

ISSN 2518-1726 (Online),
ISSN 1991-346X (Print)

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫ

әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің

Х А Б А Р Л А Р Ы

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Қазақстан Республикасының Ғылым
Академиясының Алматыдағы
Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық
университетінің

NEWS

OF THE ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
al-Farabi Kazakh National University

SERIES
PHYSICO-MATHEMATICAL

4 (338)

JULY – AUGUST 2021

PUBLISHED SINCE JANUARY 1963

PUBLISHED 6 TIMES A YEAR

ALMATY, NAS RK

NAS RK is pleased to announce that News of NAS RK. Series physico-mathematical journal has been accepted for indexing in the Emerging Sources Citation Index, a new edition of Web of Science. Content in this index is under consideration by Clarivate Analytics to be accepted in the Science Citation Index Expanded, the Social Sciences Citation Index, and the Arts & Humanities Citation Index. The quality and depth of content Web of Science offers to researchers, authors, publishers, and institutions sets it apart from other research databases. The inclusion of News of NAS RK. Series of chemistry and technologies in the Emerging Sources Citation Index demonstrates our dedication to providing the most relevant and influential content of chemical sciences to our community.

Қазақстан Республикасы Ұлттық ғылым академиясы «ҚР ҰҒА Хабарлары. Физикалық-математикалық сериясы» ғылыми журналының Web of Science-тің жаңаланған нұсқасы Emerging Sources Citation Index-те индекстелуге қабылданғанын хабарлайды. Бұл индекстелу барысында Clarivate Analytics компаниясы журналды одан әрі the Science Citation Index Expanded, the Social Sciences Citation Index және the Arts & Humanities Citation Index-ке қабылдау мәселесін қарастыруда. Web of Science зерттеушілер, авторлар, баспашылар мен мекемелерге контент тереңдігі мен сапасын ұсынады. ҚР ҰҒА Хабарлары. Химия және технология сериясы Emerging Sources Citation Index-ке енуі біздің қоғамдастық үшін ең өзекті және беделді химиялық ғылымдар бойынша контентке адалдығымызды білдіреді.

НАН РК сообщает, что научный журнал «Известия НАН РК. Серия физико-математическая» был принят для индексирования в Emerging Sources Citation Index, обновленной версии Web of Science. Содержание в этом индексировании находится в стадии рассмотрения компанией Clarivate Analytics для дальнейшего принятия журнала в the Science Citation Index Expanded, the Social Sciences Citation Index и the Arts & Humanities Citation Index. Web of Science предлагает качество и глубину контента для исследователей, авторов, издателей и учреждений. Включение Известия НАН РК в Emerging Sources Citation Index демонстрирует нашу приверженность к наиболее актуальному и влиятельному контенту по химическим наукам для нашего сообщества.

Бас редактор:

МҰТАНОВ Ғалымқайыр Мұтанұлы, техника ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, ҚР БҒМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институты» бас директорының м.а. (Алматы, Қазақстан) Н=5

Редакция алқасы:

ҚАЛИМОЛДАЕВ Мақсат Нұрәділұлы (бас редактордың орынбасары), физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, ҚР БҒМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институты» бас директорының кеңесшісі, зертхана меңгерушісі (Алматы, Қазақстан) Н=7

БАЙГУНЧЕКОВ Жұмаділ Жанабайұлы (бас редактордың орынбасары), техника ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Кибернетика және ақпараттық технологиялар институты, Сағпаев университетінің Қолданбалы механика және инженерлік графика кафедрасы, (Алматы, Қазақстан) Н=3

ВОЙЧИК Вальдемар, техника ғылымдарының докторы (физика), Люблин технологиялық университетінің профессоры (Люблин, Польша) Н=23

БОШКАЕВ Қуантай Авғазыұлы, Ph.D. Теориялық және ядролық физика кафедрасының доценті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан) Н-10

QUEVEDO Hemando, профессор, Ядролық ғылымдар институты (Мехико, Мексика) Н=28

ЖҮСПОВ Марат Абжанұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, теориялық және ядролық физика кафедрасының профессоры, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан) Н=7

КОВАЛЕВ Александр Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, Украина ҰҒА академигі, Қолданбалы математика және механика институты (Донецк, Украина) Н=5

МИХАЛЕВИЧ Александр Александрович, техника ғылымдарының докторы, профессор, Беларусь ҰҒА академигі (Минск, Беларусь) Н=2

РАМАЗАНОВ Тілекқабыл Сәбитұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің ғылыми-инновациялық қызмет жөніндегі проректоры, (Алматы, Қазақстан) Н=26

ТАКИБАЕВ Нұрғали Жабағаұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан) Н=5

ТИГИНЯНУ Ион Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, академик, Молдова ғылым Академиясының президенті, Молдова техникалық университеті (Кишинев, Молдова) Н=42

ХАРИН Станислав Николаевич, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Қазақстан-Британ техникалық университеті (Алматы, Қазақстан) Н=10

ДАВЛЕТОВ Асқар Ербуланович, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан) Н=12

КАЛАНДРА Пьетро, Ph.D (физика), Наноқұрылымды материалдарды зерттеу институтының профессоры (Рим, Италия) Н=26

«ҚР ҰҒА Хабарлары.

Физика-математикалық сериясы».

ISSN 2518-1726 (Online),

ISSN 1991-346X (Print)

Меншіктеуші: «Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы» РҚБ (Алматы қ.). Қазақстан Республикасының Ақпарат және қоғамдық даму министрлігінің Ақпарат комитетінде 14.02.2018 ж. берілген **№ 16906-Ж** мерзімдік басылым тіркеуіне қойылу туралы куәлік.

Тақырыптық бағыты: *математика, информатика, механика, физика, ғарыштық зерттеулер, астрономия, ионосфера.*

Мерзімділігі: жылына 6 рет.

Тиражы: 300 дана.

Редакцияның мекен-жайы: 050010, Алматы қ., Шевченко көш., 28, 219 бөл., тел.: 272-13-19

<http://www.physico-mathematical.kz/index.php/en/>

© Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы, 2021

Типографияның мекен-жайы: «Аруна» ЖК, Алматы қ., Мұратбаев көш., 75.

Главный редактор:

МУТАНОВ Галимкаир Мутанович, доктор технических наук, профессор, академик НАН РК, и.о. генерального директора «Института информационных и вычислительных технологий» КН МОН РК (Алматы, Казахстан) Н=5

Редакционная коллегия:

КАЛИМОЛДАЕВ Максат Нурадилович, (заместитель главного редактора), доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, советник генерального директора «Института информационных и вычислительных технологий» КН МОН РК, заведующий лабораторией (Алматы, Казахстан) Н=7

БАЙГУНЧЕКОВ Жумадил Жанабаевич, (заместитель главного редактора), доктор технических наук, профессор, академик НАН РК, Институт кибернетики и информационных технологий, кафедра прикладной механики и инженерной графики, университет Сатпаева (Алматы, Казахстан) Н=3

ВОЙЧИК Вальдемар, доктор технических наук (физ.-мат.), профессор Люблинского технологического университета (Люблин, Польша) Н=23

БОШКАЕВ Куантай Авгазыевич, доктор Ph.D, преподаватель, доцент кафедры теоретической и ядерной физики, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан) Н=10

QUEVEDO Hemando, профессор, Национальный автономный университет Мексики (UNAM), Институт ядерных наук (Мехико, Мексика) Н=28

ЖУСУПОВ Марат Абжанович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и ядерной физики, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан) Н=7

КОВАЛЕВ Александр Михайлович, доктор физико-математических наук, академик НАН Украины, Институт прикладной математики и механики (Донецк, Украина) Н=5

МИХАЛЕВИЧ Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, академик НАН Беларуси (Минск, Беларусь) Н=2

РАМАЗАНОВ Тлеккабул Сабитович, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, проректор по научно-инновационной деятельности, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан) Н=26

ТАКИБАЕВ Нургали Жабагаевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан) Н=5

ТИГИНЯНУ Ион Михайлович, доктор физико-математических наук, академик, президент Академии наук Молдовы, Технический университет Молдовы (Кишинев, Молдова) Н=42

ХАРИН Станислав Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, Казахстанско-Британский технический университет (Алматы, Казахстан) Н=10

ДАВЛЕТОВ Аскар Ербуланович, доктор физико-математических наук, профессор, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан) Н=12

КАЛАНДРА Пьетро, доктор философии (Ph.D, физика), профессор Института по изучению наноструктурированных материалов (Рим, Италия) Н=26

«Известия НАН РК.

Серия физико-математическая».

ISSN 2518-1726 (Online),

ISSN 1991-346X (Print)

Собственник: Республиканское общественное объединение «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы).

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации Министерства информации и общественного развития Республики Казахстан № 16906-Ж выданное 14.02.2018 г.

Тематическая направленность: *математика, информатика, механика, физика, космические исследования, астрономия, ионосфера.*

Периодичность: 6 раз в год.

Тираж: 300 экземпляров.

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, оф. 219, тел.: 272-13-19

<http://www.physico-mathematical.kz/index.php/en/>

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2021

Адрес типографии: ИП «Аруна», г. Алматы, ул. Муратбаева, 75.

Editor in chief:

MUTANOV Galimkair Mutanovich, doctor of technical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, acting director of the Institute of Information and Computing Technologies of SC MES RK (Almaty, Kazakhstan) H=5

Editorial board:

KALIMOLDAYEV Maksat Nuradilovich (Deputy Editor-in-Chief), doctor in Physics and Mathematics, Professor, Academician of NAS RK, Advisor to the General Director of the Institute of Information and Computing Technologies of SC MES RK, Head of the Laboratory (Almaty, Kazakhstan) H=7

BAYGUNCHEKOV Zhumadil Zhanabayevich, (Deputy Editor-in-Chief), doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Institute of Cybernetics and Information Technologies, Department of Applied Mechanics and Engineering Graphics, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan) H=3

WOICIK Waldemar, Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor, Lublin University of Technology (Lublin, Poland) H=23

BOSHKAYEV Kuantai Avgazievich, PhD, Lecturer, Associate Professor of the Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan) H=10

QUEVEDO Hemando, Professor, National Autonomous University of Mexico (UNAM), Institute of Nuclear Sciences (Mexico City, Mexico) H=28

ZHUSSUPOV Marat Abzhanovich, Doctor in Physics and Mathematics, Professor of the Department of Theoretical and Nuclear Physics, al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan) H=7

KOVALEV Alexander Mikhailovich, Doctor in Physics and Mathematics, Academician of NAS of Ukraine, Director of the State Institution «Institute of Applied Mathematics and Mechanics» DPR (Donetsk, Ukraine) H=5

MIKHALEVICH Alexander Alexandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of NAS of Belarus (Minsk, Belarus) H=2

RAMAZANOV Tlekkabul Sabitovich, Doctor in Physics and Mathematics, Professor, Academician of NAS RK, Vice-Rector for Scientific and Innovative Activity, al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan) H=26

TAKIBAYEV Nurgali Zhabagaevich, Doctor in Physics and Mathematics, Professor, Academician of NAS RK, al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan) H=5

TIGHINEANU Ion Mikhailovich, Doctor in Physics and Mathematics, Academician, Full Member of the Academy of Sciences of Moldova, President of the AS of Moldova, Technical University of Moldova (Chisinau, Moldova) H=42

KHARIN Stanislav Nikolayevich, Doctor in Physics and Mathematics, Professor, Academician of NAS RK, Kazakh-British Technical University (Almaty, Kazakhstan) H=10

DAVLETOV Askar Erbulanovich, Doctor in Physics and Mathematics, Professor, al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan) H=12

CALANDRA Pietro, PhD in Physics, Professor at the Institute of Nanostructured Materials (Monterotondo Station Rome, Italy) H=26

News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physical-mathematical series.
ISSN 2518-1726 (Online),
ISSN 1991-346X (Print)

Owner: RPA «National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan» (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 No. 16906-Ж, issued 14.02.2018

Thematic scope: *mathematics, computer science, mechanics, physics, space research, astronomy, ionosphere.*

Periodicity: 6 times a year.

Circulation: 300 copies.

Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, Almaty, 050010, tel. 272-13-19

<http://www.physico-mathematical.kz/index.php/en/>

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 4, Number 338 (2021), 6 – 14

<https://doi.org/10.32014/2021.2518-1726.60>

УДК 533.523/.527; 533.9:51-73

МРНТИ 29.27.35

Бастыкова Н.Х.* , Коданова С.К.

КазНУ имени Аль-Фараби, Алматы, Казахстан.

E-mail: bastykova_nuriya@physics.kz

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ПРИСТЕНОЧНОЙ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЕ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Аннотация: в данной работе рассматривается динамика и время жизни пылинок из материалов бериллия, карбона и вольфрама, образовавшееся на поверхности стенки термоядерного реактора. Для описания динамики пылинок решаются уравнения движения, уравнения баланса массы и энергии, а также уравнения для зарядки пылинок. Расчеты были проведены с учетом параметров, описывающих материальные функции, такие как молярная энтальпия и давление насыщенных паров, свойства электронной эмиссии и излучения, а также сложные явления при взаимодействии пылинок с плазмой, приводящие к потере массы. Были получены равновесные температуры пылинок из материалов бериллия, карбона и вольфрама для типичных параметров пристеночной плазмы, а также температура и радиус пылинок, как функции времени. Были продемонстрированы стадии нагрева / испарения пылинки, начальное нарастание температуры, плавление, переход к тепловому равновесию и испарение при равновесной температуре. На основе этих расчетов получены оценки времени жизни пылинок из материалов бериллия, карбона и вольфрама. Приведены расчеты заряда и времени жизни пылевых частиц из материалов бериллия, карбона и вольфрама в присутствии внешнего магнитного поля. Были выявлены, что с увеличением магнитного поля абсолютная величина заряда пылевых частиц уменьшается для всех рассматриваемых материалов. Установлено, что существенное влияние магнитного поля на заряд и время жизни пылевой частицы наблюдается у вольфрамовой пылинки по сравнению с другими рассматриваемыми пылевыми материалами.

Ключевые слова: пылевая частица, пристеночная плазма, пылеобразование, время жизни пылинок, заряд пылинок, магнитное поле, давление насыщенных паров, термоядерный реактор.

Введение. Действительность существования пылевых частиц в пристеночной плазме термоядерного реактора было доказано много лет назад. Первые наблюдения пылевых частиц в токамаке были сделаны Гудоллом [1]. О том, что пылевые частицы могут стать фактором загрязнения примесей ядра в термоядерных устройствах токамак одним из первых предположил Окава [2]. Необходимость увеличения размеров токамак, которая приведет к осуществимости в них энергетически выгодного синтеза может повлечь за собой риск чрезмерной выработки пыли. Таким образом, пылеобразования и механизмы формирования пылевых частиц в пристеночной области плазмы, а также в диверторных пластинах, первых стенах и в других внутренних строительных элементах является актуальным

вопросом. В работах [3-5] исследуются разнообразие пылевидных форм и состав материалов, а также различные механизмы пылеулавливания в термоядерных устройствах.

Чаще всего в термоядерных устройствах для облицовки плазмой используют материалы, которые обычно представляют собой графит, вольфрам, бериллий, титан и сталь. Для областей кондиционирования стенок камеры используют бор и литий. Выбор материала в подобных устройствах определяются конкретными термохимическими характеристиками. Известно, что Be имеет самую низкую атомную массу и температуру плавления среди всех материалов. А W имеет самую высокую атомную массу и температуру плавления. Это свидетельствует о том, что пылевые частицы, состоящие из тяжелых материалов, имеют вероятность долгого существования в плазме термоядерного реактора. Об этом говорится и в работе [6], где металлы с высокой атомной массой используются для облицовки плазмой в различных участках крупномасштабных термоядерных устройств, такие как вольфрам в ITER[7] и сталь в DEMO[8].

Динамика и механизмы образования пылинок играют немаловажную роль в исследовании физических явлений в пристеночной пылевой плазме термоядерного реактора. Пылевые частицы, образовавшиеся вследствие инъекции частиц макроскопических (микронных) размеров в плазму, подвергаются влиянию различных процессов[9]. Для моделирования динамики пыли необходимо учитывать процесс зарядки, термоэлектронную, фотоэлектронную, вторично электронную эмиссии и влияние магнитного поля на заряд пылинок. Процесс зарядки пылевых частиц позволяет описать процессы формирования и эволюции пылевых структур. Заряд изначально нейтральной пылевой частицы становится отрицательным вследствие более быстрой способности к движению электронов по сравнению с ионами[10-11]. Также частицы в определенных случаях могут быть положительно заряженными, как например, в случае фотоэлектронной зарядки пылевых частиц. За счет процессов термоэлектронной, фотоэлектронной и вторичной электронной эмиссии увеличивается заряд частицы, в ходе которой, электроны, обладающие достаточной энергией, покидают поверхность пылевых частиц. Также, влияние магнитного поля на заряд пылинок является существенной задачей в физике пылевой плазмы[12-13]. Магнитное поле влияет на процесс зарядки пылинок за счет замагничивания электронов. Влияние является достаточно малым в слабом магнитном поле. В сильном магнитном поле за счет замагничивания электронов заряд пылинки уменьшается, и приводит к продлению времени жизни пылинки[14-15]. В настоящее время эффект быстрого повторного сбора эмитированных электронов из поверхности пылинок в присутствии магнитного поля может существенно повлиять на зарядку и на время существования пылевых частиц, особенно при высокой температуре и положительном заряде пылинки за счет сильного процесса термоэлектронной эмиссии [16]. В результате плавающий потенциал пылинки уменьшается, а время существования увеличивается. Время жизни пылинки является одной из важных характеристик, которая способствует описанию динамических явлений в пылевой плазме.

Материалы и методы. Математическая модель, представляющая эволюцию пылеобразования из материалов бериллия (Be), карбона (C) и вольфрама (W), которые отличаются различиями в свойствах материала и термохимическими свойствами, а также временем жизни (существования) в пристеночной плазме термоядерного реактора, была построена с помощью основных уравнений, описывающих динамику пылинки в пылевой плазме, которая учитывает корректный анализ сил, действующих на них. Основные уравнения, описывающие динамику пылинки, имеют следующий вид:

$$\frac{dr_d}{dt} = v_d$$

$$m_d \frac{dv_d}{dt} = F_e + F_i + q_d \left(E + \frac{v_d}{c} \times B \right) + m_d g \quad (1)$$

$$\frac{dm_d}{dt} = \frac{dm_d}{dt} \Big|_{vap} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}(m_d h_d) = Q_e + Q_i + Q_{isn} + Q_{te} + Q_{see} + Q_{rad} + Q_{vap} \quad (3)$$

$$I_e + I_i + I_{te} + I_{see} = 0 \quad (4)$$

где c - скорость света и g - ускорение силы тяжести, (E, B) - электромагнитные поля, h_d - молярная энтальпия пылинки, $Q_{e(i)}$ - поток энергии за счет поглощенных электронов и ионов, Q_{isn} - поток энергии за счет нейтрализации на поверхности пылинки, Q_{te}, Q_{see} - поток энергии за счет термоэлектронной и вторичной электронной эмиссий, Q_{rad} - поток энергии за счет радиационного излучения и Q_{vap} - поток энергии за счет испарения, $I_{e(i)}$ - потоки электронов и ионов. Заряд пылинки в присутствии магнитного поля рассчитывался методами частиц в ячейках и Монте-Карло [16]. В результате проведенных расчетов были получены зависимости заряда пылинки и потоков электронов и ионов на ее поверхность с учетом влияния магнитного поля. Характерное время, необходимое для достижения равновесного значения заряда пылевой частицы, имеет порядок 10^{-8} с, что пренебрежимо мало по отношению к временным масштабам переноса пылинки.

Результаты и их обсуждения. В расчетах были использованы соответствующие свойства и значения для исследуемых материалов. В таблице 1 приведены основные свойства для Be, C и W, использованные в настоящем расчете. Наблюдения, проведенные с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM), показали, что пылинки материалов, собранные из эксперимента, имеют аморфные структуры. Отметим, что материалы с аморфной структурой имеют более низкую температуру плавления. Как видно, бериллий имеет самую низкую атомную массу и температуру плавления среди всех материалов. А вольфрам имеет самую высокую атомную массу и температуру плавления. Это может свидетельствовать о том, что пылевые частицы, состоящие из тяжелых материалов, имеют вероятность долгого существования в плазме термоядерного реактора.

Таблица 1 - Свойства материалов Be, W, C

	Бериллий (Be)	Вольфра м (W)	Углерод (C)
M_{at} - атомная масса, г/моль	9.012	183.9	12.01
- плотность, г/см ³	1.85	19.3	2.2
T_{melt} - температура плавления, К	1150	2450	4765
- максимум коэффициент при ЕЭЭ	0.50	1.40	1.0
E_m - коэффициент энергии при ВЭЭ	200	650	300
- экспонента при ВЭЭ	0.4-1.3	0.4-1.0	0.4
W_f - работа выхода, эВ	4.98	4.61	4.71
- термоионный корректирующий фактор	0.26	0.50-0.83	0.25

Численные расчеты по изучению динамики пылинок проведены для следующих параметров пристеночной плазмы термоядерного реактора, такие как плотность электронов и ионов в диапазоне $10^{17} \div 10^{20} \text{ м}^{-3}$ и температура электронов и ионов 1-100 эВ. Заряд пылинок для Be, C, W с радиусом 0,5-10 μm при значениях магнитного поля в диапазоне $B = 1 \div 10 \text{ Т}$ рассчитаны для параметров пристеночной

плазмы $T_e = T_i = 18.7 \text{ eV}$, $T_a = 0.3T_i$, $n_e = n_i = n_a = 10^{18} \text{ m}^{-3}$. При таких параметрах плазмы ларморовский радиус электрона и иона равен $R_{L(e)} = 10 \text{ мкм}$, $R_{L(i)} = 624 \text{ мкм}$ при $B = 1 \text{ Тл}$ и $R_{L(e)} = 1 \text{ мкм}$, $R_{L(i)} = 62 \text{ мкм}$ при $B = 10 \text{ Тл}$. Когда ларморовский радиус электрона меньше радиуса пылевой частицы, необходимо учитывать влияние магнитного поля на процессы зарядки пылевых частиц [12]. В наших расчетах это соответствует случаю, когда $B > 6 \text{ Тл}$.

В таблице 2 представлены оценки заряда пылевых частиц Be, C и W с радиусом 3 мкм при различных значениях магнитного поля и разности зарядов пылевых частиц с / без учета магнитного поля в процентах. Из результатов видно, что с увеличением магнитного поля абсолютная величина заряда пылевых частиц уменьшается для всех материалов. Как показывают результаты в процентном соотношении, максимальное снижение заряда пылевых частиц составляет 14,4% для вольфрамовой пылинки, тогда как для бериллиевой пылинки она составляет 12,1%. Такое уменьшение заряда пылинок объясняется тем, что в сильных магнитных полях, когда радиус пылевой частицы становится больше ларморовского радиуса электрона и меньше ларморовского радиуса иона, частицы плазмы движутся только вдоль силовых линий магнитного поля и могут достичь пылинки только в том случае, если силовая линия магнитного поля пересекает ее поверхность.

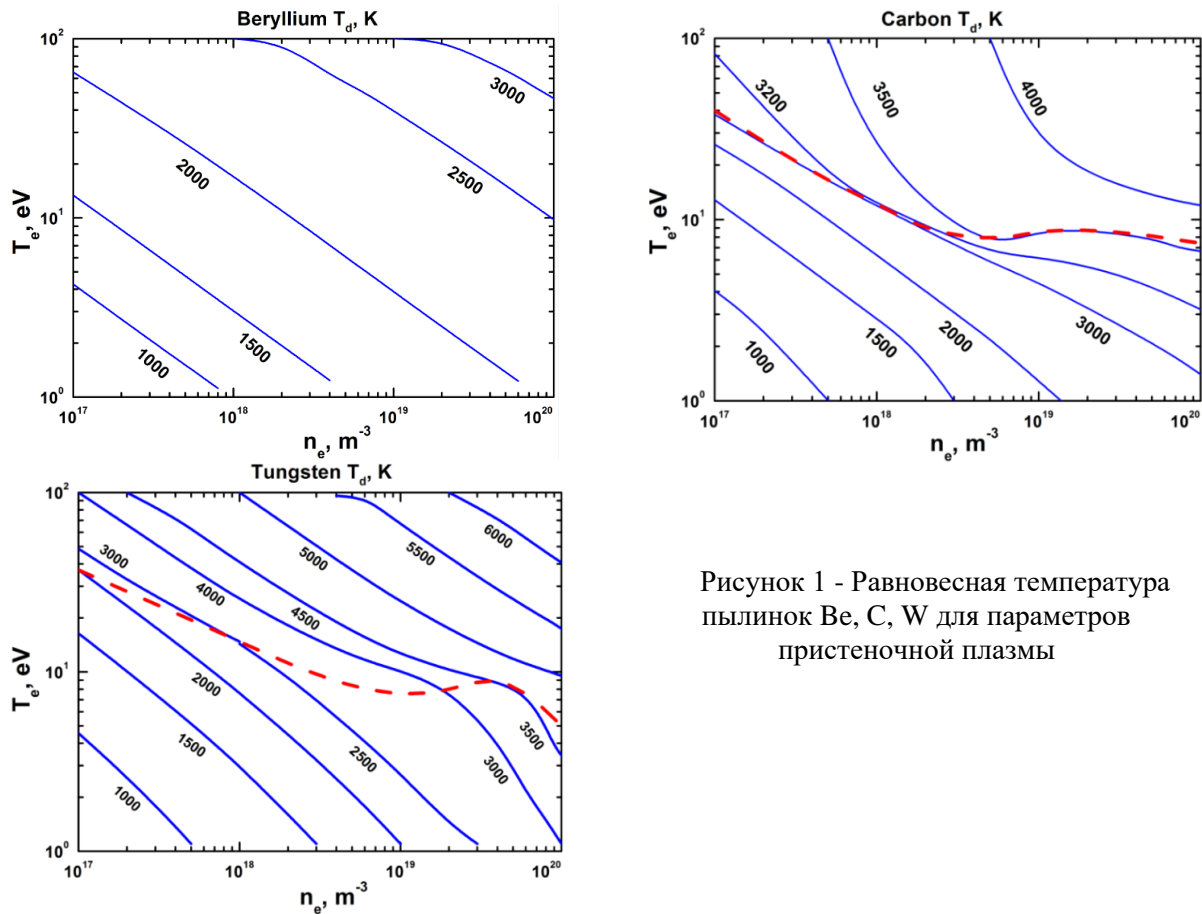


Рисунок 1 - Равновесная температура пылинок Be, C, W для параметров пристеночной плазмы

На рисунке 1 показаны равновесные температуры для материалов Be, C, W для параметров пристеночной плазмы. Равновесная температура определяется энергетическим балансом, главным образом, между потоком выходной мощности за счет испарения и излучения и потоком тепловой мощности из плазмы на пылинку. Максимальная равновесная температура для материала бериллия достигает до 3000 К в диапазоне плотности плазмы $10^{18} \div 10^{20} \text{ м}^{-3}$ тогда как равновесная температура более тяжелого и тугоплавкого вольфрама достигало до 6000 К. Для пылинок карбона и вольфрама при

равновесной температуре наблюдается два устойчивых решения, ниже пунктирной линией показаны температуры, когда пылинка нагревается.

Таблица 2 - Заряд пылевых частиц вольфрама, берилия и карбона при различных значениях напряженности магнитного поля

	$ Z_d $		$\Delta Z_d / Z_d(B=0) \times 100$			
	Be		C		W	
$B = 0$	16012	–	17594	–	19350	–
$B = 4 T$	15900	0.7 %	17452	0.8 %	19140	1.1 %
$B = 6 T$	15371	3.2 %	16975	3.5 %	18508	4.35 %
$B = 10 T$	14074	12 %	15394	12.5 %	16566	14.4 %

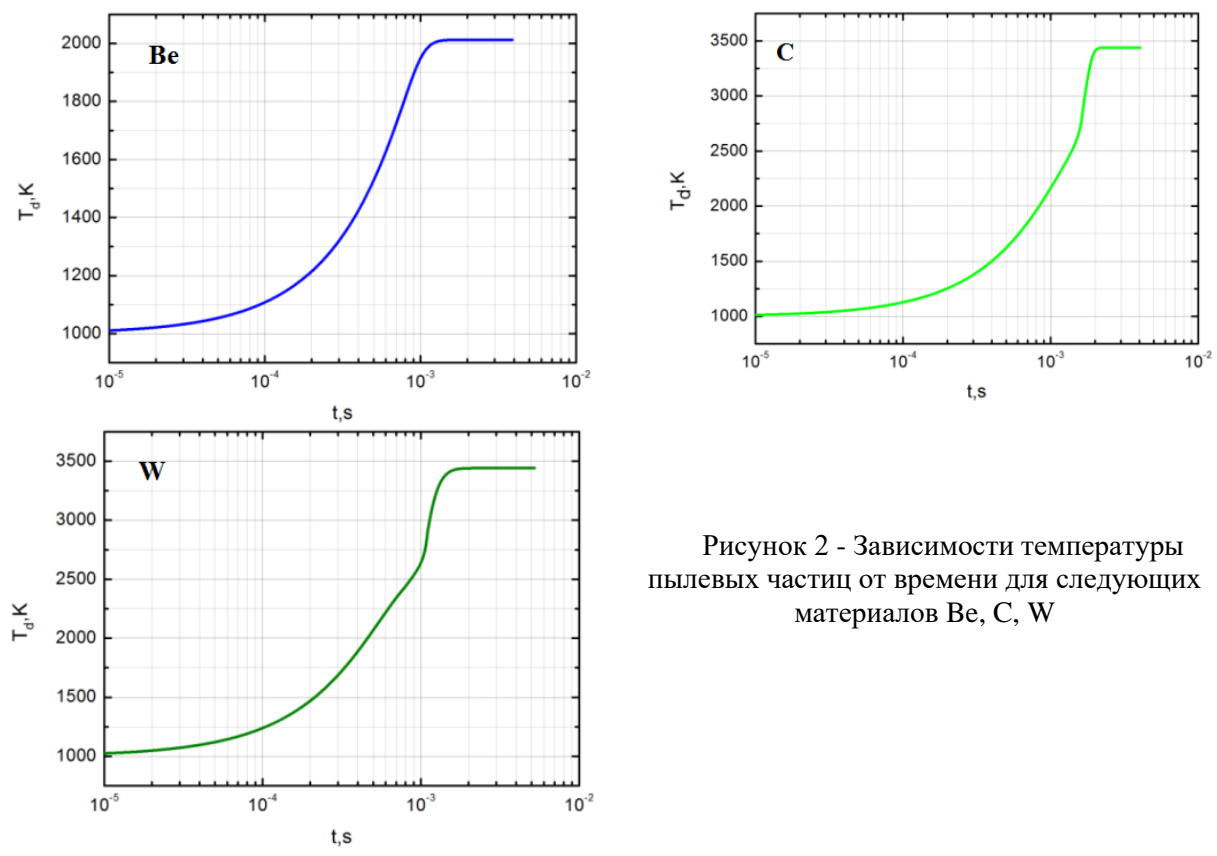


Рисунок 2 - Зависимости температуры пылевых частиц от времени для следующих материалов Be, C, W

На рисунках 2-3 показаны временные эволюции температуры и радиуса пылевых частиц из различных материалов. Временные эволюции температуры и радиуса пылинки были рассчитаны для однородных условий плазмы. Были продемонстрированы стадии нагрева / испарения пылинки, начальное нарастание температуры, плавление, переход к тепловому равновесию и испарение при равновесной температуре.

Тяжелые пылевые частицы имеют монотонно возрастающие температуры с плато во время процесса плавления. Плавление легких частиц происходит быстро во время начальной стадии нагрева при

относительно низких температурах. После резкого изменения температуры (градиента температуры) пылевой частицы, они теряют всю свою массу из-за термического испарения.

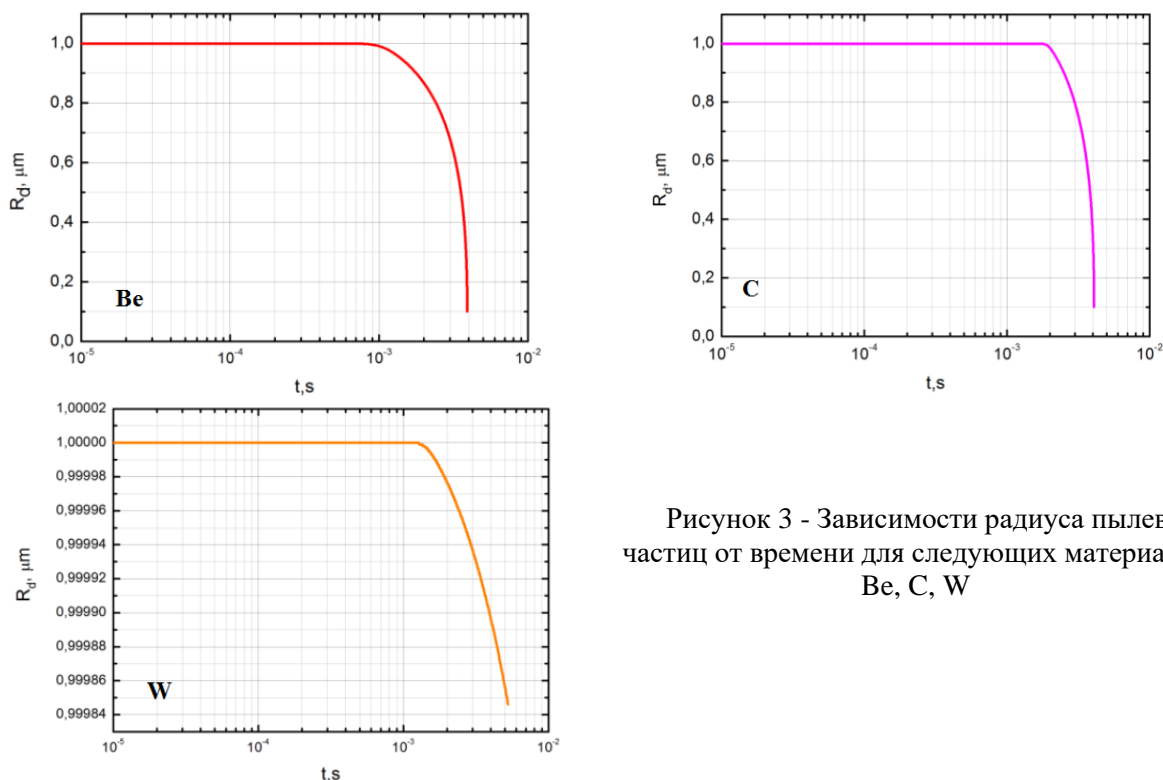


Рисунок 3 - Зависимости радиуса пылевых частиц от времени для следующих материалов Be, C, W

Таблица 3 - Время жизни пылевых частиц вольфрама, бериллия и карбона при различных значениях напряженности магнитного поля

	Время жизни, $t_d [s]$		$\Delta t_d / t_d (B=0) \times 100$			
	Be	C	W			
$B = 0$	$4.0 \cdot 10^{-2}$	–	$6.0 \cdot 10^{-2}$	–	$1.1 \cdot 10^{-1}$	–
$B = 10 T$	$4.64 \cdot 10^{-2}$	16 %	$7.32 \cdot 10^{-2}$	22 %	$1.45 \cdot 10^{-1}$	32 %

В таблице 3 представлены время жизни пылевых частиц Be, C и W с радиусом 3 мкм при $B = 10$ Тл и процентное соотношение времени жизни пыли с магнитным полем и без него. Видно, что магнитное поле приводит к увеличению времени жизни вольфрамовой пылинки на 32%, углеродной пылинки - на 22% и бериллиевой пылинки - на 16%, что вызвано подавлением теплового потока частиц плазмы в пылевую частицу с уменьшением их заряда.

Заключение. В данной работе исследуются динамика и время жизни пылевых частиц для материалов Be, C и W образовавшиеся на поверхности стенки термоядерного реактора. Уравнения движения, уравнения баланса массы и энергии, а также уравнения заряда пылевой частицы решаются для описания динамики пылевой частицы. Расчеты были проведены с учетом параметров, описывающих материальные функции, такие как молярная энтальпия и давление насыщенных паров, сложные явления при взаимодействии пылинки с плазмой, приводящие к потере массы, свойства электронной эмиссии и излучения. Приведены расчеты заряда и времени жизни пылевых частиц Be, C и W в присутствии внешнего магнитного поля. Были получены равновесные температуры пылинок Be, C, W для типичных параметров пристеночной плазмы. Установлено, что существенное влияние магнитного поля на заряд и

время жизни пылевой частицы наблюдается у вольфрамовой пылинки по сравнению с другими рассматриваемыми пылевыми материалами.

***Благодарности.** Выполненные исследования проведены в рамках проекта №AP09258792 «Транспортные, оптические и термодинамические свойства неизотермической плотной плазмы инерционного термоядерного синтеза в магнитном поле (2021-2023 гг.)» КН МОН РК.*

Бастыкова Н.Х. *, Коданова С.К.

Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан.

E-mail: bastykova_nuriya@physics.kz

ТЕРМОЯДРОЛЫҚ ҚАБЫРҒАЛЫҚ ПЛАЗМАДА ТОЗАҢДЫ БӨЛШЕКТЕРДІҢ ДИНАМИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН КОМПЬЮТЕРЛІК МОДЕЛЬДЕУ

Аннотация: бұл жұмыста термоядролық реактор қабырға бетінде пайда болған бериллий, карбон және вольфрам материалдарынан жасалған тозаңды бөлшектердің динамикасы мен өмір сүру уақыты қарастырылады. Тозаңды бөлшек динамикасын сипаттау үшін қозғалыс теңдеулері, масса мен энергияның теңдеулері, сондай-ақ тозаңды бөлшектің зарядталу теңдеулері шешіледі. Есептеулер молярлық энтальпия және қаныққан булардың қысымы, тозаңды бөлшектің плазмамен өзара әрекеттесуі кезіндегі күрделі құбылыстар, массаның жоғалуына әкелетін электрондық эмиссия және сәуле шығару қасиеттері сияқты материалдық функцияларды сипаттайтын параметрлерді есепке ала отырып жүргізілді. Қабырғааралық плазманың типтік параметрлері үшін бериллий, карбон және вольфрам тозаңды бөлшектерінің тепе-тең температуралары алынды. Сонымен қатар, уақыт функциясы ретінде тозаңды бөлшек температурасы мен радиусы алынды. Тозаңды бөлшектің қыздыру / булану кезеңдері, температураның бастапқы көтерілуі, балқу, жылу тепе-теңдігіне көшу және тепе-теңдік температурада булану кезеңдері көрсетілді. Осы есептеулердің негізінде бериллий, карбон және вольфрам материалдарынан жасалған тозаңды бөлшектердің өмір сүру уақытының бағалануы алынды. Сыртқы магнит өрісі болған кезде бериллий, карбон және вольфрам тозаңды бөлшектерінің зарядының және өмір сүру уақытының есептеулері келтірілген. Магнит өрісінің жоғарылауымен тозаңды бөлшектерінің зарядының абсолютті мәні барлық қарастырылған материалдар үшін азаятыны анықталды. Магнит өрісінің тозаңды бөлшектердің заряды мен өмір сүру уақытына әсері басқа қарастырылған тозаңды материалдармен салыстырғанда вольфрам тозаңды бөлшегіне айтарлықтай байқалды.

Түйін сөздер: тозаңды бөлшек, тозаңды қабырғааралық плазма, тозаңды бөлшектің пайда болуы, тозаңды бөлшектің өмір сүру уақыты, тозаңды бөлшектің заряды, магнит өрісі, қаныққан булардың қысымы, термоядролық реактор.

Bastykova N.Kh. *, Kodanova S.K.

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: bastykova_nuriya@physics.kz

COMPUTER SIMULATION OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF DUST PARTICLES IN THE EDGE FUSION PLASMA

Abstract: in this work the dynamics and lifetime of beryllium, carbon and tungsten dust formed on the edge of fusion plasma are considered. For describing the dynamics of the dust particle, the equations of motion, the equations of mass and energy balance, and the equations for the dust particle charge are solved. The calculations are carried out taking into account the parameters describing the material functions, such as molar enthalpy and saturated vapor pressure, complex phenomena in the interaction of the dust with the plasma, leading to mass loss, the properties of electron emission and radiation. The equilibrium temperatures of the dust particles for the materials beryllium, carbon and tungsten for typical edge fusion plasma parameters are obtained. Also, the

temperature and radius of the dust particles were obtained as a function of time. The stages of heating / evaporation of the dust particle, the initial increase in temperature, melting, transition to thermal equilibrium, and evaporation at equilibrium temperature are demonstrated. Based on these calculations, estimates of the lifetime of the dust particles for beryllium, carbon and tungsten materials are obtained. Calculations of charging and lifetime of beryllium, carbon and tungsten dust particles in the presence of the magnetic field are presented. It is found that with an increase in the magnetic field, the absolute value of the charge of dust particles decreases for all the materials under consideration. It is found that the maximum effect of the magnetic field on the charge and on the dust lifetime is for tungsten dust in comparison with other considered dust materials.

Key words: dusty plasma, dusty edge plasma, dust formation, dust lifetime, dust charge, magnetic field, saturated vapor pressure, thermonuclear reactor.

Information about authors:

Bastykova Nuriya Khamitbekovna – PhD, Associate professor, e-mail: bastykova_nuriya@physics.kz;

Kodanova Sandugash Kulmagambetov – PhD, Professor, e-mail: kodanova@physics.kz;

REFERENCES:

- 1 Goodall D.H.J. (1982). High speed cine film studies of plasma behavior and plasma surface interactions in tokamaks, *J. Nucl. Mater.*, 111-112, 11. DOI:10.1016/0022-3115(82)90174-X (In Eng.).
- 2 Ohkawa T. (1977). Dust particles as a possible source of impurities in tokamaks. *Kaku yugo Kenkyu*, 37, 117. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1288911> (In Eng.).
- 3 Winter J. (2000). Dust: A new challenge in nuclear fusion research? *Physics of Plasmas*, 7(10), 3862–3866. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1288911> (In Eng.).
- 4 Winter J. (2004). Dust in fusion devices—a multi-faceted problem connecting high- and low temperature plasma physics. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 46(12B), B583–B592. DOI: <https://doi.org/10.1088/0741-3335/46/12B/047> (In Eng.).
- 5 Smirnov R.D., Pigarov A.Yu., Rosenberg M., Krasheninnikov S.I., Mendis D.A. (2007). Modelling of dynamics and transport of carbon dust particles in tokamaks. *Plasma Phys. Control. Fusion*. DOI: <https://doi.org/10.1088/0741-3335/49/4/001> (In Eng.).
- 6 Brown B.T., Smirnov R.D., Krasheninnikov S.I. (2014). Dynamics and transport of dust particles in tokamak edge plasmas. *Phys. Plasmas*, 21, 024501. DOI: <https://doi.org/10.1088/0741-3335/47/5A/025> (In Eng.).
- 7 R.A. Pitts, S. Carpentier, F. Escourbiac, T. Hirai, V. Komarov, S. Lisgo, A.S. Kukushkin, A. Loarte, M. Merola, A.S. Naik et al. (2013). A full tungsten divertor for ITER: Physics issues and design status. *J. Nucl. Mater.* 438, S48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.01.008> (In Eng.).
- 8 H. Zohm (2013). *Fusion Engineering and Design.*, 88, 428. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2013.01.001 (In Eng.).
- 9 Y. Tanaka, A.Yu. Pigarov, R.D. Smirnov, S.I. Krasheninnikov, N. Ohno, Y. Uesugi (2007). Modeling of dust-particle behavior for different materials in plasmas. *Phys. Plasmas.*, 14, 052504. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2722274> (In Eng.).
- 10 N.Kh. Bastykova, A.Zs. Kovács, S.K. Kodanova, T.S. Ramazanov, I. Korolov, P. Hartmann, Z. Donkó 2015. Controlled levitation of dust particles in RF+DC discharges. *Contributions to Plasma Physics*, 55, 671. DOI: <https://doi.org/10.1002/ctpp.201500063> (In Eng.).
- 11 J. S. Chang, K. Spariosu (1993). Dust particle-charging characteristics under a collisionless magneto-plasma, *J. Phys. Soc. Japan*, 62, 97. DOI: <https://doi.org/10.1143/JPSJ.62.97> (In Eng.).
- 12 V.N. Tsytoich, N. Sato, G.E. Morfill (2003). Note on the charging and spinning of dust particles in complex plasmas in a strong magnetic field. *New Journal of Physics*, 5, 43.1. DOI: 10.1088/1367-2630/5/1/343 (In Eng.).
- 13 Y. Tomita, G. Kawamura, T. Yamada, O. Ishihara (2009). Charging of dust particles in Magnetic field. *J. Plasma Fusion Res. Series*, 8, 273. (In Eng.).
- 14 L. Vignitchouk, S. Ratynskaia P. Toliás (2017). Analytical model of particle and heat flux collection by dust immersed in dense magnetized plasmas. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 59, 104002. DOI: 10.1088/1361-6587/aa7c44 (In Eng.).

15 S.K. Kodanova, N.Kh. Bastykova, T.S. Ramazanov, G.N. Nigmatova, S.A. Maiorov (2018). The Effect of Magnetic Field on Dust Dynamic in the Edge Fusion Plasma. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 46, 832. DOI: 10.1109/TPS.2017.2763965 (In Eng.).

16 A. Autricque, N. Fedorczak, S.A. Khrapak, L. Couëdel, B. Klumov, C. Arnas, N. Ning, J.-M. Layet, and C. Grisolia (2017). Magnetized electron emission from a small spherical dust grain in fusion related plasmas. *Physics of Plasmas*, 24, 124502. DOI: 10.1063/1.4997695 (In Eng.).

МАЗМҰНЫ

ФИЗИКА

Бастыкова Н.Х., Коданова С.К. ТЕРМОЯДРОЛЫҚ ҚАБЫРҒАЛЫҚ ПЛАЗМАДА ТОЗАҢДЫ БӨЛШЕКТЕРДІҢ ДИНАМИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН КОМПЬЮТЕРЛІК МОДЕЛЬДЕУ.....	6
Байсеитов Қ.М. КВАРК – ГЛЮОНДЫ ПЛАЗМАНЫҢ ДИЭЛЕКТРЛІК ФУНКЦИЯСЫ.....	15
Досымбетова Г.Б., Сванбаев Е.А., Жуман Г.Б., Нұрғалиев М.К., Саймбетов А.К. КОНЦЕНТРАЦИЯЛАУШЫ КРЕМНИЙЛІ КҮН БАТАРЕЯСЫН ЖАСАУ.....	25
Джазаиров-Кахраманов А.В., Имамбеков О., Карипбаева Л.Т., Стеблякова А.А. ${}^8\text{Li}(p,\gamma){}^9\text{Be}$ ҚАРМАУЫ КЕЗІНДЕ СӘЙКЕС ${}^9\text{Be}$ АСТРОФИЗИКАЛЫҚ СИНТЕЗІ ҮШІН РЕАКЦИЯ ЖЫЛДАМДЫҒЫНА РЕЗОНАНСТАРЫНЫҢ МӘНІ.....	31
Исмагамбетова Т.Н., Габдуллин М.Т., Ramazanov T.S. ЖАРТЫЛАЙ АЗҒЫНДАЛҒАН КВАЗИКЛАССИКАЛЫҚ ИОНДАРЫ БАР ТЫҒЫЗ СУТЕГІ ПЛАЗМАСЫНЫҢ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ.....	41
Ибраев А.Т. ЗАРЯДТАЛҒАН БӨЛШЕКТЕР КӨЗДЕРІНІҢ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ ТЕОРИЯСЫН ЖЕТІЛДІРУ.....	47
Минасянц Г.С., Минасянц Т.М., В.М. Томозов ЖАРҚ ЕТУІ САЛДАРЫНАН ДАМЫҒАН ҰЗАҚ ГАММА – СӨУЛЕЛЕРІНІҢ ҮДЕМЕЛІ ПРОТОНДАР АҒЫНЫНЫҢ СИПАТТАМАСЫ.....	55
Садыков Т.Х., Аргынова А.Х., Жуков В.В., Новолодская О.А., Пискаль В.В. «АДРОН-55» ТЯНЬ-ШАНЬ ИОНДАУШЫ - НЕЙТРОНДЫ КАЛОРИМЕТРІНІҢ ПЕРИФЕРИЯЛЫҚ ДЕТЕКТОРЛАРЫН ЖАҢҒЫРТУ».....	65
Саяков О., Жао Я., Машекова А. 3D СҮЙЫҚТЫҚ ПЕН ҚҰРЫЛЫМНЫҢ ЕКІ ЖАҚТЫ ӨЗАРА ӘРЕКЕТТЕСУІМЕН ҚАНАТТЫ АЭРОДИНАМИКАЛЫҚ ТАЛДАУ.....	75
Терещенко В.М. СПЕКТРОФОТОМЕТРЛІК СТАНДАРТТАРДЫҢ ЖИНАҚТАЛҒАН КАТАЛОГЫН ҚҰРУДЫҢ ПАЙДАСЫ ТУРАЛЫ.....	82
ИНФОРМАТИКА	
Дайырбаева Э.Н., Ерімбетова А.С., Тойгожинова А.Ж. ӘР ТҮРЛІ МАТРИЦАЛАРДЫ ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, СТРИП ӘДІСІНЕ НЕГІЗДЕЛГЕН КЕСКІНДІ ҚАЛПЫНА КЕЛТІРУ НӘТИЖЕЛЕРІН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ.....	89
Калижанова А., Вуйчик В., Кунельбаев М., Козбакова А., Амиргалиева Ж. МАТЛАВ ОРТАСЫНДА КӨЛБЕУ БРЭГГ ТОРЫ БАР ТАЛШЫҚТЫ -ОПТИКАЛЫҚ СЕНСОРДЫҢ СПЕКТРЛІК СИПАТТАМАЛАРЫН МОДЕЛЬДЕУ.....	96
Жантаев Ж.Ш., Қайранбаева А.Б., Қиялбаева А.К., Нұрпейсова Г.Б., Панюкова Д.В. ЗИЯТКЕРЛІК БОЛЖАУҒА АРНАЛҒАН МАҒЛҰМАТ ЖИНАУ: ӘДІСТЕР МЕН НӘТИЖЕЛЕР.....	108

МАТЕМАТИКА

Айсағалиев С.А., Севрюгин И.В., Исаева З.Б., Игликова М.Н. ШЕКТЕУЛЕР МЕН СЫЗЫҚТЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІ ТИІМДІ БАСҚАРУ.....	118
Дауылбаев М.Қ., Атахан Н., Асет Н. СИНГУЛЯРЛЫ АУЫТҚЫҒАН ИНТЕГРАЛДЫ-ДИФФЕРЕНЦИАЛДЫҚ ТЕНДЕУ ҮШІН БАСТАПҚЫ СЕКІРІСТІ ШЕТТІК ЕСЕБІ ШЕШІМІНІҢ АСИМПТОТИКАЛЫҚ ЖІКТЕЛУІ.....	126
Есмағамбетов Б.С., Апсеметов А.Т., Балабекова М.О., Каюмов К.Г., Джакибаев А.Ш. КЕЗДЕЙСОҚ ПРОЦЕСТЕРДІҢ ҒЫҚТИМАЛДЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН ПАРАМЕТРЛІК ЕМЕС БАҒАЛАУ.....	136
Иманбаев Н.С. КВАЗИСИНГУЛЯРЛЫ ИНТЕГРАЛДЫҚ ТЕНДЕУДІҢ ИНДЕКСІН ЕСЕПТЕУДІҢ ТОПОЛОГИЯЛЫҚ БІР ӘДІСІ ЖАЙЛЫ.....	143
Мырканова А.М., Аканова К.М., Ластовецкий А.Л. ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ЭКОНОМИКАЛЫҚ КЕҢІСТІГІНІҢ АНИЗОТРОПИЯСЫ.....	151
Омарова Г.Т., Омарова Ж.Т. К ОБРАТНОЙ ЗАДАЧЕ НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ.....	165

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА

Бастыкова Н.Х., Коданова С.К. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ПРИСТЕНОЧНОЙ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЕ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ.....	6
Байсеитов К.М. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ФУНКЦИЯ КВАРК-ГЛЮОННОЙ ПЛАЗМЫ.....	15
Досымбетова Г.Б., Сванбаев Е.А., Жуман Г.Б., Нұрғалиев М.К., Саймбетов А.К. РАЗРАБОТКА КОНЦЕНТРИРУЮЩИХ КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ.....	25
Джазаиров-Кахраманов А.В., Имамбеков О., Карипбаева Л.Т., Стеблякова А.А. ЗНАЧЕНИЕ РЕЗОНАНСОВ НА СКОРОСТЬ РЕАКЦИИ ПРИ ${}^8\text{Li}(p,\gamma){}^9\text{Be}$ ЗАХВАТЕ ДЛЯ СООТВЕТСТВУЮЩЕГО АСТРОФИЗИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ${}^9\text{Be}$	31
Исмагамбетова Т.Н., Габдуллин М.Т., Ramazanov T.S. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛОТНОЙ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ С ЧАСТИЧНО ВЫРОЖДЕННЫМИ КВАЗИКЛАССИЧЕСКИМИ ИОНАМИ.....	41
Ибраев А.Т. КОРРЕКТИРОВКА ТЕОРИИ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ИСТОЧНИКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ.....	47
Минасянц Г.С., Минасянц Т.М., Томозов В.М. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКОВ УСКОРЕННЫХ ПРОТОНОВ ПРИ РАЗВИТИИ ВСПЫШЕК С ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫМ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕМ.....	55
Садыков Т.Х., Аргынова А.Х., Жуков В.В., Новолодская О.А., Пискаль В.В. МОДЕРНИЗАЦИЯ ПЕРИФЕРИЙНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ТЯНЬ-ШАНСКОГО ИОНИЗАЦИОННО-НЕЙТРОННОГО КАЛОРИМЕТРА «АДРОН-55».....	65
Саяков О., Жао Я., Машекова А. 3D АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КРЫЛА С ДВУСТОРОННИМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ЖИДКОСТИ И КОНСТРУКЦИИ.....	75
Терещенко В.М. О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ СОЗДАНИЯ СВОДНОГО КАТАЛОГА СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.....	82

ИНФОРМАТИКА

Дайырбаева Э.Н., Еримбетова А.С., Тойгожинова А.Ж. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СТРИП-МЕТОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МАТРИЦ.....	89
Калижанова А., Вуйчик В., Кунельбаев М., Козбакова А., Амиргалиева Ж. МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА С НАКЛОННОЙ РЕШЕТКОЙ БРЭГГА В СРЕДЕ MATLAB.....	96
Жантаев Ж.Ш., Кайранбаева А.Б., Киялбаев А.К., Нурпеисова Г.Б., Панюкова Д.В. СБОР ДАННЫХ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ: МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ.....	108

МАТЕМАТИКА

Айсагалиев С.А., Севрюгин И.В., Исаева З.Б., Игликова М.Н. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ.....	118
Дауылбаев М.Қ., Атахан Н., Асет Н. АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ РЕШЕНИЯ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ С НАЧАЛЬНЫМИ СКАЧКАМИ ДЛЯ СИНГУЛЯРНО ВОЗМУЩЕННОГО ИНТЕГРО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ.....	126
Есмагамбетов Б.С., Апсеметов А.Т., Балабекова М.О., Каюмов К.Г., Джакибаев А.Ш. НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ.....	136
Иманбаев Н.С. ОБ ОДНОМ ТОПОЛОГИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ К ВЫЧИСЛЕНИЮ ИНДЕКСА КВАЗИСИНГУЛЯРНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ.....	143
Мырканова А.М., Аканова К.М., Ластовецкий А.Л. АНИЗОТРОПИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН....	151
Омарова Г.Т., Омарова Ж.Т. К ОБРАТНОЙ ЗАДАЧЕ НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ.....	159

CONTENTS

PHYSICS

Bastykova N.Kh., Kodanova S.K. COMPUTER SIMULATION OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF DUST PARTICLES IN THE EDGE FUSION PLASMA.....	6
Baiseitov K.M. DIELECTRIC FUNCTION OF QUARK-GLUON PLASMA.....	15
Dosymbetova G.B., Svanbayev Ye.A., Zhuman G.B., Nurgaliyev M.K., Saymbetov A.K. DEVELOPMENT OF CONCENTRATING SILICON SOLAR CELLS.....	25
Dzhazairov-Kakhramanov A.V., Imambekov O., Karipbayeva L.T., Steblyakova A.A. THE ROLE OF RESONANCES IN THE CAPTURE OF ${}^8\text{Li}(p,\gamma){}^9\text{Be}$ ON THE REACTION RATE OF THE RELEVANT ASTROPHYSICAL SYNTHESIS OF ${}^9\text{Be}$	31
Ismagambetova T.N., Gabdullin M.T., Ramazanov T.S. THERMODYNAMIC PROPERTIES OF DENSE HYDROGEN PLASMAS WITH PARTIALLY DEGENERATE SEMICLASSICAL IONS.....	41
Ibrayev A.T. CORRECTION OF THE THEORY OF RESEARCHING THE PROPERTIES OF CHARGED PARTICLES SOURCES.....	47
Minasyants G.S., Minasyants T.M., Tomozov V.M. CHARACTERISTICS OF ACCELERATED PROTONS FLUXES DURING THE DEVELOPMENT OF FLARES WITH PROLONGED GAMMA RADIATION.....	55
Sadykov T.Kh., Argynova A.Kh., Jukov V.V., Novolodskaya O.A., Piskal' V.V. MODERNIZATION OF THE PERIPHERAL DETECTORS OF TIEN-SHAN IONIZATION- NEUTRON CALORIMETER DETECTORS "HADRON-55".....	65
Sayakov O., Zhao Y., Mashekova A. 3D AERODYNAMIC ANALYSIS OF AWING WITH 2-WAY FLUID-STRUCTURE INTERACTION.....	75
Tereshchenko V.M. ABOUT EXPEDIENCY OF CREATION COMPILE CATALOGUE OF SPECTROPHOTOMETRIC STANDARDS.....	82

COMPUTER SCIENCE

Daiyrbayeva E., Yerimbetova A., Toigozhinova A. COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF IMAGE RECOVERY BASED ON THE STRIP METHOD USING VARIOUS MATRICES.....	89
Kalizhanova A., Wojcik W., Kunelbayev M., Kozbakova A., Amirgaliyeva Zh. MODELING SPECTRAL CHARACTERISTICS OF FIBER-OPTIC SENSOR WITH TILTED BRAGG GRATING IN MATLAB MEDIUM.....	96
Zhantayev Zh., Kairanbayeva A., Kiyalbayev A., Nurpeissova G., Panyukova D. DATA COLLECTION FOR INTELLECTUAL FORECASTING: METHODS AND RESULTS.....	108

MATHEMATICS

Aisagaliev S.A., Sevryugin I.V., Issyaeva Z.B., Iglukova M.N. OPTIMAL CONTROL OF LINEAR SYSTEMS WITH CONDITIONS.....	118
Dauylbayev M.K., Atakhan N., Asset N. ASYMPTOTIC EXPANSION OF SOLUTION OF BVP WITH INITIAL JUMPS FOR SINGULARLY PERTURBED INTEGRO-DIFFERENTIAL EQUATION.....	126
Yesmagambetov B.B., Apsemetov A., Balabekova M.O., Kayumov K.G., Jakibayev A. NON-PARAMETRIC ESTIMATION OF PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF RANDOM PROCESSES.....	136
Imanbaev N.S. ON A TOPOLOGICAL METHOD FOR CALCULATING THE INDEX OF QUASI-SINGULAR INTEGRAL EQUATION.....	143
Myrkanova A.M., Akanova K.M., Lastovetsky A.L. ANISOTROPY OF ECONOMIC SPACE OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN.....	151
Omarova G.T., Omarova Zh.T. TO THE INVERSE PROBLEM OF CELESTIAL MECHANICS.....	159

**Publication Ethics and Publication Malpractice in
the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan**

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct (http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайтах:

www.nauka-nanrk.kz

<http://physics-mathematics.kz/index.php/en/archive>

ISSN 2518-1726 (Online),

ISSN 1991-346X (Print)

Редакторы: *М.С. Ахметова, А. Ботанқызы, Д.С. Аленов, Р.Ж. Мрзабаева*
Верстка на компьютере *Г.Д. Жадыранова*

Подписано в печать 15.08.2021.

Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.

4,6 п.л. Тираж 300. Заказ 4.