

**ISSN: 1991-346X (Print)**  
**ISSN: 2518-1726 (Online)**

**ACADEMIC JOURNAL  
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES**

**№4  
2025**

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

2025 • 4



# **ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES**

PUBLISHED SINCE JANUARY 1944

ALMATY, NAS RK

**Editor-in-Chief:**

**ZHURINOV Murat Zhurinovich**, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Acting President of RPA NAS RK, General Director of JSC "Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry named after D.V. Sokolsky" (Almaty, Kazakhstan) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960>

**Editorial Board:**

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

**ADEKENOV Sergazy Mynzhasarovich**, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Director of the International Science and Production Holding "Phytochemistry" (Karaganda, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**DAVLETOV Askar Erbulanovich**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Branch of NRNU MEPhI Kazakh National University named after Al-Farabi (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602642543>

**ABISHEV Medeu Erzhanovich**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>

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

**ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES.**

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

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

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

Thematic scope: *physics and chemistry*.

Periodicity: 4 times a year.

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

**Бас редактор:**

**ЖҰРЫНОВ Мұрат Жұрыңұлы**, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, ҚР ҰҒА РҚБ президенті м.а., АҚ «Д.В. Сокольский атындағы Отын, катализ және электрохимия институтының» бас директоры (Алматы, Қазақстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960>

**Редакция ұжымы:**

**ҚАЛИМОЛДАЕВ Мақсат Нұрәліұлы**, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі (Алматы, Қазақстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>

**ӘДЕКЕНОВ Серғазы Мыңжасарұлы**, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, «Фитохимия» халықаралық ғылыми-өндірістік холдингінің директоры (Қарағанды, Қазақстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>

**РАМАЗАНОВ Тілекқабұл Сәбитұлы**, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің ғылыми-инновациялық қызмет жөніндегі проректоры, (Алматы, Қазақстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701328029>

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

**ОЛИВЬЕРО Росси Сезаре**, PhD (химия), Калабрия университетінің профессоры (Калабрия, Италия) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>

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

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

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

**КАЛАНДРА Пьетро**, PhD (физика), нанокүрылымды материалдарды зерттеу институтының профессоры (Рим, Италия) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>

**БОШКАЕВ Құнтай Ағвазыұлы**, Ph.D. Теориялық және ядролық физика кафедрасының доценті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54883880400>

**Бүркітбаев Мұхамбетқали**, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>

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

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

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

**ТАКИБАЕВ Нұрғали Жабағаұлы**, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24077239000>

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

**ДАВЛЕТОВ Асқар Ербуланович**, физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент, ҰЯЗУ МИФИ әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602642543>

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

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

**ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES**

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

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

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

Тақырыптық бағыты: *физика, химия.*

Мерзімділігі: жылына 4 рет.

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

© «Орталық Азия академиялық ғылыми орталығы» ЖШС, 2025

**Главный редактор:**

**ЖУРИНОВ Мурат Журинович**, доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, и.о. президента РОО НАН РК, Генеральный директор АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского» (Алматы, Казахстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960>

**Редакционная коллегия:**

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

**АДЕКЕНОВ Сергазы Мынжасарович**, доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, директор Международного научно-производственного холдинга «Фитохимия» (Караганда, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>

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

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

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

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

**САИГ-СУ Квак**, доктор философии (PhD, биохимия, агрохимия), профессор, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский центр инженерных систем растений, Корейский научно-исследовательский институт бионауки и биотехнологии (KRIBB), (Дэчон, Корея), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>

**БЕРСИМБАЕВ Рахметкажи Искендерович**, доктор биологических наук, профессор, академик НАН РК, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева (Астана, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004012398>

**КАЛАНДРА Пьетро**, доктор философии (PhD, физика), профессор Института по изучению наноструктурированных материалов (Рим, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>

**БОШКАЕВ Куантай Авгазыевич**, PhD, преподаватель, доцент кафедры теоретической и ядерной физики, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54883880400>

**БҮРКИТБАЕВ Мухамбеткали**, доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, (Алматы, Казахстан) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>

**QUEVEDO Hernando**, профессор, Национальный автономный университет Мексики (UNAM), Институт ядерных наук (Мехико, Мексика), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>

**ЖУСУПОВ Марат Абжанович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и ядерной физики, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602166928>

**КОВАЛЕВ Александр Михайлович**, доктор физико-математических наук, академик НАН Украины, Институт прикладной математики и механики (Донецк, Украина), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>

**ТАКИБАЕВ Нургали Жаббагаевич**, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24077239000>

**ХАРИН Станислав Николаевич**, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>

**ДАВЛЕТОВ Аскар Ербуланович**, кандидат физико-математических наук, доцент, Филиал НИЯУ МИФИ Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602642543>

**АБИШЕВ Медеу Ержанович**, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>

**АБИЛЬМАГЖАНОВ Арлан Зайнуталлаевич**, кандидат химических наук, первый заместитель генерального директора АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197468109>

**ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES****ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)**

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

Свидетельство № **KZ93VPY00121157** о повторной регистрации периодического печатного издания информационного агентства, информационного агентства и сетевого издания, выданное Республиканским государственным учреждением «Комитет информации» Министерства культуры и информации Республики Казахстан **05.06.2025**Тематическая направленность: *физика, химия*.

Периодичность: 4 раза в год.

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

© ТОО «Центрально-азиатский академический научный центр», 2025

## CONTENTS

### PHYSICS

**U.A. Ualikhanova, Y.Y. Kurban, A.M. Syzdykova, A.B. Altaibayeva, G.S. Altayeva**  
Dynamical systems analysis of the Starobinsky cosmological model.....11

**M.B. Zhassybayeva, Z. Myrzakulova, M. Abeuova**  
Darboux transformation for the two-layer M-LXXII equation.....24

**G.K. Beketova, N.N. Zhanturina, Z.K. Aimaganbetova**  
Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub> double halide perovskites as advanced materials for high-efficiency solar cells.....38

**L.I. Shestakova, R.R. Spassyyuk**  
Spectral studies of the k–f corona interface at 5000–6000 Å.....52

**A.Khazhidinova, A. Khazhidinov**  
On the issue of fuel consumption of a thermal power plant.....66

**T.B. Koshtybayev, K.K. Zhantleuov, M.E. Aliyeva**  
Greens function in the theory of quantum fluids.....77

**A.V. Serebryanskiy, Ch.B. Akniyazov, Ch.T. Omarov, S. Sittykova, D. Kadyrova**  
Analysis of lunar impact flashes statistics.....91

**G.T. Omarova, Zh.T. Omarova**  
The Lagrange - Jacobi equation and its application to the N - body problem.....105

**Zh. Muratkhan, M. Khassanov**  
Methods for estimation of stellar wind parameters in high-mass X-ray binary systems with neutron stars.....113

**V. Mukamedenkyzy, A. Izbasar, A. Aqikat**  
Investigation of structured flows induced by concentration-driven convection in ternary gases systems.....127

**K. Saurova, S. Nysanbaeva, G. Turlybekova**  
Modeling of the optical system of a star tracker for accurate spacecraft attitude determination.....140

## CHEMISTRY

|   |     |
|---|-----|
| <b>B.S. Serikbayeva, M.S. Satayev, N.K. Sarypbekova</b><br>Study of the electroplating process on polypropylene using a conductive layer.....   | 157 |
| <b>A.P. Auyeshov, Ch.Z. Yeskibayeva, A.K. Dikanbayeva</b><br>Resource-efficient utilization of serpentinite waste for magnesium sulfate production.....                                     | 172 |
| <b>A.K. Kozybaev, Zh.D. Alimkulova, S.O. Abilkasova</b><br>Kinetic and thermodynamic studies of heavy metal adsorption onto water-washed Ca-montmorillonite clay.....                       | 184 |
| <b>A.Abdрахmanova, V. Krivchenko, A. Sabitova1, B. Kuderina</b><br>DOL-enhanced electrolytes as a route to stable anodes in Li–V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> systems.....                   | 196 |
| <b>B.K. Massalimova, A.S. Shayakhmetova, A.S.Darmenbayeva</b><br>Water resources of Northern Kazakhstan: environmental monitoring and sustainable anagement.....                            | 208 |
| <b>A. Rakhimov, N. Zhanikulov, B. Taimasov, E. Potapova, A.K. Sviderskiy</b><br>Investigation of lead slag processing waste as raw material for cement industry.....                        | 227 |
| <b>L.M. Kalimoldina, K.Zh. Zhalgasbayev, A.S. Dauletbayev</b><br>Comparative study of industrial wastewater treatment methods.....  | 241 |
| <b>A. Nurlan, S.R. Konuspayev, T.S. Abildin, K. Toshtay</b><br>Transformations of hydrocarbons during the hydrogenation of gasoline containing benzene.....                                 | 256 |
| <b>G.J. Baisalova, B.K. Yertay, A.A. Taltenov, P. Kuzhatova, G. Saspugayeva</b><br>A quantitative determination of the phenol compounds sum in the thallus of <i>Parmelia sulcata</i> ..... | 274 |
| <b>B.E. Myrzabekov, A.B. Makhanbetov, T.E. Gaipov, B.S. Abzhalov, N.N. Nurgaliyev</b><br>Electrochemical reduction of manganese (II) ions on titanium and lead electrodes.....              | 286 |
| <b>A.S. Darmenbayeva, G.M. Zhussipnazarova, R. Reshmy, Zh.B. Mukazhanova, V.A. Rube</b><br>Biocoatings based on flax stem cellulose and their properties.....                               | 298 |



## МАЗМҰНЫ

### ФИЗИКА

|  |     |
|--|-----|
| <b>У.А. Уалиханова, Е.Е. Құрбан, А.М. Сыздыкова, А.Б. Алтайбаева, Г.С. Алтаева</b><br>Старобинскийдің космологиялық моделін динамикалық жүйелер арқылы<br>талдау.....                                  | 11  |
| <b>М.Б. Жасыбаева, Ж. Мырзақұлова, М. Абеуова</b><br>Қос қабатты М-LXXII теңдеуі үшін дарбу түрлендіруі.....   | 24  |
| <b>Г.К. Бекетова, Н.Н. Жантурина, З.К. Аймағанбетова</b><br>Cs <sub>2</sub> AgBiBr <sub>6</sub> қос галоидты перовскиттер: күн батареяларына арналған<br>тиімділігі жоғары жаңа озық материалдары..... | 38  |
| <b>Л.И. Шестакова, Р.Р. Спасюк</b><br>5000–6000 Å диапазонында k- және f-короналар арасындағы өтпелі<br>аймақты спектрлік зерттеу.....   | 52  |
| <b>А. Хажидинова, А. Хажидинов</b><br>Жылу электр станциясының отын тұтыну мәселесі.....   | 66  |
| <b>Т.Б. Қоштыбаев, К.Қ. Жантлеуов, М.Е. Алиева</b><br>Кванттық сұйықтар теориясындағы Грин функциялары.....  | 77  |
| <b>А.В. Серебрянский, Ч.Б. Акниязов, Ч.Т. Омаров, С. Ситтыкова,<br/>Д. Кадырова</b><br>Айдың беткі қабатына метеоридтардың соқтығысуын статистикалық<br>тұрғыдазерттеу.....                            | 91  |
| <b>Г.Т. Омарова, Ж.Т. Омарова</b><br>Лагранж – Якоби тундеуі және оны N -денелі есепке қолдану.....  | 105 |
| <b>Ж. Мұратхан, М. Хасанов</b><br>Нейтрон жұлдыздары бар массивті рентгендік екілік жүйелердегі жұлдыздық<br>жел параметрлерін бағалау әдістері.....   | 113 |
| <b>В. Мукамеденкызы, А. Избасар, А. Ақиқат</b><br>Үшкомпонентті газ жүйелеріндегі концентрациялық конвекцияның<br>әсерінен құрылымдық ағындардың пайда болуын зерттеу.....                             | 127 |
| <b>К. Саурова, С. Нысанбаева, Г. Турлыбекова</b><br>Ғарыш аппараттарының ориентациясын нақты анықтау үшін жұлдыз<br>сенсорының оптикалық жүйесін модельдеу.....  | 140 |



## ХИМИЯ

**Б.С. Серикбаева, М.С. Сатаев, Н.К. Сарыпбекова**

Электрөткізгіш қабатты қолданып, полипропиленге гальваникалық қаптама алу процесін зерттеу.....157

**А.П. Ауешов, Ч.З. Ескибаева, А.К. Диканбаева**

Серпентинит қалдығынан магний сульфатын алудың техникалық-экономикалық зерттеуі.....172

**А.Қ. Қозыбаев, Ж.Д. Әлімқұлова, С.О. Әбілқасова**

Сумен жуылған са-монтмориллонит сазында ауыр металдардың сорбциясының кинетикасы мен термодинамикасы.....184

**А. Абдрахманова, В. Кривченко, А. Сабитова, Б. Кудерина**Li–V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> жүйесіндегі тұрақты анодтарға қол жеткізуге арналған DOL-мен модификацияланған электролиттер.....196**Б.К. Масалимова, А.С. Шаяхметова, А.С. Дарменбаева**

Солтүстік Қазақстанның су ресурстары: экологиялық мониторинг және ұтымды басқару.....208

**А. Рахимов, Н. Жаникулов, Б. Таймасов, Е. Потапова, А.К. Сви́дерский**

Цемент өнеркәсібі үшін шикізат ретінде қорғасын қожын өндеу қалдықтарын зерттеу.....227

**Л.М. Калимолдина, Қ.Ж. Жалғасбаев, А.С. Даулетбаев**

Өнеркәсіптік сарқынды суларды тазартудың әдістерін салыстырмалы түрде зерттеу.....241

**Ә. Нұрлан, С.Р. Конуспаев, Т.С. Аби́льдин, К. Тоштай**

Құрамында бензол бар бензинді гидрлеу кезінде көмірсутектердің өзгеруі.....256

**Г.Ж. Байсало́ва, Б.К. Ертай, А.А.Талтенов, П. Кужатова, Г.Е. Саспугаева***PARMELIA SULCATA* талломындағы фенолды қосылыстардың жиынтық мөлшерін сандық анықтау.....274**Б.Э. Мырзабеков, А.Б. Маханбетов, Т.Э. Гаипов, Б.С. Абжалов, Н.Н. Нұрғалиев**

Марганец (II) ионының титан және қорғасын электродында электрохимиялық тотықсыздануы.....286

**А.С. Дарменбаева, Г.М. Жусипназарова, Р. Решми, Ж.Б. Мукажанова, В.А. Рубе**

Зығыр сабағынан алынған целлюлоза негізіндегі биожабындар және олардың қасиеттері.....298

## СОДЕРЖАНИЕ

## ФИЗИКА

|  |     |
|--|-----|
| <b>У.А. Уалиханова, Е.Е. Курбан, А.М. Сыздыкова, А.Б. Алтайбаева, Г.С. Алтаева</b><br>Анализ космологической модели старобинского с помощью динамических систем.....                                   | 11  |
| <b>М.Б. Жасыбаева, Ж. Мырзакулова, М. Абеуова</b><br>Преобразование Дарбу для двухслойного уравнения M-LXXII.....  | 24  |
| <b>Г.К. Бекетова, Н.Н. Жантурина, З.К. Аймаганбетова</b><br>Cs <sub>2</sub> AgBiBr <sub>6</sub> : двойные галоидные перовскиты как передовые материалы для высокоэффективных солнечных элементов ..... | 38  |
| <b>Л.И. Шестакова, Р.Р. Спасюк</b><br>Спектральные исследования области перехода между К и F короной в диапазоне 5000–6000Å.....   | 52  |
| <b>А. Хажидинова, А. Хажидинов</b><br>К вопросу о расходе топлива на тепловой электростанции.....  | 66  |
| <b>Т.Б. Коштыбаев, К.К. Жантлеуов, М.Е. Алиева</b><br>Функции Грина в теории квантовых жидкостей .....   | 77  |
| <b>А.В. Серебрянский, Ч.Б. Акниязов, Ч.Т. Омаров, С. Ситтыкова, Д. Кадырова</b><br>Исследование статистики ударов метеороидов о поверхность луны .....   | 91  |
| <b>Г.Т. Омарова, Ж.Т. Омарова</b><br>Уравнение Лагранжа – Якоби и его применение к задаче N -тел.....  | 105 |
| <b>Ж. Муратхан, М. Хасанов</b><br>Методы оценки параметров звездного ветра в массивных двойных рентгеновских системах с нейтронными звездами.....  | 113 |
| <b>В. Мукамеденкызы, А. Избасар, А. Акикат</b><br>Исследование возникновения структурированных течений, обусловленных концентрационной конвекцией в трёхкомпонентных газовых системах.....             | 127 |
| <b>К. Саурова, С. Нысанбаева, Г. Турлыбекова</b><br>Моделирование оптической системы звёздного датчика для точного определения ориентации космических аппаратов.....                                   | 140 |

## ХИМИЯ

**Б.С. Серикбаева, М.С. Сатаев, Н.К. Сарыпбекова**

Исследование процесса гальванопокрытия на полипропилене с использованием электропроводного слоя.....157

**А.П. Ауешов, Ч.З. Ескибаева, А.К. Диканбаева**

Технико-экономическое исследование получения сульфата магния из серпентинитового отхода.....172

**А.К. Козыбаев, Ж.Д. Алимкулова, С.О. Абилкасова**

Кинетика и термодинамика сорбции тяжелых металлов на промытой водой кальциево-монтмориллонитовой глине.....184

**А. Абдрахманова, В. Кривченко, А. Сабитова, Б. Кудерина**DOL – модифицированные электролиты как путь к стабильным анодам в системах  $\text{Li-V}_2\text{O}_5$ .....196**Б.К. Масалимова, А.С. Шаяхметова, А.С. Дарменбаева**

Водные ресурсы Северного Казахстана: экологический мониторинг и устойчивое управление.....208

**А. Рахимов, Н. Жаникулов, Б. Таймасов, Е. Потапова, А.К. Сви́дерский**

Исследование отходов переработки свинцового шлака в качестве сырья для цементной промышленности.....227

**Л.М. Калимолдина, К.Ж. Жалгасбаев, А.С. Дәулетбаев**

Сравнительное исследование методов очистки промышленных сточных вод.....241

**А. Нурлан, С.Р. Конуспаев, Т.С. Аби́льдин, К. Тоштай**

Превращения углеводов при гидрировании бензина, содержащего бензол.....256

**Г.Ж. Байсалова, Б.К. Ерта́й, А.А.Талтенов, П. Кужатова, Г.Е. Саспугаева**Количественное определение суммы фенольных соединений в талломе *PARMELIA SULCATA*.....274**Б.Э. Мырзабеков, А.Б. Маханбетов, Т.Э. Гайпов, Б.С. Абжалов, Н.Н. Нурғалиев**

Электрохимическое восстановление ионов марганца (II) на титановом и свинцовом электродах.....286

**А.С. Дарменбаева, Г.М. Жусипназарова, Р. Решми, Ж.Б. Мукажанова, В.А. Рубе**

Биопокрытия на основе целлюлозы из стебля льна и их свойства.....298

ACADEMIC JOURNAL  
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES  
ISSN 2224-5227  
Volume 4.  
Number 356 (2025), 256–273

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1483.398>

УДК 665.654.2, 669.235, 661.666.1

©A. Nurlan<sup>1</sup>, S.R. Konuspayev<sup>2</sup>, T.S. Abildin<sup>3</sup>, K. Toshtay<sup>3</sup>, 2025.

<sup>1</sup>D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan;

<sup>2</sup>A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences, Almaty, Kazakhstan;

<sup>3</sup>Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: nurlanannas@gmail.com

## TRANSFORMATIONS OF HYDROCARBONS DURING THE HYDROGENATION OF GASOLINE CONTAINING BENZENE

**Nurlan Annas** — PhD student at KazNU, D.V.Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: nurlanannas@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0294-7198>;

**Konuspayev Saparkaly** — Doctor of Chemical Sciences, Professor, A.B.Bekturov Institute of Chemical Sciences, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: srkonuspayev@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7962-6107>;

**Tleutay Abildin** — Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, Kazakh National University named after Al-Farabi Almaty, Kazakhstan,

E-mail: Abildin54@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2710-7233>;

**Toshtay Kainaubek** — PhD, Associate Professor, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: Kainaubek.toshtay@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1182-7460>.

**Abstract.** The history of aromatic compound hydrogenation spans several centuries, emphasizing the continuous scientific and industrial interest in this reaction. Its attractiveness lies in the ongoing search for highly active and selective hydrogenation catalysts. In addition to its theoretical significance — where the  $\pi$ -complex of an aromatic ring can adsorb onto the catalyst surface in different configurations depending on the nature of the substituent groups — the reaction serves as the foundation for numerous industrial processes. For instance, in the synthesis of lubricating oils, aromatic rings are hydrogenated and transformed into naphthenes; in many organic syntheses, hydrogenation constitutes one of the key intermediate stages; and in hydrogen energy systems, this process can act as a potential hydrogen storage mechanism. Currently, aromatic hydrogenation can be considered a key component in the production of environmentally friendly motor gasoline. Incomplete combustion of gasoline containing benzene leads to the formation of benzopyrene, one of the strongest carcinogens found in exhaust gases. According to Euro standards, the benzene content in gasoline should not exceed 1%, while achieving the more stringent requirement of 0.1% remains

technologically unfeasible. The development of new, highly active, and selective catalysts capable of complete benzene hydrogenation in the presence of other aromatic compounds could provide an effective solution to this problem.

**Key Words:** hydrogenation, rhodium, Sibunit, aluminum oxide, BAC, benzene, hydrogen

©Ә. Нұрлан<sup>1</sup>, С.Р. Конуспаев<sup>2</sup>, Т.С. Абильтин<sup>3</sup>, Қ. Тоштай<sup>3</sup>, 2025.

<sup>1</sup>«Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты» АҚ, Алматы, Қазақстан;

<sup>2</sup>«Ә.Б. Бектуров атындағы Химия ғылымдары Институты» АҚ, Алматы, Қазақстан;

<sup>3</sup>Әл-фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан.  
E-mail: nurlanannas@gmail.com

## ҚҰРАМЫНДА БЕНЗОЛ БАР БЕНЗИНДІ ГИДРЛЕУ КЕЗІНДЕ КӨМІРСУТЕКТЕРДІҢ ӨЗГЕРУІ

**Нұрлан Әннәс** — Докторант, Д.В. Сокольский атындағы Жанармай, катализ және электрохимия институты, Алматы, Қазақстан,

E-mail: nurlanannas@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0294-7198>;

**Конуспаев Сапаркали** — х.ғ.д., профессор, Ә.Б. Бектуров атындағы Химия ғылымдары институты, Алматы, Қазақстан,

E-mail: srkonuspayev@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7962-6107>;

**Әбділин Тілеутай** — х.ғ.д., қауымдастырылған, профессор, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Қазақстан,

E-mail: Abildin54@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2710-7233>;

**Тоштай Қайнаубек** — Доцент, PhD, Әл-фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: Kainaubek.toshtay@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1182-7460>.

**Аннотация.** Ароматты қосылыстарды гидрлену тарихы бірнеше ғасырларға созылады, бұл реакцияның тартымдылығы соншалық, зерттеушілер гидрлеу үшін активті және селективті катализаторларды іздеуді әлі де жалғастыруда. Теориялық тұрғыдан алғанда, ароматты сақинаның  $\pi$ -комплексі катализатор бетінде сақинадағы радикалдың табиғатына байланысты әртүрлі түрде адсорбциялана алады. Сонымен қатар, бұл реакция көптеген өндірістік процестердің негізінде жатыр: мысалы, майлау майларын синтездеу кезінде ароматты сақиналар сутекпен қанығып, нафтендерге айналады; көптеген органикалық синтездерде ол аралық сатылардың бірі болып табылады; ал сутектік энергетикада сутекті сақтау резервуары ретінде қызмет ете алады. Қазіргі уақытта бұл реакция экологиялық таза бензин өндірудің негізгі компоненттерінің бірі бола алады. Себебі, құрамында бензол бар бензиннің толық емес жануы нәтижесінде ең күшті канцерогендердің бірі — бензопирен түзіледі. Еуро стандарттарына сәйкес бензинде бензол мөлшері 1 %-дан аспауы тиіс, алайда бұл көрсеткішті 0,1 %-ға дейін төмендету үшін қазіргі уақытта тиімді технологиялық шешім жоқ. Сондықтан бензолды басқа

ароматты қосылыстардың қатысуында толық конверсиямен гидрлеуге қабілетті жаңа активті және селективті катализаторларды әзірлеу мәселені шешудің тиімді жолы бола алады.

**Түйін сөздер:** гидрлеу, родий, сибунит, алюминий оксиді, БАУ, бензол, сутегі

©А. Нурлан<sup>1</sup>, С.Р. Конуспаев<sup>2</sup>, Т.С. Абильдин<sup>3</sup>, К. Тоштай<sup>3</sup>, 2025.

<sup>1</sup>АО «Институт Топлива, катализа и электрохимии им Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан;

<sup>2</sup>АО «Институт химических наук им. А.Б. Бектурова», Алматы, Казахстан;

<sup>3</sup>Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан.  
E-mail: nurlanannas@gmail.com

## ПРЕВРАЩЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ ГИДРИРОВАНИИ БЕНЗИНА, СОДЕРЖАЩЕГО БЕНЗОЛ

**Нурлан Аннас** — Докторант, АО «Институт Топлива, катализа и электрохимии им Д.В. Сокольского», Алматы, Казахстан,  
E-mail: nurlanannas@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0294-7198>;

**Конуспаев Сапаркали** — Доктор химических наук, профессор, АО «Институт химических наук им. А.Б. Бектурова», Алматы, Казахстан,  
E-mail: srkonuspayev@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7962-6107>;

**Абильдин Тлеутай** — Доктор химических наук, ассоциированный профессор, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,  
E-mail: Abildin54@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2710-7233>;

**Тоштай Кайнаубек** — Доцент, PhD, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан,  
E-mail: Kainaubek.toshtay@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1182-7460>.

**Аннотация.** Гидрирование ароматических соединений имеет давнюю историю и остаётся одной из центральных реакций каталитической химии благодаря своей высокой теоретической и практической значимости. Интерес исследователей к этой реакции сохраняется в связи с необходимостью разработки более активных и селективных катализаторов, способных эффективно гидрировать ароматические кольца даже в сложных многокомпонентных углеводородных системах. С теоретической точки зрения важным является разнообразие способов адсорбции  $\pi$ -комплексов ароматических колец на поверхности катализатора, что определяется природой заместителей и структурой ароматического соединения. С практической стороны реакция гидрирования лежит в основе широкого ряда промышленных процессов: в производстве смазочных масел ароматические соединения насыщаются водородом с образованием нафтенов; в органическом синтезе гидрирование является ключевой стадией многих последовательных процессов; в водородной энергетике реакция рассматривается как перспективный механизм аккумулялирования водорода; в нефтепереработке гидрирование ароматических углеводородов — важный этап получения экологически чистого бензина. Особое значение гидрирование приобретает при снижении содержания

бензола в бензине. Неполное сгорание бензина, содержащего ароматические углеводороды, приводит к образованию высокотоксичного канцерогена — бензопирена. Согласно требованиям стандартов Евро, содержание бензола в бензине не должно превышать 1 %, однако для достижения более жёсткой нормы — 0,1 % — отсутствуют эффективные промышленные решения. Поэтому разработка высокоактивных и селективных катализаторов гидрирования бензола, обеспечивающих полную конверсию в условиях присутствия других ароматических углеводородов, представляет собой актуальную и важную научно-практическую задачу. Решение данной проблемы позволит повысить экологическую безопасность автомобильных топлив и усилить соответствие международным стандартам качества.

**Ключевые слова:** гидрирование, родий, Сибунит, окись алюминия, БАУ, бензол, водород

**Введение.** Наиболее активными катализаторами гидрирования ароматических соединений является металлы платиновой группы (Haiting et al, 2024; Alimohammadi et al, 2019; Xiaojing et al, 2022; Hongli et al, 2015; Glotov et al, 2018; Zhihao et al, 2019; Fang et al, 2021; Akbayrak, 2018; Konuspaev et al, 2009), а также другие d-металлы, как никель, кобальт и медь. Авторы (Haiting et al, 2024) приводят сведения о гидрировании бензола и циклогексена на платине и палладии, а также на биметаллических катализаторах Pt — Re, с определением кинетических параметров. Они сравнивали величины эффективных констант скоростей на изученных катализаторах, изучили влияние добавок сероводорода и меркаптанов на кинетические параметры и обсудили возможный механизм прохождения реакции, а также характер влияния добавок рения к платине. В работе (Shirokoroyas et al, 2024) изучено гидрирование 2-метилнафталина в гептане в присутствии добавок 400 ppm по сере дибензотиофена на нанесенных Pt — Pd катализаторах, содержащих мезопористые алюмосиликаты Al-SBA-15. Состав носителя 65 %  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 35 % Al-SBA-15, а содержание Pt и Pd 0,25 и 1,0 масс. %, соответственно. Опыты проводили в автоклаве при 240 — 260°C и давлении 30 атм, конверсия 2-метилнафталина при 260°C через 3 часа составила 85 % при селективности по метилтетралину 97 %. Авторы (Alimohammadi et al, 2019) приводят сведения о гидрировании бензола в смеси н-гептаном на цеолите 13X, модифицированном палладием, т.е. катализатор Pd/13X, так при температуре 200°C, давлении 1 Мпа и скорости подачи реакционной смеси 20 ч<sup>-1</sup> и молярном соотношении H<sub>2</sub>/HC = 1,3 конверсия бензола составила 95 %. В обзоре (Xiaojing et al, 2022) проанализировано создание катализаторов селективного гидрирования на основе палладия, в том числе при гидрировании ароматических соединений.

Особое место при гидрировании бензола занимают катализаторы на основе рутения, где возможно превращение бензола в циклогексен (Hongli et al, 2015; Glotov et al, 2018; Zhihao et al, 2019; Fang Hao et al, 2021). Авторы (Hongli et al, 2015; Glotov et al, 2018) о гидрировании бензола в циклогексан мягких условиях. В работе [(Hongli et al, 2015) приводятся сведения Ru—Pt/MIL-10, где MIL-10



цеолит, на который Ru—Pt нанесены методом коллоидального осаждения, где конверсия бензола в мягких условиях до 99 %, создана кинетическая модель и обсуждается механизм действия катализатора. Авторы (Zhihao et al. 2019; Fang et al, 2021) приводят данные о селективном превращении бензола в циклогексен, если в работе (Zhihao et al, 2019) обобщены теоретические и экспериментальные подходы, направленные на повышение выхода циклогексена на рутениевых катализаторах с упором на термодинамические и кинетические основы, то в работе (Fang et al, 2021) при нанесении рутения на TS ( $\text{TiO}_2$ :  $\text{SiO}_2 = 7:1$ ) при гидрировании бензола получено 38,2 % циклогексена, и авторы (Fang et al, 2021) обсуждают получение такого хорошего результата в взаимодействии  $\text{TiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$ , а также их коллективным воздействием на рутений. В работе (Fang et al, 2021) проводится сравнение рутениевых катализаторов на различных носителях и предложены катализаторы синтеза 4-карбометоксиформилциклогексана из гидрированием соответствующего ароматического соединения.

Самыми активными катализаторами гидрирования ароматического кольца являются родиевые катализаторы (Akbayrak, 2018; Konuspaev et al, 2010; Konuspaev et al, 2011; Nurlan et al, 2023). В работе (Fang et al, 2021) представлены результаты гидрирования бензола на Rh NPs/ $\text{CeO}_2$  без растворителя в проточной системе при давлении водорода 3 бар и температуре 25°C и скорости подачи 495 ч<sup>-1</sup>, где катализатор показывает более высокую активность по сравнению с родием, нанесенным на  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$  и  $\text{HfO}_2$ . Авторы (Konuspaev et al, 2011) провели систематические исследования по гидрированию бензола и других ароматических соединений с целью создания катализаторов селективного гидрирования бензола. В работе (Konuspaev et al, 2010) родий наносили на угольные носители с развитой поверхностью более 500 м<sup>2</sup>/г, как сибунит, КАУ (косточковый активированный уголь) и БАУ (березовый активированный уголь), методом РФЭС было показано, что селективного гидрирования бензола в присутствии других ароматических соединений необходимо катализатор после восстановления модифицировать кислотными добавками, чтобы на поверхности возникали кластеры с  $\text{Rh}^{\delta+}$ . Авторами (Konuspaev et al, 2010; Konuspaev et al, 2011) проведены работы по исследованию влияния на кинетику и механизм гидрирования ароматических соединений, как содержание родия на катализаторе, температуры, давления водорода и природы растворителя, а также в (Konuspaev S.R et al, 2011) показано, что введение в систему п-моллибдата аммония в виде модифицирующей добавки может повысить селективность гидрирования бензола в присутствии других ароматических соединений. Селективность гидрирования бензола можно увеличить если использовать протонные растворители в кислой среде (Konuspaev et al, 2009).

В следующем цикле работ представлены никелевые катализаторы для гидрирования ароматических соединений (Peyrovi et al, 2018). В обзоре (Rong et al, 2023) проанализировано использование никелевых катализаторов для гидрирования ароматических соединений, где обсуждается влияние природы носителей, количества металлической фазы, а также воздействие различных на катализаторы. Авторы (Peyrovi et al, 2018) никель наносили на  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$

и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , затем в проточном режиме гидрировали бензол из риформинг бензина при атмосферном давлении и интервале температур 398 — 473°K при различных соотношениях  $\text{H}_2$ /бензол и скоростях подачи реакционной смеси, наибольшая степень конверсии бензола достигнута на  $\text{Ni}/\text{SiO}_2$  при 423°K. В работе (Peurovi et al, 2018) гидрировали бензол в модельной смеси с толуолом на различных никелевых катализаторах:  $\text{Ni}/\text{HMS}$ ,  $\text{Ni}/\text{HZSM-5}$ ,  $\text{Ni}/\text{HZSM5-HMS}$ ,  $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Ni}/\text{SiO}_2$ . Наибольшая конверсия бензола 99,19 % отмечена на  $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$  при 130°C, обсуждаются различных технологических факторов на процесс.

Цикл работ (Kumar et al, 2023; Vázquez-Céspedes et al, 2018; Bayram et al, 2011; Gu et al, 2015; Johnson et al, 2025) посвящен использованию в качестве катализаторов различных комплексных соединений, так авторы (Kumar et al, 2023) для гидрирования ароматического кольца использовали стабильный на воздухе родиевый комплекс с пинцерным бис(оксазолил) фенильным лигандом. В работе (Bayram et al, 2011) для гидрирования бензола использовали комплекс  $[\text{RhCp}^*\text{Cl}_2]_2$ , где  $\text{Cp}^* = [\eta^5\text{-C}_5(\text{CH}_3)_5]$ , авторы (Vázquez-Céspedes et al, 2018) использовали комплекс  $\text{Rh(V)}$  для активации связи C—H. Авторы показали, что органо-циркониевые комплексы, посаженные на оксиды циркония, алюминия и другие кислые носители в мягких условиях 25°C и атмосферное давление превращают бензол в циклогексан. В работе (Johnson et al, 2025) представлены результаты по гидрированию бензола на комплексах переходных металлов, имеющих органические лиганды.

Краткий анализ сведений по гидрированию ароматических соединений, в частности селективное гидрирование бензола, показывает, что интерес исследователей к этой реакции не ослабевает, а наоборот растет, вовлекая новых групп катализаторов, как комплексы переходных металлов.

Данная работа является логическим продолжением сведений, опубликованных в работах (Nurlan et al, 2023) и направлена на углубление знаний по созданию катализаторов селективного гидрирования бензола.

**Методика гидрирования.** Гидрирование проводили в специальном термостатированном автоклаве, снабженной турбинной мешалкой, исключающей внешне-диффузионные торможение с возможностью отбирать пробы в ходе реакции. Для измерения объема поглощённого водорода использовали устройство, позволяющее поддерживать постоянное давление в ходе реакции. Через специальное устройство автоклава вначале засыпали навеску катализатора, затем вносили растворитель и гидрируемое соединение. После герметизации, автоклав трижды продували водородом, затем включали обогрев автоклава и набирали нужное давление водорода. После 30 минутного отстоя при нужной температуре, включали мешалку автоклава и проводили замер объема поглощённого водорода. После реакции давали время остыть автоклаву до комнатной температуры, выгружали продукты реакции через пробоотборник, промывали автоклав растворителем. Результаты эксперимента оформляли в виде графика зависимости скорости от общего количества поглощенного водорода. Опыты с гидрированием бензинов проводили без растворителей. Продукты реакции анализировали методом ГЖХ.

*Катализаторы* готовили методом пропитки по влагоемкости носителя. Для определения влагоемкости носителя брали фиксированный объем предварительного прокаленного при 300—350°C носителя и прикапывали воду из бюретки с постоянным перемешиванием до образования пасты. Фиксировали объем жидкости к объему носителя. Затем брали необходимую массу носителя для приготовления катализатора и определяли его объем. Брали фиксированный объем воды, соответствующий влагоемкости носителя, и в нем растворяли соль  $\text{RhCl}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . Заливали носитель этим объемом раствора, тщательно перемешивали до образования пасты и оставляли на ночь в герметичном режиме. Катализатор сушили при постоянном перемешивании до образования порошка. Затем катализатор прокаливали при 200°C 4 часа и восстанавливали в токе водорода при 300°C в течение 4 часов. Катализатор после остывания в токе водорода до комнатной температуры пересыпали в бюксы и хранили в эксикаторе над прокаленным силикагелем.

**Материалы** для исследований были следующие. Носители: сибунит — специальный угольный носитель, разработанный в Институте катализа им. Г.К.Борескова СО РАН, имеет развитую поверхность до 500 м<sup>2</sup>/г и механическую прочность; БАУ — березовый активированный уголь до 500 м<sup>2</sup>/г промышленного производства;  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  с удельной поверхностью до 100 м<sup>2</sup>/г. Соль  $\text{RhCl}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  запаивалась в ампуле. Автомобильный бензин марки АИ 92, реализуемый в Алматы, был предварительно перегнан при атмосферном давлении и к нему добавлен бензол марки «ч».

**Анализы** продуктов реакции и исходных соединений проводили на хроматографе «Хроматэк—Кристалл 5000.2» с пламенно-ионизационным детектором (FID), снабженной капиллярной колонкой НР-5 (5 % фенил-метилполисилоксан, 100 м × 0,25 мм × 0,25 мкм), программируемый нагрев термостата: 40 °C (2 мин) → 10 °C/мин → 250 °C (5 мин), газ носитель гелий. Хроматограф снабжен библиотекой, позволяющей идентифицировать состав углеводородов и проводить автоматические расчеты составов анализируемых проб.

Эксперименты РФЭС были выполнены на фотоэлектронном спектрометре фирмы SPECS с использованием излучения  $\text{AlK}_\alpha$  ( $h\nu = 1486.6$  эВ, 150 Вт). Шкала энергий связи (Е<sub>св</sub>) была предварительно откалибрована по положению пиков основных уровней золота и меди  $\text{Au}4f_{7/2}$  (84.0 эВ) и  $\text{Cu}2p_{3/2}$  (932.67 эВ). Образцы наносились на двухсторонний проводящий медный скотч. Эффект подзарядки, возникающий в процессе фотоэмиссии электронов, учитывался с помощью метода внутреннего стандарта, в качестве которого использовалась  $\text{Al}2p$  линия от алюминия (Е<sub>св</sub>=74.5 эВ), входящего в состав носителя ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ). Как обзорные спектры, так и отдельные спектральные регионы записывались при энергии пропускания анализатора — 20 эВ. Определение относительного содержания элементов на поверхности катализаторов и отношение их атомных концентраций осуществлялось по интегральным интенсивностям фотоэлектронных линий, откорректированных на соответствующие коэффициенты атомной чувствительности.

**Результаты и их обсуждение.** Типичные кинетические кривые гидрирования бензина на 3% Rh/сибуните при различных температурах представлены на рисунке 1, где просматриваются два участка. На первом участке до поглощения примерно 1000 мл водорода скорости гидрирования снижаются от 150 до 25 мл/мин при 80°C, далее наблюдается плато с постоянной скоростью до поглощения рассчитанного количества водорода. Причем не допоглощение при разных температурах разное, так если при 40°C реакция практически останавливается после поглощения 4300 мл H<sub>2</sub>, то при 60°C 6000 мл, в при 80°C 6300 мл водорода.

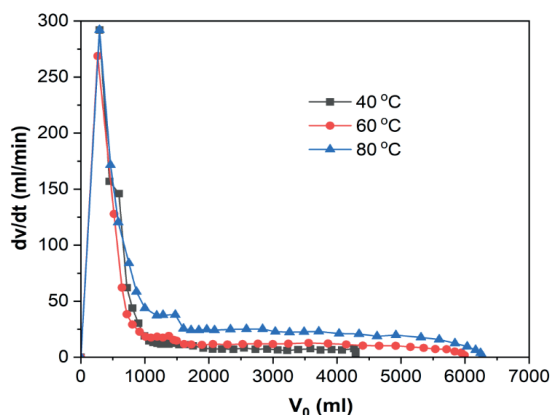


Рисунок 1 — Гидрирование бензина на 3% Rh/сибуните (0,3г) при 40 атм водорода и различных температурах: 1 — 80°C, 2 — 60°C, 3 — 40°C.

Вид кинетических кривых гидрирования бензина на 3% Rh/БАУ (Рис.2) такой как на 3% Rh/сибуните, разница наблюдается в величинах скоростей гидрирования. Общим фактом обоих рисунков является недопоглощение водорода, причем при 40°C количество поглощенного водорода в два раза, чем при 80°C, а 60°C находится между ними.

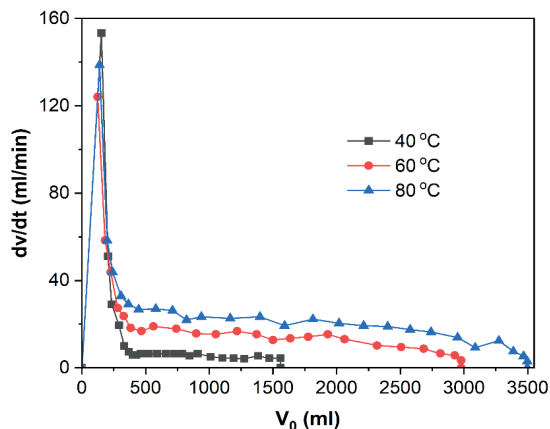


Рисунок 2 — Гидрирование бензина на 3% Rh/БАУ (0,3г) при 40 атм водорода и температуре: 1 — 80°C, 2 — 60°C, 3 — 40°C

В чем причина такого влияния температуры, почему при снижении температуры от 80 до 40°C наблюдается недопоглощение водорода до 2000 мл  $H_2$ , причем это наблюдается на обоих катализаторах (Рис.1 и Рис.2). Ответы на эти вопросы может прояснить изменение углеводородного состава бензина после гидрирования.

В таблицах 1 и 2 приведены химические составы исходного бензина и продуктов его на родиевых катализаторах, нанесенных на сибунит, БАУ и  $\gamma-Al_2O_3$ . В таблице 2 приведены групповые, а в таблице 1 индивидуальный углеводородный по конкретным соединениям. В исходном бензине содержится 82,6 % парафинов, т.е. линейных алканов, 4,9 % изоалканов, 1,8 % нафтен, 0,3 % олефинов и 8,8 % бензола. Следует отметить, что для изучения возможности селективного гидрирования мы намеренно добавили некоторое количество бензола в бензин, который реализуется в розничной торговле. Перед добавкой торговый бензин был перегнан при атмосферном давлении, чтобы исключить негативное воздействие на катализатор добавок по изменению цвета и других технологических характеристик. В таблице 1 показано, что в бензине содержится 82,2 % гексана, а из олефинов обнаруживается 0,3 % децена-1, количество индивидуальных нафтен менее 1 % каждый.

После гидрирования на 3 % Rh/сибунит состав бензина существенно изменяется, так при 40°C количество н-алканов уменьшается до 15,9 %, такая же тенденция наблюдается на 3 % Rh/БАУ и 3 % Rh/  $\gamma-Al_2O_3$ . Мы рассчитывали, что катализатор будет гидрировать ароматическое кольцо бензола, но оказалось, что происходит изменение всего углеводородного состава бензина. Наряду с гидрированием параллельно идут реакции изомеризации, циклизации и другие.

Сравнение изученных катализаторов показывает, что на 3 % Rh/сибуните количество изоалканов увеличивается до 61,8 %, на 3 % Rh/БАУ до 57,9 %, а на 3 % Rh/  $\gamma-Al_2O_3$  до 51,3 % (Табл.2). Количество циклогексана составляет 3 % Rh/ сибуните 12,8; 16,8 % на 3 % Rh/БАУ и 13,5 % на 3 % Rh/  $\gamma-Al_2O_3$  (Табл.1) т.е. в продуктах реакции обнаруживается больше, чем бензола в исходном бензине, что говорит о прохождении реакции циклизации алканов. Кроме циклогексана в продуктах реакции обнаруживаются и другие нафены, как 1,3-диметилциклопентан в цис- и транс-формах. 1,2-диметилциклопентан, 1,1,3-триметилциклопентан, этилциклогексан, 1,1,2-триметилциклогексан, транс-1,3-диметилциклогексан. Этих нафенов с исходным бензином не содержатся, а также обнаруживается 0,1 % толуола, тогда в исходном бензине его не было, поэтому к числу происходящих реакций можно причислить реакцию ароматизации. К числу углеводородов, которых не было в исходном бензине необходимо добавить бутан и изобутан, пентан и изопентан, 2,2-диметилбутан, 4-метилпентен-1, 2,3-диметилбутан, 3-метилпентан, 2,2-диметилпентан, 2,4-диметилпентан, 2,3-диметилгексан, н-октан, а также можно отнести диены, 2,3,4-триметил-1,4-пентадиен и 3,3-диметил-1,5-гексадиен.

На 3 % Rh/  $\gamma-Al_2O_3$  обнаруживаются соединения, которых не было в исходном бензине и на 3 % Rh/БАУ, и на 3 % Rh/сибуните. Это следующие соединения: цис-октен-2, 2,2-диметилгептан, 1,1,4-триметилциклогексан, этилбензол,

1,2,4-триметилциклогексан, 3-метил-3-этилгексан, о-ксилол и другие, содержание которых менее 1 %.

Анализируя результаты составов продуктов гидрирования, можно констатировать, что наряду с гидрированием бензола на изученных катализаторах идут следующие реакции: изомеризации, циклизации, ароматизации, крекинга, дегидрирования, алкилирования. Все эти реакции идут через образования полугидрированной формы, которая образуется на поверхности катализатора, и является промежуточным соединением всех вышеназванных реакций.

Таблица 1. Сравнительный состав исходного бензина и продуктов его гидрирования на родиевых катализаторах при 40 атм и 80°C.

| №  | Название             | Исходный бензин | 3 % Rh/<br>Сибунит | 3 % Rh/БАУ | 3 % Rh/<br>$\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ |
|----|----------------------|-----------------|--------------------|------------|--|
| 1  | и-бутен              | -               | 0,6                | 0,3        | -  |
| 2  | н-бутен              | -               | 2,5                | 1,6        | 0,1                                      |
| 3  | и-пентан             | -               | 21,5               | 17,9       | 7,5                                      |
| 4  | н-пентан             | -               | 6,1                | 5,4        | 3,0                                      |
| 5  | 2,2-диметилбутан     | -               | 12,6               | 11,9       | 9,7                                      |
| 6  | 4-метилпентен-1      | -               | 0,8                | 0,8        | 0,6                                      |
| 7  | 2,3-диметилбутан     | -               | 2,6                | 2,5        | 2,4                                      |
| 8  | 2-метилпентан        | 0,1             | 8,7                | 8,6        | 8,5                                      |
| 9  | 3-метилпентан        | -               | 5,1                | 5,2        | 5,3                                      |
| 10 | н-гексан             | 82,2            | 4,1                | 4,3        | 4,7                                      |
| 11 | 2,2-диметилпентан    | -               | 2,7                | 2,8        | 3,2                                      |
| 12 | 2,4-диметилпентан    | -               | 0,6                | 0,6        | 0,8                                      |
| 13 | Бензол               | 8,8             | 0,8                | 0,8        | 1,2                                      |
| 14 | Н-нонан              | 0,4             | -                  | -          | 0,1                                      |
| 15 | 2,5-диметилоктан     | 0,5             | -                  | -          | -  |
| 16 | I-c10-1              | 0,1             | -                  | -          | -  |
| 17 | н-бутилциклопентан   | 0,2             | -                  | -          | -  |
| 18 | N-c101               | 0,3             | -                  | -          | -  |
| 19 | 1,3,5-триметилбензол | 0,3             | -                  | -          | -  |
| 20 | 2,3-диметилоктан     | 0,5             | -                  | -          | -  |
| 21 | 5-метилнонан         | 0,4             | -                  | -          | -  |
| 22 | N-c10-6              | 0,2             | -                  | -          | -  |
| 23 | I-c10-6              | 1,2             | -                  | -          | -  |
| 24 | 2-метилнонан         | 0,4             | -                  | -          | -  |
| 25 | 3-этилоктан          | 0,7             | -                  | -          | -  |
| 26 | N-c10-2              | 0,2             | -                  | -          | -  |
| 27 | N-c10-7              | 0,3             | -                  | -          | -  |
| 28 | I-c10-3              | 0,3             | -                  | -          | -  |
| 29 | N-c10-8              | 0,3             | -                  | -          | -  |
| 30 | I-c10-8              | 0,2             | -                  | -          | -  |
| 31 | 1,2,4-триметилбензол | 0,2             | -                  | -          | -  |
| 32 | A-c10-1              | 0,6             | -                  | -          | -  |
| 33 | N-c10-9              | 0,2             | -                  | -          | -  |
| 34 | I-c10-10             | 0,3             | -                  | -          | -  |

|    |                              |     |      |      |      |
|----|------------------------------|-----|------|------|------|
| 35 | I-c10-11                     | 0,1 | -    | -    | -    |
| 36 | Децен-1                      | 0,3 | -    | -    | -    |
| 37 | Циклогексан                  | -   | 12,8 | 16,8 | 13,5 |
| 38 | 2-метилгексан                | -   | 3,0  | 3,2  | 4,7  |
| 39 | 3-метилгексан                | -   | 3,2  | 3,4  | 5,2  |
| 40 | 1t,3-диметилциклопентан      | -   | 0,6  | 0,7  | 1,0  |
| 41 | 1c,3-диметилциклопентан      | -   | 0,4  | 0,4  | 0,7  |
| 42 | 3-этилпентан                 | -   | 0,4  | 0,5  | 0,7  |
| 43 | 1t,2-диметилциклопентан      | -   | 0,2  | 0,3  | 0,4  |
| 44 | н-гексан                     | -   | 1,8  | 1,9  | 3,3  |
| 45 | 1c,2-диметилциклопентан      | -   | 5,9  | 6,4  | 11,2 |
| 46 | 2,3-диметилпентен-2          | -   | -    | -    | 0,2  |
| 47 | 1,1,3-триметилциклопентан    | -   | 0,2  | 0,2  | 0,4  |
| 48 | 2,3,4-триметил-1,4-пентадиен | -   | 0,1  | 0,1  | 0,3  |
| 49 | 3,3-диметил-1,5-гексадиен    | -   | 0,2  | 0,2  | 0,4  |
| 50 | этилциклопентан              | -   | 0,1  | 0,1  | 0,2  |
| 51 | 2,2,3-триметилпентан         | -   | -    | -    | 0,1  |
| 52 | 1c,2e,4c-триметилпентан      | -   | -    | -    | 0,4  |
| 53 | толуол                       | -   | 0,1  | 0,1  | 0,2  |
| 54 | 1,1,2-триметиоциклопентан    | -   | -    | -    | 1,0  |
| 55 | 2,3-диметилгексан            | -   | 0,2  | 0,2  | 0,5  |
| 56 | 2-метил-3-этилпентан         | -   | 0,6  | 0,7  | 1,4  |
| 57 | Диоксид октадиена-2          | -   | 0,2  | 0,2  | 0,5  |
| 58 | 1,1,2-триметилциклопентан    | -   | 0,4  | 0,5  | 1,1  |
| 59 | 2,2,5-триметилгексан         | -   | -    | -    | 0,3  |
| 60 | 1t,3-диметилциклогексан      | -   | 0,4  | 0,4  | 0,8  |
| 61 | н-октан                      | -   | 0,2  | 0,3  | 0,7  |
| 62 | цис-октен-2                  | -   | -    | -    | 0,5  |
| 63 | 2,2-диметилгептан            | -   | -    | -    | 0,8  |
| 64 | 1,1,4-триметилциклогексан    | -   | -    | -    | 0,2  |
| 65 | этилбензол                   | -   | -    | -    | 0,4  |
| 66 | 1,2,4-триметилциклогексан    | -   | -    | -    | 0,2  |
| 67 | 3-метил-3-этилгексан         | -   | -    | -    | 0,2  |
| 68 | O-c9-19                      | -   | -    | -    | 0,1  |
| 69 | N-c9-13                      | -   | -    | -    | 0,3  |
| 70 | O-ксилол                     | -   | -    | -    | 0,2  |
| 71 | N-c10-11                     | -   | -    | -    | 0,2  |

Таблица 2. Групповой состав бензина после гидрирования на родиевых катализаторах при 40 атм.

|                 | t,°C | Состав продуктов реакции, ГЖХ, %. |          |           |        |        |        | Конверсия бензола, % |
|-----------------|------|-----------------------------------|----------|-----------|--------|--------|--------|----------------------|
|                 |      | алкан                             | изоалкан | Ароматика |        | Нафтен | Олефин |                      |
|                 |      |                                   |          | Бензол    | Толуол |        |        |                      |
| Исходный бензин |      | 82.6                              | 4.9      | 8.8       | 0      | 1.8    | 0,3    | -                    |
| 3% Rh/Сибунит   | 40   | 15,9                              | 67,6     | 1,8       | 0,1    | 12,2   | 2,1    | 79,5                 |
|                 | 60   | 13,3                              | 59,1     | 0,9       | 0,09   | 10,9   | 1,9    | 89,8                 |
|                 | 80   | 14.8                              | 61,8     | 0,8       | 0,08   | 9,1    | 1,4    | 90.9                 |



|   |    |      |      |     |      |      |     |      |
|---|----|------|------|-----|------|------|-----|------|
| 3% Rh/БАУ                                       | 80 | 13,5 | 57,9 | 0,8 | 0,08 | 9,8  | 1,3 | 90,9 |
| 3% Rh/ $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 80 | 11,9 | 51,3 | 1,2 | 0,2  | 19,4 | 3,1 | 86,0 |

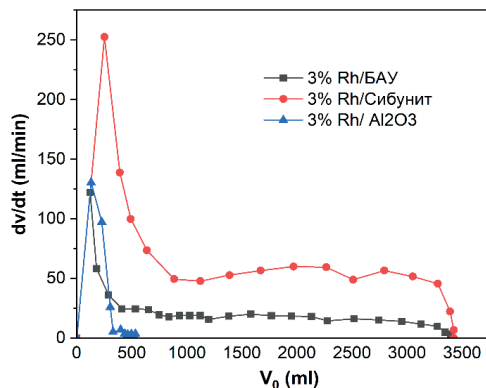


Рисунок 3 — Гидрирование бензина на 3% родиевых катализаторах (0,3 г) при 80°C и 40 атм: 1 — сибунит, 2 — БАУ, 3 —  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Сравнение кинетических кривых гидрирования бензина на родиевых катализаторах, нанесенных на различные носители, показывает, что вид их идентичен (Рис.3). На угольных носителях активность родия выше, чем на окиси алюминия, очевидно это связано с удельной поверхностью носителя, если на  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> удельная поверхность до 100 м<sup>2</sup>/г, то сибуните и БАУ превышает 500 м<sup>2</sup>/г. Кроме того необходимо отметить кислый характер угольных носителей, которые могут на родиевых кластерах положительный заряд Rh<sup>δ+</sup>, который, как было отмечено ранее нами (Konuspaev et al, 2010), способствует повышение активности катализатора и селективному гидрированию бензола в смеси с другими ароматическими соединениями.

Использованные для гидрирования бензина родиевые катализаторы были изучено методом рентгенофотозлектронной спектроскопии (РФЭС). Типичный обзорный фотоэлектронный спектр образца 3 % Rh/БАУ представлен на рисунке, для 3 % Rh/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> спектр имеет такой вид. Других линий элементов на поверхности образцов не обнаружено.

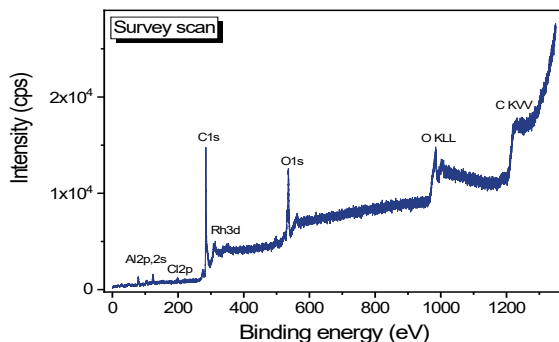


Рисунок 4 — Обзорный фотоэлектронный спектр образца 3 % Rh/БАУ.

Таблица 3. Состав поверхности измеренных образцов в атомных процентах (ат.%) и атомное отношение Rh/Al и Rh/C.

| Образец                             | Rh-% | Al-% | Cl-% | C-%  | O-%  | Rh/Al | Rh/C |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|-------|------|
| 1%Rh-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.9  | 27.9 | 0.3  | 16.2 | 54.7 | 0.03  | 0.06 |
| 3%Rh-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.4  | 31.7 | 4.0  | 12.1 | 50.7 | 0.05  | 0.12 |
| 3%Rh/БАУ                            | 1.2  | 8.0  | 0.9  | 68.9 | 21.0 | 0.15  | 0.02 |

Химический состав поверхности родиевых катализаторов представлен в таблице 3, так на поверхности катализатора Rh/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обнаруживаются все элементы носителя, как алюминий, кислород, а также хлор, который остался на поверхности после восстановления хлористого родия до металлического. На поверхности 3 % Rh/БАУ помимо углерода и хлора обнаруживается алюминий, которого не должно быть, что является неожиданным фактом, хотя БАУ, приготовлен из березовой древесины, в котором может быть алюминий.

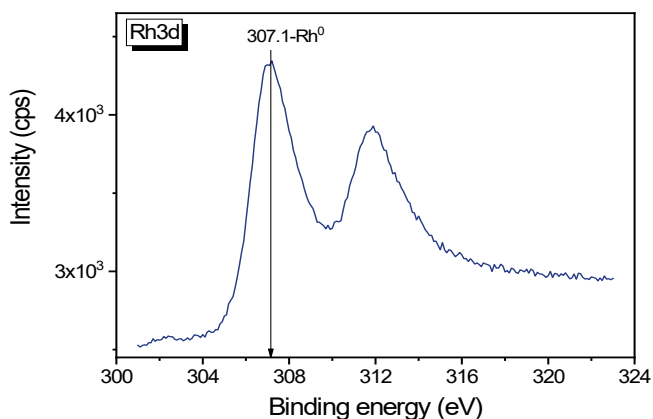


Рисунок 5 — Rh3d фотоэлектронный спектр образца 1%Rh/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

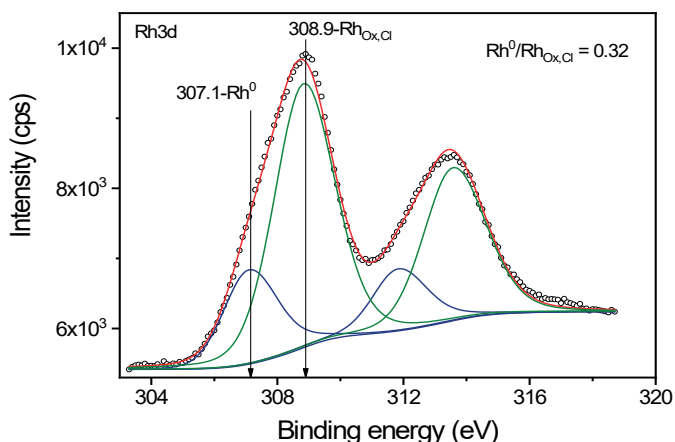


Рисунок 6 — Rh3d фотоэлектронный спектр образца 3 % Rh/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

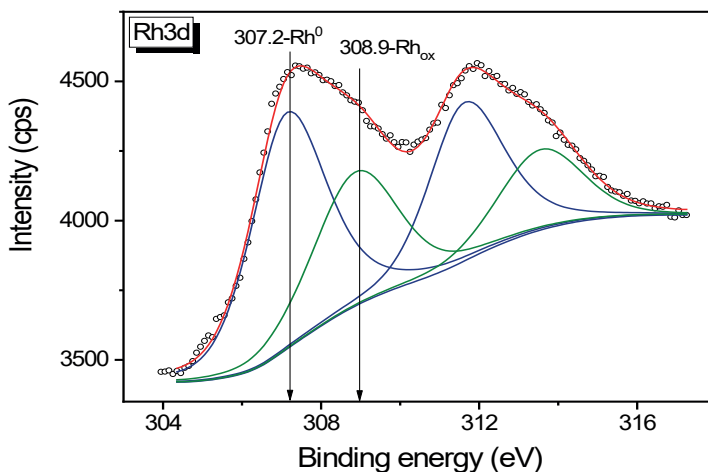


Рисунок 7 — Rh3d фотоэлектронный спектр образца 3 % Rh/БАУ.

Анализ фотоэлектронных линий родия (Rh3d) (Рис.5, 6, 7) позволяет сделать вывод, что в образце 1 % Rh/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> родий находится преимущественно в металлическом состоянии, об этом свидетельствует как значение энергии связи пика Rh3d ( $E_{\text{св}} = 307.2$  эВ), которое типично для металла, так и асимметрия фотоэлектронных пиков со стороны больших значений энергий связи, что также является характерным для металлов.

В противоположность этому образцу значение энергии связи основного пика Rh3d полученное для образца 3 % Rh/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> составляет ~ 309 эВ, такое значение характерно для родия в составе хлорида или оксида. Однако следует отметить, что в спектре Rh3d дополнительно наблюдается плечо со стороны меньших значений энергии связи (~ 307 эВ), которое можно приписать металлическому родию. С помощью программы XPS-Peak было проведено разложение пиков в регионе Rh3d на отдельные спектральные компоненты. Результаты разложения представлены на рис.6. Отношение площадей пиков индивидуальных состояний металла и родия в составе оксида или хлорида ( $\text{Rh}^0/\text{Rh}_{\text{ox,Cl}}$ ) составляет — 0.32. В спектре Rh3d образца 3 % Rh/БАУ (Рис.7) также наблюдаются два состояния родия (металл и оксид). Отношение площадей пиков этих индивидуальных состояний ( $\text{Rh}^0/\text{Rh}_{\text{ox}}$ ) составляет — 1.5. Авторами (Kumar et al, 2023) при изучении катализатора Rh/сибунит методом РФЭС было показано, что для селективного гидрирования бензола в присутствии других ароматических соединений необходимо присутствие на поверхности  $\text{Rh}^{\delta+}$ , для чего в каталитическую систему подкисляли, для появления положительного заряда на кластерах родия.

**Заключение и выводы.** В ранее проведенных нами работах (Nurlan et al, 2023) было изучено гидрирование индивидуальных ароматических соединений, как бензол, толуол и кумол в среде растворителей, которыми были этанол и вода. Растворитель не участвовал в реакции, а был всего лишь средой, который мог участвовать в сольватации или гидратации исходных соединений,

продуктов реакции и поверхности катализатора. В случае гидрирования бензола, находящегося в бензине, катализатор оказывает глубокое воздействие на все углеводородные соединения, находящиеся в составе бензина. Авторы в начале полагали, что углеводородная среда будет служить растворителем и средой, в котором проходит реакция. Эксперимент показал, что родий, нанесенный на сибунит, БАУ и  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , проводит не только гидрирование бензола, но и проводит целый букет химических реакций превращения углеводородов, как изомеризация (каркасная и цис-транс-), циклизация, крекинг, ароматизация, дегидрирование, алкилирование и другие. Причиной этому является наличие на поверхности металлического родия различных форм адсорбированного водорода и возможность активации и ароматических соединений, и алканов, и нафтен, и олефинов. Если ароматические соединения и олефины адсорбируются и активируются через взаимодействие  $\pi$ -комплекса, то алканы активируются через образование  $\sigma$ -соединений с родием. В обоих случаях идет образование полугидрированной формы, как отмечено Д.В. Сокольским, позднее хемосорбцию стали связывать с координацией, т.е. образованием на поверхности координационных соединений. Полугидрированную форму можно рассматривать, как координационное соединение, которое является промежуточным состоянием выше названных реакций, идущих параллельно, при гидрировании бензола в составе бензина.

*Исходя из этого можно сделать следующие выводы.*

1. При гидрировании бензола, содержащегося в бензине, идет целый букет химических реакций, основной из которых является каркасная изомеризация углеводород.

2. Во случаях гидрирование бензина отмечается недопоглощение рассчитанного количества водорода, меньше на Rh/сибунит, больше на 3 % Rh/ $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ , что связано с прохождением параллельных реакций.

3. При гидрировании бензола, содержащегося в составе бензина, не достигается 100% конверсии бензола, что, видимо, связано с наличием параллельных реакций.

4. Методом РФЭС показано, что на поверхности изученных катализаторов помимо металлического родия обнаруживаются заряженные формы родия близкие к солям и оксидам родия.

#### Литература

Akbayrak S. (2018) Rhodium (0) Nanoparticles Supported on Ceria as Catalysts in Hydrogenation of Neat Benzene at Room Temperature. J. Colloid and Interface Sci. — Vol 530. 15. — No 2018. — P.459-4647.

Alimohammadi N., Fathi S. (2019) Selective benzene reduction from gasoline using catalytic hydrogenation reactions over zeolite Pd/13X. React. Kinet. Mech. and Cat. — Vol. 128. p. 949—964.

Bayram E., Linehan I.C., Fulton J.L., Roberts J.A., Szymczak N.K., Smurthwaite T.D., O'zkar S., Balasubramanian M., and Finke R.G. (2011) Is It Homogeneous or Heterogeneous Catalysis Derived from  $[\text{RhCp}^*\text{Cl}_2]_2$ . In Operando XAFS., Kinetic, and Crucial Kinetic Poisoning Evidence for Subnanometer  $\text{Rh}_4$  Cluster-Based Benzene Hydrogenation Catalysis. J. Am. Chem. Soc. — Vol. 133. — P.18889—18902.

Fang Hao, Jingsong Zheng, Donghong Ouyang, Wei Xiong, Pingle Liu, and Hean Luo. (2021) Selective hydrogenation of benzene over Ru supported on surface modified  $\text{TiO}_2$ . Korean J. Chem. Eng. — No 38(4). — P.736-746.



Glotov A.P., Stavitskaya A.V., Chudakov Ya.A., Artemova M.I., Smirnova E.M., Demikhova N.R., Shabalina T.N., Gureev A.A., and Vinokurov V.A. (2018) Nanostructured Ruthenium Catalysts in Hydrogenation of Aromatic Compounds. *Petrol. Chem.* — Vol. 58. — No.14. — P.1221-1226.

Gu W., Stalzer M.M., Nicholas C.P., Bhattacharyya A., Motta A., Gallagher J.R., Zhang G., Miller J.T., Kobayashi T., Pruski M., Delferro M. and Marks T.J. (2015) Benzene Selectivity in Competitive Arene Hydrogenation: Effects of Single-Site Catalyst•••Acidic Oxide Surface Binding Geometry. *J. Am. Chem. Soc.* — Vol. 137. — P. 6770-6780.

Haiting Cai, Haoyu Nie, Zhuole Lu, Chandra Veer Singh, Ya-Huei (Cathy) Chin. (2024) Catalytic consequences of the identity and coverages of reactive intermediates during benzene hydrogenation on Pt, Pd, and Pt-Re catalysts. *J. Catal.* — Vol. 436. 115582.

Hongli Liu, Ruiqi Fang, Zhong Li, Yingwei Li. (2015) Solventless hydrogenation of benzene to cyclohexane over a heterogeneous Ru—Pt bimetallic catalyst. *Chem. Eng. Sci.* — Vol. (122)27. — P.350-359.

Johnson R., Hu P., Pugh J., Haridasan R.K. and Searles K. (2025) Benzene hydrogenation utilizing organometallic early transition metal precursors. *Catal. Sci. Technol.* — Vol. 15. — P.41-45.

Kumar P., Qi L., Williams S., Dop R.A., Liu Y, Tao Zhang, Changzhi Li, Jianliang Xiao. (2023) Selective Hydrogenation of Lignin-derived Aromatics to Give Cyclohexanes with a Rhodium-Pincer Precatalyst. *J. Organomet. Chem.* — Vol. 997. — P.15.

L. Marot, G. De Temmerman, V. Thommen, D. Mathys, P. Oelhafen. (2008) Characterization of magnetron sputtered rhodium films for reflective coatings. *Surface & Coatings Technology*, — Vol. 202. — P.2837-2843.

Nurlan A., Konuspayev S.R., Abildin T.S. (2023) The Effect of Rh/BAC Catalyst Preparation and Pretreatment Methods on Benzene Hydrogenation. *Eurasian J. Chem.* — Vol. 4(112). — P. 123-129.

Peyrovi M.H., Parsafard N., Mohammadian Z. (2018) Benzene selective hydrogenation over supported Ni (nano-) particles catalysts: Catalytic and kinetics studies. *Chinese J. of Chem. Eng.* — Vol. 26. — P. 521-528.

Peyrovi M.H., Rostamikia T. and Parsafard N. (2018) Competitive Hydrogenation of Benzene in Reformate Gasoline over Ni Supported on SiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalysts: Influence of Support Nature. *Energy Fuels* 32, 11432–11439.

Shirokopoyas S.I., Baranova S.V., Maksimov A.L., Kardashev S.V., Kulikov A.B., Naranov E.R., Vinokurov V.A., Lysensko S.V. and Karakhanov E.A. (2024) Hydrogenation of Aromatic Hydrocarbons in the Presence of Dibenzothiophene over Platinum—Palladium Catalysts Based on Al—SBA15 Aluminosilicates. *Petrol. Chem.*, —Vol. (54)2. — P.94-99.

Vásquez-Céspedes S., Xiaoming Wang, and Glorius F. (2018) Plausible Rh (V) Intermediates in Catalytic C—H Activation Reactions. *ACS Catal.* — Vol.8. — P.242-257.

Xiaojing Zhao, Yandong Chang, Wen-Jie Chen, Qingshi Wu, Xiaoyang Pan, Kongfa Chen, and Bo Weng. (2022) Recent Progress in Pd-Based Nanocatalysts for Selective Hydrogenation. *ACS Omega*. 7. 17-31.

Zhihao Chen, Haijie Sun, Zhikun Peng, Jie Gao, Baojun Li, Zhongyi Liu, and Shouchang Liu. (2019) Selective Hydrogenation of Benzene: Progress of Understanding for the Ru-Based Catalytic System Design. *Indus. Eng. Chem. Res.* — Vol. (58)31. — P.13794-13803.

Конуспаев С.Р., Шаймардан М., Ауезов А.Б., Конуспаева З.С., Кушкарина С.М., Саланов А.Н. (2011) Бензолды гидрлеудің Rh/Сибунит катализаторына Мо модификаторының әсері. *Хим. журн. Казахстана*. — № 2, — С. 57-63.

Конуспаев С.Р., Шаймардан М., Нурбаева Д.Р., Ауезов А.Б., Боронин А.И. (2010) Разработка катализаторов гидрирование бензола при создании экологически чистого бензина. *Нефтехимия*. — №1, — С. 48-51.

## References

Akbayrak S. (2018) Rhodium (0) Nanoparticles Supported on Ceria as Catalysts in Hydrogenation of Neat Benzene at Room Temperature. *J. Colloid and Interface Sci.* — Vol. 530. 15 — No 2018. — P.459-4647. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.07.011> (in English)

Alimohammadi N., et al. (2019) Selective benzene reduction from gasoline using catalytic hydrogenation

reactions over zeolite Pd/13X. *Reac. Kinet. Mech. and Cat.* — Vol. 128. — P. 949-964. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11144-019-01675-w> (in English)

Bayram E., et al. (2011) Is It Homogeneous or Heterogeneous Catalysis Derived from  $[\text{RhCp}^*\text{Cl}_2]_2$  In Operando XAFS, Kinetic, and Crucial Kinetic Poisoning Evidence for Subnanometer  $\text{Rh}_4$  Cluster-Based Benzene Hydrogenation Catalysis. *J. Am. Chem. Soc.* — Vol. 133. — P.18889-18902. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja2073438> (in English)

Fang Hao., et al. (2021) Selective hydrogenation of benzene over Ru supported on surface modified  $\text{TiO}_2$ . *Korean J. Chem. Eng.* — No 38(4). — P.736-746. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11814-020-0689-9> (in English)

Glotov A.P., et al. (2018) Nanostructured Ruthenium Catalysts in Hydrogenation of Aromatic Compounds. *Petrol. Chem.* — Vol. 58. — No.14. — P.1221-1226. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965544118140013> (in English)

Gu W., et al. (2015) Benzene Selectivity in Competitive Arene Hydrogenation: Effects of Single-Site Catalyst•••Acidic Oxide Surface Binding Geometry. *J. Am. Chem. Soc.* — Vol. 137. — P.6770-6780. DOI: <https://doi.org/10.1021/jacs.5b03254> (in English)

Haiting Cai., et al. (2024) Catalytic consequences of the identity and coverages of reactive intermediates during benzene hydrogenation on Pt, Pd, and Pt-Re catalysts. *J. Catal.* — Vol. 436. 115582. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2024.115582> (in English)

Hongli Liu., et al. (2015) Solventless hydrogenation of benzene to cyclohexane over a heterogeneous Ru—Pt bimetallic catalyst. *Chem. Eng. Sci.* — Vol. (122)27. — P.350-359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.09.050> (in English)

Johnson R., et al. (2025) Benzene hydrogenation utilizing organometallic early transition metal precursors. *Catal. Sci. Technol.* — Vol. 15. — P.41-45. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4CY01272K> (in English)

Konýspaev S.R., Shaimardan M., Aýezov A.B., Konýspaeva Z.S., Kýshkarina S.M., Salanov A.N. Benzoldy gıdrleýdiń Rh/Cıbýnıt katalızatoryna Mo modifikatorynń áseri. [Effect of a Mo Modifier on the Hydrogenation of Benzene over an Rh/Cibunite Catalyst]. *Chemical Journal of Kazakhstan*. 2011. — № 1. — P.57—63. (in Russian)

Konýspaev S.R., Shaimardan M., Nýrbaeva D.R., Aýezov A.B., Boronin A.I. Razrabotka katalizatorov gıdrovanie benzola pri sozdani ekologicheski chıstogo benzına. [Development of Catalysts for the Hydrogenation of Benzene in the Production of Environmentally Friendly Gasoline]. *Petrochemistry*. 2010. — № 1. — P.48—51. (in Russian)

Kumar P., et al. (2023) Selective Hydrogenation of Lignin-derived Aromatics to Give Cyclohexanes with a Rhodium-Pincer Precatalyst. *J. Organomet. Chem.* — Vol. 997. — P.15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2023.122795> (in English)

L. Marot., et al. (2008) Characterization of magnetron sputtered rhodium films for reflective coatings. *Surface & Coatings Technology*, — Vol. 202. — P.2837-2843. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.10.014> (in English)

Nurlan A., et al. (2023) The Effect of Rh/BAC Catalyst Preparation and Pretreatment Methods on Benzene Hydrogenation. *Eurasian J. Chem.* — Vol. 4(112). — P.123-129. DOI: <https://doi.org/10.31489/2959-0663/4-23-17> (in English)

Peyrovi M.H., et al. (2018) Benzene selective hydrogenation over supported Ni (nano-) particles catalysts: Catalytic and kinetics studies. *Chinese J. of Chem. Eng.* — Vol. 26. — P.521-528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2017.05.022> (in English)

Peyrovi M.H., et al. (2018) Competitive Hydrogenation of Benzene in Reformate Gasoline over Ni Supported on  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$ , and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Catalysts: In uence of Support Nature. 8b02952 *Energy Fuels* 32. 11432–11439. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b02952> (in English)

Shirokopoyas S.I., et al. (2024) Hydrogenation of Aromatic Hydrocarbons in the Presence of Dibenzothiophene over Platinum—Palladium Catalysts Based on Al—SBA15 Aluminosilicates. *Petrol. Chem.*, — Vol. (54)2. — P.94-99. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965544114020108> (in English)

Vásquez-Céspedes S., et al. (2018) Plausible Rh (V) Intermediates in Catalytic C—H Activation Reactions. *ACS Catal.* — Vol.8. — P. 242-257. DOI: <https://doi.org/10.1021/acscatal.7b03048> (in English)



Xiaojing Zhao., et al. (2022) Recent Progress in Pd-Based Nanocatalysts for Selective Hydrogenation. ACS Omega. 7. 17-31. DOI: 10.1021/acsomega.1c06244 (in English)

Zhihao Chen., et al. (2019) Selective Hydrogenation of Benzene: Progress of Understanding for the Ru-Based Catalytic System Design. Indus. Eng. Chem. Res. — Vol. (58)31 — P.13794-13803. DOI: 10.1021/acs.iecr.9b01475. (in English)



**Publication Ethics and Publication Malpractice  
in the journals of the Central Asian Academic Research Center LLP**

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 journals of the Central Asian Academic Research Center LLP 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 Central Asian Academic Research Center LLP 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 Central Asian Academic Research Center LLP.

The Editorial Board of the Central Asian Academic Research Center LLP will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

**[www.nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz)**

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

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

Ответственный редактор *А. Ботанқызы*

Редакторы: *Д.С. Аленов, Т. Апендиев*

Верстка на компьютере *Г.Д. Жадырановой*

Подписано в печать 29.12.2025.

Формат 60x88<sup>1</sup>/<sub>8</sub>.

18,0 п.л. Заказ 4.

---

«Central Asian Academic Research Center» LLP

Алматы, Қонаев к-сі, 142