

**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 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

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

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

## МАЗМҰНЫ

|                                                                                                                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Абдугалимов А.Ш., Джалмаханбетова Р.И., Мукушева Г.К.</b><br>Бетулон қышқылының химиялық құрылымына еріткіштер әсерін атомистикалық тұрғыдан зерттеу .....                                                                              | 11  |
| <b>Асембаева Э.К., Шәді Д.Қ., Нурмуханбетова Д.Е., Божбанов А.Ж., Габдуллина Е.Ж.</b><br>Инулиннің ірімшік сарысуы негізіндегі ашытылған сусынның сапа көрсеткіштеріне әсері.....                                                          | 25  |
| <b>Асылбекова Д.Д., Токтыбаева Х.Р., Қалдыбаева А.Р., Журхабаева Л., Түкібаева А.С.</b><br>Фосфорлы қышқылдың платина электродындағы электрохимиялық қасиеттері және оны қорғасын анодын қолданып гальваностатикалық анодты тотықтыру..... | 39  |
| <b>Ауешов А.П., Ескибаева Ч.З., Ибраева А.М., Алжанов К.Б., Джолдасова Э.М.</b><br>Қышқылды-сілтілі комбинациялық әдіспен серпентиниттен алынған кремнеземнің адсорбциялық сипаттамаларын зерттеу .....                                    | 58  |
| <b>Ғалымжан А., Қожабеков С., Қуанышев А., Сансызбай Н., Абдрасилова А.</b><br>Октадецилметакрилат пен малеин ангидридi сополимерлері құрамының мұнайдың реологиялық қасиеттеріне әсері .....                                              | 78  |
| <b>Дарменбаева А.С., Rajasekharan R.</b> Агроқалдықтардан алынған наноцеллюлозалы мембраналардың құрылымдық қасиеттерін зерттеу.....                                                                                                       | 95  |
| <b>Дмитриева Е.А., Медведев А., Кемелбекова А.</b><br>SnO <sub>2</sub> жұқа қабықшалары негізіндегі төмен температуралы газ сенсорын және жоғары кедергілерді тіркеуге арналған прецизионды өлшеу жүйесін әзірлеу.....                     | 109 |
| <b>Джелдыбаева И.М., Қайырбеков Ж., Есеналиева М.З., Досумова Б.Т., Суймбаева С.М.</b><br>Ультрадыбыстық өңдеудің қоңыр көмір гумин қышқылдарының құрылымы мен физика-химиялық қасиеттеріне әсері.....                                     | 125 |
| <b>Джумадилов Т.К., Химэрсэн Х., Иманғазы А.</b><br>Біртекті полиэлектролиттерден құрылған интерполимерлік жүйелердің ауыр металл иондарын сорбциялау ерекшеліктері.....                                                                   | 140 |
| <b>Жылқыбек М., Оразбекова Р.С., Еркибаева М.К., Айдарова А.О., Байжұманова Т.С.</b><br>Метанды терең тотықтыруға арналған Co–Mg оксидті катализаторлар: синтезі, құрылымы және каталитикалық белсенділігі.....                            | 154 |
| <b>Иманғалиева Б., Рахметова Г., Досанова Б., Совет Н.</b><br>Полимер қалдықтарын гидролиздік өңдеу арқылы биологиялық тыңайтқыш алу технологиясы.....                                                                                     | 169 |
| <b>Қарар М.Е., Бейсенбаев О.К., Алибеков Р.С., Роснах Шамсудин.</b><br>Байдалы күрішпен және Гала сортты картоптан крахмал алу және оны биоыдырайтын материалдарда қолдану.....                                                            | 186 |
| <b>Құдайбергенова Г.Н., Азимбаева Г.Е., Камысбаева А.К., Ізтелеу Б.М., Құрбанбаева Н.М.</b><br>Топинамбур гүлдерінің май қышқылдық құрамы .....                                                                                            | 204 |

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

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Абдугалимов А.Ш., Джалмаханбетова Р.И., Мукушева Г.К.</b><br>Атомистическое исследование влияния растворителей на химическую структуру<br>бетулоновой кислоты.....                                                                                   | 11  |
| <b>Асембаева Э.К., Шади Д.К., Нурмуханбетова Д.Е., Божбанов А.Ж., Габдуллина Е.Ж.</b><br>Влияние инулина на показатели качества ферментированного напитка на основе сырной<br>сыворотки .....                                                           | 25  |
| <b>Асылбекова Д.Д., Токтибаева Х.Р., Калдыбаева А.Р., Журхабаева Л., Тукибаева А.С.</b><br>Электрохимическое поведение фосфористой кислоты на платиновом электроде<br>и её гальваностатическое анодное окисление с использованием свинцового анода..... | 39  |
| <b>Ауешов А.П., Ескибаева Ч.З., Ибраева А.М., Алжанов К.Б., Джолдасова Э.М.</b><br>Исследование адсорбционных характеристик кремнезёма, полученного из серпентинита<br>комбинированным кислотно-щелочным методом .....                                  | 58  |
| <b>Галымжан А., Кожабеков С., Куанышев А., Сансызбай Н., Абдрасилова А.</b><br>Влияние состава сополимеров октадецилметакрилата и малеинового ангидрида<br>на реологические свойства нефти .....                                                        | 78  |
| <b>Дарменбаева А.С., Rajasekharan R.</b><br>Исследование структурных свойств наноцеллюлозных мембран, полученных из агроотходов.....                                                                                                                    | 95  |
| <b>Дмитриева Е.А., Медведев А., Кемелбекова А.</b><br>Разработка низкотемпературного газового сенсора на основе тонких плёнок $\text{SnO}_2$ и прецизионной<br>измерительной системы для регистрации высокоомных сопротивлений.....                     | 109 |
| <b>Джелдыбаева И.М., Каирбеков Ж., Есеналиева М.З., Досумова Б.Т., Суймбаева С.М.</b><br>Влияние ультразвуковой обработки на структуру и физико-химические свойства гуминовых<br>кислот бурого угля .....                                               | 125 |
| <b>Джумадилов Т.К., Химэрсэн Х., Имангазы А.</b><br>Особенности сорбции ионов тяжёлых металлов интерполимерными системами,<br>сформированными из однородных полиэлектролитов.....                                                                       | 140 |
| <b>Жылкыбек М., Оразбекова Р.С., Еркибаева М.К., Айдарова А.О., Байжуманова Т.С.</b><br>Co–Mg оксидные катализаторы для глубокого окисления метана: синтез, структура<br>и каталитическая активность .....                                              | 154 |
| <b>Имангалиева Б., Рахметова Г., Досанова Б., Совет Н.</b><br>Технология получения биологического удобрения путём гидролизной обработки<br>полимерных отходов .....                                                                                     | 169 |
| <b>Карар М.Е., Бейсенбаев О.К., Алибеков Р.С., Роснах Шамсудин.</b><br>Получение крахмала из риса «Байдалы» и картофеля сорта «Гала» и его применение<br>в биоразлагаемых материалах .....                                                              | 186 |
| <b>Кудайбергенова Г.Н., Азимбаева Г.Е., Камысбаева А.К., Изтелеу Б.М., Курбанбаева Н.М.</b><br>Жирнокислотный состав цветков топинамбура .....                                                                                                          | 204 |

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

© Samadun A.I.<sup>1\*</sup>, Taussarova B.R.<sup>1</sup>, Asrakulova D.I.<sup>2</sup>,  
Nurmukhanbetova D. E.<sup>3</sup>, 2026.

<sup>1</sup>Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan;

<sup>2</sup>Institute of Polymer Chemistry and Physics, Academy of Sciences of the Republic of  
Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan;

<sup>3</sup>Narxoz University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: abdu.93\_93@mail.ru

## BIODEGRADABLE PACKAGING FILMS WITH COPPER NANOPARTICLES: EFFECT OF NABH<sub>4</sub> CONCENTRATION ON MORPHOLOGY AND ANTIFUNGAL PROPERTIES

**Samadun Abdyssemat** — head of the research laboratory for evaluation of quality and safety of food products, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: abdu.93\_93@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5286-5175>;

**Taussarova Bizhamal** — professor of the Department «Technology of chemical and pharmaceutical production», Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: brtaussarova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2718-2102>;

**Asrakulova Dilorom** — junior Researcher, Laboratory of Advanced Polymer Synthesis, Institute of Polymer Chemistry and Physics, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan,

E-mail: asrakulovadi@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-2106-6326>;

**Nurmukhanbetova Dinara** — candidate of technical sciences, Narxoz University, EP "Restaurant and hotel business" Almaty, Kazakhstan,

E-mail: dinara.nurmukhanbetova@narxoz.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8939-6325>.

**Abstract.** Fungal contamination caused by *Fusarium spp.* results in significant food losses and mycotoxin-related risks, particularly in the cereal and bakery industries. In this study, copper nanoparticles (CuNPs) were synthesized *in situ* by reducing CuSO<sub>4</sub> with sodium borohydride (NaBH<sub>4</sub>) in the presence of gelatin as a stabilizing agent (CuSO<sub>4</sub>:gelatin ratio = 1:10, v/v). Five *in situ* formulations were prepared with CuSO<sub>4</sub>:NaBH<sub>4</sub> ratios ranging from 1:1 to 1:5. Particle size distribution was characterized by dynamic light scattering (DLS). The CuNPs were incorporated into biodegradable gelatin–pectin–glycerol composite films using the solvent casting method. The antifungal activity of the films against *Fusarium sp.* was evaluated by the agar well diffusion method (10 mm well diameter) after 48 h of incubation. The formulation with a CuSO<sub>4</sub>:NaBH<sub>4</sub> ratio of 1:1 exhibited the highest proportion of true nanoparticles

(20.6% at 18.9 nm) and produced the most homogeneous film morphology. Increasing the  $\text{NaBH}_4$  concentration resulted in progressive hydrogen evolution ( $\text{NaBH}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaB}(\text{OH})_4 + 4\text{H}_2\uparrow$ ), leading to the formation of a porous film structure. All films demonstrated antifungal activity, with inhibition zone diameters ranging from  $21.0 \pm 2.5$  mm to  $32.0 \pm 1.2$  mm. Film No. 1 (1:1 ratio) showed the strongest antifungal effect, producing the largest inhibition zone ( $32.0 \pm 1.5$  mm after 48 h). These findings indicate that hydrogen evolution is a critical limitation at elevated  $\text{NaBH}_4$  concentrations and confirm that the 1:1  $\text{CuSO}_4\text{:NaBH}_4$  ratio is optimal for developing biodegradable active packaging materials.

**Keywords:** copper nanoparticles, gelatin, pectin, biodegradable film, antifungal activity, *Fusarium*, sodium borohydride, food packaging

**For citations:** Samadun A.I., Taussarova B.R., Asrakulova D.I., Nurmukhanbetova D.E. Biodegradable packaging films with copper nanoparticles: effect of  $\text{NaBH}_4$  concentration on morphology and antifungal properties. *Academic Scientific Journal of Chemistry*, 2026. — No.3. — P. 351–369. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1491.405>.

© Самадун А.И.<sup>1\*</sup>, Таусарова Б.Р.<sup>1</sup>, Асракулова Д.И.<sup>2</sup>,  
Нурмуханбетова Д. Е.<sup>3</sup>, 2026.

<sup>1</sup>Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан;

<sup>2</sup>Өзбекстан Республикасы Ғылым академиясының Полимерлер химиясы және физикасы институты, Ташкент, Өзбекстан;

<sup>3</sup>Нархоз университеті, Алматы, Қазақстан.

Email: abdu.93\_93@mail.ru

## МЫС НАНОБӨЛШЕКТЕРІ БАР БИОЫДЫРАЙТЫН ҚАПТАМАЛЫҚ ҮЛДІРЛЕР: $\text{NaBH}_4$ КОНЦЕНТРАЦИЯСЫНЫҢ МОРФОЛОГИЯҒА ЖӘНЕ САҢЫРАУҚҰЛАҚҚА ҚАРСЫ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІ

**Самадун Абдысемат** — Азық-түлік өнімдерінің сапасы мен қауіпсіздігін бағалау ғылыми-зерттеу зертханасының меңгерушісі, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан,  
E-mail: abdu.93\_93@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5286-5175>;

**Таусарова Бижамал** — химия ғылымдарының докторы, профессор, «Химиялық және фармацевтикалық өндіріс технологиясы» кафедрасы, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: brtaussarova@gmail.com;

**Асракулова Дилором** — кіші ғылыми қызметкер, Перспективалы полимерлер синтезі зертханасы, Өзбекстан Республикасы Ғылым академиясының Полимерлер химиясы және физикасы институты, Ташкент, Өзбекстан,

E-mail: asrakulovadi@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-2106-6326>;

**Нурмуханбетова Динара** — техника ғылымдарының кандидаты, «Мейрамхана және қонақүй бизнесі» білім беру бағдарламасы, Нархоз университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: dinara.nurmukhanbetova@narхоз.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8939-6325>.

**Аннотация.** *Fusarium* туысына жататын саңырауқұлақтармен ластану азық-түлік өнімдерінің елеулі шығынына және микотоксиндермен байланысты қауіптерге әкелуі мүмкін. Зерттеуде мыс нанобөлшектері  $\text{CuSO}_4$ -ті натрий боргидридімен ( $\text{NaBH}_4$ ) тотықсыздандыру арқылы желатиннің тұрақтандырғыш ретіндегі қатысуымен *in situ* әдісімен синтезделді;  $\text{CuSO}_4$ :желатин қатынасы 1:10 (көлем/көлем) болды.  $\text{CuSO}_4$ : $\text{NaBH}_4$  қатынасы 1:1-ден 1:5-ке дейінгі бес құрам дайындалды. Бөлшектердің өлшемдік таралуы динамикалық жарық шашырауы әдісімен анықталды. Алынған мыс құрамды наноқұрылымдар ерітіндіден құю әдісі арқылы биобидырайтын желатин–пектин–глицерин композиттік үлдірлеріне енгізілді. Үлдірлердің *Fusarium* sp. саңырауқұлағына қарсы белсенділігі 10 мм диаметрлі ұяшықтарды пайдаланып, агардағы диффузия әдісімен 48 сағат инкубациядан кейін бағаланды.  $\text{CuSO}_4$ : $\text{NaBH}_4$  = 1:1 қатынасындағы құрам нанометрлік диапазондағы бөлшектердің ең жоғары үлесін көрсетті — 18,9 нм кезінде 20,6%, сондай-ақ үлдірдің ең біркелкі морфологиясын қамтамасыз етті.  $\text{NaBH}_4$  концентрациясының жоғарылауы  $\text{NaBH}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaB}(\text{OH})_4 + 4\text{H}_2\uparrow$  реакциясына сәйкес сутектің қарқынды бөлінуіне және үлдірдің кеуекті құрылымының қалыптасуына әкелді. Барлық үлдірлер саңырауқұлаққа қарсы белсенділік көрсетті. 48 сағаттан кейін тежелу аймақтарының диаметрі шамамен  $22,0 \pm 2,2$  мм-ден  $32,0 \pm 1,5$  мм-ге дейін өзгерді. №1 үлдір, яғни 1:1 қатынасындағы құрам, ең жоғары саңырауқұлаққа қарсы әсер көрсетті. Нәтижелер  $\text{NaBH}_4$  жоғары концентрацияларында сутектің бөлінуі негізгі шектеуші факторлардың бірі екенін және зерттелген құрамдар ішінде  $\text{CuSO}_4$ : $\text{NaBH}_4$  = 1:1 қатынасы биобидырайтын белсенді қаптама материалдарын әзірлеу үшін ең қолайлы екенін көрсетті.

**Түйін сөздер:** мыс нанобөлшектері, желатин, пектин, биобидырайтын үлдір, саңырауқұлаққа қарсы белсенділік, *Fusarium*, натрий боргидриді, тағамдық қаптама

© Самадун А.И.<sup>1\*</sup>, Таусарова Б.Р.<sup>1</sup>, Асрақұлова Д.И.<sup>2</sup>,  
Нурмуханбетова Д.Е.<sup>3</sup>, 2026.

<sup>1</sup> Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан;

<sup>2</sup> Институт химии и физики полимеров Академии наук Республики Узбекистан,  
Ташкент, Узбекистан;

<sup>3</sup> Университет Нархоз, Алматы, Казахстан.

Email: abdu.93\_93@mail.ru

## БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ УПАКОВОЧНЫЕ ПЛЁНКИ С НАНОЧАСТИЦАМИ МЕДИ: ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ $\text{NaBH}_4$ НА МОРФОЛОГИЮ И АНТИГРИБКОВЫЕ СВОЙСТВА

Самадун Абдысемат — заведующий Научно-исследовательской лабораторией по оценке качества и безопасности продовольственных продуктов, Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан,

E-mail: abdu.93\_93@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5286-5175>;

Таусарова Бижама — доктор химических наук, профессор кафедры «Технологии химического

и фармацевтического производства», Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан,

E-mail: brtaussarova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2718-2102>;

**Асракулова Дилором** — младший научный сотрудник лаборатории синтеза перспективных полимеров, Институт химии и физики полимеров Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан,

E-mail: asrakulovadi@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-2106-6326>;

**Нурмуханбетова Динара** — кандидат технических наук, образовательная программа «Ресторанный и отельный бизнес», Университет Нархоз, Алматы, Казахстан,

E-mail: dinara.nurmukhanbetova@narxoz.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8939-6325>.

**Аннотация.** Грибковая контаминация, вызываемая представителями рода *Fusarium*, приводит к значительным потерям пищевой продукции и создаёт риски, связанные с микотоксинами, особенно в зерновой и хлебопекарной промышленности. В работе наночастицы меди синтезировали *in situ* путём восстановления  $\text{CuSO}_4$  боргидридом натрия ( $\text{NaBH}_4$ ) в присутствии желатина в качестве стабилизатора при соотношении  $\text{CuSO}_4$ :желатин = 1:10 об./об. Были приготовлены пять составов с соотношением  $\text{CuSO}_4$ : $\text{NaBH}_4$  от 1:1 до 1:5. Распределение частиц по размерам исследовали методом динамического светорассеяния. Полученные медьсодержащие наноструктуры вводили в биоразлагаемые желатин–пектин–глицериновые композитные плёнки методом полива из раствора. Антигрибковую активность плёнок в отношении *Fusarium* sp. определяли методом диффузии в агар с диаметром лунки 10 мм после 48 ч инкубации. Состав с соотношением  $\text{CuSO}_4$ : $\text{NaBH}_4$  = 1:1 характеризовался наибольшей долей частиц в истинно нанометровом диапазоне — 20,6% при размере 18,9 нм - и обеспечивал наиболее однородную морфологию плёнки. Повышение концентрации  $\text{NaBH}_4$  сопровождалось усилением выделения водорода согласно реакции  $\text{NaBH}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaB}(\text{OH})_4 + 4\text{H}_2\uparrow$ , что приводило к формированию пористой структуры плёнок. Все исследованные плёнки проявляли антигрибковую активность. Через 48 ч диаметр зон ингибирования составлял примерно от  $22,0 \pm 2,2$  мм до  $32,0 \pm 1,5$  мм, при этом максимальный эффект наблюдался для плёнки №1 с соотношением 1:1. Полученные результаты показывают, что при повышенных концентрациях  $\text{NaBH}_4$  выделение водорода становится существенным ограничивающим фактором, а соотношение  $\text{CuSO}_4$ : $\text{NaBH}_4$  = 1:1 является наиболее благоприятным из исследованных для разработки биоразлагаемых активных упаковочных материалов.

**Ключевые слова:** наночастицы меди, желатин, пектин, биоразлагаемая плёнка, антигрибковая активность, *Fusarium*, боргидрид натрия, упаковка пищевых продуктов

**Введение.** Виды рода *Fusarium* относятся к наиболее экономически значимым фитопатогенам злаковых и зернобобовых культур, вызывая корневые гнили, стеблевые гнили и фузариоз колоса с одновременной продукцией трихотеценовых, фумонизиновых и зеараленоновых микотоксинов, представляющих серьёзную угрозу для здоровья человека и животных (Leslie et al., 2006). Помимо снижения

урожайности сельскохозяйственных культур, развитие *Fusarium spp.* приводит к ухудшению технологических характеристик зерна и существенным потерям при хранении и переработке. Особую опасность представляет способность грибов сохранять жизнеспособность в продуктах переработки зерна, включая муку и хлебобулочные изделия, а также синтезировать устойчивые микотоксины, которые сохраняются даже после термической обработки. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO), ежегодно до 25 % мирового объема сельскохозяйственной продукции подвергается поражению микроскопическими грибами и загрязняется микотоксинами, что делает проблему контроля грибковой контаминации одной из наиболее актуальных задач современной пищевой промышленности.

В Республике Казахстан производство зерновых продуктов составляет около 37 % в структуре пищевой промышленности (Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan, 2024). Казахстан входит в число крупнейших мировых производителей и экспортёров пшеницы и муки, поэтому обеспечение микробиологической безопасности зерновой продукции имеет не только экономическое, но и стратегическое значение. Несмотря на совершенствование технологий послеуборочной обработки, транспортировки и хранения зерна, риск вторичного инфицирования продукции плесневыми грибами сохраняется на протяжении всей логистической цепочки. В связи с этим возрастает необходимость разработки новых упаковочных материалов, способных не только выполнять барьерные функции, но и активно подавлять развитие патогенной микрофлоры непосредственно на поверхности пищевого продукта.

**Литературный обзор.** В последние годы концепция активной упаковки рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений повышения безопасности и увеличения сроков хранения пищевых продуктов. В отличие от традиционных упаковочных материалов, выполняющих преимущественно защитную функцию, активные упаковочные системы способны взаимодействовать с внутренней средой упаковки, подавляя рост микроорганизмов, регулируя газовый состав, поглощая влагу или высвобождая антимикробные соединения в контролируемых количествах. Современные исследования показывают, что использование активной упаковки позволяет существенно увеличить сроки хранения хлебобулочных изделий без применения дополнительных химических консервантов, что соответствует современным требованиям экологически безопасного и «чистого» производства пищевых продуктов (Gvozdenko et al., 2022; Zhang et al., 2023).

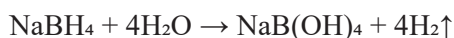
Особое внимание уделяется биоразлагаемым упаковочным материалам, способным заменить традиционные полимеры нефтехимического происхождения. Ежегодно в мире производится более 400 млн тонн пластиковых материалов, значительная часть которых используется именно для упаковки пищевой продукции. Большинство подобных материалов практически не подвергается биодеструкции и становится источником длительного загрязнения окружающей среды. В связи с этим биоразлагаемые полимерные композиции на основе

природных биополимеров рассматриваются как одно из наиболее перспективных направлений развития экологически безопасной упаковки. Наибольший интерес вызывают композиционные материалы, содержащие функциональные нанодобавки, способные одновременно улучшать механические свойства плёнок и придавать им выраженную антимикробную активность.

Среди различных неорганических антимикробных наполнителей наночастицы меди (НЧМ) занимают особое место благодаря высокой биологической активности, доступности исходного сырья и относительно невысокой стоимости по сравнению с наночастицами серебра. Механизм их антигрибкового действия является комплексным и включает постепенное высвобождение ионов  $\text{Cu}^{2+}$ , взаимодействие с белками клеточной стенки и цитоплазматической мембраны микроорганизмов, нарушение функционирования дыхательной цепи, генерацию активных форм кислорода, включая гидроксильные радикалы посредством реакций Фентона, а также повреждение ДНК и ингибирование активности жизненно важных ферментов клетки (Katsumiti et al., 2018; Jafarzadeh et al., 2020). Благодаря множественности механизмов воздействия вероятность формирования устойчивости микроорганизмов к меди значительно ниже по сравнению с традиционными фунгицидами, что делает наночастицы меди перспективными компонентами активных упаковочных материалов.

Антимикробная эффективность НЧМ во многом определяется их морфологическими характеристиками, прежде всего размером частиц, распределением по размерам, степенью агрегации и устойчивостью коллоидной системы. Уменьшение среднего диаметра частиц сопровождается увеличением удельной площади поверхности и числа активных центров, что способствует более интенсивному высвобождению ионов меди и повышению эффективности взаимодействия с клетками микроорганизмов. Поэтому выбор условий синтеза наночастиц является одним из ключевых факторов формирования функциональных свойств будущих нанокompозитных упаковочных материалов.

Одним из наиболее распространённых восстановителей при химическом синтезе металлических наночастиц является боргидрид натрия ( $\text{NaBH}_4$ ). Его использование обеспечивает быстрое восстановление ионов меди при комнатной температуре и позволяет получать частицы нанометрового диапазона без применения сложного оборудования (Iqbal Z. et al., 2020). Однако высокая реакционная способность  $\text{NaBH}_4$  сопровождается интенсивным гидролизом в водной среде с выделением газообразного водорода согласно реакции:



Если синтез наночастиц осуществляется непосредственно (*in situ*) в растворе, содержащем плёнообразующие биополимеры, образование пузырьков водорода может существенно влиять на формирование структуры материала. Возникающие газовые включения способны образовывать поры различного размера, нарушать однородность плёнки, ухудшать её механическую прочность, прозрачность и

барьерные свойства. Несмотря на большое количество публикаций, посвящённых синтезу наночастиц меди, влияние выделения водорода при *in situ* синтезе на морфологию биоразлагаемых упаковочных плёнок остаётся недостаточно изученным и требует дополнительного экспериментального исследования (Truong et al., 2023).

В качестве основы биоразлагаемых упаковочных материалов широко используются природные полимеры, обладающие высокой биосовместимостью и безопасностью для контакта с пищевыми продуктами. Желатин представляет собой денатурированный коллаген животного происхождения, характеризующийся хорошими плёнообразующими свойствами, высокой прозрачностью, способностью образовывать эластичные структуры и эффективно стабилизировать металлические наночастицы за счёт наличия аминных и карбоксильных функциональных групп (Блинов А.В. и др., 2020). Однако чистые желатиновые плёнки обладают относительно высокой чувствительностью к влаге и недостаточной механической стабильностью.

Для устранения указанных недостатков перспективным является использование смешанных биополимерных систем. Одним из наиболее эффективных компонентов таких композиций является пектин — природный анионный полисахарид, широко распространённый в клеточных стенках высших растений. В условиях Республики Казахстан дополнительным преимуществом применения пектина является возможность его получения из яблочных выжимок, представляющих собой многотоннажные отходы предприятий соковой промышленности. Совместное использование желатина и пектина позволяет формировать более плотную полимерную сеть за счёт электростатического взаимодействия между макромолекулами, повышая механическую прочность, эластичность, газобарьерные свойства и устойчивость плёнок к воздействию влаги (Omerović et al., 2021; Zhang et al., 2023). Введение наночастиц меди в подобные биополимерные матрицы позволяет придать материалу выраженные антигрибковые свойства. В настоящей работе полученные образцы рассматриваются как плёнки на основе биоразлагаемых полимеров с антигрибковыми свойствами; оценка фактической биоразлагаемости, миграции и токсикологической безопасности разработанных материалов требует проведения дополнительных исследований.

Важным фактором, определяющим эффективность активных упаковочных материалов, является контролируемое высвобождение антимикробного компонента в течение всего периода хранения пищевого продукта. В отличие от традиционных консервантов, которые вводятся непосредственно в состав пищевой продукции, антимикробные соединения, иммобилизованные в полимерной матрице, постепенно мигрируют к поверхности продукта, поддерживая эффективную концентрацию активного вещества на протяжении длительного времени. Такой механизм позволяет существенно снизить суммарное содержание антимикробного агента, уменьшить риск его накопления в продукте и обеспечить пролонгированную защиту от микробиологической порчи. Для

металлических наночастиц особое значение имеет способность полимерной матрицы регулировать скорость высвобождения ионов металла, поскольку именно контролируемая миграция  $\text{Cu}^{2+}$  обеспечивает устойчивый антибактериальный и антигрибковый эффект без превышения допустимых уровней безопасности.

Не менее важным параметром является равномерность распределения наночастиц в объёме полимерной матрицы. Агрегация металлических наночастиц приводит к уменьшению их удельной поверхности, снижению количества активных центров и, как следствие, к уменьшению антимикробной активности. Кроме того, крупные агрегаты могут выступать концентраторами механических напряжений, ухудшая прочностные характеристики плёнок и снижая их эксплуатационную надёжность. Поэтому получение устойчивых коллоидных систем с узким распределением частиц по размерам рассматривается как одно из основных условий создания эффективных нанокompозитных упаковочных материалов.

Использование желатина в качестве стабилизатора при синтезе наночастиц меди позволяет одновременно решать несколько технологических задач. Функциональные аминные, карбоксильные и гидроксильные группы белковой макромолекулы способны координироваться с поверхностью образующихся наночастиц, формируя пространственный защитный слой, препятствующий их коагуляции и окислению. Одновременно желатин выполняет функцию совместимого плёнкообразующего компонента, благодаря чему отпадает необходимость дополнительного введения поверхностно-активных веществ или синтетических стабилизаторов, способных ухудшить экологическую безопасность упаковочного материала. Использование желатина в качестве стабилизатора позволяет совместить функции стабилизации наноструктур и формирования полимерной матрицы, что потенциально может способствовать сокращению количества дополнительных вспомогательных компонентов. Вместе с тем применение  $\text{NaBH}_4$  требует дополнительной оценки безопасности процесса, остаточного содержания реагента и продуктов его превращения. Поэтому в данной работе этот подход рассматривается как перспективный с точки зрения принципов рационального использования компонентов, однако его соответствие принципам «зеленой химии» не следует считать окончательно подтвержденным без проведения дополнительных исследований.

Следует отметить, что эффективность биоразлагаемых упаковочных материалов определяется не только их антимикробными свойствами, но и совокупностью физико-механических характеристик. Для практического применения упаковочные плёнки должны обладать достаточной прочностью при растяжении, эластичностью, низкой газопроницаемостью и удовлетворительной устойчивостью к воздействию влаги. Формирование пористой структуры вследствие выделения водорода во время восстановления ионов меди способно существенно изменять перечисленные свойства. С одной стороны, увеличение пористости может способствовать более интенсивному выходу ионов меди и повышению скорости антимикробного действия. С другой стороны, наличие

большого количества пор снижает механическую прочность материала, ухудшает его барьерные свойства и повышает проницаемость для кислорода и водяного пара, что отрицательно влияет на эффективность упаковки при длительном хранении пищевых продуктов. Следовательно, оптимизация условий синтеза должна обеспечивать компромисс между высокой биологической активностью и сохранением необходимых эксплуатационных характеристик плёнки.

Дополнительный интерес представляет применение технологии *in situ* синтеза наночастиц непосредственно в плёнообразующем растворе. По сравнению с традиционным подходом, предусматривающим предварительное получение и последующее введение наночастиц в полимерную матрицу, *in situ* синтез позволяет существенно сократить число технологических стадий, уменьшить вероятность агломерации наночастиц при хранении коллоидных систем и обеспечить их более равномерное распределение в объёме формируемой плёнки. Кроме того, образование наночастиц непосредственно в присутствии макромолекул желатина и пектина способствует более эффективному взаимодействию между поверхностью наночастиц и функциональными группами биополимеров, что положительно влияет на стабильность композитной структуры. Вместе с тем особенности протекания реакции восстановления, сопровождающейся интенсивным выделением газообразного водорода, требуют тщательного выбора концентрации восстановителя, поскольку именно этот фактор способен определять как морфологию материала, так и его последующие функциональные свойства.

В последние годы всё больше исследований посвящается разработке активных биоразлагаемых упаковочных материалов именно для хлебобулочных изделий, поскольку после выпечки их основным фактором порчи становятся плесневые грибы, включая представителей рода *Fusarium*, *Penicillium* и *Aspergillus*. В условиях повышенной влажности поверхности хлеба микромицеты способны быстро колонизировать продукт, вызывая ухудшение органолептических свойств, снижение пищевой ценности и потенциальное накопление микотоксинов. Поэтому создание биоразлагаемых упаковочных материалов с пролонгированным антигрибковым действием рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений современной пищевой нанотехнологии и соответствует мировым тенденциям перехода к экологически безопасным упаковочным системам нового поколения.

Несмотря на значительное число исследований, посвящённых синтезу наночастиц меди и созданию биоразлагаемых упаковочных материалов, взаимосвязь между концентрацией  $\text{NaBH}_4$ , размером синтезируемых наночастиц, особенностями формирования структуры плёнки и её антигрибковой активностью изучена недостаточно. Особенно мало сведений о влиянии выделения водорода при *in situ* синтезе наночастиц на морфологические характеристики упаковочных материалов и их функциональные свойства.

Целью настоящего исследования являлись: *in situ* синтез наночастиц меди с последующей характеристикой распределения частиц по размерам методом

динамического светорассеяния, изучение влияния концентрации  $\text{NaBH}_4$  на размер наночастиц и морфологию биоразлагаемых желатин–пектиновых плёнок, содержащих *in situ* - синтезированные наночастицы меди, а также оценка антигрибковой активности разработанных упаковочных материалов против *Fusarium sp.* методом диффузии в агаре с лункой после 48 часов инкубации. Полученные результаты направлены на оптимизацию условий синтеза функциональных биоразлагаемых упаковочных материалов с улучшенными защитными свойствами для увеличения микробиологической безопасности пищевой продукции.

### Материалы и методы

**Материалы.** Пентагидрат сульфата меди (II) ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\geq 99\%$ ), боргидрид натрия ( $\text{NaBH}_4$ , 98%), глицерин ( $\geq 99,5\%$ ) и желатин (пищевой, прочность по Блуму 200) приобретены у Sigma-Aldrich (Merck KGaA, Дармштадт, Германия). Пектин (степень этерификации  $\geq 65\%$ ) предоставлен Jiaxing Renze Import & Export Co., Ltd. (Китай). Агар Сабуро с декстрозой (АСД) и микробиологические реактивы получены от HiMedia Laboratories (Индия). Микробиологические исследования по определению антимикробных свойств разработанных упаковочных материалов проводились на базе испытательной лаборатории Института микробиологии Академии наук Республики Узбекистан. Тест-объект — штамм *Fusarium sp.* — был получен из коллекции культур данного Института.

**Синтез наночастиц меди методом *in situ*.** Пять составов НЧМ методом *in situ* (№ 1–5) приготовлены смешением 1 мл 1,25%-го водного раствора  $\text{CuSO}_4$  с 10 мл 1%-го водного раствора желатина (соотношение  $\text{CuSO}_4$ : желатин = 1:10 об./об.) при перемешивании при комнатной температуре. Раствор  $\text{NaBH}_4$  (0,5 Н) добавляли по каплям в течение 2 мин в объёмах 1, 2, 3, 4 и 5 мл для составов 1–5 соответственно, что соответствует соотношениям  $\text{CuSO}_4$ : $\text{NaBH}_4$  от 1:1 до 1:5. Окраска реакционной смеси изменялась от бледно-голубой до оранжево-коричневой, что подтверждает восстановление меди. Выделение газообразного  $\text{H}_2$  (эффервесценция) визуально наблюдалось при возрастании объёма  $\text{NaBH}_4$ : отсутствовало в составе № 1 (1 мл  $\text{NaBH}_4$ ) и выраженно проявлялось в составах № 3–5 ( $\geq 3$  мл  $\text{NaBH}_4$ ).

**Характеристика наночастиц.** Распределение наночастиц меди (НЧМ) по размерам (объёмно-взвешенные массовые доли фракций) определяли методом динамического светорассеяния (ДСР) при температуре  $25 \pm 0,1$  °C на анализаторе Zetasizer Nano ZS (Malvern Panalytical, Великобритания), оснащённом He–Ne-лазером с длиной волны 633 нм и детектором обратного рассеяния (173°, NIBS). Перед измерением образцы разбавляли деионизованной водой до оптимальной концентрации, термостатировали в течение 120 с, после чего выполняли не менее трёх последовательных измерений для каждого образца. Гидродинамический диаметр частиц рассчитывали по уравнению Стокса–Эйнштейна. Метод динамического светорассеяния широко применяется для определения размеров наночастиц, оценки их распределения по размерам и коллоидной стабильности дисперсных систем (Lim et al., 2013; Ramos, 2017).

**Изготовление биоразлагаемых композитных плёнок.** Биоразлагаемые композитные плёнки получали методом полива из раствора. Плёнкообразующий раствор приготавливали растворением желатина (5 г) и пектина (10 г) в дистиллированной воде (200 мл) при 60°C при перемешивании в течение 30 мин, с последующим добавлением глицерина (5 г) в качестве пластификатора и охлаждением. Суспензию НЧМ (составы *in situ* № 1–5) вносили в плёнкообразующий раствор при соотношении наночастицы: полимер = 1:10 (об./об.) и перемешивали 5 мин. В настоящем исследовании основное внимание уделено влиянию соотношения  $\text{CuSO}_4$  на характеристики получаемых композитных плёнок. Контрольные образцы плёнок без медьсодержащего компонента и без добавления  $\text{NaBH}_4$  в текущую экспериментальную серию не включались. Получение и исследование соответствующих контрольных образцов проводится в рамках продолжающейся серии экспериментов и будет использовано для количественной оценки вклада медьсодержащего компонента и  $\text{NaBH}_4$  в антигрибковую активность и морфологию плёнок.

**Антигрибковая активность: метод диффузии в агаре с лункой.** Суспензию спор *Fusarium* sp. ( $1 \times 10^6$  спор  $\text{мл}^{-1}$ ) готовили в стерильной дистиллированной воде и контролировали концентрацию гемоцитометром. Агар Сабуро с декстрозой (АСД, 20 мл) разливали в стерильные чашки Петри (90 мм) и давали застыть. Инокуляцию проводили нанесением 100 мкл суспензии спор равномерным распределением стерильным шпателем. Лунки (диаметр 10 мм) вырезали стерильным пробочным сверлом. В каждую лунку вносили 100 мкл водного экстракта плёнки, приготовленного погружением диска плёнки площадью 1  $\text{см}^2$  в 1 мл стерильной дистиллированной воды на 24 ч при комнатной температуре. Чашки инкубировали при  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ . Полный диаметр зоны подавления роста (включая лунку 10 мм) измеряли через 48 ч. Все варианты плёнок исследовали в трёх независимых повторностях ( $n = 3$ ). Результаты представлены в виде среднего значения  $\pm$  стандартное отклонение (Mean  $\pm$  SD).

### Результаты.

**Распределение частиц по размерам: синтез *in situ*.** В таблице 1 представлены результаты и графики показаны на рисунке 1 ДСР для пяти составов *in situ*. Присутствие желатина в качестве стабилизатора обеспечило обнаружение нанофракций (<100 нм) во всех составах, подтверждая роль желатина в ограничении роста частиц на начальном этапе синтеза. На рисунке 2 показана аппроксимация экспериментальных данных и соответствующий спектр коэффициентов трансляционной диффузии ( $D_t$ ). Анализ пиков показал, что преобладающие популяции синтезированных наночастиц имеют коэффициенты диффузии в диапазоне  $2.7 \times 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$  (Пик 2, площадь = 42.9%) и  $1.7 \times 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$  (Пик 3, площадь = 30.0%). Согласно уравнению Стокса-Эйнштейна, эти значения соответствуют хорошо стабилизированным неагломерированным металлическим наноструктурам, локализованным внутри макромолекул желатина. Многокомпонентное распределение подтверждает, что восстановление *in situ* в матрице желатина приводит к формированию стабильных наноструктур

с высокой кинетической устойчивостью. Состав № 1 ( $\text{CuSO}_4:\text{NaBH}_4 = 1:1$ ) характеризовался наибольшей объёмной долей частиц в истинном нанометровом диапазоне: 20,6% при 18,9 нм. Составы № 3 и № 4 обеспечили наименьшие размеры отдельных частиц (9,01 нм и 7,15 нм соответственно), однако при меньших объёмных долях (16,4% и 19,3%). Состав № 5 (соотношение 1:5) показал наименьший обнаруженный размер частиц (3,62 нм) при минимальной объёмной доле (1,2%), тогда как доминирующая фракция представлена агрегатами микронного масштаба (67,5% при 3 мкм; 21,1% при 54 мкм).

Таблица 1 – Объёмно-взвешенное распределение НЧМ по размерам при синтезе *in situ* (соотношение  $\text{CuSO}_4$ :желатин = 1:10 об./об.).

| № | Соотношение $\text{CuSO}_4$ :<br>$\text{NaBH}_4$ | Распределение частиц по размерам                                        | pH    |
|---|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1 | 1:1                                              | 20,6% — 18,9 нм;<br>30,4% — 142,3 нм;<br>42,9% — 9,3 мкм                | 10,12 |
| 2 | 1:2                                              | 21,3% — 28,8 нм;<br>76,6% — 15 мкм                                      | 10,17 |
| 3 | 1:3                                              | 16,4% — 9,01 нм;<br>22,1% — 112,6 нм;<br>59,1% — 17 мкм                 | 10,79 |
| 4 | 1:4                                              | 19,3% — 7,15 нм;<br>43,1% — 95,78 нм;<br>34,7% — 29 мкм                 | 10,61 |
| 5 | 1:5                                              | 1,2% — 3,62 нм;<br>9,1% — 193,8 нм;<br>67,5% — 3 мкм;<br>21,1% — 54 мкм | 10,76 |

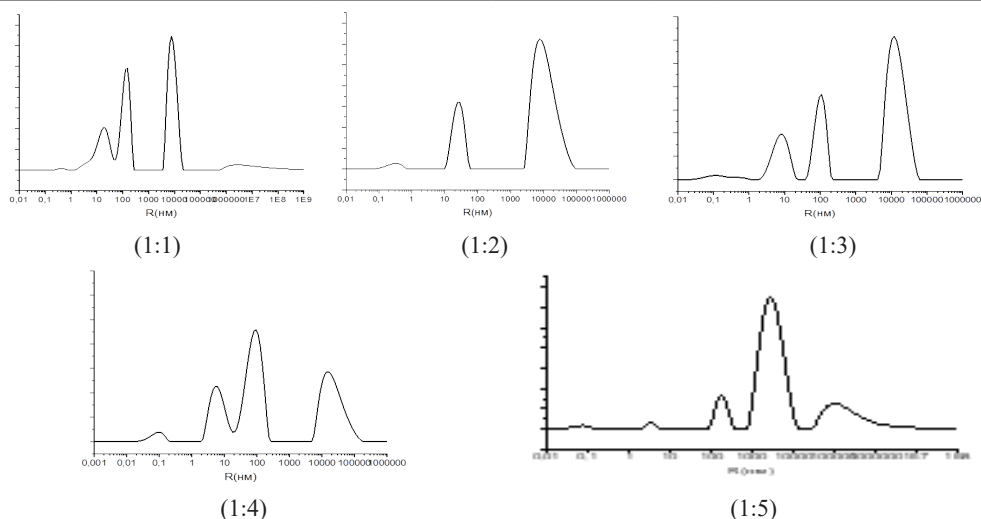


Рисунок 1 — Графики динамического светорассеяния (ДСР) распределения наночастиц меди по размерам, стабилизированных желатином ( $\text{Cu}$ -Желатин/  $\text{NaBH}_4$ ), при массовых соотношениях от 1:1 до 1:5

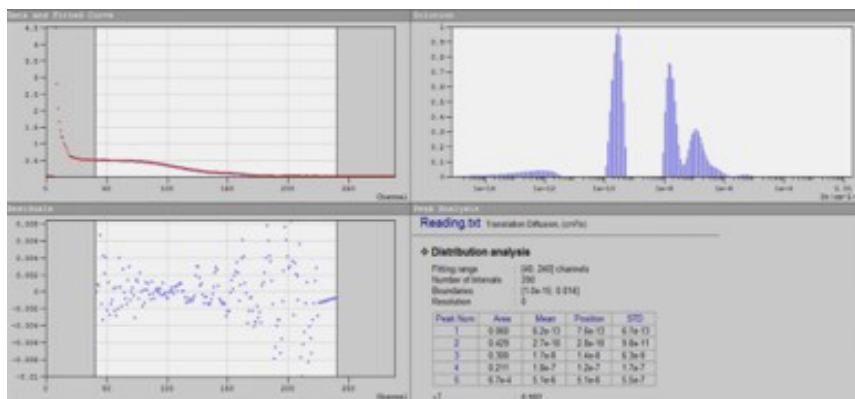


Рисунок 2 — Спектр коэффициентов трансляционной диффузии наночастиц (Cu-Желатин/NaBH<sub>4</sub>), синтезированных in situ (соотношение 1:1): аппроксимация экспериментальных данных (слева), спектр распределения коэффициентов трансляционной диффузии (Dt) (справа) и анализ остатков (снизу слева).

Цвет растворов наночастиц является их важной качественной характеристикой, т.к. он может характеризовать размер частиц и их химический состав. Причина различия цветов коллоидных растворов наночастиц различны: природа дисперсной фазы и дисперсионной среды, дисперсность частиц, форма и строение. Все эти факторы влияют не только на поглощение раствором света, но и на его рассеяние. Даже незначительное изменение цвета раствора может свидетельствовать об изменении размеров частиц и химического состава. Оптические спектры растворов наночастиц и наноматериалов являются не менее важной качественной характеристикой, чем цвет раствора. Метод оптической спектроскопии основан на измерении поглощения частицами вещества электромагнитного излучения оптического диапазона. На рисунках 3, 4 представлены результаты оптические спектры для исследованных коллоидных растворов. Влияние концентрации аскорбиновой кислоты на образования наночастиц меди изображена на рисунке 5.

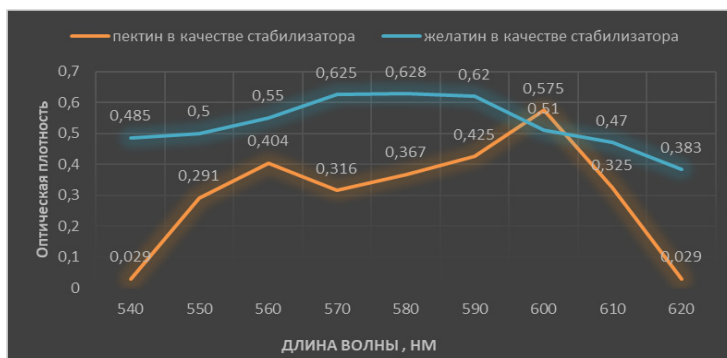


Рисунок 3 — График полученных данных на спектрофотометре Jenway 6705

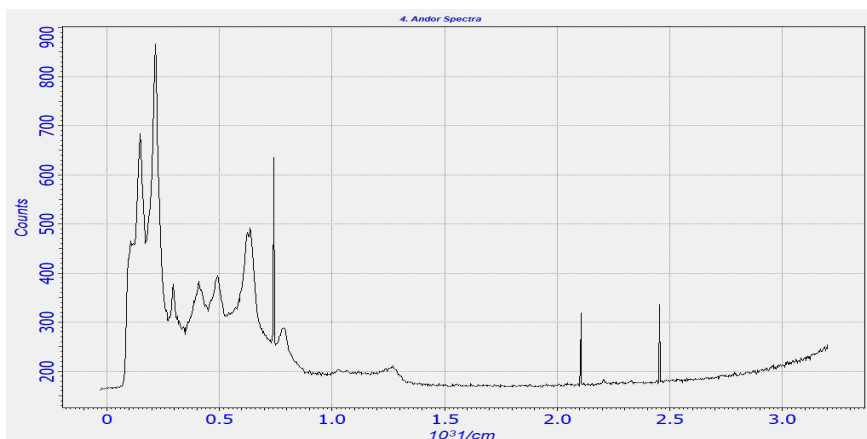


Рисунок 4 — Оптический спектр наночастиц меди при использовании желатина в качестве стабилизатора в исходных растворах

Для предварительного установления фазового состава синтезированных наночастиц меди применяли спектроскопию комбинационного рассеяния (КР). Спектры регистрировали в диапазоне  $50\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ . Результаты представлены на рисунке 5.

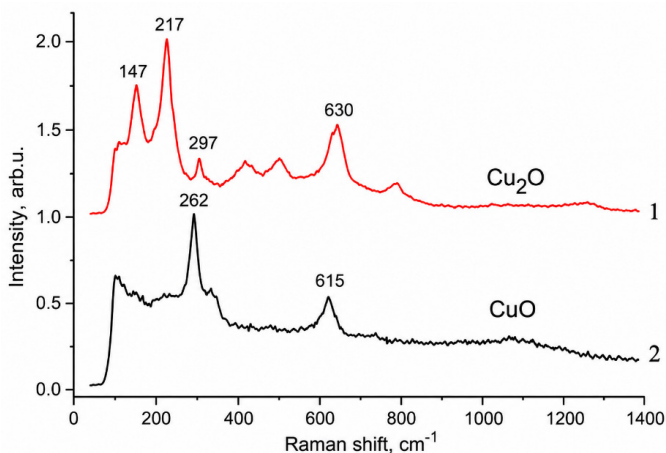


Рисунок 5 — Рамановские спектры наночастиц меди, полученных с использованием желатина (верхняя кривая, спектральный профиль предположительно соответствует  $\text{Cu}_2\text{O}$ ) и пектина (нижняя кривая, спектральный профиль предположительно соответствует  $\text{CuO}$ ) в качестве стабилизаторов

КР-спектр образца, стабилизированного желатином, характеризуется четырьмя основными полосами при  $147$ ,  $217$ ,  $297$  и  $630\text{ см}^{-1}$ . Наблюдаемый набор колебательных мод имеет спектральные характеристики, согласующиеся с литературными данными для кубической фазы оксида меди(I) ( $\text{Cu}_2\text{O}$ , куприт).

Совокупность наблюдаемых полос демонстрирует хорошее соответствие характерным рамановским особенностям наноразмерного  $\text{Cu}_2\text{O}$ , что позволяет предположить преимущественное присутствие данной фазы в исследуемом образце. Регистрации характеристических КР-полос, соответствующих фазам  $\text{Cu}_2\text{O}$  и  $\text{CuO}$ , служит косвенным доказательством образования медьсодержащих наночастиц в ходе синтеза. В исходных реакционных растворах, содержащих ионы  $\text{Cu}^{2+}$  в растворённой форме, соответствующие фононные моды кристаллических фаз меди отсутствуют. Появление выраженных характеристических полос в КР-спектрах свидетельствует о формировании упорядоченных кристаллических доменов, что является признаком нуклеации и роста наночастиц. Таким образом, метод КР-спектроскопии подтверждает образование наночастиц на основе оксидов меди в обоих синтезированных образцах, при этом фазовый состав определяется природой применяемого стабилизатора.

**Морфология биоразлагаемых композитных плёнок.** Визуальный осмотр высушенных желатин–пектин–глицериновых композитных плёнок выявил выраженную зависимость морфологии плёнки от соотношения  $\text{CuSO}_4\text{:NaBH}_4$  (рисунок 6). Плёнки № 1 и № 2 выглядели полупрозрачными, гладкими и однородными, с бледно-кремово-жёлтой окраской, обусловленной диспергированными НЧМ. Плёнки № 3 и № 4 демонстрировали прогрессирующее побурение и незначительные поверхностные неровности, по всей поверхности плёнки были видны макроскопические поры и газовые пузыри. Плёнка № 5 (5 мл  $\text{NaBH}_4$ ) существенно отличалась от остальных: по всей поверхности плёнки были видны макроскопические поры и газовые пузыри, вызванные захватом  $\text{H}_2$  в матрице желатин–пектин при желировании плёнки в ходе реакции  $\text{NaBH}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaB(OH)}_4 + 4\text{H}_2\uparrow$ . Образовавшаяся пористая структура нарушила однородность и целостность плёнки.

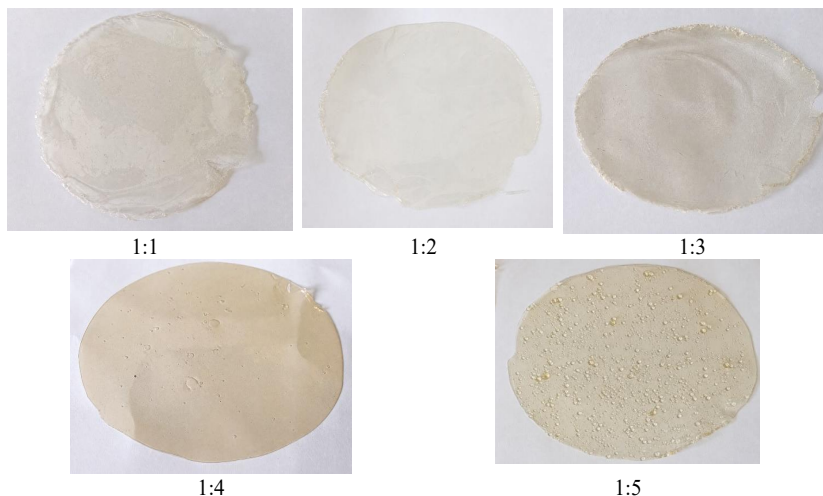
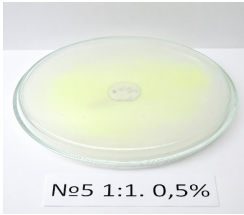
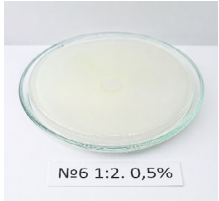
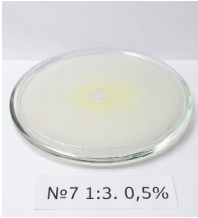
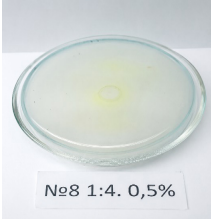
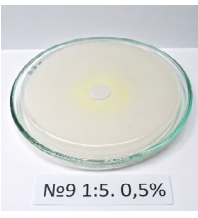


Рисунок 6 – Фотографии биоразлагаемых желатин–пектин–глицериновых композитных плёнок (№ 1–5), содержащих НЧМ, синтезированные при соотношениях  $\text{CuSO}_4\text{:NaBH}_4$  от 1:1 до 1:5.

**Антигрибковая активность против *Fusarium sp.*** Результаты оценки антигрибковой активности представлены в таблице 2. Все пять плёнок обеспечивали измеримые зоны подавления роста *Fusarium sp.* через 48 ч, что подтверждает высвобождение биологически активных форм меди из всех составов. Диаметры зон подавления через 48 ч варьировали от  $22,0 \pm 2,2$  мм (плёнка № 5) до  $32,0 \pm 1,5$  мм (плёнка № 1).

Таблица 2 – Диаметры зон подавления роста (мм) против *Fusarium sp.*  
Диаметр лунки = 10 мм.

| Соотношение $\text{CuSO}_4$ :<br>$\text{NaBH}_4$ | Зона подавления 48 ч, мм |                                                                                                      |
|--------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (1:1)                                            | $32,0 \pm 1,5$           | <br>№5 1:1. 0,5%   |
| (1:2)                                            | $29,0 \pm 1,8$           | <br>№6 1:2. 0,5%   |
| (1:3)                                            | $27,0 \pm 2,0$           | <br>№7 1:3. 0,5%  |
| (1:4)                                            | $26,0 \pm 1,5$           | <br>№8 1:4. 0,5% |
| (1:5)                                            | $22,0 \pm 2,2$           | <br>№9 1:5. 0,5% |

**Обсуждение.** Превосходящая антигрибковая эффективность плёнки № 1 ( $\text{CuSO}_4\text{:NaBH}_4 = 1\text{:}1$ ; зона подавления  $32,0 \pm 1,5$  мм через 48 ч) определяется двумя взаимодополняющими структурными факторами. Во-первых, состав 1:1 обеспечил наибольшую объёмную долю частиц в истинном нанометровом диапазоне (20,6% при 18,9 нм). Меньшие по размеру НЧМ обладают большей удельной поверхностью, что обеспечивает более эффективное высвобождение ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и генерацию АФК — основных механизмов антигрибкового действия — в соответствии с установленными зависимостями «размер–активность» для металлических наночастиц (Katsumiti et al., 2018; Žabar et al., 2021). Прямая связь между размером наночастиц и антигрибковой активностью против *Fusarium* подтверждена в независимых исследованиях НЧМ, синтезированных с хитозаном в качестве стабилизатора (Truong et al., 2023), что свидетельствует об универсальности данной тенденции для различных биополимерных стабилизаторов.

Во-вторых, однородная морфология плёнки состава № 1 обеспечивает равномерную кинетику высвобождения ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и максимальный эффективный контакт плёнки с поверхностью агара в ходе диффузионного теста. Напротив, пористая структура плёнки № 5, обусловленная выделением  $\text{H}_2$  при высокой концентрации  $\text{NaBH}_4$ , снижала площадь эффективного контакта и нарушала равномерную диффузию форм меди в агар. Зарегистрированные в настоящем исследовании диаметры зон подавления роста (32 мм) сопоставимо с данными, приведёнными в литературе для антигрибковых плёнок и покрытий на основе НЧМ против *Fusarium* и родственных фитопатогенных грибов (как правило, 15–35 мм) (Žabar et al., 2021; Popescu et al., 2023).

Полученные результаты указывают на двойную функцию желатина в исследуемой системе: в качестве стабилизатора при синтезе наноструктур и в качестве плёнокообразующего компонента матрицы. В методе *in situ*: в качестве агента ограничения роста наночастиц при синтезе и в качестве основного плёнокообразующего компонента матрицы. Прогрессирующая потеря эффективности стабилизации при  $\text{CuSO}_4\text{:NaBH}_4 > 1\text{:}2$ , выражающаяся в нарастании агрегированных фракций и дефектов плёнки, вызванных  $\text{H}_2$ , определяет практическую верхнюю границу использования  $\text{NaBH}_4$  в данной системе, которую следует учитывать при масштабировании производства.

### **Заключение.**

1. Синтез НЧМ методом *in situ* с желатином в качестве стабилизатора ( $\text{CuSO}_4\text{:желатин} = 1\text{:}10$  об./об.) обеспечил более управляемое распределение частиц по размерам с выявляемыми нанофракциями во всех составах.

2. Соотношение  $\text{CuSO}_4\text{:NaBH}_4 = 1\text{:}1$  признано оптимальным: оно обеспечивает наибольшую долю истинных наночастиц (20,6% при 18,9 нм) и наиболее однородную морфологию плёнки.

3. Все пять желатин–пектиновых НЧМ-плёнок проявили антигрибковую активность против *Fusarium sp.* по методу диффузии в агаре с лункой. Плёнка № 1 (соотношение 1:1) показала наибольшую эффективность.

4. Желатин–пектин–глицериновая матрица представляет перспективную основу для разработки биоразлагаемых полимерных плёнок с антигрибковыми свойствами. Оценка фактической биоразлагаемости, миграции меди, остаточного содержания продуктов превращения  $\text{NaBH}_4$  и токсикологической безопасности требует проведения дополнительных исследований.

5. Электронно-микроскопическая и спектроскопическая характеристика синтезированных медьсодержащих наноструктур, а также исследование контрольных образцов, миграции компонентов и безопасности разработанных материалов являются направлениями продолжающейся работы.

### References

Blinov A.V., Gvozdenko A.A., Siddiqui S.A. (2020) Sintez nanorazmernogo oksida medi (II), stabilizirovannogo polietilenglikolem [Synthesis of nanoscale copper (II) oxide stabilized with polyethylene glycol]. Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series "Natural Sciences", 3. — P. 56–70. (in Russ.)

Byuro nacional'noj statistiki Respubliki Kazahstan [Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan] (2024) Resources and use of certain types of products. Astana. (in Russ.)

Gvozdenko A.A., Siddiqui S.A., Blinov A.V. et al. (2022) Synthesis of CuO Nanoparticles Stabilized with Gelatin for Potential Use in Food Packaging Applications. Scientific Reports, 12(1). — P. 12843. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16878-w> (in Eng.)

Iqbal Z., Siddiqui V.U., Alam M., Siddiqi W.A. (2020) Synthesis of Copper (II) Oxide Nanoparticles by Pulsed Sonochemical Method. AIP Conference Proceedings, 2276. — P. 020010. <https://doi.org/10.1063/5.0025688> (in Eng.)

Jafarzadeh S., Jafari S.M. (2020) Metal Nanoparticles as Functional Additives in Biodegradable Food Packaging Materials: Effects on Mechanical, Barrier, Optical and Thermal Properties. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 61. — P. 2640–2658. (in Eng.)

Katsumiti A., Thorley A.J., Arostegui I., Reip P., Valsami-Jones E., Tetley T.D., Cajaraville M.P. (2018) Cytotoxicity of CuO Nanoparticles in Mussel Cells and Comparative Sensitivity of Human Cells. Toxicology in Vitro, 48. — P. 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2018.01.013> (in Eng.)

Leslie J.F., Summerell B.A. (2006) The Fusarium Laboratory Manual. Ames: Blackwell Publishing. (in Eng.)

Lim J.K., Yeap S.P., Che H.X., Low S.C. (2013) Characterization of Magnetic Nanoparticle by Dynamic Light Scattering. Nanoscale Research Letters, 8. — P. 381. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-381> (in Eng.)

Omerović N., Djisalov M., Živojević K., Mladenović M., Vunduk J., Milenković I., Knežević Ž.N., Gadžanski I., Vidić J. (2021) Antimicrobial Nanoparticles and Biodegradable Polymer Composites for Active Food Packaging. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 20. — P. 2428–2454. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12727> (in Eng.)

Popescu V., Prodan D., Cuc S. et al. (2023) Antimicrobial Poly (Lactic Acid)/Copper Nanocomposites for Packaging Materials. Materials, 16. — P. 1415. <https://doi.org/10.3390/ma16041415> (in Eng.)

Ramos A.P. (2017) Dynamic Light Scattering Applied to Nanoparticle Characterization. In: Nanocharacterization Techniques. Elsevier. — P. 99–110. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-49778-7.00004-7> (in Eng.)

Samadun A.I., Tausarova B.R., Daribaeva G.T., Nurmukhanbetova D.E. (2024) Sintez nanochastich oksida medi i ih primeneniye dlya upakovki pishchevyykh produktov [Synthesis of copper oxide nanoparticles and their application for food packaging]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Chemistry and Technology Series, 1(458). — P. 153–163. <https://doi.org/10.32014/2024.2518-1491.214> (in Russ.)

Samadun A.I., Tausarova B.R., Nabieva Zh.S., Daribaeva G.T. (2024) Razrabotka antimikrobnyykh upakovochnykh materialov dlya pishchevyykh produktov na osnove nanochastich medi [Development of

antimicrobial packaging materials for food products based on copper nanoparticles]. Bulletin of the Kazakh University of Technology and Business, 3(24). — P. 215–225. <https://doi.org/10.58805/kazutb.v.3.24-304> (in Russ.)

Truong H.T., Nguyen T.H.T., Le T.H., Vu N.H. (2023) Synthesis and Antifungal Activity of Copper Nanoparticles Against *Fusarium oxysporum*. Materials Research Express, 10. — P. 065001. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acdb34> (in Eng.)

Zhang W., Roy S., Rhim J.W. (2023) Copper-Based Nanoparticles in Functional Biopolymer Films for Food Packaging. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 22. — P. 1933–1952. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13136> (in Eng.)

Žabar R., Tkalec M., Šiber A., Dobovišek A. (2021) Antifungal Activity of Copper-Based Nanomaterials Against *Fusarium* Species. Nanomaterials, 11. — P. 1273. <https://doi.org/10.3390/nano11051273> (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](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://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