641>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/9567106>

ФАРЗАЛИЕВ Вагиф Меджидоглы, химия ғылымдарының докторы, профессор, АҰҒА академигі (Баку, Әзірбайжан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6601962486>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/21617033>

ГАРЕЛИК Хемда, философия докторы (PhD, химия), Халықаралық таза және қолданбалы химия одағының Химия және қоршаған орта бөлімінің президенті (Лондон, Англия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56010090400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/29866743>

«ACADEMIC SCIENTIFIC JOURNAL OF CHEMISTRY».

ISSN 2518-1491 (Online),

ISSN 2224-5286 (Print)

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

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации Министерства информации и общественного развития Республики Казахстан № KZ23VPY00121156, выданное 05.06.2025 г.

Тематическая направленность: *органическая химия, неорганическая химия, катализ, электрохимия и коррозия, фармацевтическая химия и технологии.*

Периодичность: 4 раз в год.

<http://chemistry-technology.kz/index.php/en/arithv>

© ТОО «Центрально-азиатский академический научный центр», 2026

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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

Редакционная коллегия:

АДЕКЕНОВ Сергазы Мынжасарович (заместитель главного редактора), 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>

АГАБЕКОВ Владимир Енокович (заместитель главного редактора), доктор химических наук, профессор, академик НАН Беларуси, почетный директор Института химии новых материалов (Минск, Беларусь), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004624845>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/28920574>

СТРНАД Мирослав, профессор, заведующий лабораторией института Экспериментальной ботаники Чешской академии наук (Оломоуц, Чехия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=36789185000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/18379>

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/691218>

ХОХМАНН Джудит, заведующий кафедрой Фармакогнозии Фармацевтического факультета Университета Сегеда, директор Междисциплинарного центра естественных наук (Сегед, Венгрия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004457196>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/15630788>

РОСС Самир, PhD, профессор Школы Фармации национального центра научных исследований растительных продуктов Университета Миссисипи (Оксфорд, США), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7401610128>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/47926269>

ХУТОРЯНСКИЙ Виталий, доктор философии (Ph.D, фармацевт), профессор Университета Рединга (Рединг, Англия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=35606915700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/221621>

ТЕЛЫТАЕВ Багдат Бурханбайулы, доктор технических наук, профессор, академик НАН РК, Министерство Индустрии и инфраструктурного развития Республики Казахстан (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506225641>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/72161>

ФАРУК Ахсана Дар, профессор колледжа Восточной медицины Хамдарда аль-Маджида, факультет Восточной медицины университета Хамдарда (Карачи, Пакистан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55884056900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1796996>

ФАЗЫЛОВ Серик Драгметович, доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, заместитель директора по научной работе Института органического синтеза и углехимии (Караганда, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701472056>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1541357>

ЖОРОБЕКОВА Шарипа Жоробековна, доктор химических наук, профессор, академик НАН Кыргызстана, Институт химии и химической технологии НАН КР (Бишкек, Кыргызстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602652060>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/31723468>

ХАЛИКОВ Джурабай Халикович, доктор химических наук, профессор, академик АН Таджикистана, Институт химии имени В.И. Никитина АН РТ (Душанбе, Таджикистан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603735641>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/9567106>

ФАРЗАЛИЕВ Вагиф Меджид оглы, доктор химических наук, профессор, академик НАНА (Баку, Азербайджан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6601962486>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/21617033>

ГАРЕЛИК Хемда, доктор философии (Ph.D, химия), президент Отдела химии и окружающей среды Международного союза чистой и прикладной химии (Лондон, Англия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56010090400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/29866743>

«ACADEMIC SCIENTIFIC JOURNAL OF CHEMISTRY»

ISSN 2518-1491 (Online),

ISSN 2224-5286 (Print)

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

Қазақстан Республикасының Ақпарат және қоғамдық даму министрлігінің Ақпарат комитетінде 05.06.2025 ж. берілген № KZ23VPY00121156 мерзімдік басылым тіркеуіне қойылу туралы куәлік.

Тақырыптық бағыты: *органикалық химия, бейорганикалық химия, катализ, электрохимия және коррозия, фармацевтикалық химия және технологиялар.*

Мерзімділігі: жылына 4 рет.

<http://chemistry-technology.kz/index.php/en/arhiv>

© «Орталық Азия академиялық ғылыми орталығы» ЖШС, 2026

CONTENTS

Abdugaliyev A.Sh., Jalmakhanbetova R.I., Mukusheva G.K. Atomistic insight into solvent effects on the chemical structure of betulonic acid.....	11
Assembayeva E.K., Shadi D.K., Nurmukhanbetova D.E., Bozhbanov A.Zh., Gabdullina E.Zh. Effect of inulin on the quality characteristics of a fermented cheese whey-based beverage	25
Asylbekova D.D., Toktibayeva Kh.R., Kaldybayeva A.R., Zhurkhabayeva L., Tukibayeva A.S. Electrochemical behavior of phosphorous acid on a platinum electrode and its galvanostatic anodic oxidation using a lead anode	39
Auyeshov A.P., Yeskibayeva Ch.Z., Ibrayeva A.M., Alzhanov K.B., Dzholdasova E.M. Investigation of the adsorption characteristics of silica obtained from serpentinite by a combined acid–alkali method	58
Galymzhan A., Kozhabekov S., Kuanyshev A., Sansyzbay N., Abdrasilova A. Effect of octadecyl methacrylate–maleic anhydride copolymer composition on crude oil rheological properties	78
Darmenbayeva A.S., Rajasekharan R. Investigation of the structural properties of nanocellulose membranes derived from agricultural waste	95
Dmitriyeva E.A., Medvedev A., Kemelbekova A. Development of a low-temperature gas sensor based on SnO ₂ thin films and a precision measurement system for high-resistance detection	109
Dzheldybaeva I.M., Kairbekov Zh., Esenalieva M.Z., Dossumova B.T., Suimbaeva S.M. Influence of ultrasonic treatment on the structure and physicochemical properties of brown coal humic acids	125
Jumadilov T.K., Khimersen Kh., Imangazy A. Features of heavy metal ion sorption by interpolymer systems formed from homogeneous polyelectrolytes	140
Zhylybek M., Orazbekova R.S., Yerkibaeva M.K., Aidarova A.O., Baizhumanova T.S. Co–Mg oxide catalysts for deep oxidation of methane: synthesis, structure, and catalytic activity.....	154
Imangaliyeva B., Rakhmetova G., Dossanova B., Sovet N. Technology of biological fertilizer production by hydrolysis treatment of polymer waste.....	169
Karar M.E., Beisenbayev O.K., Alibekov R.S., Shamsudin R. Starch extraction from Baidaly rice and Gala potatoes for application in biodegradable materials.....	186
Kudaibergenova G.N., Azimbayeva G.E., Kamysbayeva A.K., Izteleu B.M., Kurbanbayeva N.M. Fatty acid composition of <i>Helianthus tuberosus</i> flowers	204
Massenova A.T., Sass A.S., Torlopov I.I., Rakhmetova K.S., Malgazhdarova M.K. Tuning of surface acidity in Zn–Me-modified shaped ZSM-5–Al ₂ O ₃ alkylation catalysts.....	219
Nurislamov R.M., Nefedov A.N., Beissenbayev D.K., Leontyeva X.A., Imashev B.K. Effect of oxide films on the corrosion resistance of iron: modeling in COMSOL Multiphysics 6.2.....	238

Nurlybayev O., Kudaibergenova R., Taubayeva R., Bekaulova A., Seitmanbetova A. Textural properties of bentonite–sawdust carbon composites after metal-chloride-assisted carbonization.....	250
Puzikova D.S., Bessonova G.V., Kenzin N.R., Zhurinov M.Zh., Torlopov I.I. Modeling cavitation of oil-containing media in various hydrodynamic configurations.....	263
Rakhimov A., Zhanikulov N., Taimasov B., Potapova E., Sarsenbaev B. Calculation of the raw material composition for cement clinker with the addition of lead slag processing waste.....	285
Ryskalieva D., Baibulanova A., Yessenamanova M., Mustafina A., Samat A. Hydrogen sulfide pollution in the atmosphere of an industrial city: the potential role of evaporation fields (Atyrau, Kazakhstan)	299
Serikbayeva K.T., Chalov T.K., Sadykov K.A. Rubidium sorption from aqueous solutions by VEMEA–AGE–PEI anion exchangers.....	322
Seitkazinova A.R., Nazhipkyzy M., Yeleuov M.A., Zhaparov A.A., Kalybayeva A.K. Orange peel-derived porous activated carbon	334
Samadun A.I., Taussarova B.R., Asrakulova D.I., Nurmukhanbetova D.E. Biodegradable packaging films with copper nanoparticles: effect of NaBH ₄ concentration on morphology and antifungal properties	351
Khamitova T.O., Tyanakh S., Bolatbay A.N., Ma Fengyun, Aitbekova D.E. Linking geological genesis to the molecular and optical traits of humic acids from coal wastes.....	370
Talgatov E., Zamanbekova A., Abilmagzhanov A., Auyezkhanova A., Akhmetova S. Polymer-modified supported catalysts for the oxidation of cyclohexane with hydrogen peroxide.....	389

МАЗМҰНЫ

Абдугалимов А.Ш., Джалмаханбетова Р.И., Мукушева Г.К.

Бетулон қышқылының химиялық құрылымына еріткіштер әсерін атомистикалық тұрғыдан зерттеу11

Асембаева Э.К., Шәді Д.Қ., Нурмуханбетова Д.Е., Божбанов А.Ж., Габдуллина Е.Ж.

Инулиннің ірімшік сарысуы негізіндегі ашытылған сусынның сапа көрсеткіштеріне әсері.....25

Асылбекова Д.Д., Токтыбаева Х.Р., Қалдыбаева А.Р., Журхабаева Л., Түкібаева А.С.

Фосфорлы қышқылдың платина электродындағы электрохимиялық қасиеттері және оны қорғасын анодын қолданып гальваностатикалық анодты тотықтыру.....39

Ауешов А.П., Ескибаева Ч.З., Ибраева А.М., Алжанов К.Б., Джолдасова Э.М.

Қышқылды-сілтілі комбинациялық әдіспен серпентиниттен алынған кремнеземнің адсорбциялық сипаттамаларын зерттеу58

Ғалымжан А., Қожабеков С., Қуанышев А., Сансызбай Н., Абдрасилова А.

Октадецилметакрилат пен малеин ангидридi сополимерлері құрамының мұнайдың реологиялық қасиеттеріне әсері78

Дарменбаева А.С., Rajasekharan R. Агроқалдықтардан алынған наноцеллюлозалы

мембраналардың құрылымдық қасиеттерін зерттеу.....95

Дмитриева Е.А., Медведев А., Кемелбекова А.

SnO₂ жұқа қабықшалары негізіндегі төмен температуралы газ сенсорын және жоғары кедергілерді тіркеуге арналған прецизионды өлшеу жүйесін әзірлеу.....109

Джелдыбаева И.М., Қайырбеков Ж., Есеналиева М.З., Досумова Б.Т., Суймбаева С.М.

Ультрадыбыстық өңдеудің қоңыр көмір гумин қышқылдарының құрылымы мен физика-химиялық қасиеттеріне әсері.....125

Джумадилов Т.К., Химэрсэн Х., Иманғазы А.

Біртекті полиэлектролиттерден құрылған интерполимерлік жүйелердің ауыр металл иондарын сорбциялау ерекшеліктері.....140

Жылқыбек М., Оразбекова Р.С., Еркибаева М.К., Айдарова А.О., Байжұманова Т.С.

Метанды терең тотықтыруға арналған Co–Mg оксидті катализаторлар: синтезі, құрылымы және каталитикалық белсенділігі.....154

Иманғалиева Б., Рахметова Г., Досанова Б., Совет Н.

Полимер қалдықтарын гидролиздік өңдеу арқылы биологиялық тыңайтқыш алу технологиясы.....169

Қарар М.Е., Бейсенбаев О.К., Алибеков Р.С., Роснах Шамсудин.

Байдалы күрішпен және Гала сортты картоптан крахмал алу және оны биоыдырайтын материалдарда қолдану.....186

Құдайбергенова Г.Н., Азимбаева Г.Е., Камысбаева А.К., Ізтелеу Б.М., Құрбанбаева Н.М.

Топинамбур гүлдерінің май қышқылдық құрамы204

Масенова А.Т., Сасс А.С., Торлопов И.И., Рахметова К.С., Малгаждарова М.К. Zn–Me-модификацияланған қалыпталған ZSM-5–Al ₂ O ₃ алкилдеу катализаторларының беттік қышқылдығын реттеу.....	219
Нурисламов Р.М., Нефедов А.Н., Бейсенбаев Д.К., Леонтьева К.А., Имашев Б.К. Темірдің коррозияға төзімділігіне оксидтік қабықшалардың әсері: COMSOL Multiphysics 6.2 бағдарламасында модельдеу.....	238
Нурлыбаев О., Кудайбергенова Р., Таубаева Р., Бекаулова А., Сейтманбетова А. Металл хлоридтері қатысында карбонизацияланған бентонит–ағаш үгіндісі көміртекті композиттерінің текстуралық қасиеттері.....	250
Пузикова Д.С., Бессонова Г.В., Кензин Н.Р., Жұрынов М.Ж., Торлопов И.И. Өртүрлі гидродинамикалық конструкциялардағы мұнай құрамды орталардың кавитация процесін модельдеу	263
Рахимов А., Жаникулов Н., Таймасов Б., Потапова Е., Сәрсенбаев Б. Қорғасын қожын өндеу қалдықтары қосылған цемент клинкерінің шикізат шихтасының құрамын есептеу	285
Серікбаева К.Т., Чалов Т.К., Садықов К.А. Сулы ерітінділерден рубидийді ВЭМЭА–АГЭ–ПЭИ аниониттерімен сорбциялау.....	299
Сейтказинова А.Р., Нажипқызы М., Елеуов М.А., Жапаров А.А., Қалыбаева А.Қ. Апельсин қабығынан алынған кеуекті белсендірілген көмір.....	322
Самадун А.И., Таусарова Б.Р., Асракулова Д.И., Нурмұханбетова Д.Е. Мыс нанобөлшектері бар биоыдырайтын қаптамалық үлдірлер: NaBH ₄ концентрациясының морфологияға және саңырауқұлаққа қарсы қасиеттеріне әсері.....	334
Хамитова Т.О., Тянах С., Болатбай А.Н., Ма Фэньюнь, Айтбекова Д.Е. Көмір қалдықтарынан бөлінген гумин қышқылдарының геологиялық генезисі мен молекулалық және оптикалық қасиеттерінің байланысы	351
Рысқалиева Д.К., Байбуланова А.А., Есенаманова М.С., Мұстафина А.Ж., Самат А.С. Өнеркәсіптік қала атмосферасының күкіртсутекпен ластануы: булану алаңдарының ықтимал рөлі (Атырау, Қазақстан)	370
Талғатов Э.Т., Заманбекова А.Т., Абильмагжанов А.З., Әуезханова А.С., Ахметова С.Н. Циклогександы сутек пероксидімен тотықтыруға арналған полимермен модификацияланған тасымалдағышқа бекітілген катализаторлар	389

СОДЕРЖАНИЕ

Абдугалимов А.Ш., Джалмаханбетова Р.И., Мукушева Г.К. Атомистическое исследование влияния растворителей на химическую структуру бетулоновой кислоты.....	11
Асембаева Э.К., Шади Д.К., Нурмуханбетова Д.Е., Божбанов А.Ж., Габдуллина Е.Ж. Влияние инулина на показатели качества ферментированного напитка на основе сырной сыворотки	25
Асылбекова Д.Д., Токтибаева Х.Р., Калдыбаева А.Р., Журхабаева Л., Тукибаева А.С. Электрохимическое поведение фосфористой кислоты на платиновом электроде и её гальваностатическое анодное окисление с использованием свинцового анода.....	39
Ауешов А.П., Ескибаева Ч.З., Ибраева А.М., Алжанов К.Б., Джолдасова Э.М. Исследование адсорбционных характеристик кремнезёма, полученного из серпентинита комбинированным кислотно-щелочным методом	58
Галымжан А., Кожабеков С., Куанышев А., Сансызбай Н., Абдрасилова А. Влияние состава сополимеров октадецилметакрилата и малеинового ангидрида на реологические свойства нефти	78
Дарменбаева А.С., Rajasekharan R. Исследование структурных свойств наноцеллюлозных мембран, полученных из агроотходов.....	95
Дмитриева Е.А., Медведев А., Кемелбекова А. Разработка низкотемпературного газового сенсора на основе тонких плёнок SnO_2 и прецизионной измерительной системы для регистрации высокоомных сопротивлений.....	109
Джелдыбаева И.М., Каирбеков Ж., Есеналиева М.З., Досумова Б.Т., Суймбаева С.М. Влияние ультразвуковой обработки на структуру и физико-химические свойства гуминовых кислот бурого угля	125
Джумадилов Т.К., Химэрсэн Х., Имангазы А. Особенности сорбции ионов тяжёлых металлов интерполимерными системами, сформированными из однородных полиэлектролитов.....	140
Жылкыбек М., Оразбекова Р.С., Еркибаева М.К., Айдарова А.О., Байжуманова Т.С. Co–Mg оксидные катализаторы для глубокого окисления метана: синтез, структура и каталитическая активность	154
Имангалиева Б., Рахметова Г., Досанова Б., Совет Н. Технология получения биологического удобрения путём гидролизной обработки полимерных отходов	169
Карар М.Е., Бейсенбаев О.К., Алибеков Р.С., Роснах Шамсудин. Получение крахмала из риса «Байдалы» и картофеля сорта «Гала» и его применение в биоразлагаемых материалах	186
Кудайбергенова Г.Н., Азимбаева Г.Е., Камысбаева А.К., Изтелеу Б.М., Курбанбаева Н.М. Жирнокислотный состав цветков топинамбура	204

Масенова А.Т., Сасс А.С., Торлопов И.И., Рахметова К.С., Малгаждарова М.К. Регулирование поверхностной кислотности Zn–Me-модифицированных формованных ZSM-5–Al ₂ O ₃ катализаторов алкилирования	219
Нурисламов Р.М., Нефедов А.Н., Бейсенбаев Д.К., Леонтьева К.А., Имашев Б.К. Влияние оксидных плёнок на коррозионную стойкость железа: моделирование в COMSOL Multiphysics 6.2	238
Нурлыбаев О., Кудайбергенова Р., Таубаева Р., Бекаулова А., Сейтманбетова А. Текстурные свойства бентонит–углеродных композитов после карбонизации в присутствии хлоридов металлов	250
Пузикова Д.С., Бессонова Г.В., Кензин Н.Р., Журинов М.Ж., Торлопов И.И. Моделирование процесса кавитации нефтесодержащих сред в различных гидродинамических конструкциях.....	263
Рахимов А., Жаникулов Н., Таймасов Б., Потапова Е., Сарсенбаев Б. Расчёт состава сырьевой шихты для цементного клинкера с добавлением отходов переработки свинцового шлака	285
Серикбаева К.Т., Чалов Т.К., Садыков К.А. Сорбция рубидия из водных растворов анионитами ВЭМЭА–АГЭ–ПЭИ.....	299
Сейтказинова А.Р., Нажипкызы М., Елеуов М.А., Жапаров А.А., Калыбаева А.К. Пористый активированный углерод, полученный из апельсиновой кожуры.....	322
Самадун А.И., Таусарова Б.Р., Асракулова Д.И., Нурмуханбетова Д.Е. Биоразлагаемые упаковочные плёнки с наночастицами меди: влияние концентрации NaBH ₄ на морфологию и антигрибковые свойства	334
Хамитова Т.О., Тянах С., Болатбай А.Н., Ма Фэньюнь, Айтбекова Д.Е. Связь геологического генезиса с молекулярными и оптическими характеристиками гуминовых кислот из угольных отходов	351
Рыскалиева Д.К., Байбуланова А.А., Есенаманова М.С., Мустафина А.Ж., Самат А.С. Загрязнение атмосферы промышленного города сероводородом: потенциальная роль полей испарения (Атырау, Казахстан)	370
Талгатов Э.Т., Заманбекова А.Т., Абильмагжанов А.З., Ауезханова А.С., Ахметова С.Н. Полимер-модифицированные нанесённые катализаторы окисления циклогексана пероксидом водорода	389

© **Massenova A.T.*, Sass A.S., Torlopov I.I., Rakhmetova K.S.,
Malgazhdarova M.K., 2026.**

JSC “D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry”,
Almaty, Kazakhstan
E-mail: almasenova@mail.ru

TUNING OF SURFACE ACIDITY IN Zn–Me-MODIFIED SHAPED ZSM-5–Al₂O₃ ALKYLATION CATALYSTS

Massenova Alma — Doctor of Chemical Sciences, Chief Researcher, Laboratory of Organic Catalysis, JSC “D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry”, Almaty, Kazakhstan,

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

Sass Aleksandr — Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher, Sector of Design of Technological Processes, JSC “D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry”, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: aleksandr-sass@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4049-6314>;

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

E-mail: myndfrea@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-9660-6397>;

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

E-mail: rahmetova_75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2098-3169>;

Malgazhdarova Makpal — PhD, scientific secretary, JSC “D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry”, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: m.malgazhdarova@ifce.kz, <https://orcid.org/0009-0001-6652-4857>.

Abstract. The effect of shaping and metal modification on the acidic and catalytic properties of shaped ZSM-5–Al₂O₃ compositions for the alkylation of aromatic hydrocarbons was studied. Shaped materials based on ZSM-5 and an alumina binder derived from pseudoboehmite were used as the initial matrix. To evaluate the role of the support composition, calcined Al₂O₃ and ZSM-5–Al₂O₃ compositions containing 50, 70, and 80 wt.% zeolite were investigated. NH₃ temperature-programmed desorption showed that an increase in the ZSM-5 content was accompanied by an increase in the intensity and area of the desorption signals, as well as by a moderate shift of the desorption maxima toward higher temperatures. A series of Zn–Me catalysts containing Zn, Zn–Ce, Zn–La, and Zn–Zr was prepared using the 50 wt.% ZSM-5 + 50 wt.% Al₂O₃ composition. The samples were characterized by X-ray diffraction,

FTIR spectroscopy, and FTIR spectroscopy of adsorbed pyridine. It was found that the introduction of metal components did not lead to severe destruction of the ZSM-5 framework; however, ZrO_2 reflections were detected for the $\text{Zn-Zr/ZSM-5-Al}_2\text{O}_3$ sample. According to pyridine FTIR spectroscopy, Lewis acid sites predominated in all Zn-Me catalysts; the B/L ratio varied from 0.18 for $\text{Zn-Ce/ZSM-5-Al}_2\text{O}_3$ to 0.36 for $\text{Zn-Zr/ZSM-5-Al}_2\text{O}_3$. Catalytic tests in benzene alkylation with ethylene showed that the highest selectivity to ethylbenzene was observed for $\text{Zn-Ce/ZSM-5-Al}_2\text{O}_3$, the highest ethylene conversion for $\text{Zn-Zr/ZSM-5-Al}_2\text{O}_3$, and the highest ethylbenzene yield for $\text{Zn-La/ZSM-5-Al}_2\text{O}_3$. The results show that the properties of shaped $\text{Zn-Me/ZSM-5-Al}_2\text{O}_3$ catalysts are determined by the combined effect of the zeolite-alumina matrix composition and the nature of the metal modifier.

Keywords: ZSM-5 zeolite; alkylation catalysts; rare-earth elements; acid sites; NH_3 -TPD

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., Sass A.S., Torloпов I.I., Rakhmetova K.S., Malgazhdarova M.K. Tuning of surface acidity in Zn-Me-modified shaped ZSM-5- Al_2O_3 alkylation catalysts. Academic Scientific Journal of Chemistry, 2026. — No. 3. — P. 219–237. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1491.397>.

© Масенова А.Т.*, Сасс А.С., Торлопов И.И., Рахметова К.С.,
Малгаждарова М.К., 2026.

«Д.В. Сокольский атындағы жанармай, катализ және электрохимия институты»
АҚ, Алматы, Қазақстан.
E-mail: almasenova@mail.ru

Zn-Me-МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН ҚАЛЫПТАЛҒАН ZSM-5- Al_2O_3 АЛКИЛДЕУ КАТАЛИЗАТОРЛАРЫНЫҢ БЕТТІК ҚЫШҚЫЛДЫҒЫН РЕТТЕУ

Масенова Алма — химия ғылымдарының докторы, Органикалық катализ зертханасының бас ғылыми қызметкері, «Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ, Алматы, Қазақстан,

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

Сасс Александр — химия ғылымдарының кандидаты, технологиялық процестерді жобалау секторының жетекші ғылыми қызметкері, «Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ, Алматы, Қазақстан,

E-mail: aleksandr-sass@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4049-6314>;

Торлопов Иван — кіші ғылыми қызметкер, технологиялық процестерді жобалау секторы, «Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ, Алматы, Қазақстан,

E-mail: myndfrea@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-9660-6397>;

Рахметова Кенжегүл — ғылыми қызметкер, технологиялық процестерді модельдеу секторы, «Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ, Алматы, Қазақстан,

E-mail: rahmetova_75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2098-3169>;

Малгаждарова Мақпал — PhD, ғылыми хатшы, «Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ, Алматы, Қазақстан,

E-mail: m.malgazhdarova@ifce.kz, <https://orcid.org/0009-0001-6652-4857>.

Аннотация. Жұмыста ароматты көмірсутектерді алкилдеуге арналған қалыпталған ZSM-5–Al₂O₃ композицияларының қышқылдық және каталитикалық қасиеттеріне қалыптау мен металдармен модификациялаудың әсері зерттелді. Бастапқы матрица ретінде ZSM-5 цеолиті және псевдобемиттен алынған алюминий оксиді байланыстырғышы негізіндегі қалыпталған материалдар пайдаланылды. Тасымалдағыш құрамының әсерін бағалау үшін күйдірілген Al₂O₃ және құрамында 50, 70 және 80 мас.% ZSM-5 бар ZSM-5–Al₂O₃ композициялары зерттелді. Аммиактың температуралық бағдарламаланған десорбциясы ZSM-5 мөлшерінің артуы десорбциялық сигналдардың қарқындылығы мен ауданының ұлғаюымен және максимумдардың біршама жоғары температураларға ығысуымен қатар жүретінін көрсетті. Құрамында 50 мас.% ZSM-5 және 50 мас.% Al₂O₃ бар композиция негізінде Zn, Zn–Ce, Zn–La және Zn–Zr модификаторлары енгізілген Zn–Me катализаторларының сериясы дайындалды. Үлгілер рентгендік дифракция, ИҚ-Фурье-спектроскопия және адсорбцияланған пиридиннің ИҚ-Фурье-спектроскопиясы әдістерімен сипатталды. Металл компоненттерін енгізу ZSM-5 қаңқасының айқын бұзылуына әкелмегені анықталды, алайда Zn–Zr/ZSM-5–Al₂O₃ үлгісінде ZrO₂ рефлекстері байқалды. Пиридиннің ИҚ-спектроскопиясы барлық Zn–Me катализаторларында Льюис қышқылдық орталықтарының басым екенін көрсетті; B/L қатынасы Zn–Ce/ZSM-5–Al₂O₃ үшін 0,18-ден Zn–Zr/ZSM-5–Al₂O₃ үшін 0,36-ға дейін өзгерді. Бензолды этиленмен алкилдеу сынақтары этилбензолға ең жоғары селективтілік Zn–Ce/ZSM-5–Al₂O₃ үшін, этиленнің ең жоғары конверсиясы Zn–Zr/ZSM-5–Al₂O₃ үшін, ал этилбензолдың ең жоғары шығымы Zn–La/ZSM-5–Al₂O₃ үшін байқалғанын көрсетті. Нәтижелер қалыпталған Zn–Me/ZSM-5–Al₂O₃ катализаторларының қасиеттері цеолит–алюминий оксиді матрицасының құрамы мен металл модификаторының табиғатына бір мезгілде тәуелді екенін көрсетті.

Түйін сөздер: ZSM-5 цеолиті; алкилдеу катализаторлары; сирек жер элементтері; қышқыл орталықтары; аммиактың ТПД

© Масенова А.Т.*, Сасс А.С., Торлопов И.И., Рахметова К.С.,
Малгаждарова М.К., 2026.

АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского»,
Алматы, Казахстан.

E-mail: almasenova@mail.ru

РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ КИСЛОТНОСТИ Zn– Me-МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФОРМОВАННЫХ ZSM-5–Al₂O₃ КАТАЛИЗАТОРОВ АЛКИЛИРОВАНИЯ

Масенова Алма — доктор химических наук, главный научный сотрудник лаборатории органического катализа, АО «Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,

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

Сасс Александр — кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник сектора проектирования технологических процессов, АО «Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,

E-mail: aleksandr-sass@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4049-6314>;

Торлопов Иван — младший научный сотрудник сектора проектирования технологических процессов, АО «Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,

E-mail: myndfrea@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-9660-6397>;

Рахметова Кенжегуль — научный сотрудник сектора моделирования технологических процессов, АО «Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,

E-mail: rahmetova_75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2098-3169>;

Малгаждарова Макпал — PhD, учёный секретарь, АО «Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,

E-mail: m.malgazhdarova@ifce.kz, <https://orcid.org/0009-0001-6652-4857>.

Аннотация. Исследовано влияние формования и модифицирования металлами на кислотные и каталитические свойства формованных композиций ZSM-5–Al₂O₃ для алкилирования ароматических углеводородов. В качестве исходной матрицы использовали формованные материалы на основе ZSM-5 и алюмооксидного связующего, полученного из псевдобемита. Для оценки влияния состава носителя исследовали прокалённый Al₂O₃ и композиции ZSM-5–Al₂O₃, содержащие 50, 70 и 80 мас.% цеолита. Температурно-программированная десорбция аммиака показала, что увеличение содержания ZSM-5 сопровождается ростом интенсивности и площади десорбционных сигналов, а также умеренным смещением максимумов десорбции в область более высоких температур. На основе композиции 50 мас.% ZSM-5 + 50 мас.% Al₂O₃ приготовлена серия Zn–Me-катализаторов, содержащих Zn, Zn–Ce, Zn–La и Zn–Zr. Образцы охарактеризованы методами рентгеновской дифракции, ИК-Фурье-спектроскопии и ИК-Фурье-спектроскопии адсорбированного пиридина. Установлено, что введение металлических компонентов не приводит к выраженному разрушению каркаса ZSM-5, однако для образца Zn–Zr/ZSM-5–Al₂O₃ обнаружены рефлексы ZrO₂. По данным ИК-спектроскопии адсорбированного пиридина во всех Zn–Me-

катализаторах преобладают льюисовские кислотные центры; отношение B/L изменяется от 0,18 для Zn–Ce/ZSM-5–Al₂O₃ до 0,36 для Zn–Zr/ZSM-5–Al₂O₃. Каталитические испытания в реакции алкилирования бензола этиленом показали, что максимальная селективность по этилбензолу достигается на Zn–Ce/ZSM-5–Al₂O₃, наибольшая конверсия этилена - на Zn–Zr/ZSM-5–Al₂O₃, а максимальный выход этилбензола - на Zn–La/ZSM-5–Al₂O₃. Полученные результаты показывают, что свойства формованных Zn–Me/ZSM-5–Al₂O₃-катализаторов определяются совместным влиянием состава цеолит-алюмооксидной матрицы и природы металлического модификатора.

Ключевые слова: цеолит ZSM-5; катализаторы алкилирования; редко-земельные элементы; кислотные центры; ТПД аммиака

Введение. Цеолитные катализаторы занимают важное место в кислотно-каталитических процессах нефтепереработки и нефтехимии благодаря сочетанию высокой термической стабильности, развитой пористой структуры, регулируемых кислотных свойств и селективности по форме. Среди них особый интерес представляют цеолиты типа ZSM-5, обладающие микропористой структурой MFI и способные обеспечивать селективное протекание реакций с участием ароматических углеводородов. В процессах алкилирования бензола, нафталина и других ароматических соединений спиртами или олефинами такие материалы позволяют сочетать кислотную активацию реагентов с ограничением образования крупных молекул побочных продуктов, что особенно важно при получении моно- и диалкилароматических соединений (Абильмагжанов и др., 2009; Надилов и др., 2009; Абильмагжанов и др., 2009; Масенова и др., 2010).

Литературный обзор. Алкилирование ароматических углеводородов относится к числу реакций, чувствительных к природе, силе и доступности кислотных центров катализатора. Для протекания реакции необходимы достаточно активные кислотные центры, способные участвовать в образовании алкилирующих интермедиатов, однако чрезмерно высокая концентрация сильных центров может усиливать побочные процессы: дегидратацию спиртов, олигомеризацию олефиновых фрагментов, полиалкилирование, крекинг и образование кокса. Поэтому при разработке цеолитных катализаторов алкилирования важна не только суммарная кислотность, но и соотношение бренстедовских и льюисовских кислотных центров, а также их распределение по силе (Танабе, 1993; Han et al., 2021).

В лабораторных исследованиях цеолиты часто рассматриваются в порошкообразном состоянии, однако в практических каталитических процессах они должны использоваться в виде гранул, экструдатов, таблеток или других формованных тел. Формование необходимо для обеспечения механической прочности, приемлемого гидродинамического сопротивления слоя и технологической пригодности катализатора. Вместе с тем переход от порошка к формованному материалу не является нейтральной стадией. Введение связующего, воды, пептизатора и последующая термообработка изменяют

пористую структуру, плотность, прочность, доступность цеолитной фазы и кислотные свойства поверхности (Yang et al., 2021; García-Sánchez and Baldovino-Medrano, 2023; Massenova et al., 2026).

Особенно существенное влияние на свойства формованных цеолитных материалов оказывают алюмооксидные связующие. С одной стороны, они обеспечивают консолидацию частиц и формирование прочных гранул; с другой стороны, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ и продукты термического превращения псевдобемита могут вносить собственные льюисовские кислотные центры, изменять распределение алюминия и влиять на кислотно-пористую структуру цеолитсодержащего материала. Поэтому при разработке формованных катализаторов на основе ZSM-5 необходимо учитывать не только свойства исходного цеолита, но и вклад связующего, а также изменения, возникающие на стадии формования и прокаливания (Lakiss et al., 2020; Nikolopoulos et al., 2023; Lashchenko et al., 2025). Это особенно важно для катализаторов алкилирования, где доступность кислотных центров и баланс между бренstedовской и льюисовской кислотностью могут определять соотношение конверсии, селективности и устойчивости к дезактивации.

Одним из подходов к дальнейшему регулированию кислотных свойств ZSM-5-содержащих катализаторов является пост-синтетическое металлическое модифицирование. Введение цинка представляет интерес вследствие возможности формирования Zn-связанных льюисовских кислотных центров и изменения адсорбционно-каталитических свойств цеолитной поверхности. Для Zn/ZSM-5-систем показано, что состояние Zn-центров, их взаимодействие с кислотными центрами и распределение между цеолитной и алюмооксидной составляющими могут существенно влиять на каталитическое поведение материала в превращениях кислородсодержащих соединений и углеводородов (Pinilla-Herrero et al., 2021; Geng et al., 2022; Zhang et al., 2022). При этом модифицирование только цинком не всегда позволяет однозначно оптимизировать кислотную функцию, поскольку рост льюисовской кислотности может сопровождаться изменением числа доступных бренstedовских центров и перераспределением реакционных маршрутов.

Перспективным является совместное введение цинка и второго модифицирующего компонента. Так, церий может влиять на состояние Zn-содержащих центров и вклад оксидных поверхностных участков; лантан традиционно рассматривается как модификатор кислотности и стабильности цеолитных катализаторов; цирконий способен формировать дополнительные кислотные и кислотно-основные центры, а также участвовать в создании бифункциональных систем на основе ZSM-5. В литературе показано, что Ce-, La- и Zr-содержащие компоненты могут заметно изменять каталитические свойства Zn/ZSM-5-систем в реакциях ароматизации, превращения спиртов, углеводородов и алкилирования бензола (Wang et al., 2024; Ni et al., 2010; Yu et al., 2019; Liu et al., 2025). Поэтому сравнительное исследование Zn-, Zn-Ce-, Zn-La- и Zn-Zr-модифицированных ZSM-5- Al_2O_3 -композиций представляет интерес как

способ выявить влияние природы второго модификатора на кислотное состояние поверхности при одинаковой матрице.

В связи с этим целью настоящей работы являлось установление влияния стадий формования и последующего металлического модифицирования на структурные, текстурно-прочностные, кислотные и каталитические характеристики ZSM-5–Al₂O₃-композиций, предназначенных для алкилирования ароматических углеводородов. На первой стадии рассматривали влияние состава формованной ZSM-5–Al₂O₃-системы на кислотные характеристики. На второй стадии исследовали физико-химические и каталитические характеристики серии Zn–Me/ZSM-5–Al₂O₃-катализаторов.

Материалы и основные методы.

Материалы:

В работе использовали цеолит ZSM-5 и алюмооксидное связующее на основе псевдобемита. Формованные ZSM-5–Al₂O₃-композиции применяли в качестве носителей для последующего металлического модифицирования. Для оценки влияния соотношения цеолитной и алюмооксидной фаз на кислотные свойства дополнительно исследовали прокаленный Al₂O₃ и формованные композиции с содержанием ZSM-5 50, 70 и 80% масс.

Для приготовления Zn- и Zn–Me-модифицированных катализаторов использовали водорастворимые соли соответствующих металлов. Цинк вводили в виде Zn(NO₃)₂·6H₂O («х.ч.», ГОСТ 5106–77). В качестве второго модифицирующего компонента использовали Ce(NO₃)₃·6H₂O («ч.д.а.», ТУ 6-09-4081–84), La(NO₃)₃·6H₂O («х.ч.», ТУ 6-09-4676–83) и ZrOCl₂·8H₂O («х.ч.», ТУ 6-09-3677–74). Вода, использованная для приготовления пропиточных растворов, была дистиллированной. Для удобства обозначения образцов использовали сокращенные названия: Zn/ZSM-5, Zn–Ce/ZSM-5, Zn–La/ZSM-5 и Zn–Zr/ZSM-5, при этом модифицированные образцы были приготовлены на основе формованной композиции ZSM-5–Al₂O₃, содержащей 50% масс. ZSM-5 и 50% масс. Al₂O₃.

Методы:

Формованные ZSM-5–Al₂O₃-композиции получали смешением порошкообразного ZSM-5 с алюмооксидным связующим и последующим формованием пластичной массы в соответствии с методикой, детально описанной в (Massenova et al., 2026). В настоящей работе формованные материалы использовали как исходную матрицу для изучения кислотных характеристик при гранулировании и последующем металлическом модифицировании. Формование проводили методом экструзии на плунжерном экструдере через фильеру диаметром 2,7 мм. Полученные экструдаты разрезали или разламывали на цилиндрические гранулы длиной ~ 3–5 мм. После формования гранулы выдерживали при комнатной температуре в течение ночи, сушили при 150 °С в течение 4 ч при скорости нагрева 2 °С/мин и прокаливали на воздухе при 500 °С в течение 2 ч при скорости нагрева 10 °С/мин.

Металлические компоненты вводили методом пропитки по влагоемкости

формованного цеолитсодержащего носителя водными растворами соответствующих солей. Масса носителя при приготовлении каждого образца составляла 15 г. Для образца Zn/ZSM-5 в раствор вводили только $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ в количестве, соответствующем 2% масс. Zn относительно массы исходного носителя. При приготовлении биметаллических образцов содержание Zn оставляли постоянным (2% масс.), а в пропиточный раствор дополнительно вводили соль второго металла (Ce, La и Zr). Содержание второго компонента составляло 1% масс. в расчете на соответствующий металл относительно массы исходного носителя. Предшественники Zn и второго металла вводили совместно из одного пропиточного раствора. После завершения пропитки образцы сушили при 150 °C в течение 2 ч и подвергали термообработке при 550 °C в течение 2 ч.

Фазовый состав образцов исследовали методом рентгенофазового анализа (РФА). Дифрактограммы регистрировали на дифрактометре ДРОН-4-07 (Буревестник, Санкт-Петербург, Россия) с использованием $\text{Co K}\alpha$ излучения в диапазоне углов $2\theta = 10\text{--}90^\circ$ с шагом $0,02^\circ$. Идентификацию фаз проводили с использованием базы данных PDF и программного обеспечения Crystallographica Search-Match v. 2.0.3.1.

ИК-спектры регистрировали на ИК-Фурье-спектрометре Nicolet iS5 (Thermo Fisher Scientific, Италия) при комнатной температуре в диапазоне $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$. Образцы для анализа готовили прессованием с KBr.

Суммарный объем пор формованных гранул определяли методом водного насыщения. Навеску прокаленного образца помещали в стеклянную колбу и по каплям добавляли дистиллированную воду до полного заполнения порового пространства; окончание титрования определяли по началу прилипания гранул к стенкам колбы. Измерения проводили не менее чем в двух параллелях. Суммарный объем пор рассчитывали как отношение объема поглощенной воды к массе сухого прокаленного образца.

Механическую прочность гранул определяли на автоматическом измерителе прочности ЛинтелПК-21 (БСКБ «Нефтехимавтоматика», РФ). Перед испытанием измеряли диаметр и длину каждой гранулы. Испытания проводили при двух схемах нагружения: осевом сжатии между торцами цилиндрической гранулы и радиальном сжатии по образующей. Для расчета использовали нагрузку разрушения и геометрические размеры гранул; итоговые значения определяли как средние по десяти гранулам. Для сравнительной оценки кислотных характеристик Al_2O_3 и формованных ZSM-5- Al_2O_3 -композиций с различным содержанием цеолита использовали температурно-программированную десорбцию аммиака (ТПД NH_3). Масса навески образца составляла 0,20 г. Перед измерением образцы насыщали аммиаком при комнатной температуре в течение 1 ч, после чего удаляли физически адсорбированный аммиак продувкой гелием. В качестве газа-носителя использовали He с расходом $30\text{ см}^3/\text{мин}$. Нагрев проводили со скоростью $15\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ до конечной температуры 600 °C. Количество и распределение кислотных центров оценивали по форме профилей ТПД, положению максимумов десорбции и интегральной площади десорбционных сигналов.

Для определения природы кислотных центров Zn-Me/ZSM-5- Al_2O_3 -катализаторов использовали ИК-спектроскопию адсорбированного пиридина. Пиридин применяли как молекулу-зонд для разделения бренстедовских (БКЦ) и льюисовских кислотных центров (ЛКЦ). Насыщение образцов проводили парами пиридина в закрытом эксикаторе: пиридин помещали в открытый сосуд на дно эксикатора, а образцы располагали отдельно, исключая их непосредственный контакт с жидким пиридином. Образцы выдерживали в атмосфере насыщенных паров пиридина в течение 3–4 суток при комнатной температуре, после чего сушили при 115 °С для удаления избытка и слабосвязанного пиридина. Затем регистрировали ИК-спектры в тех же условиях, что и для исходных образцов.

При интерпретации спектров полосу в области 1540–1550 см^{-1} относили к пиридиНИЕВЫМ ионам, образующимся при взаимодействии пиридина с БКЦ, а полосу в области 1445–1460 см^{-1} – к координационно связанному пиридиНУ на ЛКЦ. Полоса около 1490 см^{-1} имеет смешанную природу и при расчете отношения БКЦ и ЛКЦ не учитывалась.

Для полуколичественного сравнения кислотных характеристик проводили деконволюцию спектров в области 1600–1350 см^{-1} с интегрированием полос пиридина, связанного с БКЦ и ЛКЦ. Поскольку таблетки для всех образцов готовили при близком содержании катализатора и спектры регистрировали в одинаковых условиях, интегральные площади использовали для сравнительной оценки кислотности. При расчёте отношения В/Л использовали коэффициенты экстинкции: для полосы пиридина на БКЦ – 1,67 $\text{см}^2/\text{мкмоль}$, для полосы на ЛКЦ при ~1455 см^{-1} – 2,22 $\text{см}^2/\text{мкмоль}$.

Каталитические испытания проводили в реакции алкилирования бензола этиленом на установке FINERACTOR-4100С, которая представляет собой компактный проточный реактор стационарного слоя, при температуре 350 °С, атмосферном давлении, массовой скорости подачи сырья 9,0 ч^{-1} и молярном соотношении бензол: этилен = 3: 1. Масса катализатора составляла 20 г. Состав исходной смеси и продуктов реакции определяли на газовом хроматографе "Кристаллюкс-4000М" с пламенно-ионизационным детектором. Конверсию этилена, селективность по этилбензолу и выход этилбензола рассчитывали по известной калибровке.

Результаты

Характеристики формованных композиций ZSM-5- Al_2O_3 .

На первом этапе были рассмотрены формованные материалы, полученные на основе псевдобемита и ZSM-5. Для оценки влияния цеолитной составляющей использовали прокаленный $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, полученный из псевдобемита, а также ZSM-5- Al_2O_3 -композиции с содержанием цеолита 50, 70 и 80% масс.

Текстурные и прочностные характеристики выбранных формованных образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Текстульные и структурно-прочностные характеристики формованных образцов Al_2O_3 и $\text{ZSM-5-Al}_2\text{O}_3$

Образец	Состав	V_{Σ} , см ³ /г	$P_{\square}$, МПа	$P_{\circ}$, МПа
1	Al_2O_3	0,34	49,0	5,6
2	50% ZSM-5 + 50% Al_2O_3	0,43	30,6	11,1
3	70% ZSM-5 + 30% Al_2O_3	0,46	39,8	7,5
4	80% ZSM-5 + 20% Al_2O_3	0,52	34,7	4,7

Примечание: V_{Σ} – суммарный объем пор; $P_{\square}$ – прочность на раздавливание по торцу; $P_{\circ}$ – прочность на раздавливание по образующей.

Полученные данные показывают, что выбранные ZSM-5– Al_2O_3 -композиции сохраняют развитую пористую структуру и достаточную механическую прочность. При переходе от Al_2O_3 к цеолитсодержащим композициям изменяются суммарный объем пор, кажущаяся плотность, усадка и прочность гранул.

Кислотные свойства прокаленного Al_2O_3 и формованных ZSM-5– Al_2O_3 -композиций исследовали методом ТПД NH_3 . Полученные профили представлены на рисунке 1.

Профиль Al_2O_3 характеризуется широким сигналом десорбции аммиака с максимумами около 200 и 331 °С. Для ZSM-5– Al_2O_3 -композиций наблюдаются более выраженные низкотемпературные максимумы в области 205–223 °С и высокотемпературные области в области 444–468 °С. При увеличении содержания ZSM-5 от 50 до 80% масс. возрастает интенсивность десорбционных сигналов, тогда как положение основных максимумов изменяется умеренно.

Характеристики модифицированных катализаторов Zn–Me/ZSM-5– Al_2O_3 .

Для дальнейшего металлического модифицирования в качестве базовой матрицы был выбран формованный образец 2 (50% ZSM-5 + 50% Al_2O_3), сочетающий развитую пористость с повышенной механической прочностью.

Фазовый состав Zn–Me-модифицированных катализаторов исследовали методом РФА. Дифрактограммы образцов представлены на рисунке 2.

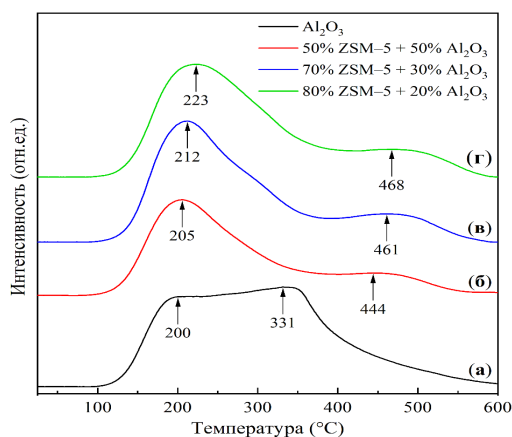


Рисунок 1 – Профили ТПД NH_3 синтезированных образцов: (а) Al_2O_3 ; (б) 50% ZSM-5 + 50% Al_2O_3 ; (в) 70% ZSM-5 + 30% Al_2O_3 ; (г) 80% ZSM-5 + 20% Al_2O_3 ;

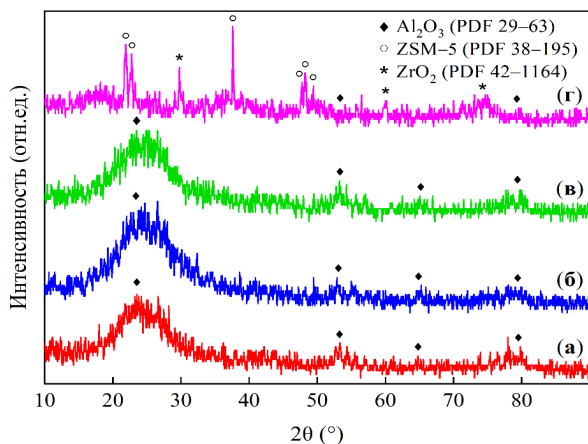


Рисунок 2 – Дифрактограммы образцов Zn-Me/ZSM-5-Al₂O₃: (а) Zn/ZSM-5-Al₂O₃; (б) Zn-Ce/ZSM-5-Al₂O₃; (в) Zn-La/ZSM-5-Al₂O₃; (г) Zn-Zr/ZSM-5-Al₂O₃

На дифрактограммах образцов Zn/ZSM-5-Al₂O₃, Zn-Ce/ZSM-5-Al₂O₃ и Zn-La/ZSM-5-Al₂O₃ наблюдается широкий диффузный максимум в области $2\theta \approx 20-30^\circ$, а также рефлексы, соответствующие алюмооксидной составляющей. Для образца Zn-Zr/ZSM-5-Al₂O₃ профиль отличается: на дифрактограмме фиксируются более выраженные рефлексы цеолитной фазы ZSM-5 и дополнительные пики, отнесенные к ZrO₂. Интенсивных рефлексов отдельных кристаллических фаз Zn-, Ce- и La-содержащих соединений на представленных дифрактограммах не выявлено.

Структурное состояние Zn-Me-модифицированных образцов дополнительно исследовали методом ИК-Фурье-спектроскопии. Спектры представлены на рисунке 3.

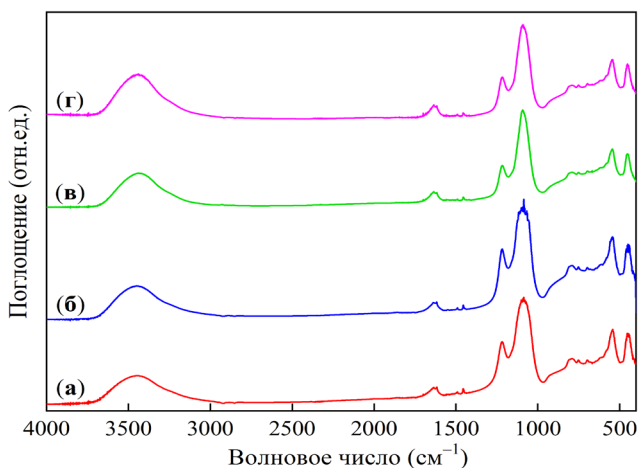


Рисунок 3 – ИК-спектры образцов Zn-Me/ZSM-5-Al₂O₃: (а) Zn/ZSM-5-Al₂O₃; (б) Zn-Ce/ZSM-5-Al₂O₃; (в) Zn-La/ZSM-5-Al₂O₃; (г) Zn-Zr/ZSM-5-Al₂O₃

Во всех исследованных образцах наблюдается характерный набор полос поглощения цеолитсодержащей алюмосиликатной матрицы. Широкая полоса в области $3600\text{--}3000\text{ см}^{-1}$ относится к валентным колебаниям ОН-групп и адсорбированной воды, полоса $\sim 1630\text{ см}^{-1}$ – к деформационным колебаниям адсорбированной воды. Наиболее интенсивная группа полос в области $1250\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ соответствует асимметричным валентным колебаниям связей Me–O–Me (Me = Si, Al), а полосы ~ 800 и 450 см^{-1} – симметричным валентным и деформационным колебаниям каркасных связей. Для всех образцов сохраняется полоса около 550 см^{-1} , связанная с колебаниями пятичленных колец структуры MFI.

Положение основных полос для Zn/ZSM-5- Al_2O_3 , Zn-Ce/ZSM-5- Al_2O_3 , Zn-La/ZSM-5- Al_2O_3 и Zn-Zr/ZSM-5- Al_2O_3 близко. Новых интенсивных полос, указывающих на образование значительного количества дополнительных соединений, в ИК-спектрах не выявлено.

Для определения природы кислотных центров Zn-Me/ZSM-5- Al_2O_3 -катализаторы исследовали методом ИК-спектроскопии адсорбированного пиридина. Спектры в области $1600\text{--}1350\text{ см}^{-1}$ представлены на рисунке 4.

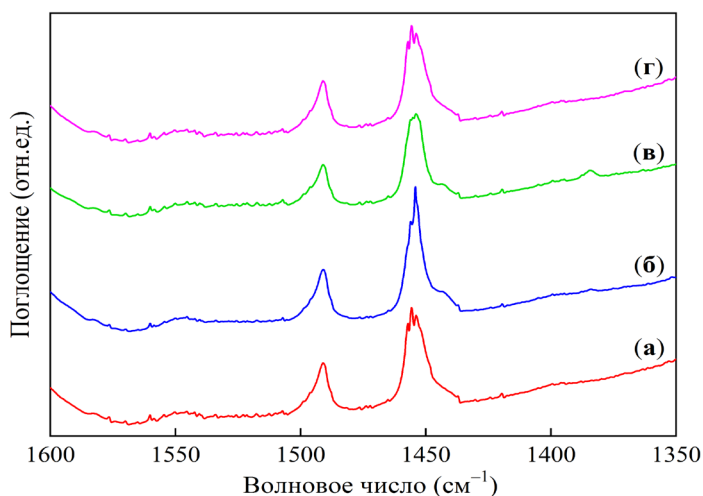


Рисунок 4 – ИК-спектры адсорбированного пиридина образцов Zn-Me/ZSM-5- Al_2O_3 :
(а) Zn/ZSM-5- Al_2O_3 ; (б) Zn-Ce/ZSM-5- Al_2O_3 ; (в) Zn-La/ZSM-5- Al_2O_3 ; (г) Zn-Zr/ZSM-5- Al_2O_3

Во всех исследованных образцах после адсорбции пиридина (рисунок 5.16) наблюдается интенсивная полоса в области $1450\text{--}1460\text{ см}^{-1}$, характерная для пиридина, координационно связанного с льюисовскими кислотными центрами. Полоса $\sim 1490\text{ см}^{-1}$ имеет смешанную природу и включает вклад пиридина, взаимодействующего как с бренstedовскими, так и с льюисовскими кислотными центрами. В области $1540\text{--}1550\text{ см}^{-1}$, характерной для пиридиновых ионов, образующихся на бренstedовских кислотных центрах, во всех спектрах регистрируется значительно менее интенсивное поглощение.

Интегральные характеристики полос адсорбированного пиридина приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Интегральные характеристики полос адсорбированного пиридина образцов Zn–Me/ZSM-5–Al₂O₃ и относительное соотношение бренстедовских и льюисовских кислотных центров

Образец	ν_L , см ⁻¹	S_L , отн.ед.	ν_B , см ⁻¹	S_B , отн.ед.	S_B/S_L	B/L
Zn/ZSM-5–Al ₂ O ₃	1454	13,02	1549	1,98	0,152	0,202
Zn–Ce/ZSM-5–Al ₂ O ₃	1454	16,30	1550	2,22	0,136	0,181
Zn–La/ZSM-5–Al ₂ O ₃	1455	13,17	1548	2,20	0,167	0,222
Zn–Zr/ZSM-5–Al ₂ O ₃	1455	14,61	1546	3,91	0,268	0,356

Примечание: ν_L – положение п.п. пиридина, связанного с ЛКЦ; ν_B – положение п.п. пиридина, связанного с БКЦ; S_L и S_B – величины площадей п.п. пиридина на ЛКЦ и БКЦ соответственно, B/L – отношение числа БКЦ к числу ЛКЦ с учетом коэффициентов экстинкции.

По данным таблицы, для всех Zn–Me-модифицированных образцов интегральная площадь полосы пиридина, связанного с ЛКЦ, превышает площадь полосы пиридиниевых ионов. Значения отношения B/L находятся в интервале 0,181–0,356; минимальное значение получено для Zn–Ce/ZSM-5, максимальное – для Zn–Zr/ZSM-5.

Каталитические свойства Zn–Me/ZSM-5–Al₂O₃-катализаторов оценивали в реакции алкилирования бензола этиленом. Результаты каталитических испытаний представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Каталитические свойства образцов Zn–Me/ZSM-5–Al₂O₃ в реакции алкилирования бензола этиленом

Образец	X , %	$S_{ЭБ}$, %	$Y_{ЭБ}$, %
Zn/ZSM-5–Al ₂ O ₃	61	72	44
Zn–Ce/ZSM-5–Al ₂ O ₃	57	80	46
Zn–La/ZSM-5–Al ₂ O ₃	66	75	50
Zn–Zr/ZSM-5–Al ₂ O ₃	75	64	48

Примечание: X – степень превращения этилена; $S_{ЭБ}$ – селективность по этилбензолу; $Y_{ЭБ}$ – выход этилбензола.

Все исследованные Zn–Me/ZSM-5–Al₂O₃-катализаторы проявляют активность в реакции алкилирования бензола этиленом. Конверсия этилена изменяется в пределах 57–75%, селективность по этилбензолу – в пределах 64–80%. Наименьшая конверсия этилена наблюдается для образца Zn–Ce/ZSM-5–Al₂O₃, тогда как максимальная конверсия достигается на Zn–Zr/ZSM-5–Al₂O₃. Напротив, максимальная селективность по этилбензолу характерна для Zn–Ce/ZSM-5–Al₂O₃, а наибольший выход этилбензола получен на Zn–La/ZSM-5–Al₂O₃. Для Zn–Zr/ZSM-5–Al₂O₃, несмотря на наиболее высокую конверсию этилена, селективность является минимальной в исследованной серии.

Обсуждение.

Полученные результаты показывают, что формирование ZSM-5 с алюмооксидным

связующим является не только технологической стадией получения механически прочных гранул, но и фактором, определяющим исходное кислотное состояние катализатора. Сравнение прокаленного Al_2O_3 и ZSM-5- Al_2O_3 -композиций показывает, что введение цеолитной фазы сопровождается изменением пористой структуры и прочностных характеристик. При этом наиболее важным является не абсолютное увеличение или уменьшение отдельного параметра, а формирование баланса между объемом пор и устойчивостью гранул. Выбранная формованная композиция 50% ZSM-5 + 50% Al_2O_3 может рассматриваться как компромиссная матрица, пригодная для нанесения металлических компонентов: она сохраняет развитую пористость и обладает достаточной прочностью для каталитических испытаний.

Данные ТПД NH_3 дополняют эту картину с точки зрения кислотных свойств формованных материалов. Профиль Al_2O_3 характеризуется широким сигналом десорбции с максимумами около 200 и 331 °C. Это указывает, что алюмооксидное связующее не является инертной фазой с точки зрения кислотных свойств и вносит свой вклад в адсорбцию аммиака. Однако характер кислотности Al_2O_3 отличается от цеолитсодержащих композиций: в последних появляется выраженный высокотемпературный вклад в области 444–468 °C, связанный с более сильным удерживанием аммиака. На рисунке 5 представлены количественные данные анализа профилей ТПД NH_3 .

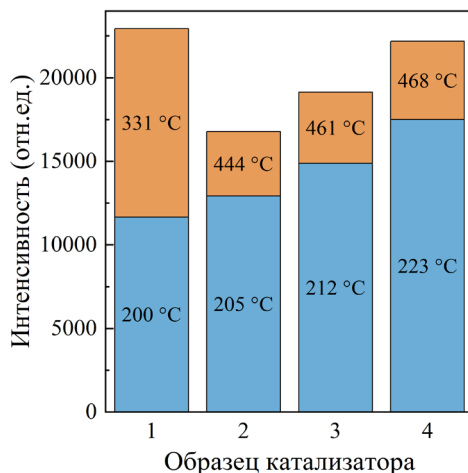


Рисунок 5 – Влияние содержания цеолита в системе ZSM-5- Al_2O_3 на содержание низко- и высокотемпературных кислотных центров по данным ТПД NH_3 : 1 – Al_2O_3 ; 2 – 50% ZSM-5 + 50% Al_2O_3 ; 3 – 70% ZSM-5 + 30% Al_2O_3 ; 4 – 80% ZSM-5 + 20% Al_2O_3

В ряду ZSM-5- Al_2O_3 -композиций увеличение содержания цеолита от 50 до 80% масс. сопровождается ростом суммарной площади сигнала десорбции (рисунок 5). При этом низкотемпературный максимум смещается от 205 до 223 °C, а высокотемпературный – от 444 до 468 °C. Следовательно, увеличение доли ZSM-5 влияет не только на количество кислотных центров, но и вызывает умеренное

повышение температуры десорбции аммиака, т.е. увеличивает их относительную силу. Тем не менее основной эффект проявляется в росте площади, тогда как положение максимумов меняется менее значительно.

РФА Zn–Me-модифицированных образцов показывает, что после пропитки и термообработки сохраняются признаки исходной цеолит-алюмооксидной матрицы. Для Zn/ZSM-5–Al₂O₃, Zn–Ce/ZSM-5–Al₂O₃ и Zn–La/ZSM-5–Al₂O₃ характерен широкий диффузный максимум в области 20–30°, что можно связать с вкладом слабо окристаллизованной алюмооксидной составляющей носителя. Отсутствие интенсивных рефлексов ZnO, CeO₂ и La-содержащих фаз указывает на то, что соответствующие компоненты находятся в высокодисперсном состоянии, присутствуют или распределены по структуре носителя без образования крупных кристаллических частиц.

Образец Zn–Zr/ZSM-5–Al₂O₃ заметно отличается от остальных по профилю дифрактограммы: для него фиксируются выраженные рефлексы ZSM-5 и дополнительные пики, отнесенные к ZrO₂. Вероятно, цирконийсодержащий модификатор в выбранных условиях легче формирует рентгенографически различимую оксидную фазу, тогда как Ce- и La-содержащие добавки в данной серии не дают интенсивных рефлексов. При этом наличие рефлексов ZrO₂ указывает на иной характер распределения второго модификатора после пропитки и прокаливания.

ИК-спектры исходных Zn–Me-модифицированных образцов подтверждают сохранение основных структурных признаков ZSM-5–Al₂O₃-композиции. Во всех спектрах сохраняются полосы, относимые к колебаниям алюмосиликатного каркаса, включая область асимметричных валентных колебаний Me–O–Me, полосы симметричных валентных и деформационных колебаний, а также полосу характерную для пятичленных колец структуры MFI. Это согласуется с данными РФА и показывает, что пропитка Zn, Zn–Ce, Zn–La и Zn–Zr в использованных условиях не сопровождается разрушением цеолитной составляющей.

ИК-спектры адсорбированного пиридина показывают, что во всех Zn–Me/ZSM-5–Al₂O₃-катализаторах преобладают льюисовские кислотные центры. Это проявляется в высокой интенсивности полосы 1450–1460 см^{–1} по сравнению с полосой 1540–1550 см^{–1}, соответствующей пиридиновым ионам на БКЦ. Такое соотношение кислотных центров является закономерным для формованных Zn-содержащих ZSM-5–Al₂O₃-систем, поскольку льюисовскую кислотность могут создавать сразу несколько компонентов: алюмооксидное связующее, внекаркасные алюминийевые центры, Zn²⁺/ZnOH⁺-содержащие центры и оксидные формы второго модификатора.

Сравнение значений В/Л показывает, что природа второго металлического компонента существенно влияет на распределение БКЦ и ЛКЦ. Для Zn/ZSM-5–Al₂O₃ отношение В/Л составляет 0,202. При введении Ce оно снижается до 0,181, при этом площадь льюисовской полосы является наибольшей в серии. Это указывает на преимущественное усиление льюисовской составляющей кислотности при введении церия. Для Zn–La/ZSM-5–Al₂O₃ значение В/Л равно

0,222, то есть близко к $\text{Zn/ZSM-5-Al}_2\text{O}_3$, что свидетельствует о более умеренном влиянии La на кислотный баланс.

Наиболее выраженное изменение наблюдается для $\text{Zn-Zr/ZSM-5-Al}_2\text{O}_3$: отношение В/Л возрастает до 0,356, а площадь полосы БКЦ почти вдвое превышает соответствующее значение для $\text{Zn/ZSM-5-Al}_2\text{O}_3$. С учетом данных РФА это может быть связано с особым состоянием цирконийсодержащей фазы и ее взаимодействием с цеолит-алюмооксидной матрицей. При этом следует отметить, что Zr не просто увеличивает общую кислотность, но и меняет относительный вклад бренстедовской составляющей. Таким образом, Zn-Ce и Zn-Zr образцы представляют два разных направления регулирования кислотной функции: Ce смещает систему в направлении более выраженной льюисовской кислотности, тогда как Zr повышает относительный вклад БКЦ.

В результате по величине отношения В/Л исследованные образцы располагаются в ряд:



Сопоставление данных ТПД NH_3 и ИК-спектроскопии адсорбированного пиридина позволяет разделить вклад двух стадий приготовления. Стадия формования определяет исходный кислотный профиль матрицы: соотношение ZSM-5 и Al_2O_3 меняет количество центров, удерживающих аммиак, и положение максимумов десорбции. Стадия металлического модифицирования влияет уже на природу доступных кислотных центров, прежде всего на соотношение бренстедовской и льюисовской кислотности. Поэтому итоговые свойства $\text{Zn-Me/ZSM-5-Al}_2\text{O}_3$ -катализаторов формируются последовательно: сначала через выбор состава формованной цеолит-алюмооксидной матрицы, затем через природу нанесенного металлического модификатора.

Сопоставление каталитических данных с результатами ИК-спектроскопии адсорбированного пиридина показывает, что изменение природы второго модификатора влияет не только на кислотные характеристики, но и на соотношение активности и селективности в реакции алкилирования бензола этиленом. Базовый образец $\text{Zn/ZSM-5-Al}_2\text{O}_3$ характеризуется конверсией этилена 61% и селективностью по этилбензолу 72%, что соответствует выходу этилбензола 44%. Введение Ce приводит к снижению конверсии этилена до 57%, однако одновременно повышает селективность до 80%. Такое поведение согласуется с данными ИКС пиридина: для $\text{Zn-Ce/ZSM-5-Al}_2\text{O}_3$ получено минимальное значение отношения В/Л и наибольшая площадь полосы ЛКЦ. Следовательно, усиление льюисовской составляющей при снижении вклада БКЦ, вероятно, ограничивает побочные реакции избыточного алкилирования и олигомеризации.

Для $\text{Zn-Zr/ZSM-5-Al}_2\text{O}_3$, напротив, наблюдается максимальная конверсия этилена (75%), но селективность снижается до 64%. Этот образец характеризуется максимальным значением В/Л, то есть наиболее высоким относительным вкладом бренстедовской кислотности. Повышение доли БКЦ, вероятно, способствует

более глубокой активации алкилирующего агента и росту конверсии, однако одновременно усиливает вклад побочных превращений, что приводит к снижению селективности.

Образец Zn–La/ZSM-5 занимает промежуточное положение по кислотным характеристикам и демонстрирует наиболее благоприятное сочетание конверсии и селективности: при конверсии этилена 66% селективность по этилбензолу составляет 75%. Таким образом, максимальный выход целевого продукта в данной серии достигается не на катализаторе с наибольшей конверсией и не на образце с максимальной селективностью, а на системе с более сбалансированным соотношением бренstedовских и льюисовских кислотных центров.

Таким образом, данные РФА, ИКС, ТПД NH_3 и ИКС адсорбированного пиридина согласованно показывают, что кислотные характеристики формованных ZSM-5– Al_2O_3 -катализаторов регулируются на двух уровнях. Формование задает текстурные и механические характеристики, а также общий кислотный профиль матрицы, а последующее модифицирование изменяет соотношение БКЦ и ЛКЦ без грубого разрушения цеолитного каркаса. При этом регулирование кислотной функции Zn/ZSM-5– Al_2O_3 введением второго металлического компонента позволяет изменять направление каталитического действия. Это подтверждает, что эффективность формованных Zn–Me/ZSM-5– Al_2O_3 -катализаторов алкилирования определяется не только суммарной кислотностью, но и балансом кислотных центров.

Заключение

В работе исследовано влияние стадий формования и последующего металлического модифицирования на структурные, текстурно-прочностные, кислотные и каталитические характеристики ZSM-5– Al_2O_3 -композиций, предназначенных для алкилирования ароматических углеводородов. На первом этапе рассмотрены формованные материалы на основе псевдобемита и ZSM-5 с различным содержанием цеолитной фазы. Показано, что введение ZSM-5 в алюмооксидную матрицу изменяет суммарный объем пор и прочностные характеристики гранул. Полученные данные подтверждают, что стадия формования определяет не только механические свойства катализатора, но и состояние его пористой структуры.

Методом ТПД аммиака установлено, что Al_2O_3 и ZSM-5– Al_2O_3 -композиции характеризуются различными профилями кислотности. Для Al_2O_3 наблюдается широкий сигнал десорбции с максимумами около 200 и 331 °C. Для цеолитсодержащих композиций наблюдаются низкотемпературные максимумы в области 205–223 °C и высокотемпературные вклады в области 444–468 °C. Увеличение содержания ZSM-5 от 50 до 80% масс. сопровождается ростом интенсивности и суммарной площади десорбционных сигналов при малом смещении температурных максимумов. Это показывает, что изменение состава формованной ZSM-5– Al_2O_3 -композиции влияет прежде всего на количество доступных кислотных центров.

На основе выбранной матрицы 50% ZSM-5 + 50% Al_2O_3 получена серия Zn–

Me-модифицированных катализаторов, содержащих Zn, Zn–Ce, Zn–La и Zn–Zr. По данным РФА и ИКС установлено, что введение металлических компонентов выбранным способом не приводит к грубому разрушению алюмосиликатного каркаса ZSM-5. Для образца Zn–Zr/ZSM-5–Al₂O₃ дополнительно выявлены рефлексы ZrO₂, что указывает на отличие состояния цирконийсодержащего модификатора от Ce- и La-содержащих добавок.

ИК-спектроскопия адсорбированного пиридина показала, что во всех Zn–Me/ZSM-5–Al₂O₃-катализаторах преобладают льюисовские кислотные центры. Значения В/Л находятся в интервале 0,18–0,36. Минимальное значение получено для Zn–Ce/ZSM-5–Al₂O₃, максимальное – для Zn–Zr/ZSM-5–Al₂O₃. Следовательно, природа второго модификатора существенно влияет на соотношение БКЦ и ЛКЦ; Ce усиливает относительный вклад льюисовской составляющей, La оказывает умеренное влияние, Zr повышает относительную долю бренстедовских центров.

Каталитические испытания в реакции алкилирования бензола этиленом показали, что все исследованные образцы проявляют активность в образовании этилбензола. Наиболее высокая селективность получена для Zn–Ce/ZSM-5–Al₂O₃, максимальная конверсия – для Zn–Zr/ZSM-5–Al₂O₃, а наибольший выход этилбензола – для Zn–La/ZSM-5–Al₂O₃. Таким образом, максимальный выход продукта достигается не при наибольшей конверсии или максимальной селективности, а при более сбалансированном соотношении БКЦ и ЛКЦ.

В целом установлено, что кислотные и каталитические свойства формованных Zn–Me/ZSM-5–Al₂O₃-катализаторов регулируются последовательно на двух стадиях: формование определяет структурно-прочностные характеристики и общий кислотный профиль матрицы, а металлическое модифицирование изменяет природу доступных кислотных центров. Полученные результаты подтверждают перспективность тонкого регулирования состава формованной цеолит-алюмооксидной основы и природы металлического модификатора при разработке катализаторов алкилирования ароматических углеводородов.

References

- Abilmagzhanov A.Z., Massenova A.T., Dosumova B.T., Zhumakanova A.S., Basheva Zh.T. (2009) Vliyaniye sootnosheniya SiO₂/Al₂O₃ v tseolite HZSM-5 na ego aktivnost v protsesse alkilirovaniya benzola etilenom [Effect of the SiO₂/Al₂O₃ ratio in HZSM-5 zeolite on its activity in benzene alkylation with ethylene], Izvestiya NAN RK. Seriya Khimicheskaya, 2:15-18 (in Russ.).
- Abilmagzhanov A.Z., Massenova A.T., Dosumova B.T., Zhumakanova A.S., Kasenova D.Sh., Basheva Zh.T., Rakhmetova K. (2009) Alkilirovanie benzola etanolom na bimetallicheskih tseolitsoderzhashchikh katalizatorakh [Benzene alkylation with ethanol over bimetallic zeolite-containing catalysts], Izvestiya NAN RK. Seriya Khimicheskaya, 6:69-72 (in Russ.).
- García-Sánchez J.T., Baldovino-Medrano V.G. (2023) Elements of the manufacture and properties of technical catalysts, Industrial & Engineering Chemistry Research, 62:7769-7838. DOI: 10.1021/acs.iecr.3c00369 (in Eng.).
- Geng R., Liu Y., Guo Y., Wang P., Dong M., Wang S., Wang J., Qin Z., Fan W. (2022) Structure evolution of Zn species on fresh, deactivated, and regenerated Zn/ZSM-5 catalysts in ethylene aromatization, ACS Catalysis, 12(23):14735-14747. DOI: 10.1021/acscatal.2c04074 (in Eng.).
- Han M., Xue Z., Ling L., Zhang R., Fan M., Wang B. (2021) Effect of Lewis/Brønsted acid sites in HZSM-5 zeolite on the selectivity of *para*-xylene during methylation of toluene with methanol, Molecular Catalysis, 509:111622. DOI: 10.1016/j.mcat.2021.111622 (in Eng.).

Lakiss L., Gilson J.-P., Valtchev V., Mintova S., Vicente A., Vimont A., Bedard R., Abdo S., Bricker J. (2020) Zeolites in a good shape: catalyst forming by extrusion modifies their performances, Microporous and Mesoporous Materials, 299:110114. DOI: 10.1016/j.micromeso.2020.110114 (in Eng.).

Lashchenko D.I., Kukushkin R.G., Danilova I.G., Nadeina K.A., Kazakov M.O., Cherepanova S.V., Gerasimov E.Y., Prosvirin I.P., Klimov O.V., Noskov A.S. (2025) Effect of the alumina binder content on the mechanical strength and the Si/Al ratio in the zeolite framework in the shaped γ - Al_2O_3 -ZSM-5 composites, Materials Today Chemistry, 46:102735. DOI: 10.1016/j.mtchem.2025.102735 (in Eng.).

Liu Y., Fu T., Guo Y., Wang R., Cao R., Li Z. (2025) Highly dispersed ZnZrO_x supported on silicalite-1 boost synergistic catalysis with HZSM-5 for benzene alkylation with CO_2/H_2 , Journal of Environmental Chemical Engineering, 13(3):116704. DOI: 10.1016/j.jece.2025.116704 (in Eng.).

Massenova A.T., Abilmagzhanov A.Z., Zhumakanova A.S., Basheva Zh.T., Rakhmetova K., Alkeeva G.S. (2010) Alkilirovanie naftalina spirtami na modifitsirovannykh tseolitsoderzhashchikh katalizatorakh [Naphthalene alkylation with alcohols over modified zeolite-containing catalysts], Izvestiya NAN RK. Seriya Khimicheskaya, 3:82-85 (in Russ.).

Massenova A., Torlopov I., Rakhmetova K., Sass A., Zhumakanova A., Malgazhdarova M., Abilmagzhanov A. (2026) Formulation of shaped ZSM-5/ Al_2O_3 composites: comparison of pseudoboehmite and nitrate-derived aluminum binders, Catalysts, 16(8):751. DOI: 10.3390/catal16080751 (in Eng.).

Nadirov N.K., Abilmagzhanov A.Z., Massenova A.T. (2009) Alkilirovanie benzola etanolom na modifitsirovannykh tseolitsoderzhashchikh katalizatorakh [Benzene alkylation with ethanol over modified zeolite-containing catalysts], Izvestiya NAN RK. Seriya Khimicheskaya, 3:11-15 (in Russ.).

Ni Y., Peng W., Sun A., Mo W., Hu J., Li T., Li G. (2010) High selective and stable performance of catalytic aromatization of alcohols and ethers over La/Zn/HZSM-5 catalysts, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 16(4):503-505. DOI: 10.1016/j.jiec.2010.03.011 (in Eng.).

Nikolopoulos N., Wickramasinghe A., Whiting G.T., Weckhuysen B.M. (2023) Alumina binder effects on the hydrothermal stability of shaped zeolite-based catalyst bodies, Catalysis Science & Technology, 13:862-873. DOI: 10.1039/D2CY01894B (in Eng.).

Pinilla-Herrero I., Borfecchia E., Cordero-Lanzac T., Mentzel U.V., Joensen F., Lomachenko K.A., Bordiga S., Olsbye U., Beato P., Svelle S. (2021) Finding the active species: The conversion of methanol to aromatics over Zn-ZSM-5-alumina shaped catalysts, Journal of Catalysis, 394:416-428. DOI: 10.1016/j.jcat.2020.10.024 (in Eng.).

Tanabe K. (1993) Katalizatory i kataliticheskie protsessy [Catalysts and catalytic processes], Moscow: Mir, 176 p. ISBN 5-03-002335-6 (in Russ.).

Wang X., Yin Y., Li H., Fan S., Lv J., Zhao T. (2024) The effect of Ce promotor on catalytic performance of Zn/ZSM-5 in coaromatization of methanol and *n*-hexane, Microporous and Mesoporous Materials, 375:113158. DOI: 10.1016/j.micromeso.2024.113158 (in Eng.).

Yang K., Zhang D., Zou M., Yu L., Huang S. (2021) The known and overlooked sides of zeolite-extrudate catalysts, ChemCatChem, 13:1414-1423. DOI: 10.1002/cctc.202001601 (in Eng.).

Yu B., Ding C., Wang J. et al. (2019) Dual effects of zinc species on active sites in bifunctional composite catalysts $\text{Zr}/\text{H}[\text{Zn}]/\text{ZSM-5}$ for alkylation of benzene with syngas, The Journal of Physical Chemistry C, 123:18993-19004. DOI: 10.1021/acs.jpcc.9b03990 (in Eng.).

Zhang Y., Liu Y., Li J. (2022) In situ synthesis of metal-containing ZSM-5 and its catalytic performance in aromatization of methanol, ACS Omega, 7(28):24241-24248. DOI: 10.1021/acsomega.2c01442 (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 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 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 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 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

<http://chemistry-technology.kz/index.php/en/arhiv>

ISSN 2518-1491 (Online), ISSN 2224-5286 (Print)

*Managing Editor: A.Shormakova
Editors: D.S. Alenov, T. Apendiev
Computer layout: G.D. Zhadyranova*

Signed for print: September 23, 2026

Format: 70×90 1/16. 24.0 printed sheets. Order No. 3