

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

**ACADEMIC JOURNAL  
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES**

**№2  
2026**

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

2026 • 2



**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 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:**

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

**ADEKENOV Sergazy Mynzhasarovich**, 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>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/13503476>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

**OLIVIERO Rossi Cesare**, PhD (Chemistry), Professor at the University of Calabria (Calabria, Italy), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/399768>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

**BERSIMBAYEV Rakhmetkazhi 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

**CALANDRA Pietro**, PhD (Physics), Professor, Institute for the Study of Nanostructured Materials (Rome, Italy), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/616360>

**BOSHKAEV Kuantai Avgazyevich**, 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2080231>

**BURKITBAEV Mukhambetkali**, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, (Almaty, Kazakhstan) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/29017135>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30353742>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/566>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/65533963>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1671760>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2023295>

**ABISHEV Medeu Erzhanovich**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Corresponding Member of NAS RK, (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1556025>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

**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 Жұрынулы**, химия ғылымдарының докторы, профессор, ХҒАҚ және ҚР ҰҒА академигі, Мұнай өңдеу және мұнай-химиясы ғылыми-зерттеу институтының бас директоры (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960%3E>; <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

**Редакция ұжымы:**

**КАЛИМОЛДАЕВ Максат Нұрәділулы**, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

**ӘДЕКЕНОВ Серғазы Мынжасарұлы**, 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>

**РАМАЗАНОВ Тілеккабыл Сәбитұлы**, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701328029>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/13503476>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

**ОЛИВЬЕРО Росси Сесаре**, PhD (химия), Калабрия университетінің профессоры (Калабрия, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/399768>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

**САНГ-СУ Квак**, PhD (биохимия, агрохимия), профессор, Корей Биоғылым және биотехнология ғылыми-зерттеу институты (KRIIBV), өсімдіктердің инженерлік жүйелері ғылыми-зерттеу орталығының бас ғылыми қызметкері, (Дэчон, Корея), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

**КАЛАНДРА Пьетро**, PhD (физика), нанокұрылымды материалдарды зерттеу институтының профессоры (Рим, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/616360>

**БОШКАЕВ Қуантай Авгазыұлы**, 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2080231>

**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/29017135>

**QUEVEDO Hernando**, профессор, Мексика ұлттық автономиялық университеті (UNAM), Ядролық ғылымдар институты (Мехико, Мексика), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30353742>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/566>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/65533963>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1671760>

**ХАРИН Станислав Николаевич**, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2023295>

**ӘБІШЕВ Медеу Ержанұлы**, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1556025>

**ӘБІЛМАҒЖАНОВ Арлан Зайнұтталайұлы**, 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

## 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** Куәлік.

Тақырыптық бағыты: *физика, химия.*

Мерзімділігі: жылына 4 рет.

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

**Главный редактор:**

**ЖУРИНОВ Мурат Журинович**, доктор химических наук, профессор, академик МААН и НАН РК, Генеральный директор НИИ нефтепереработки и нефтехимии (Алматы, Казахстан), [https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960%";](https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960%) <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

**Редакционная коллегия:**

**КАЛИМОЛДАЕВ Максат Нурадилович**, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

**АДЕКЕНОВ Сергезы Мынжасарович**, 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>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/13503476>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

**ОЛИВЬЕРО Росси Чезаре**, доктор философии (PhD, химия), профессор Университета Калабрии (Калабрия, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/399768>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

**САНГ-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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

**БЕРСИМБАЕВ Рахметжахи Искендинович**, 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

**КАЛАНДРА Пьетро**, доктор философии (PhD, физика), профессор Института по изучению наноструктурированных материалов (Рим, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/616360>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2080231>

**БУРКИТБАЕВ Мухамбеткали**, доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/wos/author/detail.uri?authorId=8513885600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/29017135>

**QUEVEDO Hernando**, профессор, Национальный автономный университет Мексики (UNAM), Институт ядерных наук (Мехико, Мексика), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30353742>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/566>

**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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/65533963>

**ТАКИБАЕВ Нурғали Жабағаевич**, 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1671760>

**ХАРИН Станислав Николаевич**, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2023295>

**АБИШЕВ Медеу Ержанович**, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1556025>

**АБИЛЬМАТЖАНОВ 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>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

## 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>

CONTENTS

PHYSICS

<b>Koshtybayev T.B., Aliev Sh., Aliyeva M.E., Zhavliyeva A.T.</b> Covariant approach to the kinetic theory of plasma in a strong electromagnetic field.....	13
<b>Kemelbekova A., Shongalova A., Bondar E., Otunchi Ye.</b> Recycling technologies for spent lithium-ion batteries: environmental impact, recovered products, and future development trends.....	25
<b>Koilyk N., Baimbetova G., Dalelkhankyzy A., Kaptagay G., Primkulova Zh.</b> Simplification of the fermionic dynamical symmetry model for identical particles and its mapping into bosonic space.....	38
<b>Massak B., Agyl-Mussapar O., Amangeldinova S., Kurmangaliyeva V., Snow M.</b> Constraints on Yukawa-Type short-range interactions from neutron interferometry data.....	60
<b>Nurbayev B.M., Dmitriyeva E.A.</b> Tin-based perovskites.....	70
<b>Nurtazina A.S., Zhubaev A.K.</b> Study of the effect of highly dispersed ochre on the kinetic characteristics of epoxy composites.....	92
<b>Shokanov A.K., Khamrayev Sh.I., Smikhan Y.A.</b> Mössbauer studies of fly ash-based tracers.....	103
<b>Ualikhanova U.A., Kurban Y.Y., Syzdykova A.M., Altayeva G.S., Altaibayeva A.B.</b> Breaking the degeneracy between metric and teleparallel gravity theories through multi-messenger gravitational-wave astronomy.....	119
<b>Zhadyranova A.A., Yerzhan B.</b> Dynamics of bounce regimes in modified teleparallel gravity.....	134
<b>Zhusupova N.K.</b> Application of machine learning methods in the analysis of gravitational waves and cosmological models.....	151
<b>CHEMISTRY</b>	
<b>Aubakirov Ye., Akhmetova F., Tashmukhambetova Zh., Toshtay K., Amantaiuly K.</b> Conversion of Polymer Waste into Synthetic Fuel via Modification of Taizhuzhen Zeolite with Tungsten Salts.....	164
<b>Auyeshov A.P., Eskibayeva Ch.Z., Ibrayeva A.M., Alzhanov K.B., Dikanbayeva A.K.</b> Physicochemical study of serpentinite waste and phosphoric acid products.....	175
<b>Bayeshova A.K., Bayeshov A., Tuleshova E.Zh.</b> Reduction of copper ions by zinc in the presence of titanium(iv) ions in sulfuric acid solutions.....	188

<b>Fazylov S.D., Syzdykov A.K., Pustolaikina I.A., Kazhuratova A.T., Tazhibay A.M.</b> Production of $\alpha$ -, $\beta$ -, $\gamma$ -oligosaccharide clathrate cytosine complexes.....	200
<b>Jalmakhanbetova R.I., Yelshibayeva A.M., Zhumagaliyeva Zh.Zh., Mukusheva G.K.</b> Terpenoid compounds of <i>Artemisia terrae-albae</i> growing in the Turkestan Region of Kazakhstan.....	213
<b>Kapizov O.S., Mukhanov D.K., Dzheldybaeva I.M., Seisenov E.B., Akimbayeva A.B.</b> Sustainable recycling of ferrosilicon machining chips from metallurgical plants into high-performance silicon-carbon anodes.....	228
<b>Massalimova B.K.</b> Wastewater treatment methods for heavy metal removal: production of activated carbon from biomass.....	244
<b>Nurtai Zh., Orynassar R., Aimaganbetova Z.K., Zhanturina N.N.</b> Simulation of kinetic parameters of vinyl ester resin samples with diatomite and dimethyl methylphosphonate fillers.....	272
<b>Sagyntayeva A., Zhanikulov N., Sudarev E., Kaiyrbaeva M., Zhakipbayev B.</b> Research on the quality of raw materials for obtaining gypsum-cement-pozzolanic composite material.....	286
<b>Satayeva S., Yermukhanova S., Urazova A., Mendygaliyeva A., Sabitov B.</b> Obtaining benzene by photocatalytic oxidation of toluene.....	302
<b>Sdikova G.Zh., Dalabayeva N.S., Sarova N.B., Muhtar T.Zh., Zhaltyrbayeva N.K.</b> Efficiency of phosphorus-containing inhibitors in protecting steel against corrosion.....	315
<b>Shaimardan M., Azhikhanova Z., Abutalip M., Toktarbaiuly O.</b> Isolation and Characterization of lignin from <i>Phlomis tuberosa</i> L. biomass via acid treatment.....	329
<b>Yesimsiitova Z.B., Seisenova A., Oryngaliyeva S.Zh., Sanuar A., Manap K.R.</b> Obtaining carbonized materials from rice husk using a mobile pyrolysis plant for energy applications.....	338
<b>Zhetenova M.S., Suleimenova M.Sh., Nuraly A.M., Mutushev A.Zh., Kalimoldina L.M.</b> Development and research of carotenoid-containing extracts obtained from plant raw materials.....	353
<b>Zhortarova A.A., Kubicek V., Salkeyeva L.K., Ibrayev M.K., Seidakhmetova R.B.</b> Synthesis and investigation of biological activity of 1,3-Bis(4-Phenylthiazol-2-yl)-2,4-Bis(N,N- Diethylamino)-1,3-Diaza-2,4-Diphosphétidine.....	367
<b>Zhumabek M., Tungatarova S.A., Murzin D.Yu., Baizhumanova T.S.</b> Structural and catalytic properties of SCS-derived Co-Al-Mg-Mn catalysts in dry reforming of methane.....	383

## МАЗМҰНЫ

## ФИЗИКА

<b>Қоштыбаев Т.Б., Алиев Ш., Алиева Е.М., Жавлиева А.Т.</b> Күшті электромагниттік өрістегі плазманың кинетикалық теориясына коварианттық көзқарас.....	13
<b>Кемелбекова А., Шонғалова А., Бондарь Е., Отунчи Е.</b> Пайдаланылған литий-ионды аккумуляторларды қайта өңдеу технологиялары: экологиялық әсері, алынатын өнімдер және болашақ даму бағыттары.....	25
<b>Қойлық Н.О., Байымбетова Г.А., Дәлелханқызы А., Қаптағай Г.А., Примкулова Ж.Е.</b> Бірдей бөлшектер үшін фермионды динамикалы-симметриялық модельді ықшамдау және оны бозондық кеңістікке бейнелеу.....	38
<b>Масақ Б., Ағыл-Мұсапар О., Амангелдинова С., Курманғалиева В., Сноу М.</b> Нейтрондық интерферометрия негізінде юкава типті қысқа-қашықтықтағы өзара әсерлесулерге шектеулер қою.....	60
<b>Нұрбаев Б.М., Дмитриева Е.А.</b> Қалайы негізіндегі перовскиттер.....	70
<b>Нуртазина А.С., Жубаев А.К.</b> Дисперстілігі жоғары охранның эпоксидті композиттердің кинетикалық сипаттамаларына ықпалын зерттеу.....	92
<b>Шоканов А.К., Хамраев Ш.И., Смихан Е.А.</b> Үшқыш күл негізіндегі трассерлердің мессбауэрлік зерттеулері.....	103
<b>Уалиханова У.А., Құрбан Е.Е., Сыздыкова А.М., Алтаева Г.С., Алтайбаева А.Б.</b> Көп арналы гравитациялық-толқындық астрономия арқылы метрикалық және телепараллельді гравитация теорияларының айырмашылығын зерттеу.....	119
<b>Жадыранова А.А., Ержан Б.</b> Модификацияланған телепараллель гравитациядағы серпіліс режимдерінің динамикасы.....	134
<b>Жусупова Н.К.</b> Машиналық оқыту әдістерін гравитациялық толқындар мен космологиялық модельдерді талдауда қолдану.....	151
<b>ХИМИЯ</b>	
<b>Аубакиров Е., Ахметова Ф., Ташмухамбетова Ж., Тоштай Қ., Амантайұлы Қ.</b> Тайжүзген цеолитін вольфрам тұздарымен модификациялау арқылы полимер қалдықтарын синтетикалық отынға түрлендіру.....	164
<b>Ауешов А.П., Ескибаева Ч.З., Ибраева А.М., Алжанов К.Б., Диканбаева А.К.</b> Серпентинит қалдықтарының фосфор қышқылымен әрекеттесу өнімдерінің физика-химиялық зерттелуі.....	175

<b>Башова А.К., Башов А.Б., Тулешова Э.Ж.</b> Мыс иондарын күкіртқышқылды ерітінділерде титан (IV) иондары қатысында мырышпен тотықсыздандыру.....	188
<b>Фазылов С.Д., Сыздықов А.К., Пустолайкина И.А., Қажмұратова А.Т., Тәжібай А.М.</b> Цитизиннің $\alpha$ -, $\beta$ -, $\gamma$ -олигосахаридтермен клатраттыкешендерін алу.....	200
<b>Джалмаханбетова Р.И., Елшібаева А.М., Жумагалиева Ж.Ж., Мукушева Г.К.</b> Қазақстанның Түркістан өңірінде өсетін <i>Artemisia terrae-albae</i> терпеноидты косылыстары.....	213
<b>Капизов О.С., Муханов Д.К., Желдыбаева И.М., Сейсенов Е.Б., Акимбаева А.Б.</b> Металлургиялық зауыттардың ферросилиций жоңқаларын жоғары өнімді кремний-көміртекті анодтарға тұрақты қайта өңдеу.....	228
<b>Масалимова Б.К.</b> Ауыр металдардан ағын суларды жою әдістері: биомассадан белсендендірілген көміртек алу.....	244
<b>Нуртай Ж., Орынбасар Р.О., Аймағанбетова З.К., Жантурина Н.Н.</b> Диатомит пен диметил метилфосфонат толтырғыштары бар винилэфир шайыр үлгілерінің кинетикалық параметрлерінің модельдеу.....	272
<b>Сағынтаева А., Жаниқұлов Н., Сударев Е., Қайырбаева М., Жакипбаев Б.</b> Гипс-цемент-пуццоланды композициялық материал алу үшін қажетті шикізаттардың сапасын зерттеу.....	286
<b>Сатаева С., Ермуханова С., Уразова А., Мендығалиева А., Сабитов Б.</b> Толуолдың фотокаталитикалық тотығыуы арқылы бензол алу.....	302
<b>Сдиқова Г.Ж., Далабаева Н.С., Сарова Н.Б., Мұхтар Т.Ж., Жалтырбаева Н.К.</b> Фосфор ингибиторлардың болаттың жемірілуіне қарсы тиімділігі.....	315
<b>Шаймардан М., Ажиханова Ж., Әбутәліп М., Тоқтарбайұлы О.</b> <i>Phlomis Tuberosa</i> L. өсімдігі биомассасынан лигнинді қышқылдық өңдеу арқылы бөліп алу және сипаттау.....	329
<b>Есимсиитова З.Б., Сейсенова А., Орынғалиева С.Ж., Сануар А., Манап К.Р.</b> Энергиялық қолдану үшін жылжымалы пиролиз қондырғысын пайдалану арқылы күріш қауызынан көміртекті материалдар алу.....	338
<b>Жетенова М.С., Сүлейменова М.Ш., Нұралы Ә.М., Мутушев А.Ж., Калимолдина Л.М.</b> Өсімдік шикізатынан алынған құрамында каротиноид бар сығындыларды әзірлеу және зерттеу.....	353

**Жортарова А.А., Кубісек V., Салькева Л.К., Ибраев М.К., Сейдахметова Р.Б.**  
1,3-бис(4-фенилтиазол-2-ил)-2,4-бис(N,N-диэтиламино)-1,3-диазо-2,4-дифосфетидиннің синтезі және биологиялық белсенділігін зерттеу.....367

**Жұмабек М., Тунгатарова С.А., Мурзин Д.Ю., Байжуманова Т.С.**  
SCS әдісімен дайындалған Co–Al–Mg–Mn катализаторларының метанның құрғақ реформингіндегі құрылымдық және каталитикалық қасиеттері.....383

## СОДЕРЖАНИЕ

## ФИЗИКА

<b>Коштыбаев Т.Б., Алиев Ш., Алиева М.Е., Жавлиева А.Т.</b> Ковариантный подход к кинетической теории плазмы в сильном электромагнитном поле.....	13
<b>Кемелбекова А., Шонгалова А., Бондарь Е., Отунчи Е.</b> Технологии переработки отработанных литий-ионных аккумуляторов: экологическое воздействие, получаемые продукты и будущие направления развития.....	25
<b>Қойлық Н.О., Баймбетова Г.А., Дәлелханқызы А., Қаптағай Г.Ә., Примкулова Ж.Е.</b> Упрощение фермионной динамико-симметрической модели для идентичных частиц и её отображение в бозонное пространство.....	38
<b>Масақ Б., Ағыл-Мұсапар О., Амангелдинова С., Курмангалиева В., Сноу М.</b> Ограничения на юкавовские короткодействующие взаимодействия на основе нейтронной интерферометрии.....	60
<b>Нурбаев Б.М., Дмитриева Е.А.</b> Перовскиты на основе олова.....	70
<b>Нуртазина А.С., Жубаев А.К.</b> Исследование влияния высокодисперсной охры на кинетические характеристики эпоксидных композитов.....	92
<b>Шоканов А.К., Хамраев Ш.И., Смихан Е.А.</b> Мёсбауэровские исследования трассеров на основе летучей золы.....	103
<b>Уалиханова У.А., Курбан Е.Е., Сыздыкова А.М., Алтаева Г.С., Алтайбаева А.Б.</b> Разрешение вырождения метрических и телепараллельных теорий гравитации посредством многоканальной гравитационно-волновой астрономии.....	119
<b>Жадыранова А.А., Ержан Б.</b> Динамика отскоковых режимов в модифицированной телепараллельной гравитации.....	134
<b>Жусупова Н.К.</b> Применение методов машинного обучения при анализе гравитационных волн и космологических моделей.....	151

## ХИМИЯ

<b>Аубакиров Е., Ахметова Ф., Ташмухамбетова Ж., Тоштай К., Амантайулы К.</b> Конверсия полимерных отходов в синтетическое топливо путем модификации цеолита тайжугзен солями вольфрама.....	164
--	-----

<b>Ауешов А.П., Ескибаева Ч.З., Ибраева А.М., Алжанов К.Б., Диканбаева А.К.</b> Физико-химическое исследование продуктов взаимодействия серпентинитовых отходов и фосфорной кислоты.....	175
<b>Баешова А.К., Баешов А.Б., Тулешова Э.Ж.</b> Восстановление ионов меди цинком в присутствии ионов титана (IV) в растворах серной кислоты.....	188
<b>Фазылов С.Д., Сыздыков А.К., Пустолайкина И.А., Кажмуратова А.Т., Тажибай А.М.</b> Получение $\alpha$ -, $\beta$ -, $\gamma$ -олигосахаридных клатратных комплексов цитизина.....	200
<b>Джалмаханбетова Р.И., Елшыбаева А.М., Жумагалиева Ж.Ж., Мукушева Г.К.</b> Терпеноидные соединения <i>Artemisia terrae-albae</i> , произрастающего в Туркестанском регионе Казахстана.....	213
<b>Капизов О.С., Муханов Д.К., Джелдыбаева И.М., Сейсенов Е.Б., Акимбаева А.Б.</b> Устойчивая переработка стружки ферросилиция металлургических заводов в высокопроизводительные кремний-углеродные аноды.....	228
<b>Масалимова Б.К.</b> Методы очистки сточных вод от тяжелых металлов: получение активированного угля из биомассы.....	244
<b>Нуртай Ж., Орынбасар Р.О., Аймаганбетова З.К., Жангурина Н.Н.</b> Моделирование кинетических параметров образцов винилэфирных смол с наполнителями из диатомита и диметилметилфосфоната.....	272
<b>Сагынтаева А., Жаникулов Н., Сударев Е., Кайырбаева М., Жакипбаев Б.</b> Исследование качества сырья для получения гипсо-цементно-пуццоланового композиционного материала.....	286
<b>Сатаева С., Ермуханова С., Уразова А., Мендыгилиева А., Сабитов Б.</b> Получение бензола методом фотокаталитического окисления толуола.....	302
<b>Сдикова Г.Ж., Далабаева Н.С., Сарова Н.Б., Мухтар Т.Ж., Жалтырбаева Н.К.</b> Эффективность фосфорсодержащих ингибиторов против коррозии стали.....	315
<b>Шаймардан М., Ажиханова Ж., Абуталип М., Токтарбай О.</b> Выделение и характеристика лигнина из биомассы <i>Phlomis Tuberosa L.</i> с помощью кислотной обработки.....	329
<b>Есимсиитова З.Б., Сейсенова А., Орынгалиева С.Ж., Сануар А., Манап К.Р.</b> Получение карбонизированных материалов из рисовой шелухи с использованием мобильной пиролизной установки для энергетических применений.....	338

**Жетенова М.С., Сулейменова М.Ш., Нуралы А.М., Мутушев А.Ж.,  
Калимолдина Л.М.**

Разработка и исследование каротиноидсодержащих экстрактов, полученных  
из растительного сырья.....353

**Жортарова А.А., Kubicek V., Салькева Л.К., Ибраев М.К., Сейдахметова Р.Б.**

Синтез и исследование биологической активности 1,3-бис(4-фенилтиазол-2-ил)-2,4-  
бис(N,N-диэтиламино)-1,3-диазо-2,4-дифосфетидина.....353

**Жумабек М., Тунгатарова С.А., Мурзин Д.Ю., Байжуманова Т.С.**

Структурные и каталитические свойства Co–Al–Mg–Mn катализаторов, приготовленных  
методом SCS, для сухого риформинга метана.....383

©Koshtybayev T.B.<sup>1</sup>, Aliev Sh.<sup>2</sup>, Aliyeva M.E.<sup>3</sup>, Zhavliyeva A.T.<sup>1</sup>, 2026.

<sup>1</sup>Kazakh National Women's Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan;

<sup>2</sup>Kyrgyz State University named after I. Arabaev, Bishkek, Kyrgyzstan;

<sup>3</sup>Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan.

\*E-mail: zhavliyeva.11@gmail.com

## COVARIANT APPROACH TO THE KINETIC THEORY OF PLASMA IN A STRONG ELECTROMAGNETIC FIELD

**Koshtybayev Talgat** — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: koshtybayev70@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7344-6801>;

**Aliev Sharshenaly** — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Kyrgyz State University named after I. Arabaev, Bishkek, Kyrgyzstan,

E-mail: alidoc2010@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4704-2953>;

**Aliyeva Moldir** — Master of sciences, Senior lecturer, Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: moldir-2008@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0440-6211>;

**Zhavliyeva Ardak** — Master of Pedagogical Sciences, lecturer, Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: zhavliyeva.11@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-4554-7604>.

**Abstract.** This article presents the regularities of equilibrium statistical mechanics in the hypersurface formalism, the Hamiltonian of quantum electrodynamic plasma on hypersurfaces, and the kinetic characteristics in a strong electromagnetic field in a covariant form. The research method is based on the relativistic von Neumann equation for nonequilibrium statistical operators defined on spacelike planes in Minkowski space, canonical quantization of the system on hypersurfaces, and the covariant model of Coulomb gauge. Methods for deriving kinetic equations in the hypersurface formalism and transformations of correlation functions and nonequilibrium statistical operators with respect to unitary time evolution in an averaged electromagnetic field are shown. By applying inhomogeneous Lorentz transformations to state vectors on hypersurfaces, the covariant form of the Schrödinger equation and an equation similar to the nonrelativistic von Neumann equation for the statistical operator and a mixed quantum ensemble were derived. These equations and the equations of motion of operators were written in the Heisenberg and Schrödinger representations. Using the Legendre transformation, an

expression for the Hamiltonian of quantum electrodynamic plasma on a hypersurface was derived, kinetic equations were obtained by expanding field operators into plane waves, as well as equations for correlation functions and the photon density matrix. The dispersion law for photons on a hyperplane was uniquely defined as the average value of the operator of the photon density matrix. Taking into account the above-mentioned representation of field operators, expressions of the photon density matrix through operators were derived and presented. For the photon and fermion matrices obtained in these relations, chain equations for correlation functions arising in the calculation of commutators with the interaction Hamiltonian are constructed. These equations represent the fundamental canonical model of electromagnetic interactions in covariant form.

**Keywords:** hypersurface, quantum electrodynamic plasma, Hamiltonian, kinetic equation, Minkowski space, state vector, statistical operator

***For citations:** Koshtybayev T.B., Aliev Sh., Aliyeva M.E., Zhavliyeva A.T. Covariant Approach to the Kinetic Theory of Plasma in a Strong Electromagnetic Field. Academic Journal of Physical and Chemical Sciences. 2026. No.2. Pp. 13–24. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.434>*

©Қоштыбаев Т.Б.<sup>1</sup>, Алиев Ш.<sup>2</sup>, Алиева Е.М.<sup>3</sup>, Жавлиева А.Т.<sup>1</sup>, 2026.

<sup>1</sup> Қазақ ұлттық педагогикалық қыздар университеті, Алматы, Қазақстан;

<sup>2</sup> И. Арабаев атындағы Қырғыз мемлекеттік университеті, Бішкек, Қырғызстан;

<sup>3</sup> Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан.

\*E-mail: zhavliyeva.11@gmail.com

## КҮШТІ ЭЛЕКТРОМАГНИТТІК ӨРІСТЕГІ ПЛАЗМАНЫҢ КИНЕТИКАЛЫҚ ТЕОРИЯСЫНА КОВАРИАНТТЫҚ КӨЗҚАРАС

**Қоштыбаев Талғат** — физика–математика ғылымдарының кандидаты, доцент, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: koshtybayev70@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7344-6801>;

**Алиев Шаршенали** — физика–математика ғылымдарының кандидаты, педагогика ғылымдарының докторы, профессор, И. Арабаев атындағы Қырғыз мемлекеттік университеті, Бішкек, Қырғызстан,

E-mail: alidoc2010@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4704-2953>;

**Алиева Мөлдір** — жаратылыстану ғылымдарының магистрі, аға оқытушы, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: moldir-2008@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0440-6211>;

**Жавлиева Ардак** — педагогика ғылымдарының магистрі, оқытушы, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: zhavliyeva.11@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-4554-7604>.

**Аннотация.** Ұсынылып отырған мақалада гипержазықтықтар формализміндегі тепе–теңдік статистикалық механиканың заңдылықтары, гипержазықтықтардағы кванттық–электродинамикалық плазманың гамильтонианы мен күшті электромагниттік өрістегі кинетикалық сипаттамасы коварианттық нұсқада берілді. Зерттеу тәсілі Минковский кеңістігіндегі кеңістік тектес гипержазықтықтарда

анықталған тепе–теңсіз статистикалық операторларға арналған релятивистік фон Нейман теңдеуіне, гипержазықтықтардағы жүйенің каноникалық квантталуына және кулондық калибровканың коварианттық үлгісіне негізделген. Гипержазықтықтар формализміндегі кинетикалық теңдеулерді шығарып алу жолдары және орташаланған электромагниттік өріс бойынша корреляциялық функциялар мен тепе–теңсіз статистикалық операторлардың унитарлық уақыт бойынша түрлендірулері көрсетілген. Гипержазықтықтардағы күй векторларына біртекті Лоренц түрлендіруін қолдану арқылы Шредингер теңдеуінің коварианттық нұсқасы мен аралас кванттық ансамбльге арналған статикалық оператор үшін фон Нейманның релятивистік емес теңдеуі тәрізді теңдеу шығарылып көрсетілді. Бұл теңдеулер және операторларлық қозғалыс теңдеулері Гейзенбергтік және Шредингерлік бейнелерде жазылды. Лежандр түрлендіруі арқылы гипержазықтықтағы кванттық–электродинамикалық плазманың гамильтонианы, өрістік операторларды жазық толқындар бойынша жіктеу арқылы кинетикалық теңдеулер, корреляциялық функцияларға арналған теңдеулер мен фотондық тығыздық матрицасы шығарылып көрсетілді. Тығыздықтың фотондық матрицасының орташа мән ретінде оператордың орташасы гипержазықтықтағы фотондар үшін дисперсия заңы бір мәнді ретінде анықталды. Өрістік операторлардың жоғарыда атап өтілген бейнесін ескере отырып тығыздықтың фотондық матрицасының операторлар арқылы өрнектері шығарылып көрсетілді. Алынған осы қатынастардағы фотондық және фермиондық матрицалары әсерлесулер гамильтонианы бар коммутаторларды есептеу кезінде пайда болатын корреляциялық функцияларға арналған тізбекті теңдеулер құрылады. Бұл теңдеулер ковариантты тұрғада электромагниттік әсерлесулердің негізгі канондық үлгісі болып табылады.

**Түйін сөздер:** гипержазықтық, кванттық–электродинамикалық плазма, гамильтониан, кинетикалық теңдеу, Минковский кеңістігі, күй векторы, статикалық оператор

©**Коштыбаев Т.Б.<sup>1</sup>, Алиев Ш.<sup>2</sup>, Алиева М.Е.<sup>3</sup>, Жавлиева А.Т.<sup>1</sup>, 2026.**

<sup>1</sup>Казахский национальный женский педагогический университет,  
Алматы, Казахстан;

<sup>2</sup>Кыргызский государственный университет имени И. Арабаева,  
Бишкек, Кыргызстан;

<sup>3</sup>Казахский национальный педагогический университет имени Абая,  
Алматы, Казахстан.

\*E-mail: zhavliyeva.11@gmail.com

## КОВАРИАНТНЫЙ ПОДХОД К КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПЛАЗМЫ В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

**Коштыбаев Талгат** — кандидат физико–математических наук, доцент, Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан,

E-mail: koshtybayev70@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7344-6801>;

**Алиев Шаршенали** — кандидат физико–математических наук, доктор педагогических наук,

профессор, Кыргызский государственный университет имени И. Арабаева, Бишкек, Кыргызстан,  
E-mail: alidoc2010@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4704-2953>;

**Алиева Молдир** — магистр естественных наук, старший преподаватель, Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Алматы, Казахстан,

E-mail: moldir-2008@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0440-6211>;

**Жавлиева Ардак** — магистр педагогических наук, преподаватель, Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан,

E-mail: zhavliyeva.11@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-4554-7604>.

**Аннотация.** В статье представлены основные положения равновесной статистической механики в формализме гиперплоскостей, рассмотрен гамильтониан квантово-электродинамической плазмы на гиперплоскостях и исследованы кинетические характеристики плазмы в сильном электромагнитном поле в ковариантной форме. Метод исследования основан на релятивистском уравнении фон Неймана для неравновесных статистических операторов, определённых на пространственноподобных гиперплоскостях пространства Минковского, каноническом квантовании системы в формализме гиперплоскостей и ковариантной модели кулоновской калибровки. Рассмотрены способы вывода кинетических уравнений, а также преобразования корреляционных функций и неравновесных статистических операторов по времени в усреднённом электромагнитном поле. С использованием неоднородных преобразований Лоренца для векторов состояния на гиперплоскостях получены ковариантная форма уравнения Шрёдингера и уравнение, аналогичное нерелятивистскому уравнению фон Неймана для статистического оператора смешанного квантового ансамбля. Уравнения движения операторов представлены в формализмах Гейзенберга и Шрёдингера. На основе преобразования Лежандра выведено выражение для гамильтониана квантово-электродинамической плазмы на гиперплоскости, получены кинетические уравнения, уравнения для корреляционных функций и фотонная матрица плотности. Закон дисперсии фотонов на гиперплоскости определён через среднее значение оператора фотонной матрицы плотности. Для фотонной и фермионной матриц построены цепочечные уравнения для корреляционных функций, возникающих при вычислении коммутаторов с гамильтонианом взаимодействия. Полученные результаты формируют каноническую модель электромагнитных взаимодействий в ковариантной форме и могут быть использованы при дальнейшем развитии кинетической теории релятивистской плазмы.

**Ключевые слова:** гиперплоскость, квантово-электродинамическая плазма, гамильтониан, кинетическое уравнение, пространство Минковского, вектор состояния, статический оператор

**Кіріспе.** Өте күшті электромагниттік өрістерде орналасқан плазманың кинетикалық теориясы сызықтық эффекттер, параметрлік орнықсыздық және релятивистік қозғалыста секілді жағдайларды ескеріп, зарядталған бөлшектердің қозғалысына қатысты бірқатар қасиеттерді тереңінен зерттей алады. Қайсыбір көп бөлшектік жүйелердегі жұптасқан соқтығысулар арқылы емес, кулондық алы-

стан әсер ету күштері арқылы қарастыру ыңғайлы. Аталған күштер ұжымдастық қоздыруларға (квазибөлшектер) себепші. Бұл кезде Больцманның кинетикалық теңдеуіндегі сол жақ мүшелермен ғана шектеліп, соқтығысу интегралын қолданбауға болады. Электрондық газдан және ауыр иондардан құрылған электрлі нейтрал жүйенің тепе–теңді күйінің бірлік көлемдегі электрондар мен иондардың саны тең болғандықтан, электр өрісінің кернеулігі нөлге тең болады. Күшті өрістер бөлшектердің траекториясын өзгерте алады, соның салдарынан электронның осцилляциялық энергиясы оның тыныштық күйінің энергиясынан көп болады. Бұл жағдай бөлшек пен өрістің әсерлесу энергиясы жылулық қозғалыстардың энергиясынан көп дегенді білдіреді. Сол себептен, кинетикалық теорияның зерттеушілік нәтижесін жоғарылату мақсатында қуатты сыртқы өрісті ескеретін Власов—Максвелл теңдеуін қолдануға тура келеді. Күшті өрістер жағдайында процестерге жұмсалатын уақыт релаксация уақытынан аз болғандықтан жұптық соқтығысулар ескерілмейді, сондықтан Власов теңдеуін басты математикалық құрал деп алынады. Күшті өрістер осцилляциялық ығысу, үлестірім функциясының өзгеруі және және параметрлік орнықсыздықтар сияқты сызықты емес эффекттердің табиғатын ашып бере алады. Электрондар релятивистік қасиеттерге ие болғандықтан электрон–позитрон жұбының пайда болуы және радиациялық тежелулерді ескеретін кванттық кинетикалық теңдеулерді қолдануға мәжбүрлік пайда болады (Kukushkin et al., 2023; Mironov et al., 2018).

Күшті лазерлерлік импульстердің затпен әсерлесулеріне арналған зерттеулер күшті электромагниттік өріспен әсерлесетін релятивистік плазманың теориясын қарқынды түрде дамытуға септігін тигізді. Тұжырымдалған теориялық көзқарастар мен принциптік ұстанымдар кванттық электродинамика мен тепе–теңсіздік статистикалық механика заңдары арқылы іске асатындығы айқындалды. Тепе–теңсіздік кванттық–электродинамикалық плазманың теориясында орташаланған өрістік жуықтаудағы кинетикалық теңдеулер негізгі рөлді атқара алады. Өрістік операторлар үшін жазылған қозғалыс теңдеулері арқылы ковариантты кинетикалық теңдеуді алуға мүмкіндігі мол. Бұл теңдеудің шешімін коварианттық формализм көзқарасында қарастыру кезінде бірқатар қиындықтарға кезігеміз. Оның басты себебі, коварианттық функцияның 4–өлшемді Фурье түрлендіруі кезінде корреляциялық функциялар интегралдау қажет болады. Корреляциялық функциялардың спектрлік қасиеттері екі уақытты Грин функциясы бойынша қарастырылатыны мәлім, ол коварианттық функциялармен тығыз байланысты. Осы және осы тектес мәселелер кейінгі жылдары релятивистік кванттық кинетикалық теория тұрғысынан шешіліп жүр. Осы келтірілген көзқарастарды орташа өрістегі плазманың теориясына қолданып, диссипативті процестерді жан–жақты сипаттауға болады. Сонымен бірге, тығыздық матрицасының релятивистік әдісін ескеріп бір уақыттық формализмді коварианттық бейнеде жазуға және орташа өріс жуықтауы шеңберінен шығуға да болады (Koshtybayev & Aliyeva, 2024a; Koshtybayev & Aliyeva, 2024b).

Бұл мақала плазма теориясындағы коварианттық бір уақытты формализміне және ондағы кинетикалық теңдеулерге арналған. Гипержазықтық формализмін-

дегі тепе–теңділік статистикалық механика заңдры, гипержазықтықтағы плазманың гамильтонианының өрнегі және күшті электромагниттік өрістегі кинетикалық сипаттамасы коварианттық нұсқада берілетін болады. Зерттеу тәсілі ретінде Минковский кеңістігіндегі гипержазықтықтарда анықталған тепе–теңсіз статистикалық операторлар үшін жазылған релятивистік фон Нейман теңдеуіне, гипержазықтықтардағы жүйенің канондық квантталуына және кулондық калибровканың коварианттық бейнесіне негізделген. Кинетикалық теңдеулер гипержазықтықтар формализмін қолданып шығарылып көрсетіледі. Орташаланған электромагниттік өрістегі корреляциялық функциялар және тепе–теңсіз статистикалық операторды жіктеу тұтас уақыттық түрлендірулер бойынша орындалады.

**Зерттеу материалдары.** Магниттелген плазмадағы электрондар мен иондардың арасындағы энергия алмасуы арқылы іске асырылатын плазмалық каналдар мен беткі қабаттардың түзілуін зерттеуді материалдар қатарына қабылдауға болады. Релятивистік статистикалық механиканы кинетикалық теорияға қолданылу, операторлардың гипержазықтықтардағы коварианттық түрі, бір уақытты корреляциялық функциялар, электродинамиканың канондық квантталуы да тақырыпқа негізделген зерттеу материалдары бола алады. Статистикалық оператордың эффективті гамильтонианы, фон Нейман теңдеуіне сәйкес келуі гипержазықтықтар формализмі кинетикалық теңдеулерді алуға мүмкіндік туғызады (Lukin et al., 2021a).

**Зерттеу әдістері.** Релятивистік кинетикалық теориядағы интегралдық теңдеулерді уақытты Грин функциялары арқылы шешудің теориялық зерттеулер үшін маңызы зор. Аталған әдісті астрофизикалық жүйелерге де қолдауға болады, мұнда орташа өріс шарты рөл атқармайды. Плазманың кинетикалық қасиеттері үшін қуатты лазерлік импульстер арқылы әсер ету жеткілікті. Минковский кеңістігі бойынша гипержазықтықтардағы процестердің де зерттеу барысы үшін де маңызы бар. Операторларға арналған қозғалыс теңдеулерін қолдану арқылы плазманың электродинамикалық табиғатын ашу және кинетикалық теңдеулерді коварианттық нұсқада жазу оңайланады. Больцман немесе Власова теңдеулерін сызықтық емес эффекттерге қолдану арқылы негізгі деген нәтижелерге қол жеткізілітін болады. Қолданылатын негізгі әдістерге термоядролық синтездеуді, лазерлік плазма мен астрофизикалық нысандардағы үлестірім функциясының моменттерін, сандық модельдеу әдісін, күшті өрістерге арналған ығысулар теориясын, сонымен бірге бөлшектер жұбының пайда болуын, бөлшектердің динамикасы мен плазмаға арналған кулондық логарифмді жатқыза аламыз.

**Нәтижелер.** Арнайы салыстырмалылық теориясы бойынша жүйенің кванттық күйлері Минковский кеңістігі арқылы бақыланушылардың жиыны арқылы сипатталады. Аталған Мұндай беттердің ішінде үш өлшемді гипержазықтықтар мәселені шешуді қиындатады. Қандай да бір кеңістік тектес  $\sigma \equiv \sigma_{n,\tau}$  гипержазықтық  $n^\mu$  бірлік векторлармен және скаляр  $\tau$  параметрімен (инвариантты уақытпен) берілетін болсын (Demirnov, 2023) және оның теңдеуі

$$x \cdot n = \tau, \quad n^2 = n^\mu n_\mu = 1 \quad (1)$$

$n^\mu = (1, 0, 0, 0)$  санақ жүйесінде  $\tau$  параметрі  $t$  уақыт айнымалысы ретінде жүреді.  $\sigma_{n,\tau}$ -ға функционал болатын  $|\Psi[\sigma_{n,\tau}]\rangle$  күй векторын пайдаланып,  $\sigma, \tilde{\sigma} = L\sigma$  гипержазықтықтардағы күй векторларының арасындағы арақатынастарға  $L = \{a, \Lambda\}$  біртекті Лоренц түрлендіруін қолдану арқылы Шредингер теңдеуінің коварианттық түрін шығарып алуға болады (Lifshic & Pitaevskij, 1979; Silin, 1998).  $L = \{a, \Lambda\}$  түрлендіруінің нақты түрі

$$\sigma \rightarrow \tilde{\sigma} = L\sigma : x \rightarrow \tilde{x} = \Lambda x + a \quad (2)$$

Күй векторларының арасындағы байланыстар төменде келтірілген:

$$U(L)|\Psi[L\sigma]\rangle = |\Psi[\sigma]\rangle \quad (3)$$

мұндағы  $U(L) = U(a, \Lambda)$  – біртекті Лоренц тобы. Бұл топтың  $\hat{P}^\mu, \hat{M}^{\mu\nu}$  генераторлары энергия–импульстің 4–векторы мен бұрыштық моменттің 4–өлшемді тензоры (Izvekova et al., 2021; Lukin et al., 2021b).  $\tau$  –дың мүмкін болатын мәндерін өзгертетін уақыттық трансляцияларға сәйкес  $|\Psi[\sigma_{n,\tau}]\rangle = |\Psi(n, \tau)\rangle$  белгілеуін жасап, олар үшін  $U(a, 1) = \exp(i\hat{P}_\mu a^\mu)$  скеріп,  $a^\mu = n^\mu \delta\tau$  трансляциясына арналған

$$|\Psi(n, \tau + \delta\tau)\rangle + i\delta\tau (\hat{P}_\mu n^\mu) |\Psi(n, \tau)\rangle = |\Psi(n, \tau)\rangle \quad (4)$$

өрнегін ала аламыз. Осыдан Шредингердің релятивистік теңдеуін мына түрде аламыз:

$$i \frac{\partial}{\partial \tau} |\Psi(n, \tau)\rangle = \hat{H}(n) |\Psi(n, \tau)\rangle \quad (5)$$

Осы теңдеуге сәйкес гипержазықтықтағы беттердің гамильтонианы

$$\hat{H}(n) = \hat{P}_\mu n^\mu \quad (6)$$

Айнымалы сыртқы өрісте энергия–импульс векторы мен гамильтониан  $\tau$  –ға тәуелді (Kolesnikov & Manujlov, 2004; Kosarev, 2008). (5)–ке Шредингердің түйіндес теңдеуін қолданып кванттық ансамбльдердің статикалық  $\lambda(n, \tau)$  операторы үшін жазылатын релятивистік емес фон Нейман теңдеуі тектес теңдеуді алуға болады:

$$\frac{\partial \lambda(n, \tau)}{\partial \tau} - i \left[ \lambda(n, \tau), \overline{H}^\tau(n) \right] = 0 \quad (7)$$

Статикалық оператордың гейзенбергілік бейнесі  $\tau$ -ға тәуелді емес, шектелген  $\sigma_{n, \tau_0}$  гипержазықтықтағы функционалдар  $\overline{K}_H(x)$  операторларымен анықталады. Бұл  $\tau$  параметрінің функциясы болып табылады және олар үшін

$$\Delta_\nu^\mu = \delta_\nu^\mu - n^\mu n_\nu \quad (8)$$

проекторын енгізу арқылы 4-векторды

$$x^\mu = n^\mu \tau + x_\perp^\mu, \quad \tau = n \cdot x \quad (9)$$

Түрде жазып аламыз. мұндағы

$$x_\perp^\mu = \Delta_\nu^\mu x^\nu \quad (10)$$

$x$ -тің көлденең құраушысы. Бұл жағдайда  $\overline{K}_H(x)$  операторлары да  $\tau$  мен  $x_\perp^\mu$ -тің функциясы болып табылады:

$$\overline{K}_H(x) = \overline{K}_H(n\tau + x_\perp) \equiv \overline{K}_H(\tau, x_\perp) \quad (11)$$

$\overline{P}^\mu$  те  $\tau$ -ға тәуелді емес, яғни

$$\partial_\mu \overline{K}_H(x) = -i [\overline{K}_H(x), \overline{P}_\mu] \quad (12)$$

Түрдегі қозғалыс теңдеуін пайдаланып, (6) түрдегі гамильтонианы бар теңдеуді алуға болады:

$$\overline{K}_H(\tau, x_\perp) = \exp[i(\tau - \tau_0) \overline{K}_H(n)] \overline{K}_H(\tau_0, x_\perp) \exp[-i(\tau - \tau_0) \overline{K}_H(n)] \quad (13)$$

$\sigma_{n, \tau}$  гипержазықтығындағы  $H^\tau(n)$  гамильтонианды Лежандр түрлендіруін және (6)-ны пайдаланып анықтаймыз:

$$H^\tau(n) = P^\tau(n) n^\mu \equiv \int_{\sigma_{n, \tau}} d\sigma n^\mu T_{\mu\nu} n^\nu \quad (14)$$

мұндағы  $T_{\mu\nu}(x)$ —энергия–импульс тензоры.

Плазмадағы кинетикалық процестерді  $\sigma_{n, \tau_0}$  гипержазықтық формализмі үшін

спинор жазықтықтағы матрица болып табылатын  $W_{aa'}(x, p; \tau)$  калибрлеуіш функцияны енгіземіз:

$$W_{aa'}(x, p; \tau) = \int d^4 y e^{ipy} \delta(y \cdot n) \exp \left\{ ie \Lambda \left( x + \frac{1}{2} y, x - \frac{1}{2} y; \tau \right) \right\} N_{aa'} \left( x + \frac{1}{2} y, x - \frac{1}{2} y; \tau \right) \quad (15)$$

мұндағы

$$\Lambda(x, x', \tau) = \int_0^1 ds (x^\mu - x'^\mu) A_\mu(\tau, x' + s(x - x')) \quad (16)$$

калибрлеуіш функция. Бір бөлшектік тығыздық операторының ( $N_{aa'}$ ) орташасын жазайық:

$$N_{aa'}(x, x'; \tau) = \left\langle N_{aa'}(x, x') \right\rangle^\tau$$

Кинетикалық теорияда фотондық тығыздық матрицасын гипержазықтықтар формализмінде анықтау үшін  $A^\mu$  операторларын жазық толқындар бойынша жіктеп алу қажет болады (Koshtybayev et al., 2025):

$$A^\mu(\tau, x) = \int \frac{d^4 q}{\sqrt{2\omega_n(q)} (2\pi)^3} \delta(q - \omega_n(q)) \sum_{k=1,2} e^\mu(q, k) e^{iqx} \quad (17)$$

Мұндағы  $e^\mu(q, k)$  – поляризацияның нақтылы 4–векторы, ал гипержазықтықтағы фотондарға арналған дисперсия заңы

$$\omega_n(q) = \omega_n(-q) = \sqrt{-q^\mu q_\mu} \quad (18)$$

Тығыздықтың фотондық матрицасын төмендегі операторлар арқылы өрнектей аламыз:

$$\psi_k(x) = \int \frac{d^4 q}{\sqrt{(2\pi)^3}} \delta(q) \exp(-iqx) a_k(q) \quad (19)$$

$$\psi_k^*(x) = \int \frac{d^4 q}{\sqrt{(2\pi)^3}} \delta(q) \exp(iqx) a_k^*(q)$$

Бұл операторлардың арасындағы орын ауыстырымдылық амалдары төменде көрсетіліген (Timohin et al., 2022):

$$[\psi_k(x), \psi_{k'}^*(x')] = \delta_{kk'} \delta^3(x - x')$$

$$[\psi_k(x), \psi_{k'}^*(x')] = [\psi_k^*(x), \psi_{k'}^*(x')] = 0$$

Тығыздықтың фотондық матрицасының орташасын  $\lambda'(n, \tau)$  статистикалық оператордың көмегімен іске асыра аламыз (Zaitsev et al., 2018):

$$N_{kk'}(x, x'; \tau) = \langle \overline{N}_{kk'}(x, x') \rangle^\tau \quad (20)$$

Мұндағы

$$\overline{N}_{kk'}(x, x') = \psi_{k'}^*(x') \psi_k(x) \quad (21)$$

Егер, фотондық матрицаны  $\lambda'(n, \tau)$  –ның орташасы бойынша жазар болсақ, онда:

$$N_{kk'}(x, x'; \tau) = \langle \overline{N}_{kk'}(x, x') \rangle^\tau - \langle \psi_k(x) \rangle^\tau \langle \psi_{k'}^*(x') \rangle^\tau \quad (22)$$

(15) және (20) өрнектерге арналған кинетикалық теңдеулерді шығарып алу үшін төмендегі қозғалыс теңдеулерін пайдалану керек:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} N_{aa'}(x, x'; \tau) = -i \text{Tr} \left\{ \left[ \overline{N}_{aa'}(x, x'), \overline{H}_0^\tau(n) + \overline{H}^\tau(n) \right] \right\} \lambda'(n, \tau)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} N_{kk'}(x, x'; \tau) = -i \text{Tr} \left\{ \left[ \overline{N}_{kk'}(x, x'), \overline{H}_0^\tau(n) + \overline{H}^\tau(n) \right] \right\} \lambda'(n, \tau)$$

Осы қатынастардың оң жақ бөліктерін тығыздықтың фотондық және фермиондық матрицалары арқылы өрнектеп алуға болады (Shaihitdinov, 2014). Ол үшін  $\overline{H}^\tau(n)$  әсерлесу гамильтонианы ескерілген коммутаторларды есептеу кезіндегі

$$F_{1\dots k}(x_1, \dots, x_k; n, \tau) = \langle \overline{\mathcal{Q}}_1(x_1) \dots \overline{\mathcal{Q}}_k(x_k) \rangle^\tau$$

корреляциялық функцияларға арналған төмендегі тізбекті теңдеулерді құрып аламыз:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} F_{1\dots k}(x_1, \dots, x_k; n, \tau) = -i \left\langle \left[ \overline{\mathcal{Q}}_1(x_1) \dots \overline{\mathcal{Q}}_k(x_k), \overline{H}^\tau(n) \right] \right\rangle^\tau -$$

$$-\varepsilon \left\{ F_{1\dots k} (x_1, \dots, x_k; n, \tau) - \left\langle \bar{\mathcal{Q}}_1(x_1) \dots \bar{\mathcal{Q}}_k(x_k) \right\rangle_q^\tau \right\}$$

Мұндағы  $\bar{\mathcal{Q}}_i(x_i)$  – фермиондық және электромагниттік өріс операторларынан құрылған Шредингер операторлары, ал  $\langle \dots \rangle_q^\tau$  символы квазитепе–теңді орташалар дегенді білдіреді (Charles et al., 2008; Lafleur et al., 2010).

**Қорытынды.** Сонымен, мақалада кванттық электродинамикалық плазманың электродинамикалық қасиеттері кванттық жуықтауда қарастырылып, оның күшті электромагниттік өріспен әсерлесу жағдайындағы кинетикалық теориясы зерттелді. Есептеулер гипержазықтық формализмін қолдану арқылы іске асырылды. Аталған формализмнің ковариантты үлгіде қолданылуы бірқатар жуықтауларды ковариантты түрде жазуға мүмкіндіктер береді. Мақалада баяндалған әдістер мен көзқарастың релятивистік емес тығыздық матрицасы әдісінен бірқатар өзгешеліктері бар екенін айтып өту керек, бұл релятивистік емес статистикалық механиканың көптеген әдістерін плазманың электродинамикасына қолдана алатындығымызды дәлелдейді. Нақты айтсақ, гипержазықтықтардағы тепе–теңсізділікті сипаттайтын статистикалық операторлар көп бөлшекті корреляцияларды ескере алады. Сонымен бірге, гипержазықтықтағы гейзенберттік бейнелеулер инвариантты уақытқа тәуелді тепе–теңсізді Грин функциялары арқылы релятивистік емес жүйелердің диаграммалық техникасын жасап бере алады. Мақалада келтірілген жуықтауларды өрістік теорияның басқа да мәселелеріне, мысалы кваркты–глюонды плазмадағы тасымал құбылыстарына қолдануға болады.

### References

- Charles C., Boswell R.W., Laine R. & MacLellan P. (2008) An experimental investigation of alternative propellants for the helicon. *Journal of Physics D: Applied Physics*. – No. 6. – P. 175213. DOI: 10.1088/0022-3727/41/17/175213 (in Eng.).
- Deminov R.G. (2023) *Metody kvantovoj teorii polja v fizike kondensirovannogo sostojaniya* [Methods of Quantum Field Theory in Condensed Matter Physics]. – Kazan' 88. (in Russ.).
- Izvekova Yu.N., Kassem A.I., Popel S.I., Morozova T.I., Zelenyi L.M. (2021) Dusty Plasmas at the Moon: Effects of Magnetic Fields. *Journal of Physics: Conference Series*. – Vol. 1787. – P. 012051. DOI: 10.1088/1742-6596/1787/1/012051 (in Eng.).
- Kolesnikov E.K., Manujlov A.S. (2004) Kineticheskoe uravnenie dlja reljativistskogo jelektronnogo puchka, rasprostranjajushhegosja v plotnyh i razrezhennyh gazoplazmennyh sredah prodol'no vneshnemu magnitnomu polju [Kinetic equation for a relativistic electron beam propagating in dense and rarefied gas-plasma media along an external magnetic field]. *Technical Physics*. – No. 74(9). – P. 103-107. (in Russ.).
- Kosarev I.N. (2008) Kinetic theory of a nonideal plasma: Dispersion relations. *Gas Discharges*. – No. 53. – P. 1296-1301. DOI: <https://doi.org/10.1134/S106378420810006X> (in Eng.).
- Koshtybayev T., Aliyeva M. (2024) Correlation functions of weakly inhomogeneous plasma. *Bulletin of the Karaganda University "Physics Series"*. – No. 29(3). – P. 6-14. DOI: <https://doi.org/10.31489/2024PH3/6-14> (in Eng.).
- Koshtybayev T., Aliyeva M. (2024) To plasma electrons motion theory in high-frequency fields. *Bulletin of the Karaganda University "Physics Series"*. – No. 29(2). – P. 19-26. DOI: <https://doi.org/10.31489/2024PH2/19-26> (in Eng.).
- Koshtybayev T., Tatenov A., Aliyeva M., Zhantleuov K. (2025) Influence of a constant magnetic field and a high-frequency electric field on plasma. *Bulletin of the Karaganda University "Physics Series"*. – No. 30(1). – P. 37-44. DOI: <https://doi.org/10.31489/2024PH1/37-44> (in Eng.).

Kukushkin A.B., Sdvizhenskii P.A., Flanagan J., Kos D., Neverov V.S., Szepesi G., Taylor D.M.A., and JET Contributors. (2023) Plasma Phys. Control. Fusion. – No. 65. – P. 075009 (in Eng.).

Lafleur T., Boswell R.W., & Charles C. (2010) Ion beam formation in a very low magnetic field expanding helicon discharge. Physics of Plasmas. – No. 17. – P. 043505. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3381093> (in Eng.).

Lifshic E.M., Pitaevskij L.P. (1979) Fizicheskaja kinetika [Physical kinetics]. – Moscow: Nauka. – 528 p. (in Russ.).

Lukin A. S., Artemyev A.V., Petrukovich A.A. (2021) On application of stochastic differential equations for simulation of nonlinear wave-particle resonant interactions. Physics of Plasmas. – No. 28. – P. 092904. DOI:10.1063/5.0058054 (in Eng.).

Lukin A.S., Artemyev A.V., Petrukovich A.A., Zhang X.J. (2021) Charged particle scattering in dipolarized magnetotail. Physics of Plasmas. – No. 28. – P. 102901. DOI:10.1063/5.0062160 (in Eng.).

Mironov M.I., Zaitsev F.S., Gorelenkov N.N., Afanasyev V.I., Chernyshev F.V., Nesenevich V.G., Petrov M.P. (2018) Sawtooth mixing of alphas, knock-on D, and T ions, and its influence on NPA spectra in ITER plasma. Nuclear Fusion. – No. 58 (8). – P. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aab678> (in Eng.).

Shaihitdinov R.Z. (2014) The Mechanism of Attraction of Negatively Charged Macroparticles in Dusty Plasma. Low-Temperature Plasma in Functional Coating Processes. – No. 5. – P. 168-171. (in Eng.).

Silin V.P. (1998) Vvedenie v kineticheskiju teoriju gazov [Introduction to the kinetic theory of gases]. – Moscow: Nauka. – 354 p. (in Russ.).

Timohin V.M., et al. (2022) Spektroskopicheskaja diagnostika periferijnoj plazmy tokamaka “Globus-M2” s ispol'zovaniem inzhekcii nejtural'nogo gelija [Spectroscopic diagnostics of the peripheral plasma of the Globus-M2 tokamak using neutral helium injection]. – JETP Letters. – P. 116(5). – P. 292-299. (in Russ.).

Zaitsev F.S., Shishkin A.G., Lukianitsa A.A., Suchkov E.P., Stepanov S.V., Anikeev F.A. (2018) The Basic Components of Software-Hardware System for Modeling and Control of the Toroidal Plasma by Epsilon-Nets on Heterogeneous Mini-Supercomputers. Communications in Computational Physics. – No. 24(1). – P. 1-263. DOI: 10.4208/cicp.OA-2017-0079 (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 work described 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 originality detection service Cross Check <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)  
ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)  
<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>**

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

Signed for print: June 22, 2026  
Format: 70×90 1/16. 24.5 printed sheets. Order No. 2.

---

*«Central Asian Academic Research Center» LLP  
Almaty, Shevchenko Street, 28*