

**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
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., Нурмуханбетова 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

© **Talgatov E., Zamanbekova A.*, Abilmagzhanov A., Auyezkhanova A., Akhmetova S., 2026.**

«D.V. Sokolsky Institute of fuel, catalysis and electrochemistry» JSC,
Almaty, Kazakhstan.

E-mail: zamanbekova@bk.ru

POLYMER-MODIFIED SUPPORTED CATALYSTS FOR THE OXIDATION OF CYCLOHEXANE WITH HYDROGEN PEROXIDE

Talgatov Eldar — PhD, associate professor, Head of the laboratory of Organic catalysis. «D.V. Sokolsky Institute of fuel, catalysis and electrochemistry» JSC, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: e.talgatov@ifce.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8153-4765>;

Zamanbekova Aigul — Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Organic Catalysis, D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: zamanbekova@bk.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4129-0190>;

Abilmagzhanov Arlan — Candidate of Chemical Sciences, Head of the Laboratory of Applied Research. General Director of the «D.V. Sokolsky Institute of fuel, catalysis and electrochemistry» JSC, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: a.abilmagzhanov@ifce.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2931-9640>

Auyezkhanova Assemgul — Candidate of Chemical Sciences, Chief Researcher of the Laboratory of Organic Catalysis, D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: a.assemgul@list.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8999-2864>;

Akhmetova Sandugash — PhD, Researcher of the Laboratory of Organic Catalysis, D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: sn.akhmetova@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1048-2640>.

Abstract: Supported polymer-modified Co-, Cr-, and Cu-containing catalysts were investigated for the selective oxidation of cyclohexane with hydrogen peroxide to cyclohexanol and cyclohexanone, which constitute KA oil. This study aimed to determine the effects of the active metal, oxide support, and polymer modifier on cyclohexane conversion and product selectivity. MgO, Al₂O₃, SiO₂, and TiO₂ were used as supports, while chitosan, polyacrylic acid (PAA), and poly(4-vinylpyridine) (P4VP) were employed as polymer modifiers. The catalysts were prepared by sequential adsorption of the polymer and metal ions onto the oxide support. Chitosan immobilization was studied by viscometry and FTIR spectroscopy, whereas the content and distribution of active metals were determined using energy-dispersive X-ray spectroscopy, scanning electron microscopy, and elemental mapping. Catalytic tests were conducted in acetonitrile at

atmospheric pressure and 50 °C. Chitosan was almost quantitatively immobilized on the investigated oxides, with adsorption degrees of 96.9–98.9%. MgO was the most effective support for all Co-, Cr-, and Cu-containing systems. Cyclohexane conversions over Co-Chit/MgO, Cr-Chit/MgO, and Cu-Chit/MgO were 2.3, 6.2, and 16.3%, respectively, demonstrating the superior activity of the copper-containing catalyst. The highest conversion of 16.3% was achieved over Cu-Chit/MgO, with selectivities of 76.7% toward cyclohexanol and 23.3% toward cyclohexanone. The copper content in this sample was 5.3 wt.%, and elemental mapping indicated its relatively uniform surface distribution. The formation of cyclohexyl hydroperoxide as an intermediate was confirmed by an increased cyclohexanol yield after treatment with triphenylphosphine. At comparable copper contents, conversion strongly depended on the polymer modifier and decreased in the order chitosan (16.3%) > PAA (14.7%) >> P4VP (0.5%). Thus, catalytic properties depend on both the amount and local environment of the active metal. Based on its structural and catalytic characteristics, Cu-Chit/MgO was identified as the most promising catalyst for the mild oxidation of cyclohexane with hydrogen peroxide.

Keywords: cyclohexane, oxidation, hydrogen peroxide, supported catalysts, chitosan, polymer modification, magnesium oxide, copper

Financing. *This research was funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24992995).*

For citations: Talgatov E., Zamanbekova A., Abilmagzhanov A., Auyezkhanova A., Akhmetova S. Polymer-modified supported catalysts for the oxidation of cyclohexane with hydrogen peroxide. Academic Scientific Journal of Chemistry, 2026. — No.3. — P. 389–406. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1491.407>.

© Талғатов Э.Т., Заманбекова А.Т.*, Абильмагжанов А.З., Аuezханова А.С.,
Ахметова С.Н., 2026.

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

ЦИКЛОГЕКСАНДЫ СУТЕК ПЕРОКСИДІМЕН ТОТЫҚТЫРУҒА АРНАЛҒАН ПОЛИМЕРМЕН МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН ТАСЫМАЛДАҒЫШҚА БЕКІТІЛГЕН КАТАЛИЗАТОРЛАР

Талғатов Эльдар — PhD, қауымдастырылған профессор, Органикалық катализ зертханасының меңгерушісі, «Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ, Алматы, Қазақстан,

E-mail: e.talgatov@ifce.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8153-4765>;

Заманбекова Айгүл — химия ғылымдарының кандидаты, Органикалық катализ зертханасының жетекші ғылыми қызметкері, «Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ, Алматы, Қазақстан,

E-mail: zamanbekova@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4129-0190>;

Абильмагжанов Арлан — химия ғылымдарының кандидаты, Қолданбалы зерттеулер зертханасының меңгерушісі, бас директор, «Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ, Алматы, Қазақстан,

E-mail: a.abilmagzhanov@ifce.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2931-9640>;

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

E-mail: a.assemgul@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8999-2864>;

Ахметова Сандұғаш — PhD, Органикалық катализ зертханасының ғылыми қызметкері, «Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ, Алматы, Қазақстан,

E-mail: sn.akhmetova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1048-2640>.

Аннотация: Жұмыста циклогександы сутек пероксидімен селективті тотықтыру арқылы КА-ойл құрамына кіретін циклогексанол мен циклогексанонды алуға арналған тасымалдағышқа бекітілген, полимермен модификацияланған Со-, Сг- және Си-құрамды катализаторлар зерттелді. Зерттеудің мақсаты белсенді металдың, оксидті тасымалдағыштың және полимерлік модификатордың табиғаты циклогексан конверсиясына және мақсатты өнімдердің түзілу селективтілігіне қалай әсер ететінін анықтау болды. Тасымалдағыштар ретінде MgO, Al₂O₃, SiO₂ және TiO₂, ал полимерлік модификаторлар ретінде хитозан, полиакрил қышқылы (ПАҚ) және поли(4-винилпиридин) (П4ВП) пайдаланылды. Катализаторлар полимер мен металл иондарын оксидті тасымалдағыш бетіне кезекпен адсорбциялау әдісімен алынды. Хитозанның бекітілуі вискозиметрия және ИҚ-спектроскопия әдістерімен зерттелді, ал белсенді металдардың мөлшері мен таралу сипаты энергодисперсиялық рентгендік талдау, сканерлеуші электрондық микроскопия және элементтік карталау арқылы анықталды. Каталитикалық сынақтар ацетонитрил ортасында атмосфералық қысымда және 50 °C температурада жүргізілді. Хитозанның зерттелген оксидтерге адсорбциялану дәрежесі 96,9–98,9% болды. Барлық Со-, Сг- және Си-құрамды жүйелер үшін MgO ең тиімді тасымалдағыш ретінде анықталды. Со-Хит/MgO, Сг-Хит/MgO және Си-Хит/MgO катализаторларындағы циклогексан конверсиясы тиісінше 2,3; 6,2 және 16,3% болды. Ең жоғары конверсия Си-Хит/MgO жүйесінде байқалып, 16,3%-ды құрады; бұл ретте циклогексанол бойынша селективтілік 76,7%, ал циклогексанон бойынша 23,3% болды. Осы үлгідегі мыс мөлшері 5,3 масс.% құрады, ал элементтік карталау оның беткі қабатта салыстырмалы түрде біркелкі таралғанын көрсетті. Циклогексилгидропероксидтің аралық өнім ретінде түзілуі реакциялық қоспаны трифенилфосфинмен өндегеннен кейін циклогексанол шығымының артуымен расталды. Мыс мөлшері ұқсас болған кезде катализатор белсенділігі полимерлік модификатор табиғатына едәуір тәуелді болып, конверсия хитозан (16,3%) > ПАҚ (14,7%) >> П4ВП (0,5%) қатарында төмендеді. Алынған нәтижелер каталитикалық қасиеттер белсенді металдың мөлшерімен ғана емес, оның жергілікті ортасы және тотықтырғыш пен субстрат үшін қолжетімділігімен де анықталатынын көрсетті. Құрылымдық және каталитикалық сипаттамалар жиынтығы бойынша Си-Хит/

MgO жүйесі зерттелген үлгілер ішінде циклогександы сутек пероксидімен жұмсақ жағдайда тотықтыруға ең перспективалы катализатор ретінде анықталды.

Түйін сөздер: циклогексан, тотығу, сутек пероксиді, тасымалдағышқа бекітілген катализаторлар, хитозан, полимерлік модификация, магний оксиді, мыс

© Талғатов Э.Т., Заманбекова А.Т.*, Абильмагжанов А.З., Ауезханова А.С.,
Ахметова С.Н., 2026.

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

E-mail: zamanbekova@bk.ru

ПОЛИМЕР-МОДИФИЦИРОВАННЫЕ НАНЕСЕННЫЕ КАТАЛИЗАТОРЫ ОКИСЛЕНИЯ ЦИКЛОГЕКСАНА ПЕРОКСИДОМ ВОДОРОДА

Талғатов Эльдар — PhD, ассоциированный профессор, заведующий лабораторией органического катализа, АО «Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,

E-mail: e.talgatov@ifce.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8153-4765>;

Заманбекова Айгуль — кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории органического катализа, АО «Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,

E-mail: zamanbekova@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4129-0190>;

Абильмагжанов Арлан — кандидат химических наук, заведующий лабораторией прикладных исследований, генеральный директор АО «Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,

E-mail: a.abilmagzhanov@ifce.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2931-9640>;

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

E-mail: a.assemgul@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8999-2864>;

Ахметова Сандугаш — PhD, научный сотрудник лаборатории органического катализа, АО «Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,

E-mail: sn.akhmetova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1048-2640>.

Аннотация: В работе исследованы нанесённые полимер-модифицированные Co-, Cr- и Cu-содержащие катализаторы селективного окисления циклогексана пероксидом водорода с образованием циклогексанола и циклогексанона, составляющих КА-ойл. Цель исследования заключалась в установлении влияния природы активного металла, оксидного носителя и полимерного модификатора на конверсию циклогексана и селективность образования целевых продуктов. В качестве носителей использовали MgO, Al₂O₃, SiO₂ и TiO₂, а в качестве полимерных модификаторов - хитозан, полиакриловую кислоту (ПАК) и поли(4-винилпиридин) (П4ВП). Катализаторы получали адсорбционным методом путём последовательного нанесения полимера и ионов металла на поверхность оксидного носителя. Закрепление хитозана изучали методами вискозиметрии и ИК-спектроскопии, а содержание и распределение активных металлов определяли методами энергодисперсионного рентгеновского анализа, сканирующей

электронной микроскопии и элементного картирования. Каталитические испытания проводили в среде ацетонитрила при атмосферном давлении и температуре 50 °С. Степень адсорбции хитозана на исследованных оксидах составляла 96,9–98,9%. Для всех Co-, Cr- и Cu-содержащих систем наиболее эффективным носителем оказался MgO. Конверсия циклогексана на Co-Хит/MgO, Cr-Хит/MgO и Cu-Хит/MgO составила соответственно 2,3; 6,2 и 16,3%. Максимальная конверсия 16,3% достигнута на Cu-Хит/MgO при селективности 76,7% по циклогексанолу и 23,3% по циклогексанону. Содержание меди в этом образце составило 5,3 масс.%, а элементное картирование показало её относительно равномерное распределение по поверхности. Образование циклогексилгидропероксида как промежуточного продукта подтверждалось увеличением выхода циклогексанола после обработки реакционной смеси трифенилфосфином. При сопоставимом содержании меди активность катализаторов существенно зависела от природы полимерного модификатора: конверсия снижалась в ряду хитозан (16,3%) > ПАК (14,7%) >> П4ВП (0,5%). Полученные результаты показывают, что каталитические свойства определяются не только количеством активного металла, но также его локальным окружением и доступностью для взаимодействия с окислителем и субстратом. По совокупности структурных и каталитических характеристик система Cu-Хит/MgO является наиболее перспективной среди исследованных для мягкого окисления циклогексана пероксидом водорода.

Ключевые слова: циклогексан, окисление, пероксид водорода, нанесенные катализаторы, хитозан, полимерная модификация, оксид магния, медь

Введение. Селективное окисление циклогексана представляет значительный научный и практический интерес, поскольку его основными продуктами являются циклогексанол и циклогексанон, смесь которых известна как КА-ойл. Она служит промежуточным продуктом в производстве адипиновой кислоты и капролактама — мономеров, используемых для получения полиамидов (Dhakshinamoorthy et al., 2022; Vomeri et al., 2024).

В промышленности окисление циклогексана преимущественно проводят молекулярным кислородом при повышенных температуре и давлении в присутствии соединений кобальта или марганца. Из-за более высокой реакционной способности первичных продуктов окисления по сравнению с исходным углеводородом конверсию циклогексана обычно ограничивают низкими значениями. Это позволяет уменьшить образование продуктов глубокого окисления, однако приводит к необходимости рециркуляции значительных объемов непрореагировавшего сырья (Vomeri et al., 2024; Rana et al., 2017). Сложность селективного превращения циклогексана обусловлена высокой прочностью и низкой полярностью связей C–H, а также близкой реакционной способностью вторичных связей углерод–водород в его молекуле. В связи с этим разработка каталитических систем, способных активировать циклогексан в мягких условиях и обеспечивать преимущественное образование циклогексанола и циклогексанона, остается актуальной задачей.

В качестве альтернативы молекулярному кислороду может применяться пероксид водорода, преимуществами которого являются высокое содержание активного кислорода и образование воды в качестве основного побочного продукта. Вместе с тем эффективность H_2O_2 существенно зависит от природы активного центра. В отсутствие подходящего катализатора пероксид водорода может непродуктивно разлагаться, не участвуя в окислении углеводорода (Du et al., 2009; Gawlig et al., 2020). Перспективными катализаторами активации пероксида водорода являются соединения переходных металлов, способных изменять степень окисления, в частности Co, Cr и Cu. В гетерогенных системах состояние таких металлов определяется не только их химической природой, но и способом нанесения, взаимодействием с поверхностью носителя, дисперсностью и доступностью активных центров.

Применение нанесенных катализаторов упрощает отделение твердой фазы от реакционной смеси и позволяет направленно регулировать свойства активного компонента. При этом кислотно-основные свойства и структурные характеристики оксидных носителей могут по-разному влиять на закрепление металла, активацию H_2O_2 и распределение продуктов окисления (Rana et al., 2017; Tumabayev et al., 2020). Дополнительные возможности управления свойствами нанесенных катализаторов открывает модифицирование поверхности оксидных носителей функциональными полимерами. Макромолекулы, содержащие донорные группы, способны закрепляться на поверхности носителя и одновременно координировать ионы металлов, формируя гетерогенизированные металл-полимерные центры. Их каталитические свойства зависят от природы функциональных групп, прочности связывания металла, конформации полимерной цепи и доступности координационной сферы для взаимодействия с реагентами. Благодаря этому полимерный слой может влиять на количество закрепленного металла, его распределение и локальное химическое окружение.

Особый интерес в качестве модификатора представляет хитозан — возобновляемый аминополисахарид, содержащий аминные и гидроксильные группы, которые обеспечивают возможность химического модифицирования макромолекулы и связывания ионов металлов (Cohen et al., 2022). Благодаря сочетанию координационных свойств и способности формировать устойчивую полимерную матрицу хитозан может одновременно выполнять функции носителя и макролиганда.

Перспективность данного подхода подтверждается применением Cu-хитозановых материалов в качестве эффективных и регенерируемых гетерогенных катализаторов окисления C–H-связей (Kanarat et al., 2022). Сочетание хитозана с неорганическим носителем позволяет формировать гибридные органо-неорганические материалы, в которых оксидная матрица обеспечивает механическую и структурную устойчивость, а полимер способствует закреплению ионов металла и формированию их локального координационного окружения.

Целью настоящей работы являлось установление влияния способа приготовления, природы переходного металла, оксидного носителя и полимерного

модификатора на каталитические свойства Co-, Cr- и Cu-содержащих систем в реакции окисления циклогексана пероксидом водорода.

Для достижения поставленной цели исследованы процессы закрепления хитозана на MgO, Al₂O₃, SiO₂ и TiO₂, взаимодействие полимера с поверхностью носителей, содержание и распределение активных металлов, а также конверсия циклогексана и селективность образования циклогексанола и циклогексанона. Особое внимание уделено сравнению способов приготовления катализаторов с применением щелочного осаждения и без него, определению наиболее эффективной комбинации металла и носителя, а также оценке влияния природы полимерного модификатора на свойства Cu-содержащих катализаторов.

Литературный обзор. Селективное окисление циклогексана до циклогексанола и циклогексанона относится к наиболее сложным процессам функционализации насыщенных углеводородов. Основная трудность заключается в сочетании высокой прочности C–H-связей исходного циклогексана и повышенной реакционной способности образующихся кислородсодержащих продуктов. Циклогексанол и циклогексанон легче подвергаются дальнейшему окислению, чем исходный углеводород, поэтому увеличение конверсии обычно сопровождается снижением селективности по отношению к КА-ойлу и накоплением продуктов глубокого окисления. В промышленном процессе эту проблему решают ограничением конверсии циклогексана приблизительно до 5 % при селективности по КА-ойлу выше 90 %, после чего непрореагировавший субстрат возвращают в технологический цикл. Современное состояние гетерогенного катализа окисления циклогексана и основные ограничения промышленного процесса подробно рассмотрены в работе Dhakshinamoorthy и соавторов (Dhakshinamoorthy et al., 2022).

В качестве окислителей циклогексана исследуются молекулярный кислород, пероксид водорода и органические гидропероксиды. Молекулярный кислород экономически доступен, однако его применение обычно требует повышенных температуры и давления, а протекание радикально-цепного процесса осложняет управление селективностью. Органические гидропероксиды достаточно эффективны, но их использование связано с образованием соответствующих спиртов и увеличением количества побочных продуктов. Пероксид водорода привлекателен высоким содержанием активного кислорода и образованием воды в качестве продукта восстановления. Он позволяет проводить окисление при атмосферном давлении и сравнительно невысокой температуре, однако в присутствии соединений переходных металлов может разлагаться с выделением кислорода. Следовательно, эффективность системы определяется соотношением скоростей продуктивной активации H₂O₂ и его непродуктивного разложения.

Наиболее распространенное представление о механизме пероксидного окисления циклогексана включает образование кислородцентрированных радикалов при взаимодействии H₂O₂ с активным центром металла. Эти частицы отрывают атом водорода от циклогексана с образованием циклогексильного радикала, который затем превращается в циклогексилгидропероксид.

Последующее разложение гидропероксида приводит к образованию циклогексанола и циклогексанона. Для TiO_2 -нанесенных V–W-оксидных катализаторов экспериментально показано, что основными активными частицами при использовании H_2O_2 являются гидроксильные радикалы, образующиеся в результате гомолитического расщепления пероксида водорода. Активность таких систем определяется дисперсностью металлов и электронным взаимодействием между компонентами катализатора (Xu et al., 2024).

Циклогексилгидропероксид является не только промежуточным соединением, но и важным участником формирования конечного соотношения циклогексанола и циклогексанона. Его наличие в реакционной смеси часто устанавливают обработкой трифенилфосфином, который восстанавливает гидропероксид до соответствующего спирта. Увеличение содержания циклогексанола после такой обработки свидетельствует о накоплении циклогексилгидропероксида. Значение этого интермедиата для формирования кислородсодержащих продуктов и возможность направленного регулирования его превращений продемонстрированы при исследовании титан-силикатных катализаторов (Hereijgers et al., 2011). Таким образом, сопоставление катализаторов только по непосредственно определяемым количествам циклогексанола и циклогексанона без учета гидропероксида может приводить к неполной оценке состояния реакционной смеси.

Способность соединений переходных металлов активировать пероксид водорода связана с их участием в окислительно-восстановительных превращениях. Кобальт может переходить между состояниями Co^{2+} и Co^{3+} , медь - между Cu^{2+} и Cu^+ , тогда как соединения хрома способны образовывать оксо- и пероксокомплексы различного состава. Природа металла влияет как на скорость разложения H_2O_2 и образования активных кислородных частиц, так и на превращение циклогексилгидропероксида. Современные Co-содержащие мезопористые алюмофосфаты проявляют активность в окислении циклогексана пероксидом водорода при атмосферном давлении, при этом эффективность использования H_2O_2 зависит от состава и строения кобальтовых центров (Kumar et al., 2024). Для хромсодержащих мезопористых материалов ранее было показано, что включение Cr в структуру MCM-41 обеспечивает гетерогенное окисление циклогексана H_2O_2 , однако внекаркасные соединения хрома могут вымываться во время первого каталитического цикла. После их удаления активность стабилизируется, что подчеркивает эффект закрепленных и слабосвязанных форм металла (Sakthivel et al., 2002).

Особое место занимают Cu-содержащие катализаторы. Переход $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^+$ способствует одноэлектронной активации пероксида водорода, но свойства медных центров существенно зависят от их координационного окружения. При окислении циклогексана H_2O_2 в присутствии пиррофосфата меди было установлено, что важным фактором является гидрофобность поверхности катализатора, она влияет на контакт неполярного субстрата с активными центрами в водно-органической реакционной среде (Du et al., 2009). Медные μ_4 -оксокластеры также способны активировать H_2O_2 при мягких условиях с первоначальным образованием

циклогексанола и циклогексанона, хотя при избытке окислителя процесс продолжается до дикарбоновых кислот. Это показывает, что концентрация H_2O_2 , скорость его введения и продолжительность реакции должны строго контролироваться для предотвращения глубокого окисления КА-ойла (Gawlig et al., 2020).

Переход от гомогенных соединений металлов к нанесенным системам позволяет упростить отделение катализатора и регулировать его свойства посредством взаимодействия с носителем. Оксидный носитель нельзя рассматривать исключительно как инертную подложку. Его кислотно-основные свойства, концентрация поверхностных гидроксильных групп, удельная поверхность и характер взаимодействия с металлом определяют степень закрепления активного компонента, его дисперсность и доступность для реагентов. Современные исследования Cu- и Fe-модифицированных оксидов церия и циркония показали, что дефектность носителя, окислительно-восстановительные свойства и поверхностная экспозиция металла непосредственно влияют на активность и селективность образования КА-ойла. В этой серии Cu-содержащие материалы превосходили Fe-содержащие аналоги по производительности и обеспечивали селективность выше 90% (Vomeri et al., 2024).

Для нанесенных медных катализаторов особенно важна дисперсность Cu-содержащей фазы. Даже при одинаковом общем содержании меди различия в размере и структуре ее поверхностных частиц могут приводить к существенному изменению каталитических свойств. На примере низкопроцентных CuO_x/SiO_2 -систем показано, что изолированные динуклеарные медь-кислородные центры значительно активнее крупных доменов оксида меди. Формирование таких центров определяется поверхностными дефектами кремнезема и условиями приготовления катализатора (Nauert et al., 2018). Хотя данная работа относится к окислительному дегидрированию циклогексана, установленная зависимость между локальной структурой Cu-центров и активностью имеет общее значение для нанесенных медных систем.

Условия приготовления катализатора могут изменять не только количество нанесенного металла, но и его химическое состояние. Пропитка или адсорбционное нанесение обычно способствуют взаимодействию ионов металла с функциональными группами поверхности, тогда как осаждение при добавлении щелочи может приводить к образованию отдельных частиц гидроксида или оксида металла. При этом уменьшается доля металла, непосредственно связанного с носителем или полимерным лигандом, и возрастает вероятность агрегации. Значение способа подготовки и последующей обработки хорошо иллюстрируется исследованиями Cu/Al_2O_3 , где окислительно-восстановительная обработка крупных частиц меди вызывает их реконструкцию и редиспергирование, сопровождаемое увеличением числа доступных активных центров и повышением каталитической активности (Li et al., 2024). Следовательно, сопоставление методов приготовления необходимо для выбора условий, обеспечивающих максимальную доступность нанесенного металла.

Модифицирование оксидных носителей функциональными полимерами является одним из способов более тонкого регулирования локального окружения активных центров. В таких материалах оксид формирует устойчивую неорганическую основу, а полимерный слой содержит донорные группы, участвующие в сорбции и координации ионов металлов. Полимер может препятствовать агрегации металлических частиц, изменять гидрофильно-гидрофобный баланс поверхности и создавать вокруг металла микросреду, отличающуюся от поверхности исходного оксида. Вместе с тем слишком прочная координация способна уменьшать доступность металла для H_2O_2 и субстрата. Поэтому влияние полимера не всегда приводит к увеличению количества закрепленного металла, тут важны природа донорных групп, плотность их расположения, конформация макромолекул и прочность комплекса металл-полимер.

Хитозан представляет особый интерес благодаря наличию первичных аминогрупп и гидроксильных групп, способных участвовать во взаимодействии с поверхностью оксидов и координации ионов переходных металлов. Современный обзор производных хитозана показывает, что реакционная способность аминогрупп при атоме C2 и гидроксильных групп при атомах C3 и C6 обеспечивает широкие возможности химического модифицирования и хелатирования металлов (Cohen et al., 2022). При адсорбции хитозана на оксидах могут реализовываться электростатические взаимодействия, водородные связи и координация поверхностных центров. Соотношение этих взаимодействий зависит от кислотно-основных свойств носителя и pH среды. В случае основного MgO контакт с кислым раствором хитозана может сопровождаться депротонированием аммонийных групп, снижением растворимости полимера и его закреплением на поверхности. На Al_2O_3 , SiO_2 и TiO_2 степень сорбции в большей мере определяется зарядом поверхности, содержанием гидроксильных групп и условиями нейтрализации.

Каталитическое применение металл-хитозановых систем показана на примере Cu-содержащих гранул хитозана, использованных в реакциях окисления C–H-связей (Kanarat et al., 2022). Было показано, что хитозан выполняет двойную функцию, закрепляет активные формы меди и одновременно участвует в создании основного микроокружения каталитического центра. Полученные материалы отделялись от реакционной смеси и сохраняли активность при повторном использовании. Кроме того, применение карбоксилированных нанокристаллов хитозана в качестве носителя металлических наночастиц продемонстрировало, что совместное присутствие аминных и карбоксильных групп способствует закреплению и стабилизации дисперсной металлической фазы (Jin et al., 2020).

Работы, непосредственно посвященные окислению циклогексана на полимер-модифицированных оксидах, немногочисленны. Ранее были синтезированы Cu- и Co-содержащие катализаторы на оксидных и монтмориллонитовых носителях, модифицированных пектином. В окислении циклогексана H_2O_2 при мягких условиях наиболее эффективными оказались медные системы, а каталитические свойства существенно зависели от природы неорганического

носителя. Максимальная конверсия циклогексана на Cu-содержащем пектин-модифицированном монтмориллоните составила 11,2 % (Tumabayev et al., 2020). Эти результаты подтверждают перспективность сочетания природного полимера, оксидного или алюмосиликатного носителя и ионов переходного металла, но одновременно указывают на необходимость систематического сравнения носителей при одинаковом полимерном модификаторе.

Наряду с хитозаном для формирования металлополимерных центров могут использоваться полиакриловая кислота и поли(4-винилпиридин). Карбоксильные группы полиакриловой кислоты связывают Cu^{2+} посредством ионных и координационных взаимодействий, причем полимерное окружение способно стабилизировать промежуточные формы Cu^+ . Стабилизация пары $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^+$ в пленках полиакриловой кислоты была экспериментально подтверждена при исследовании электрохимического восстановления меди и взаимодействия такой системы с пероксидом водорода (Stojanov et al., 2022). При получении Cu/ZnO/ZnAl₂O₄-гибридных материалов полиакриловая кислота улучшала дисперсность медных частиц и взаимодействие металл–носитель, что также подтверждает её способность регулировать структуру нанесённой Cu-фазы (Omar et al., 2023).

Поли(4-винилпиридин) содержит пиридиновые атомы азота, обладающие выраженной электронодонорной и координирующей способностью. Такие группы эффективно стабилизируют металлические частицы и могут изменять их электронную плотность. Для кластеров золота, стабилизированных поли(2-винилпиридином) и поли(4-винилпиридином), установлено, что координация пиридиновых групп повышает электронную плотность металлической фазы и устойчивость катализатора в реакциях окисления (Matsuo et al., 2020). Однако применительно к Cu-содержащим системам сильная координация пиридинового азота может иметь двойственный эффект. С одной стороны, она препятствует агрегации и вымыванию меди, а с другой - способна блокировать координационные позиции и затруднять взаимодействие Cu-центра с H_2O_2 . Поэтому высокая сорбционная емкость полимера по отношению к металлу не обязательно соответствует высокой каталитической активности.

Таким образом, литературные данные показывают, что активность нанесенных катализаторов окисления циклогексана определяется совокупностью взаимосвязанных факторов – природой переходного металла, механизмом активации H_2O_2 , кислотно-основными свойствами носителя, степенью дисперсности активного компонента, способом приготовления и координационным действием полимера. При этом в литературе недостаточно представлены систематические исследования, в которых при одинаковых условиях сопоставлялись бы Co-, Cr- и Cu-содержащие катализаторы, нанесенные на MgO , Al_2O_3 , SiO_2 и TiO_2 и модифицированные одним полимером. Практически не исследовано и совместное влияние природы оксидного носителя и макролиганда на закрепление металла и его активность в окислении циклогексана пероксидом водорода. Сравнение хитозана, полиакриловой кислоты и поли(4-винилпиридина) при близком содержании меди позволяет отделить влияние количества активного компонента от влияния его

полимерного окружения и установить факторы, определяющие эффективность гибридных органо-неорганических катализаторов.

Материалы и методы. Реактивы и материалы: Хлорид кобальта(II) гексагидрат ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Mr 237,93 г/моль), нитрат хрома(III) нонагидрат ($\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, 99%), хлорид меди(II) дигидрат ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 99%), MgO (магний (II) оксид, ХЧ), Al_2O_3 (алюминий (III) оксид, ХЧ), SiO_2 (кремний (IV) оксид, ХЧ) и TiO_2 (титан (IV) оксид, частицы ~25 нм, ХЧ), хитозан (Хит, степень деацетилирования $\geq 75\%$, MW = 250 000, Sigma-Aldrich, США), поли-4-винилпиридин (П4ВП, MW = 60000, Sigma-Aldrich, США), полиакриловая кислота (ПАК, Mr 450 000 г/моль, Sigma-Aldrich, Сент-Луис, штат Миссури, США).

Приготовление рабочих растворов. Катализаторы были приготовлены путем последовательной адсорбции полимера (хитозан (Хит), поли(4-винилпиридин) (П4ВП), полиакриловая кислота (ПАК)), а затем ионов металла (Cu, Cr и Co) из водных растворов на твердые носители (MgO, Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2). В случае медных катализаторов 5 мл раствора П4ВП и ПАК (0,052 г в 5 мл воды) или Хит (0,138 г в 5 мл воды) добавляли по каплям к суспензии носителя (1 г носителя в 10 мл воды) при комнатной температуре и постоянном перемешивании. Для хромовых и кобальтовых катализаторов вводили 0,240 г полимера в 5 мл воды и 0,212 г полимера в 5 мл воды, соответственно. Полученную смесь перемешивали в течение 2 ч. Затем прикапыванием вводили водные растворы хлоридов меди и кобальта, нитрата хрома и после их внесения смесь перемешивали в течение 3 ч. Концентрация растворов полимера и соли меди (хром и кобальт) (для меди 0,16 М, для хрома 0,2 М и для кобальта 0,18 М) была взята из расчета для приготовления катализаторов с содержанием металла 5% и мольным соотношением [Me:полимер] = 1:1. Полученный катализатор оставляли в маточном растворе на 24 часа. Затем трехкратно промывали дистиллированной водой и сушили на воздухе при комнатной температуре.

Процесс окисления проводили на лабораторной установке, в стеклянном термостатированном реакторе, соединенного с бюреткой. Были выбраны следующие параметры опыта: ацетонитрил (5 мл), катализатор (0,3 г.), субстрат (1,8 моль/л), окислитель ($[\text{H}_2\text{O}_2] = 0,31 \cdot 10^2$ моль/л), температура реакции 50°C, давление атмосферное, время опыта – 360 мин. Качественный и количественный анализ продуктов реакции окисления проводили на хроматографе Хромос ГХ-1000 (Россия) с пламенно-ионизационным детектором в изотермическом режиме с использованием капиллярной колонки BP21 (FFAP) с полярной фазой (ПЭГ, модифицированный нитротерефталатом) длиной 50 м и внутренним диаметром 0,32 мм. Температура колонки составляла 90°C, температура инжектора - 200°C, газом-носителем служил гелий, объем вводимой пробы - 0,2 мкл.

3. Результаты и обсуждение. Полимер-модифицированные медные, хромовые и кобальтовые катализаторы, нанесенные на неорганические носители (MgO , Al_2O_3 , SiO_2 и TiO_2) были приготовлены адсорбционным методом путем последовательного нанесения полимера и ионов металла. Исходное количество активной фазы составляло 5%. По данным EDX элементного анализа фактическое

содержание металла зависело от природы носителя (таблица 1). Для Cu-Хит/MgO содержание Cu составляло 5,3 мас. %, т.е. было близко к расчетному уровню 5 мас. %. На Cu-Хит/ Al_2O_3 , Cu-Хит/ SiO_2 и Cu-Хит/ TiO_2 определено только 1,2-1,4 мас. % Cu.

Таблица 1 – Содержание металла по результатам EDX элементного анализа

Образец	Содержание металла, мас. %
Cu-Хит/MgO	5,3
Co-Хит/MgO	4,2
Cr-Хит/MgO	2,5
Cu-Хит/ Al_2O_3	1,3
Cu-Хит/ SiO_2	1,4
Cu-Хит/ TiO_2	1,2

На картах распределения элементов сигнал Cu наблюдался по всей анализируемой области Cu-Хит/MgO и Cu-Хит/ TiO_2 (рисунок 1). В пределах разрешения метода это указывает на отсутствие крупных локальных скоплений меди в выбранных областях и на ее сравнительно равномерное поверхностное распределение.

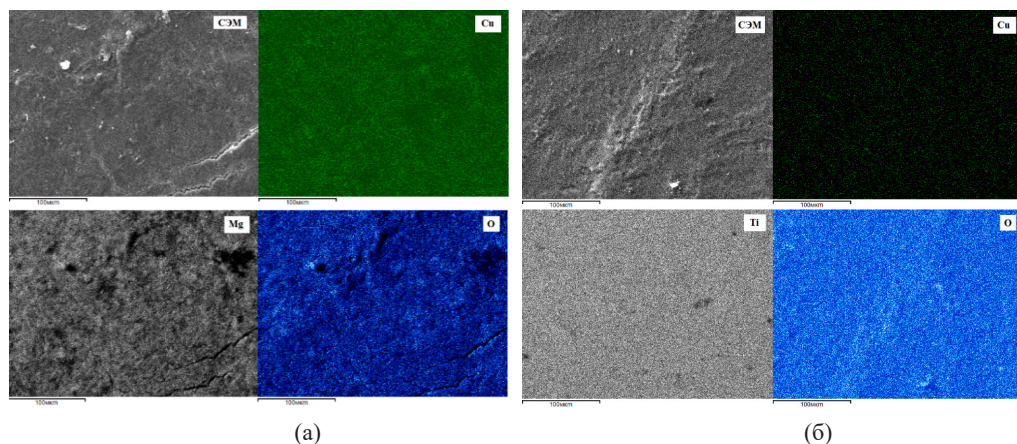


Рисунок 1 – Микрофотографии СЭМ и изображения элементного картирования Cu, элемента носителя и O

Для обоснования формирования полимер-модифицированных носителей до нанесения металла была исследована сорбция полимеров из растворов на поверхности носителей. По данным вискозиметрического определения остаточной концентрации хитозан закреплялся практически количественно на MgO , Al_2O_3 , TiO_2 и SiO_2 , степень адсорбции составляла 98,9%, 98,9%, 98,6% и 96,9%, соответственно (рисунок 2). В случае MgO закрепление хитозана может быть связано с депротонированием аминогрупп полисахарида при контакте кислого раствора с основным оксидом, выпадением полимера из раствора и его

фиксацией на поверхности. Для остальных носителей после введения хитозана значение рН довели до 7,5, что также обеспечивало практически полное закрепление полимера на поверхности.

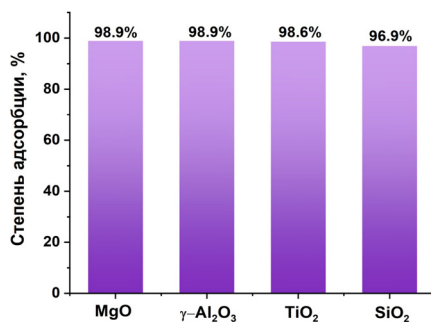


Рисунок 2 – Степень адсорбции хитозана на различных носителях по данным вискозиметрического метода

Результаты ИК-спектроскопии подтверждают не только присутствие хитозана, но и его взаимодействие с поверхностью оксидов. В спектре исходного хитозана полосы при 1660 и 1559 см⁻¹ относятся к колебаниям С=О-групп амида I и N–H-групп амида II соответственно. В композитах Хит/MgO, Хит/Al₂O₃, Хит/TiO₂ и Хит/SiO₂ полоса С=О смещалась в область 1635-1644 см⁻¹, а полоса N–H – до 1511-1514 см⁻¹. Одновременно изменялось положение полос, связанных с –CH/–ОН-группами и пиранозным кольцом полисахарида (рисунок 3). Совокупность этих изменений свидетельствует о взаимодействии функциональных групп хитозана с поверхностью носителей.

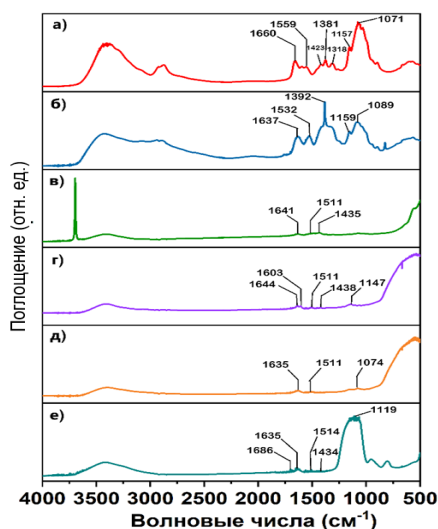


Рисунок 3 – ИК спектры хитозана (а), подкисленного хитозана (б), Хит/MgO (в), Хит/Al₂O₃ (г), Хит/TiO₂ (д), Хит/SiO₂ (е)

Таким образом, результаты физико-химических методов анализа свидетельствуют о формировании нанесенных хитозан-модифицированных медных, хромовых и кобальтовых катализаторов для процесса окисления циклогексана (ЦГ) пероксидом водорода.

ЦГ окисляется до циклогексанола (ЦОЛ) и циклогексанона (ЦОН) через образование циклогексилгидропероксида (ЦГГП) в качестве промежуточного продукта (Shul'pin et al., 2009, Roy Barman et al., 2020, Auyezkhanova et al., 2025) (рисунок 4). Для подтверждения данного механизма продукты реакции анализировали методом газовой хроматографии (ГХ) до и после добавления трифенилфосфина (PPh_3), который способен взаимодействовать с ЦГГП с образованием ЦОЛ (Shul'pin et al., 2009, Roy Barman et al., 2020, Auyezkhanova et al., 2025). Для всех исследованных каталитических систем добавление PPh_3 приводило к увеличению выхода спирта в продуктах реакции, что подтверждает присутствие ЦГГП в качестве промежуточного продукта реакции. Следует отметить, что среди продуктов реакции были обнаружены только ЦОЛ и ЦОН, что свидетельствует о высокой селективности всех катализаторов в отношении образования КА-масла. Результаты каталитических испытаний приведены в таблице 2.

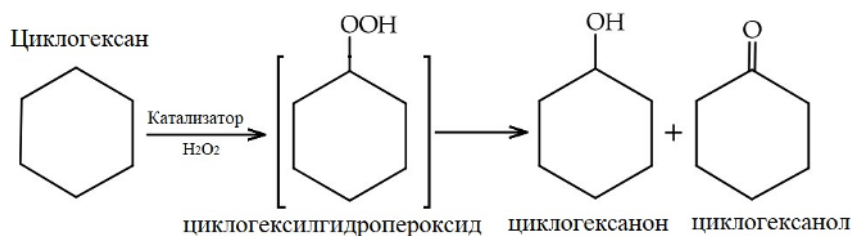


Рисунок 4 – Схема окисления циклогексана пероксидом водорода

Во всех трех типах катализаторов (Co-, Cr- и Cu-) максимальная конверсия достигалась при использовании MgO . Для Co-, Cr- и Cu-содержащих систем она составляла 2,3%, 6,2% и 16,3%, соответственно. Наиболее выраженное влияние природы носителя наблюдалось для медных катализаторов: при переходе от Al_2O_3 , TiO_2 и SiO_2 к MgO конверсия увеличивалась до 16,3 %, что соответствовало повышению в 5,6; 4,1 и 3,6 раза соответственно. По активности металлы, нанесённые на MgO , располагались в следующем порядке: $\text{Cu} \gg \text{Cr} > \text{Co}$.

Таблица 2 – Влияние природы металла и носителя на каталитические свойства разработанных катализаторов

Катализатор	S(ЦОН), %	S(ЦОЛ), %	Конверсия, %
Co-Хит/ MgO	31,5	68,5	2,3
Co-Хит/ Al_2O_3	39,7	60,3	1,9
Co-Хит/ SiO_2	38,5	61,5	2,0
Co-Хит/ TiO_2	34,9	65,1	1,4
Cr-Хит/ MgO	32,3	67,7	6,2

Cr-Хит/ Al_2O_3	30,8	69,2	3,9
Cr-Хит/ SiO_2	30,2	69,8	4,3
Cr-Хит/ TiO_2	33,3	66,7	3,6
Cu-Хит/ MgO	23,3	76,7	16,3
Cu-Хит/ Al_2O_3	29,8	70,2	2,9
Cu-Хит/ SiO_2	12,5	87,5	4,5
Cu-Хит/ TiO_2	2,5	97,5	4,0

Примечание - Условия эксперимента: $m_{\text{кат}}$ - 0,03 г; $V_{\text{цп}}$ - 0,3 мл; H_2O_2 = 0,9 мл; растворитель ацетонитрил (5 мл); t - 4 ч; T - 50 °C; P - 1 атм.

Оптимальным катализатором является Cu-Хит/ MgO , на котором при конверсии 16,3% селективность к ЦОЛ составляла 76,7%, а к ЦОН – 23,3%. Более высокая каталитическая активность MgO -содержащих систем может быть обусловлена повышенной основностью их поверхности, характером закрепления макролиганда и доступностью металла для активации H_2O_2 . Природа носителя влияла не только на конверсию, но и на распределение продуктов. Для Cu-Хит/ TiO_2 селективность по ЦОЛ достигала 97,5%, однако конверсия оставалась сравнительно низкой (4,0%).

Для установления роли полимерного модификатора в формировании выхода КА-масла были получены серии катализаторов на основе MgO , выбранного в качестве наиболее эффективного носителя. В качестве активного компонента использовали Cu, поскольку именно медь обеспечивала более высокую конверсию по сравнению с системами на основе Cr и Co. Модифицирование поверхности проводили с применением хитозана (Хит), поли-4-винилпиридина (П4ВП) и полиакриловой кислоты (ПАК) (таблица 3). При приготовлении образцов количество вводимой соли меди определяли с учетом достижения номинальной концентрации Cu, равной 5 мас.% в составе полимер-модифицированного MgO .

Таблица 3 – Влияние природы полимера на свойства Cu-содержащих катализаторов на MgO

Катализатор	Cu, мас. %	S(ЦОН), %	S(ЦОЛ), %	Конверсия, %
Cu-Хит/ MgO	5,3	23,3	76,7	16,3
Cu-ПАК/ MgO	5,6	19,7	80,3	14,7
Cu-П4ВП/ MgO	5,3	20,0	80,0	0,5

Примечание - Условия эксперимента: $m_{\text{кат}}$ - 0,03 г; $V_{\text{цп}}$ - 0,3 мл; H_2O_2 = 0,9 мл; растворитель ацетонитрил (5 мл); t - 4 ч; T - 50 °C; P - 1 атм.

Наиболее высокую конверсию продемонстрировал Cu-Хит/ MgO (16,3%), незначительно превосходивший Cu-ПАК/ MgO (14,7%). В присутствии Cu-П4ВП/ MgO конверсия составляла лишь 0,5%, несмотря на практически одинаковое содержание Cu. Это различие свидетельствует, что каталитические свойства определяются не только количеством загруженного металла, но и его локальным окружением, прочностью координации и доступностью для взаимодействия с H_2O_2 и с субстратом. Сильное связывание Cu пиридиновыми группами П4ВП, формирование менее доступных центров может подавлять активацию окислителя.

Таким образом, хитозан обеспечивал наилучшее сочетание высокой конверсии и преимущественного образования циклогексанола. ПАК-содержащий катализатор показал близкий результат и может рассматриваться как альтернативный модификатор, тогда как П4ВП в выбранных условиях был неэффективен.

Заключение. Таким образом, были получены нанесённые полимер-модифицированные медные, хромовые и кобальтовые катализаторы для окисления циклогексана до КА-масла при атмосферном давлении и температуре 40 °С. Хитозан был установлен как наиболее перспективный модификатор нанесённых катализаторов. Согласно данным вискозиметрии, степень закрепления хитозана на поверхности MgO, Al₂O₃, TiO₂ и SiO₂ составляет 96,9-98,9%. Смещение полос поглощения C=O и N-H в ИК-спектрах свидетельствует о взаимодействии функциональных групп хитозана с поверхностью оксидных носителей. Данные СЭМ и элементного картирования подтверждают равномерное распределение активной фазы по поверхности полимер-модифицированных носителей.

Сравнение каталитических систем на основе различных оксидных носителей показало, что для всех трех исследованных металлов наиболее эффективным носителем является MgO. Более высокая активность MgO-содержащих систем может быть обусловлена повышенной основностью поверхности MgO, способствующей активации реагирующих компонентов и протеканию целевых превращений.

Наибольшая конверсия циклогексана (16,3%) достигнута в присутствии катализатора Cu-Хит/MgO при селективности 76,7 % по циклогексанолу и 23,3 % по циклогексанону. Для оценки влияния природы полимерного модификатора были сопоставлены каталитические свойства систем с близким содержанием меди. Установлено, что конверсия циклогексана существенно зависит от природы полимера и уменьшается в ряду: хитозан (16,3 %) > ПАК (14,7 %) >> П4ВП (0,5 %).

Таким образом, совокупность полученных результатов свидетельствует о том, что сочетание медной активной фазы, хитозана и основного носителя MgO обеспечивает наиболее высокую эффективность катализатора. Наиболее перспективной каталитической системой для окисления циклогексана до КА-ойла является Cu-Хит/MgO.

References

- Auyezkhanova A., Zharmagambetova A., Talgatov E., Jumekeyeva A., Akhmetova S., Myltykbayeva Zh., Kalkan I., Koca A., Naizabayev A., Zamanbekova A. (2025) Chitosan-Modified SBA-15 as a Support for Transition Metal Catalysts in Cyclohexane Oxidation and Photocatalytic Hydrogen Evolution. *Catalysts*, 15(7):650. <https://doi.org/10.3390/catal15070650> (in Eng.).
- Cohen E., Poverenov E. (2022) Hydrophilic Chitosan Derivatives: Synthesis and Applications. *Chemistry – A European Journal*, 28(67):1-13. <https://doi.org/10.1002/chem.202202156> (in Eng.).
- Dhakshinamoorthy A., López-Francés A., Navalon S., Garcia H. (2022) Porous Metal Organic Frameworks as Multifunctional Catalysts for Cyclohexane Oxidation. *ChemCatChem*, 14 (22):1-14. <https://doi.org/10.1002/cctc.202201036> (in Eng.).
- Du Y., Xiong Y., Li J., Yang X. (2009) Selective oxidation of cyclohexane with hydrogen peroxide in the presence of copper pyrophosphate. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 298(1-2):12-16. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2008.09.020> (in Eng.).

Gawlig Ch., Schindler S., Becker S. (2020) One-Pot Conversion of Cyclohexane to Adipic Acid Using a μ_4 -Oxido-Copper Cluster as Catalyst Together with Hydrogen Peroxide. *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2020(3):248–252. <https://doi.org/10.1002/ejic.201901052> (in Eng.).

Hereijgers B.P.C., Parton R.F., Weckhuysen B.M. (2011) Cyclohexene Epoxidation with Cyclohexyl Hydroperoxide: A Catalytic Route to Largely Increase Oxygenate Yield from Cyclohexane Oxidation. *ACS Catal.*, 1(10):1183–1192. <https://doi.org/10.1021/cs200354c> (in Eng.).

Jin T., Kurdyla D., Hrapovic S., Leung A.C.W., Régner S., Liu Y., Moores A., Lam E. (2020) Carboxylated Chitosan Nanocrystals: A Synthetic Route and Application as Superior Support for Gold-Catalyzed Reactions. *Biomacromolecules*, 21(6):2236–2245. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.0c00201> (in Eng.).

Kanarat J., Bunchuay Th., Chutimasakul Th., Limprasart W., Unlum J., Tantirungrotechai. J. (2022) Copper-Chitosan Beads as Efficient and Recyclable Heterogeneous Catalysts for C–H Oxidation and C–X Amination. *ChemistrySelect*, 7(43):1–8. <https://doi.org/10.1002/slct.202202517> (in Eng.).

Kumar M.A., Nagarjun N., Manyar H., Selvam P. (2024) Ionic liquid templated synthesis of cobalt-substituted mesoporous aluminophosphates: A novel heterogeneous catalyst for selective oxidation of cyclohexane to cyclohexanol. *ChemCatChem*, 16(8):1–9. <https://doi.org/10.1002/cctc.202301729> (in Eng.).

Li D., Wang Zh., Jin Sh., Zhu M. (2024) Oxidation–Reduction Treatment Initiated *In Situ* Redispersion of the Supported $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ Catalyst. *Chem Bio Eng.*, 1(6):541–547. <https://doi.org/10.1021/cbe.3c00072> (in Eng.).

Matsuo A., Hasegawa Sh., Takano Sh., Tsukuda T. (2020) Electron-Rich Gold Clusters Stabilized by Poly(vinylpyridines) as Robust and Active Oxidation Catalysts. *Langmuir*, 36(27):7844–7849. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c00812> (in Eng.).

Nauert S.L., Rosen A.S., Kim H., Snurr R.Q., Stair P.C., Notestein J.M. (2018) Evidence for Copper Dimers in Low-Loaded CuOx/SiO_2 Catalysts for Cyclohexane Oxidative Dehydrogenation. *ACS Catal.*, 8(10):9775–9789. <https://doi.org/10.1021/acscatal.8b02532> (in Eng.).

Omar L., Onfroy Th., Daniele S., Perret N. (2023) Copper Zinc Aluminate Synthesized by Sol-Gel Method with Polyacrylic Acid as Catalysts for Glycerol Hydrogenolysis. *ChemCatChem*, 15(4):1–12. <https://doi.org/10.1002/cctc.202201297> (in Eng.).

Rana S., Jonnalagadda S.B. (2017) $\text{CuO}/\text{Graphene}$ Oxide Nanocomposite as Highly Active and Durable Catalyst for Selective Oxidation of Cyclohexane. *ChemistrySelect*, 2(7):2277–2281. <https://doi.org/10.1002/slct.201601637> (in Eng.).

Roy Barman, T., Sutradhar, M., Alegria, E., Guedes da Silva, M.d.F., Pombeiro, A.J.L. (2020) Fe(III) Complexes in Cyclohexane Oxidation: Comparison of Catalytic Activities under Different Energy Stimuli. *Catalysts*, 10(10), 1175. <https://doi.org/10.3390/catal10101175> (in Eng.).

Sakthivel A., Selvam P. (2002) Mesoporous (Cr)MCM-41: A Mild and Efficient Heterogeneous Catalyst for Selective Oxidation of Cyclohexane. *Journal of Catalysis*, 211(1):134–143. <https://doi.org/10.1006/jcat.2002.3711> (in Eng.).

Shul'pin, G.B., Kozlov, Y.N., Shul'pina, L.S., Kudinov, A.R., Mandelli, D. (2009) Extremely Efficient Alkane Oxidation by a New Catalytic Reagent $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Os}_3(\text{CO})_{12}/\text{Pyridine}$. *Inorg. Chem.*, 48(22): 10480–10482. <https://doi.org/10.1021/ic901576r>(in Eng.).

Stojanov L., Rafailovska A., Jovanovski V., Mirceski V. (2022) Electrochemistry of Copper in Polyacrylic Acid: The Electrode Mechanism and Analytical Application for Gaseous Hydrogen Peroxide Detection. *J. Phys. Chem. C*, 126 (43):18313–18322. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c05259> (in Eng.).

Tumabayev N., Jumekeyeva A., Zharmagambetova A., Dussenalin B., Auyezkhanova A., Talgatov E. (2020) Oxidation of cyclohexane on copper and cobalt catalysts supported on pectin-modified oxides and tagansky montmorillonite. *N E W S of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, 3(441):200–203. <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.74> (in Eng.).

Vomeri A., Stucchi M., Villa A., Hungría A.B., Calvino J., Prati L. (2024) Cu and Fe modified Cerium and Zirconium Oxides for the Oxidation of Cyclohexane to KA Oil. *ChemCatChem*, 16(20): 1–10. <https://doi.org/10.1002/cctc.202400709> (in Eng.).

Xu C., Long Q., Zhong Sh., Wang W., Guo J., Yang J., Wang X., Dai L. (2024) Insights into the Synergistic Catalytic Effect of TiO_2 Supported V–W Oxides for Selective C–H Bond Oxidation of Cyclohexane to KA Oil. *Chemistry – A European Journal*, 30(70):1–13. <https://doi.org/10.1002/chem.202402780> (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