

**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 Жұрынулы, 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 Драметович, 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
Zhylykybek 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

© **Zhylykybek M.¹, Orazbekova R.S.^{1,2}, Yerkibaeva M.K.³, Aidarova A.O.⁴,
Baizhumanova T.S.^{1,2*}, 2026.**

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

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

³ Pavlodar Pedagogical University named after Alkey Margulan,
Pavlodar, Kazakhstan;

⁴ Taraz University named after M.H. Dulati, Taraz, Kazakhstan.

E-mail: tolkynbaizhumanova52@gmail.com

Co-Mg OXIDE CATALYSTS FOR DEEP OXIDATION OF METHANE: SYNTHESIS, STRUCTURE, AND CATALYTIC ACTIVITY

Zhylykybek Magira — Researcher, Research Institute of New Chemical Technologies and Materials, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: magira.zhylykybek.90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3837-3991>;

Orazbekova Raushan — Junior Researcher, Laboratory of Oxidative Catalysis, D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Doctoral Student, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

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

Yerkibaeva Meruert — candidate of chemical sciences, associate professor Higher school of natural science, Pavlodar Pedagogical University named after Alkey Margulan, Pavlodar, Kazakhstan,

e-mail: erkibaevameruert@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6586-2125>;

Aidarova Aitkul — Senior lecturer Taraz University named after M. H. Dulati, Taraz, Kazakhstan,

E-mail: ao.aidarova@dulaty.kz, 0000-0002-7163-900X;

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>.

Abstract. In this work, inexpensive and highly efficient Co-Mg oxide catalysts free of noble metals were synthesized for the deep oxidation of methane. The catalysts were prepared by thermal decomposition of magnesium and cobalt nitrates followed by calcination at various temperatures (300–1300°C). Samples with molar ratios Co:Mg = 2:1 and 1:1 were studied. X-ray diffraction was used to study the effect of calcination temperature on the phase composition, lattice parameters, and crystallite sizes of the spinel (MgCo₂O₄ or Co₃O₄) and cubic ((Co,Mg)O solid solution) phases. The spinel structure was shown to predominate up to 800°C, decomposing above 900°C into a

cubic solid solution. Catalytic activity was tested in the deep oxidation of methane ($\text{CH}_4:\text{O}_2:\text{Ar} = 5:30:65$ vol.%) and depended on the phase composition and calcination temperature; the best result, 96.6% methane conversion, was achieved for the $\text{Co}:\text{Mg} = 1:1$ sample calcined at 600°C . The activation energy increased linearly with calcination temperature, reflecting the transition from the active spinel phase to the less active solid solution. The high activity is explained by the $\text{Co}^{3+}/\text{Co}^{2+}$ redox couple and lattice oxygen mobility, i.e. the Mars-van Krevelen mechanism. Samples subjected to thermal shock at 1100°C partially recovered their phase composition after a repeated redox cycle, confirming high thermal stability. In addition, the specific surface area decreased from 14.9 to $2.8 \text{ m}^2/\text{g}$ with increasing calcination temperature and correlated directly with catalytic activity, while the activation energy ranged from 62.1 to 99.2 kJ/mol . The proposed catalysts can be applied in gas-purification technologies in the petrochemical industry and transport sector. The results indicate that Co-Mg oxide systems are promising, low-cost catalysts, offering an accessible alternative to noble-metal-based systems for purifying methane-containing exhaust gases.

Keywords: catalyst, deep methane oxidation, cobalt-magnesium oxide, spinel phase, thermal treatment

Funding: This work was supported by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under grant AP25794979.

For citations: 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. *Academic Scientific Journal of Chemistry*, 2026. — No. 3. — P. 154–168. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1491.393>.

© Жылқыбек М.¹, Оразбекова Р.С.^{1,2}, Еркибаева М.К.³, Айдарова А.О.⁴,
Байжұманова Т.С.^{1,2*}, 2026.

¹ Өл-Фараби атындағы қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан;

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

³ Өлкей Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті,
Павлодар, Қазақстан;

⁴ М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, Қазақстан.
E-mail: tolkynbaizhumanova52@gmail.com

МЕТАНДЫ ТЕРЕҢ ТОТЫҚТЫРУҒА АРНАЛҒАН Co-Mg ОКСИДТІ КАТАЛИЗАТОРЛАР: СИНТЕЗІ, ҚҰРЫЛЫМЫ ЖӘНЕ КАТАЛИТИКАЛЫҚ БЕЛСЕНДІЛІГІ

Жылқыбек Мағира — ғылыми қызметкер, Жаңа химиялық технологиялар және материалдар ғылыми-зерттеу институты, Өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: magira.zhylybek.90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3837-3991>;
Оразбекова Раушан — кіші ғылыми қызметкер, Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ

және электрохимия институтының тотығу катализі зертханасы; Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің докторанты, Алматы, Қазақстан,

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

Еркибаева Меруерт — химия ғылымдарының кандидаты, доцент, Әлкей Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университетінің Жаратылыстану жоғары мектебі, Павлодар, Қазақстан,

E-mail: erkibaevameruert@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6586-2125>;

Айдарова Айткүл — химия ғылымдарының магистрі, «Химия» кафедрасының аға оқытушысы, М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, Қазақстан,

E-mail: ao.aidarova@dulaty.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7163-900X>;

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

E-mail: tolkynbaizhumanova52@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9851-2642>.

Аннотация: Жұмыста метанды терең тотықтыруға арналған асыл металдарсыз, қолжетімді әрі жоғары тиімді Co–Mg оксидті катализаторлар синтезделді. Катализаторлар магний және кобальт нитраттарын термиялық ыдырату және кейін 300–1300 °C аралығындағы температураларда күйдіру арқылы алынды. Co:Mg мольдік қатынастары 2:1 және 1:1 болатын үлгілер зерттелді. Рентгендік дифракциялық талдау көмегімен күйдіру температурасының шпинельдік фазалардың (MgCo_2O_4 немесе Co_3O_4) және кубтық (Co,Mg)O қатты ерітіндісінің фазалық құрамына, кристалдық тор параметрлеріне және кристаллит өлшемдеріне әсері анықталды. 800 °C-қа дейін шпинельдік құрылымның басым болатыны, ал 900 °C-тан жоғары температурада оның ыдырап, кубтық қатты ерітінді түзетіні көрсетілді. Каталитикалық белсенділік $\text{CH}_4\text{:O}_2\text{:Ar} = 5\text{:}30\text{:}65$ көлемдік қатынасындағы қоспада метанды терең тотықтыру реакциясында бағаланды. Каталитикалық қасиеттер фазалық құрам мен күйдіру температурасына едәуір тәуелді болды. Ең жоғары нәтиже Co:Mg = 1:1 қатынасындағы 600 °C-та күйдірілген үлгі үшін алынып, метан конверсиясы 96,6%-ды құрады. Күйдіру температурасы жоғарылаған сайын активтену энергиясының артуы белсенді шпинельдік фазаның белсенділігі төмен қатты ерітінді фазасына айналуымен байланысты болды. Катализаторлардың жоғары белсенділігі $\text{Co}^{3+}/\text{Co}^{2+}$ тотығу-тотықсыздану жұбымен және торлық оттегінің қозғалғыштығымен, яғни Марс–ван Кревелен механизмімен түсіндіріледі. 1100 °C температуралық әсерге ұшыраған үлгілер кейінгі тотығу-тотықсыздану циклінен соң фазалық құрамын ішінара қалпына келтірді, бұл олардың елеулі термиялық тұрақтылығын көрсетеді. Күйдіру температурасының жоғарылауымен меншікті бет ауданы 14,9-дан 2,8 м²/г-ға дейін төмендеді және каталитикалық белсенділікпен тікелей байланыс көрсетті, ал активтену энергиясы 62,1–99,2 кДж/моль аралығында өзгерді. Нәтижелер Co–Mg оксидті жүйелердің метан бар газдарды тазартуға арналған тиімді әрі салыстырмалы түрде арзан катализаторлар ретінде перспективалы екенін көрсетті.

Түйін сөздер: катализатор, метанның терең тотығуы, кобальт-магний оксиді, шпинельдік фаза, термиялық өндеу

© Жылкыбек М.¹, Оразбекова Р.С.^{1,2}, Еркибаева М.К.³, Айдарова А.О.⁴,
Байжуманова Т.С.^{1,2*}, 2026.

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

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

³ Павлодарский педагогический университет имени Алкея Маргулана,
Павлодар, Казахстан;

⁴ Таразский университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан

*E-mail: tolkynbaizhumanova52@gmail.com

Co-Mg ОКСИДНЫЕ КАТАЛИЗАТОРЫ ДЛЯ ГЛУБОКОГО ОКИСЛЕНИЯ МЕТАНА: СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И КАТАЛИТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ

Жылкыбек Магира — научный сотрудник, Научно-исследовательский институт новых химических технологий и материалов, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

E-mail: magira.zhylykybek.90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3837-3991>;

Оразбекова Раушан — младший научный сотрудник лаборатории окислительного катализа, Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского; докторант Казахского национального университета имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

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

Еркибаева Меруерт — кандидат химических наук, доцент Высшей школы естествознания, Павлодарский педагогический университет имени Әлкея Марғұлана, Павлодар, Казахстан,

E-mail: erkibaevameruert@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6586-2125>;

Айдарова Айткуль — магистр химических наук, старший преподаватель кафедры «Химия», Таразский университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан,

E-mail: ao.aidarova@dulaty.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7163-900X>;

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: tolkynbaizhumanova52@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9851-2642>.

Аннотация: В работе синтезированы доступные и высокоэффективные Со–Мг оксидные катализаторы, не содержащие благородных металлов, для глубокого окисления метана. Катализаторы получали термическим разложением нитратов магния и кобальта с последующей прокалкой при температурах 300–1300 °С. Исследованы образцы с мольными соотношениями Со:Мг = 2:1 и 1:1. Методом рентгеновской дифракции изучено влияние температуры прокалки на фазовый состав, параметры кристаллической решётки и размеры кристаллитов шпинельных фаз (MgCo_2O_4 или Co_3O_4) и кубической фазы твёрдого раствора $(\text{Co}, \text{Mg})\text{O}$. Установлено, что до 800 °С преобладает шпинельная структура, тогда как выше 900 °С происходит её разложение с образованием кубического твёрдого раствора. Каталитическую активность исследовали в реакции глубокого окисления метана при составе газовой смеси $\text{CH}_4:\text{O}_2:\text{Ar} = 5:30:65$ об.%. Активность существенно зависела от фазового состава и температуры прокалки. Максимальная конверсия метана — 96,6% — была достигнута на образце с Со:Мг = 1:1, прокалённом

при 600 °С. Рост кажущейся энергии активации с увеличением температуры прокалики отражал переход более активной шпинельной фазы в менее активную фазу твёрдого раствора. Высокая активность катализаторов связана с наличием окислительно-восстановительной пары $\text{Co}^{3+}/\text{Co}^{2+}$ и подвижностью решёточного кислорода, что согласуется с механизмом Марса–ван Кревелена. Образцы, подвергнутые термическому воздействию при 1100 °С, после повторного окислительно-восстановительного цикла частично восстанавливали фазовый состав, что свидетельствует об их значительной термической устойчивости. При повышении температуры прокалики удельная поверхность уменьшалась с 14,9 до 2,8 м²/г и коррелировала с каталитической активностью, а кажущаяся энергия активации изменялась в диапазоне 62,1–99,2 кДж/моль. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности Co–Mg оксидных систем как относительно недорогих катализаторов для очистки метаносодержащих газовых выбросов и возможной альтернативы системам на основе благородных металлов.

Ключевые слова: катализатор, глубокое окисление метана, кобальт-магниевый оксид, шпинельная фаза, термическая обработка

Кіріспе. Қазіргі кезеңде атмосфералық ауаның ластануы мен климаттың өзгеруі жаһандық деңгейдегі өзекті экологиялық мәселелердің бірі болып отыр. Парниктік газдардың ішінде метан (CH_4) ерекше орын алады, себебі оның жаһандық жылыну потенциалы көмірқышқыл газымен салыстырғанда бірнеше есе жоғары. Метан атмосфераға мұнай-газ өндіру және тасымалдау процестерінде, көмір шахталарында, қатты тұрмыстық қалдықтардың ыдырауында, ауыл шаруашылығында, сондай-ақ автокөлік және энергетикалық қондырғылардың пайдаланылған газдары құрамында бөлінеді. Метанның атмосферада жинақталуы тек парниктік әсерді күшейтіп қана қоймай, сонымен қатар тропосфералық озон түзілуіне ықпал етеді, бұл адам денсаулығына және экожүйелерге кері әсерін тигізеді.

Метанның терең каталитикалық тотығуы ($\text{CH}_4 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) - оны зиянсыз өнімдерге айналдырудың ең тиімді әдістерінің бірі. Алайда метан молекуласындағы C–H байланысының жоғары беріктігі (≈ 435 кДж/моль) оның активтенуін қиындатады және жоғары температураны талап етеді. Осыған байланысты төмен температурада жоғары каталитикалық белсенділік пен тұрақтылық көрсететін жаңа тиімді катализаторларды әзірлеу қажеттілігі туындайды.

Әдебиеттерге шолу. Қазіргі уақытта метанды тотығу реакцияларында платина тобы металдарына негізделген катализаторлар - Pt, Pd және Rh - жоғары белсенділік танытады. Дегенмен, олардың қымбаттығы, сиректігі және күкіртті қосылыстарға сезімталдығы өнеркәсіптік ауқымда кеңінен қолданылуын шектейді. Осы тұрғыдан алғанда, өтпелі металдар оксидтері негізіндегі катализаторлар экономикалық және технологиялық жағынан тиімді балама болып табылады.

Әсіресе кобальт оксиді (Co_3O_4) шпинель құрылымды жүйелер метанның төмен температурадағы тотығу реакциясында жоғары белсенділік көрсететіні әдеби деректерде дәлелденген. $\text{Co}^{3+}/\text{Co}^{2+}$ тотығу-тотықсыздану жұбының болуы және

торлық оттегінің қозғалғыштығы реакцияның Марс-ван Кревелен механизмі бойынша жүруіне жағдай жасайды. Сонымен қатар, кобальт оксидінің беттік оттегі түрлері метан молекуласының алғашқы активтену сатысын жеңілдетеді. Алайда таза Co_3O_4 жүйелерінің термиялық тұрақтылығы мен құрылымдық беріктігін арттыру, сондай-ақ олардың текстуралық сипаттамаларын онтайландыру мақсатында модификациялау қажеттілігі туындайды. Осыған байланысты MgO енгізу арқылы Co-Mg аралас оксидті шпинель жүйелерін алу перспективалы бағыт болып табылады. Mg^{2+} катиондарының енгізілуі нәтижесінде кристалдық тор параметрлері өзгереді, металл иондарының таралуы реттеледі және оттегінің беткі формаларының концентрациясы артады. Бұл өз кезегінде катализатордың белсенді орталықтарының санын көбейтіп, метанның активтену энергиясын төмендетуге ықпал етеді.

Сондай-ақ метан - 100 жыл ішінде жаһандық жылыну бойынша шамамен 28% болатын қуатты парниктік газ және ол барлық парниктік газдардың жалпы радиациялық әсерінің шамамен 20% құрайды, барлық антропогендік көздерден энергия өндіру және тасымалдау метанның ең көп шығарындыларын шығаратын екі сектор болып табылады (Forster et al, 2007; Jiang et al, 2018). Мұнай өңдеу зауыттары немесе табиғи газ зауыттары және табиғи газ қозғалтқыштары сияқты қондырғылар әдетте осы молекуланың жоғары тұрақтылығына байланысты жойылуы қиын метанның төмен концентрациясын шығарады (Long et al, 2010). Бұл газдар әдетте төмен және орташа температурадағы үлкен ағындармен сипатталатындықтан, каталитикалық тотығу метан жанған кездегі шығатын газ шығарындыларын төмендетудің қолайлы әдісі болып табылады (Korakianitis et al, 2011).

Осыған орай соңғы жылдары өнеркәсіптік кәсіпорындар мен автокөліктердің газ шығарындыларын тазарту мәселесінің өзектілігі артуда, бұл ластанудың белгілі бір түрлерін азайтуға бағытталған әртүрлі технологиялардың дамуы мен әр тараптандырылуына әкеледі. Зиянды шығарындылардың түріне және ластану көздеріне байланысты тазарту әдістері сорбциялық, каталитикалық және мембраналық технологияларға, сондай-ақ олардың комбинацияларына негізделуі мүмкін (Larki et al, 2023). Қазіргі таңда тазарту және жою технологиялары арасында әртүрлі сұйық және қатты сорбенттер қолданысына негізделген, парниктік газдар шығарындыларын азайту мақсатындағы post-combustion көмірқышқыл газын ұстау технологиялары үлкен маңыздылыққа ие (Fu et al, 2022). Дегенмен бұл технологияларды жылу құрылғыларының нақты түтін газдарында қолдану CO , NO_x , SO_2 және қалдық CH_x (Zhang et al, 2009) сияқты қоспалар әсерінен болатын сорбенттердің жылдам дезактивацияланатынын көрсетті. Сол себепті газдарды нәтижесінде CO_2 -ні ұстайтын каталитикалық әдістермен алдын-ала мұқият тазартуды қамтитын аралас технологияларды қолдану шығарындыларды азайту әдістерін дамытудың өзекті бағыттарының бірі болып табылады (Majchrzak-Kucęba et al, 2021).

Осыған байланысты газды тазартудың тиімді, тұрақты және үнемді катализаторларын дайындау, атап айтқанда CO және қалдық көмірсутектерді

жағу өте өзекті болып табылады. Ірі өнеркәсіптік және урбандалған аймақтарда, соның ішінде Алматы қаласында атмосфералық ауаның сапасы соңғы жылдары аса өзекті экологиялық мәселеге айналды. IQAir халықаралық ұйымының 2024 жылғы деректері бойынша Алматы қаласы ауаның ластану деңгейі жоғары ірі қалалардың қатарына кіреді, бұл қалада көлік пен өнеркәсіп кәсіпорындарынан бөлінетін метан мен басқа да көмірсутекті газдардың үлесі айтарлықтай екенін көрсетеді. Осындай жағдайда қалдық көмірсутектер мен метанды каталитикалық әдіспен зиянсыз өнімдерге дейін тотықтыру - атмосфералық ауаның сапасын жақсартудың перспективалы әрі экономикалық тұрғыдан тиімді жолдарының бірі болып саналады.

Әдебиеттік деректерге сәйкес, оксидті жүйелердегі метан мен басқа да көмірсутектердің терең каталитикалық тотығуы көбінесе Марс-ван Кревелен механизмі бойынша жүреді, бұл жағдайда реакцияда торлы оттегі тікелей қатысады, ал катализатордың беткі қабатындағы оттегі вакансиялары газ фазасындағы оттегімен қайта толтырылады. Осыған байланысты катализатордың белсенділігі оның тотығу-тотықсыздану қабілетімен және торлы оттегінің қозғалғыштығымен тығыз байланысты болады. Шпинель тәрізді оксидтердің жалпы формуласы AB_2O_4 түрінде беріледі, мұндағы А позициясында әдетте Mg^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} сияқты екі валентті катиондар, ал В позициясында Co^{3+} , Mn^{3+} , Fe^{3+} , Al^{3+} сияқты үш валентті катиондар орналасады, мұндай құрылымдар жоғары каталитикалық және электрлік сипаттамалармен ерекшеленеді.

Асыл металдар негізінде синтезделген катализаторлардың (Pd, Pt, Au) метанды тотықтырудағы белсенділігі әдебиетте жақсы зерттелген: мысалы, палладиймен қоспаланған үлгілер $500^{\circ}C$ температурада 90%-дан астам конверсия көрсетеді, алайда мұндай катализаторлардың құны жоғары, ал ресурстары шектеулі болып қалады. Осыған байланысты соңғы жылдары зерттеушілердің назары негізінен өтпелі металдар оксидтеріне, оның ішінде кобальт оксидіне негізделген жүйелерге бағытталуда.

Кобальт оксидінің каталитикалық белсенділігін арттырудың кеңінен қолданылатын тәсілдерінің бірі - оны кеуекті тасымалдағыш беткейінде тарату арқылы белсенді бетінің көлемін ұлғайту (мысалы, Co_3O_4/Al_2O_3 жүйелері), алайда мұндай жүйелерде жоғары температурада кобальт бөлшектерінің тасымалдағышпен әрекеттесуі және агломерациялануы катализатордың тұрақтылығын төмендетуі мүмкін. Осы тұрғыдан алғанда, магнийді модификатор ретінде пайдалану катализатордың термиялық тұрақтылығын арттырып, бөлшектердің бірігуі (агломерация) процесін тежейтін тиімді әдіс болып саналады, себебі Mg^{2+} иондары Co-Mg аралас оксидінің торына енгенде фазалық ауысу температурасын жоғарылатады және меншікті беттік ауданның сақталуына ықпал етеді.

Осылайша, жоғарыда келтірілген әдеби деректерге сүйене отырып, Co-Mg оксидті жүйелерін метанды терең каталитикалық тотықтыруға арналған асыл металдарсыз, арзан әрі тиімді катализаторлар ретінде жан-жақты зерттеу өзекті ғылыми-практикалық мәселе болып табылады.

Материалдар және негізгі әдістер

Зерттеу жүргізу барысында катализаторлар термиялық өңдеу әдісімен дайындалды. Дайындалған үлгілердің құрамында әр түрлі мөлшерде металл нитраттары бар катализаторлардың сериясы дайындалды. Магний-кобальт оксидті катализаторлары нитрат тұздарының термиялық ыдырауы арқылы синтезделді. Бастапқы реагенттер ретінде магний нитраты ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 99%, Sigma–Aldrich) және кобальт нитраты ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\geq 98\%$, Sigma-Aldrich) пайдаланылды. Бұл заттар берілген Co:Mg мольдік қатынасында дистилденген суда ерітілді. Алынған ерітінді магниттік араластырғышта үздіксіз араластырыла отырып, 100-ден 180°C-қа дейін біртіндеп қыздырылып, 8 сағат бойы буландырылды. Судың негізгі бөлігі алынғаннан кейін пайда болған құрғақ өнім муфельді пешке салынып, 275°C температурада 15 сағат бойы термоөңдеуден өтті. Алынған қатты қалдық мұқият ұнтақталып, әрі қарай әртүрлі температурада яғни 300, 400, 550, 650, 700, 750, 800, 900, 1000, 1100, 1300°C-тарда термиялық өңделді. Термоөңдеу муфель пешінде 10°/мин жылдамдықпен қыздырылып, белгіленген температурада 1 сағат бойы ұсталды. Процестің соңында үлгілер пештен алынып, ауада бөлме температурасына дейін салқындатылды (quenching әдісі). Жұмыста стандартты Co:Mg = 2:1 қатынасы қолданылды, осындай құрамдағы үлгілер Co-Mg(T) деп белгіленді, мұнда T - термоөңдеу температурасы. Co:Mg = 1:1 қатынасындағы үлгілер Co(1)-Mg(1)(T) ретінде белгіленді.

Алынған дифракциялық деректер Д.В. Сокольский атындағы жанармай, катализ және электрохимия институтында дифрактометрдегі рентгендік дифракция әдісімен ДРОН-4-0.7 (Ресей) құрылғысында алынды. Рентгенофазалық талдау (РФТ) шарттары: $\text{CoK}\alpha$ сәулелену, $2\theta = 10 - 90^\circ$ бұрыштарының аралығында, ұнтақ әдісімен жүргізілді.

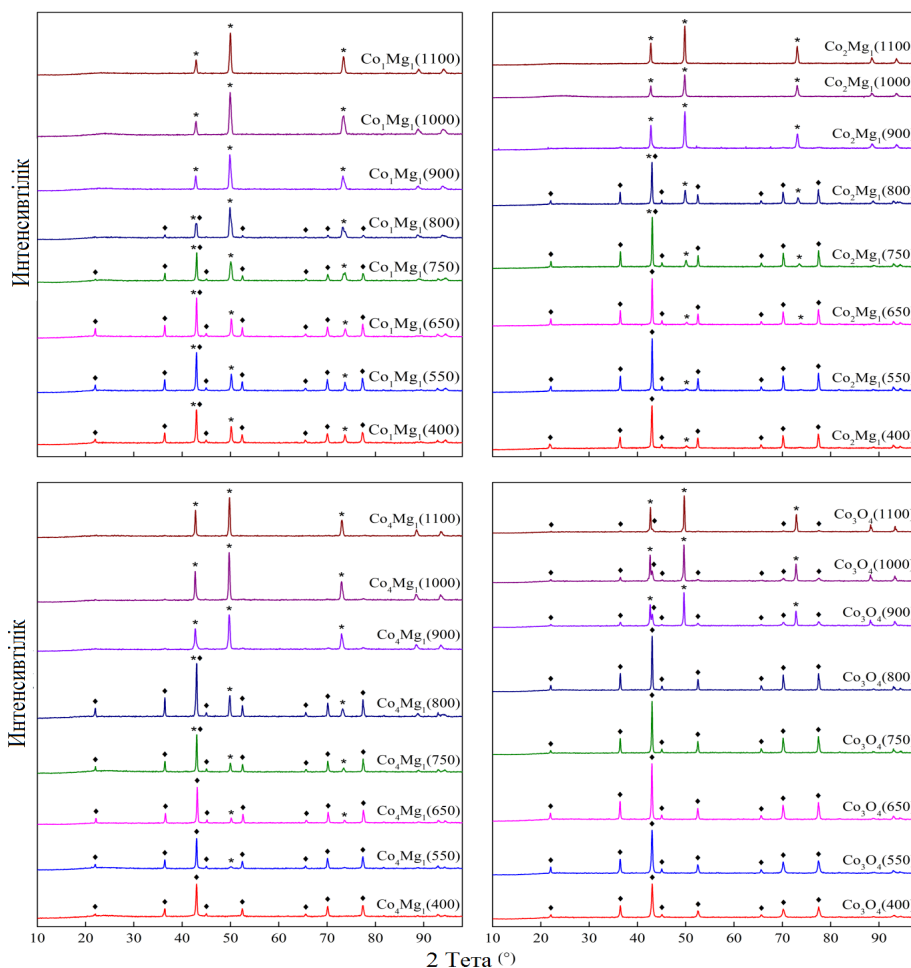
Катализаторлардың меншікті беттік ауданы GAPP-V Sorb 2800 Surfer (Thermo Fisher Scientific) газ-адсорбциялық анализаторында, азоттың төмен температуралы адсорбциясы әдісімен анықталды.

Метанның терең тотығу үрдісінде катализаторлардың белсенділігін сынау бойынша жасалынған тәжірибелер ағынды-катализдік қондырғыда зерттелді.

Ағынды катализдік қондырғы АКҚ-1 химиялық зертхана жағдайында әртүрлі гетерогенді катализдік процестерді жүзеге асыруға арналған. Бұл қондырғы метанды терең тотықтыру реакциясында катализаторлардың белсенділігін зерттеу мақсатында біз ұсынған сызба негізінде құрастырылды. АКҚ-1 үш негізгі бөлімнен тұрады: ағынды типтегі катализдік кварц реакторы, бастапқы газ қоспасын дайындау жүйесі және реакция өнімдерін талдауға арналған хроматографиялық жүйе. Метанның терең тотығуы бойынша тәжірибелер катализатордың стационарлық қабаты бар құбырлы кварц реакторында, атмосфералық қысымда жүргізілді. Катализатор реактордың орталық аймағына орналастырылды, ал кварц катализатор қабатының астыңғы және үстіңгі бөліктеріне бекітілді. Каталитикалық реакциялар 300-750°C аралығында, құрамында 5% CH_4 және 30% O_2 бар газ қоспасын пайдаланып жасалды, қалған бөлігі Ag. Катализатордың жүктемесі 1 cm^3 болғанда газ қоспасының шығыны 300 мл/мин құрады.

Хроматографиялық талдау кезінде, бастапқы газ қоспа мен реакция өнімдерінің талдауы «ХРОМОС ГХ-1000» хроматографы және Agilent technologies 6890N (АҚШ) құрылғысын қолданып, «Хромос» бағдарламасы арқылы талдау жүргізілді.

Нәтижелер. Синтезделген Co-Mg оксиді катализаторлардың яғни Co_1Mg_1 , Co_2Mg_1 , Co_4Mg_1 және Co_3O_4 үлгілердің фазалық құрамы мен термиялық өндеу температурасының өзгеруі кезіндегі рентгендік фазалық талдау нәтижелері 1-суретте келтірілген.



Сурет 1 — Әртүрлі температурада күйдірілген Co және Mg қатынасы әртүрлі үлгілердің дифрактограммалары
(◆—шпинель MgCo_2O_4 немесе Co_3O_4 , * - $(\text{Co}, \text{Mg})\text{O}$)

Дифрактограммаларда (1-сурет) Co_3O_4 (PDF 42-1467) немесе MgCo_2O_4 (PDF 2-1073, 81-671) шпинель фазаларына және MgO (PDF 45-946) және CoO (PDF 48-1719) текше (rocksalt) фазаларына немесе олардың қатты ерітіндісіне тән д.м. байқалады (Massenova et al, 2020; Zamudio et al, 2011; Veselov et al, 2023).

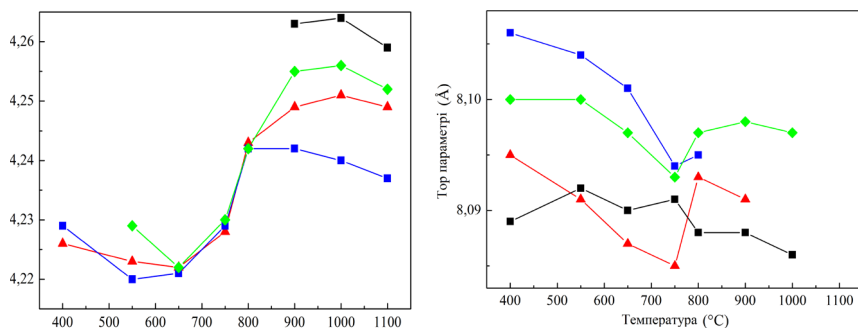
Барлық үлгілер үшін Co:Mg қатынасына қарамастан, шпинель фазаларының рефлекстері күйдіру температураларының төмен температуралық диапазонында (400-800°C) байқалады. Осы температуралық аралықта Co_3O_4 негізіндегі үлгілер үшін басқа фазалар байқалмайды, ал құрамында магний бар үлгілер қарқынды д.м. MgCo_2O_4 немесе Co_3O_4 шпинельдерінен басқа, термиялық өндеу температурасы жоғарылаған сайын қарқындылығы біртіндеп өсетін қатты ерітіндінің (Co, Mg)O кубтық фазалық рефлекстер жиынтығының болуымен сипатталады.

Co-Mg-шпинель фазасының термиялық ыдырауына сәйкес келетін 800-900°C-тан асатын жоғары температуралы аймақта (Zamudio et al, 2011; Robin et al, 1955) үлгілердің дифрактограммаларында негізінен д.м. байқалады, (Co, Mg)O қатты ерітінді, ал Co_3O_4 үлгілері Рентгендік флуоресценттік талдау мәліметтері бойынша CoO және Co_3O_4 фазаларын қамтиды. Текше фазасының беттік бөлшектерінің (species) жылдам қайта тотығуынан туындаған бұл құбылыс (Zamudio et al, 2011; Busca et al, 1990), әсіресе таза Co_3O_4 жағдайында айқын көрінеді және Co фазасының қайта тотығуы қатты ерітіндіге (Co, Mg)O қарағанда оңай жүретінін көрсетеді.

1-кестеде және 2-суретте көрсетілген шпинельдік және кубтық фазалардың тор параметрлерінің орташа мәндері, сәйкес д.м. орналасуларынан есептелген.

Кесте 1 — Өртүрлі температурада күйдірілген үлгілердің Co-Mg фазалық торларының параметрлері

Үлгі	Тор параметрі, Å			
	Co_1Mg_1	Co_2Mg_1	Co_4Mg_1	Co_3O_4
Co-Mg (400)	8,106 / 4,229	8,095 / 4,226	8,100 / –	8,089 / –
Co-Mg (550)	8,104 / 4,220	8,091 / 4,223	8,100 / 4,229	8,092 / –
Co-Mg (650)	8,101 / 4,221	8,087 / 4,222	8,097 / 4,222	8,090 / –
Co-Mg (750)	8,094 / 4,229	8,085 / 4,228	8,093 / 4,230	8,091 / –
Co-Mg (800)	8,095 / 4,242	8,093 / 4,243	8,097 / 4,242	8,088 / –
Co-Mg (900)	– / 4,242	8,091 / 4,249	8,098 / 4,255	8,088 / 4,263
Co-Mg (1000)	– / 4,240	– / 4,251	8,097 / 4,256	8,086 / 4,264
Co-Mg (1100)	– / 4,237	– / 4,249	– / 4,252	8,076 / 4,259



Сурет 2 — Өртүрлі температурадағы Co-Mg үлгілерінің шпинель торының (сол жақта) және текше фазасының (оң жақта) тор параметрлерінің орташа шамаларының тәуелділігі:

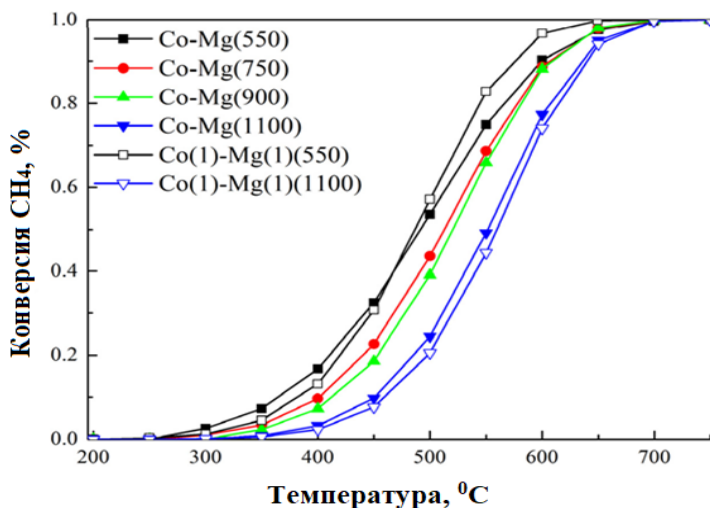
— Co_1Mg_1 , — Co_2Mg_1 , — Co_4Mg_1 , — Co_3O_4

Әртүрлі Co:Mg қатынасы үшін шпинель мен текше фазалық тор параметрлерінің температураға тәуелділігі ұқсас сипатқа ие. Осылай, төмен температуралы аймақтағы Co_3O_4 тор параметрінің шамасы шамамен тұрақты және теориялық мәннен сәл жоғары 8,084 Å, бұл оның торында ақаулар мен суперстехиометриялық оттегінің мүмкін болуына байланысты, (Casas-Cabanas et al, 2009; Raveau et al, 2012). Қыздыру температурасы одан әрі жоғарылаған сайын бұл мән төмендейді және теориялық мәнге ұмтылады.

Төмен температуралы аймақтағы әртүрлі құрамдағы Co-Mg шпинельдері жағдайында тор параметрінің мәні термиялық өңдеу температурасының жоғарылауымен біртіндеп төмендейді, бірақ 750-800°C температурада ол күрт артады және егер жоғары температуралы аймақтағы шпинель фазасы байқалуын жалғастырса, шамамен тұрақты мәнді сақтайды (2 сурет). Стехиометриялық кобальт-магний шпинелі (Co_2Mg_1) тор параметрлерінің шамаларының кең таралуымен сипатталады (Syeda et al, 2018; Krezhov et al, 1992), бұл әртүрлі жұмыстардағы шпинель инверсиясының әртүрлі дәрежесімен байланысты. Біздің мәліметтеріміз бойынша Co_2Mg_1 сериясының төмен температуралы үлгілері орташа есеппен 8,089 Å тор параметріне ие болды, бұл нитраттардың ыдырауынан алынған шпинель инверсиясының аз дәрежесі туралы айтуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, Co_1Mg_1 және Co_4Mg_1 серияларының стехиометриялық емес үлгілері олардың өзгеруінің кальцинация температурасына сапалық тәуелділігін сақтай отырып, тор параметрлерінің жоғары мәндерімен (сәйкесінше 8,100 және 8,097 Å) сипатталады. Бұл құбылыс, болжам бойынша, алынған шпинельдердің стехиометриялық емес табиғатымен түсіндіріледі, бұл тор көлемінің ұлғаюына әкеледі, сондай-ақ, осы сериядағы үлгілерде шпинель фазаларының ішінара инверсиясымен байланысты болуы мүмкін.

3-суретте Co-Mg қатынасы 2:1 және 1:1 болатын, әртүрлі температурада (550, 750, 900 және 1100°C) күйдірілген катализатор үлгілерінің метанның терең тотығу реакциясындағы каталитикалық белсенділігі салыстырмалы түрде көрсетілген. Үрдіс 200-750°C аралығында сынақтан өткізілді, бастапқы реакциялық қоспа 5% CH_4 - 30% O_2 - 64% Ar құрамында болды. Зерттеу нәтижелері бойынша барлық үлгілер үшін 750°C температурада метан конверсиясы 100%-ға дейін жетті, яғни катализаторлардың құрамы мен дайындалу температурасына қарамастан, жоғары температурада толық тотығу процесі жүзеге асатыны анықталды.

Алайда төменгі және орта температура аралығында (350-650°C) катализаторлардың белсенділігінде айтарлықтай айырмашылықтар байқалды. Ең жоғары белсенділікті Co-Mg(550) және Co(1)-Mg(1)(550) үлгілері көрсетті - бұл катализаторлар төменгі температурада да реакцияны бастай алатын қабілетімен ерекшеленді. Атап айтқанда, 600°C температурада Co-Mg(550) үлгісінің метан конверсиясы 90,6%-ға жетсе, Co(1)-Mg(1)(550) үлгісі одан да жоғары нәтиже көрсетіп, шамамен конверсия 93-95% көрсетті.



Сурет 3 — Өртүрлі температурада дайындалған Co-Mg катализаторларының метанның терең тотығу реакциясындағы белсенділігі

Ал 900°C және 1100°C-та күйдірілген үлгілер (Co-Mg(900), Co-Mg(1100), Co(1)-Mg(1)(1100)) салыстырмалы түрде төмен белсенділік көрсетті. Осы қисықтардың температуралық ығысуы жоғары температура жаққа қарай байқалады, яғни бірдей конверсия деңгейіне жету үшін оларға жоғарырақ температура қажет болды. Бұл нәтиже катализаторды дайындау (күйдіру) температурасының артуы белсенді фазаның меншікті бетінің кемуіне және, тиісінше, каталитикалық белсенділіктің төмендеуіне әкелетінін көрсетеді.

Осылайша, зерттелген катализаторлар арасында 550°C-та дайындалған үлгілер (әсіресе Co(1)-Mg(1)(550)) метанның терең тотығу реакциясында ең жоғары белсенділікке ие болды, бұл оларды төмен температуралық каталитикалық тотығу процестері үшін перспективалы материал ретінде қарастыруға негіз береді.

Катализаторлардың метанды терең тотықтыру реакциясындағы белсенділігін сандық сипаттау мақсатында әр үлгі үшін реакцияның активтену энергиясы (E_a), меншікті беттік ауданы ($S_{мен}$) және 50% конверсияға сәйкес келетін температура ($T_{50\%}$) есептелді (2-кесте).

Кесте 2 — Синтезделген катализатор үлгілерінің сипаттамалары

Үлгі	$S_{мен}$, м ² /г	$T_{50\%}$, °C	E_a , кДж/моль
Co-Mg (550)	9,6	492	62,1
Co-Mg (750)	7,7	513	74,9
Co-Mg (900)	3,8	521	81,8
Co-Mg (1100)	2,2	551	93,6
Co(1)-Mg(1) (550)	14,9	488	77,6
Co(1)-Mg(1) (750)	6,9	527	85,5
Co(1)-Mg(1) (900)	3,4	532	91,7
Co(1)-Mg(1) (1100)	2,8	560	99,2

Кесте деректеріне сәйкес, термиялық өңдеу температурасының жоғарылауымен активтену энергиясының шамасы сызықтық түрде өседі: 550°C-та дайындалған Co(1)-Mg(1) үлгісі үшін $E_a = 77,6$ кДж/моль болса, 1100°C-та күйдірілген үлгіде бұл көрсеткіш 99,2 кДж/моль-ге дейін жоғарылайды. Мұндай тәуелділік шпинель фазасының жоғары белсенді құрылымнан термиялық тұрғыдан анағұрлым тұрақты, бірақ каталитикалық белсенділігі төмен (Co,Mg)O қатты ерітіндісіне ауысуымен байланысты.

Алынған мәліметтер әдеби деректермен салыстырылды. Таза Co_3O_4 үшін метанның толық тотығу реакциясының активтену энергиясы, әдетте, 50-70 кДж/моль аралығында жатады, ал кобальт мөлшері көп жүйелерде (Co:Mg > 1:1) бұл көрсеткіш, стехиометриялық MgCo_2O_4 шпинелінен басқа жағдайларда, 100 кДж/моль-ден аспайды. Осы жұмыста алынған нәтижелер (62,1-99,2 кДж/моль аралығы) жалпы алғанда осы заңдылыққа сәйкес келеді.

Кестеден көрінетіндей, катализаторлардың меншікті беттік ауданы термиялық өңдеу температурасына кері тәуелді: Co(1)-Mg(1) сериясында 550°C-тан 1100°C-қа дейін $S_{\text{мен}}$ 14,9 м²/г-нан 2,8 м²/г-ға дейін төмендейді. Салыстырмалы төмен температурада (550-750°C) өңделген үлгілер дамыған меншікті бетін сақтайды, бұл олардың каталитикалық тұрғыдан анағұрлым қолайлы, энергетикалық жағынан белсенді бетке ие болуын қамтамасыз етеді және төмен $T_{50\%}$ мәндерімен (488-513°C) расталады.

Осылайша, зерттелген Co-Mg оксидті катализаторлар үшін меншікті беттік аудан, $T_{50\%}$ және реакцияның активтену энергиясы арасында тұрақты өзара байланыс орнатылды: төмен температурада (550°C) қалыптасатын шпинельдік фаза дамыған беткі ауданымен, төмен $T_{50\%}$ мәнімен және төмен активтену энергиясымен сипатталады, ал жоғары температурада түзілетін қатты ерітінді фазасы керісінше, каталитикалық тұрғыдан анағұрлым белсенді емес болып табылады.

Қорытынды. Есептеу нәтижелері көрсеткендей, шпинель мен текше фазаларының бөлшектерінің орташа өлшемдері, олардың тор параметрлері сияқты, Co:Mg қатынасына тәуелділігі аз. Төмен температурада шпинель фазасының кристаллиттері жағдайында олардың кристаллдылығының жоғарылауымен байланысты бөлшектердің біртіндеп кеңеюі байқалады, ал 900°C температурада шпинель бөлшектерінің өлшемдері шпинельден қатты ерітіндінің пайда болуына байланысты күрт төмендейді, жоғары температуралы аймақтағы шпинель фазасының шағын өлшемдері жылдам салқындату кезінде қайта тотыққан беткі бөлшектерге жатады. Кубтық фазалық бөлшектер ыдырау температурасына дейін шамамен тұрақты өлшемдерді сақтайды, мұнда қатты ерітіндінің кубтық фазасының құрамының өзгеруіне байланысты олардың төмендеуі орын алады, ал жоғары температурада бөлшектердің агломерациясынан туындаған өсу пайда болады.

Зерттеу нәтижелерін қорытындылай отырып, келесі негізгі тұжырымдар жасауға болады:

1) Co:Mg = 2:1 және 1:1 мольдік қатынастарындағы оксидті катализаторлар

термиялық өңдеу әдісімен сәтті синтезделді, олардың құрылымдық және каталитикалық сипаттамалары кешенді физика-химиялық әдістермен расталды;

2) термиялық өңдеу температурасының жоғарылауы MgCo_2O_4 шпинелі фазасынан 650-1000°C аралығында (Co,Mg)O қатты ерітіндісіне фазалық ауысуға алып келеді, бұл процесс барлық зерттелген Co:Mg қатынастары үшін тән заңдылық болып табылады;

3) синтезделген катализаторлардың метанның терең тотығу реакциясындағы белсенділігі олардың фазалық құрамы мен термиялық өңдеу температурасына тікелей тәуелді екені, реакцияның активтену энергиясы термоөңдеу температурасы артқан сайын 62,1 кДж/моль-ден 99,2 кДж/моль-ге дейін сызықты түрде өсетіні тәжірибелі түрде дәлелденді.

Алынған нәтижелердің теориялық маңыздылығы метанды терең тотықтыру процесінің механизмін терең түсінуге, ал практикалық маңыздылығы құрамында платина тобы металдары (Pt, Pd, Rh) жоқ, қолжетімді шикізат негізінде дайындалатын арзан әрі тиімді катализаторларды өнеркәсіптік ауқымда қолдануға негіз болатындығында. Ұсынылған Co-Mg оксидті катализаторлар мұнай-химия өнеркәсібіндегі және көлік секторындағы газ шығарындыларын тазарту технологияларын жетілдіруге, сондай-ақ экологиялық қауіпсіз, ресурс үнемдейтін технологияларды дамытуға қосымша үлес қосады.

References

- Forster P., Ramaswamy V., Solomon S., Qin D., Manning M., Marquis M., Averyt K., Tignor M.M.B., Miller H.L., Chen Z.L. (2007). *Climate Change: Working Group I: The Physical Science Basis*. Cambridge Univ. Press, New York. — 234 p. (in Eng.).
- Jiang X., Mira D., Cluff D.L. (2018). The combustion mitigation of methane as a non-CO₂ greenhouse gas. *Prog. Energy Combust. Sci.* — Vol. 66. — P. 176–199. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.06.002> (in Eng.).
- Long E., Zhang X., Li Y., Liu Z., Wang Y., Gong M., Chen Y.J. (2010). *J. Nat. Gas Chem.* — Vol. 19. — P. 134-138. (in Eng.).
- Korakianitis T., Namasivayam A.M., Crookes R.J. (2011). *Prog. Energy Combust. Sci.* — Vol. 37. — P. 89-112. (in Eng.).
- Larki I., Zahedi A., Asadi M., Forootan M.M., Farajollahi M., Ahmadi R., Ahmadi A. (2023). Mitigation approaches and techniques for combustion power plants flue gas emissions: A comprehensive review. *Sci. Total Environ.* — Vol. 903. — P. 166108. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166108> (in Eng.).
- Fu L., Ren Z., Si W., Ma Q., Huang W., Liao K., Huang Z., Wang Y., Li J., Xu P. (2022). Research progress on CO₂ capture and utilization technology. *Journal of CO₂ Utilization.* — Vol. 66. — P. 102260. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102260> (in Eng.).
- Zhang J., Xiao P., Li G., Webley P.A. (2009). Effect of flue gas impurities on CO₂ capture performance from flue gas at coal-fired power stations by vacuum swing adsorption. *Energy Procedia.* — Vol. 1. — P. 1115-1122. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.147> (in Eng.).
- Majchrzak-Kuceba I., Wawrzyńczak D., Zdeb J., Smółka W., Zajchowski A. (2021). Treatment of flue gas in a CO₂ capture pilot plant for a commercial CFB boiler. *Energies.* — Vol. 14. — Issue 9. — P. 2458. <https://doi.org/10.3390/en14092458> (in Eng.).
- Massenova A., Kalykberdiyev M., Sass A., Kenzin N., Ussenov A., Baiken A., Rakhmetova K. (2020). Catalytic technologies for solving environmental problems in the production of fuels and motor transport in Kazakhstan. *Catalysts.* — Vol. 10. — P. 1197. <https://doi.org/10.3390/catal10101197> (in Eng.).
- Zamudio M.A., Bensaid S., Fino D., Russo N. (2011). Influence of the MgCo_2O_4 preparation method on N₂O catalytic decomposition. *Industrial & Engineering Chemistry Research.* — Vol. 50. — P. 2622-2627. <https://doi.org/10.1021/ie100658w> (in Eng.).

Veselov G.B., Stoyanovskii V.O., Cherepanova S.V., Vedyagin A.A. (2023). Sol-gel prepared Co-Mg-O oxide systems: Redox behavior, thermal stability and catalytic performance in CO oxidation. *React. Kinet. Mech. Catal.* — Vol. 136. — P. 233-250. <https://doi.org/10.1007/s11144-022-02336-1> (in Eng.).

Robin J. (1955). Recherches sur la constitution et la stabilité de quelques solutions solides a base d'oxyde de cobalt. *Annales de Chimie.* — Vol. 10. — P. 389-412. (in Eng.).

Busca G., Guidetti R., Lorenzelli V. (1990). Fourier-transform infrared study of the surface properties of cobalt oxides. *J. Chem. Soc. Faraday Trans.* — Vol. 86. — Issue 6. — P. 989-994. (in Eng.).

Casas-Cabanas M., Binotto G., Larcher D., Lecup A., Giordani V., Tarascon J.-M. (2009). Defect chemistry and catalytic activity of nanosized Co₃O₄. *Chem. Mater.* — Vol. 21. — P. 1939-1947. <https://doi.org/10.1021/cm900328g> (in Eng.).

Raveau B., Seikh M. (2012). Cobalt Oxides: From Crystal Chemistry to Physics. Weinheim: Wiley-VCH, 333 p. ISBN 978-3-527-64552-7. (in Eng.).

Syeda A.F., Khan M.N. (2018). Spin state of cobalt and electrical transport in MgCo₂O₄ system. *J. Supercond. Nov. Magn.* — Vol. 31. — P. 3545-3551. <https://doi.org/10.1007/s10948-018-4598-7> (in Eng.).

Krezhov K., Konstantinov P. (1992). On the cationic distribution in Mg_xCo_{3-x}O₄ spinels. *J. Phys. Condens. Matter.* — Vol. 4. — P. L543-L548. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/4/42/001> (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