

ISSN 1991-346X

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ  
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

# Х А Б А Р Л А Р Ы

---

---

## ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

## NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES  
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА  
СЕРИЯСЫ



СЕРИЯ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ



PHYSICO-MATHEMATICAL  
SERIES

**5 (303)**

ҚЫРКҮЙЕК – ҚАЗАН 2015 ж.  
СЕНТЯБРЬ – ОКТЯБРЬ 2015 г.  
SEPTEMBER – OCTOBER 2015

1963 ЖЫЛДЫҢ ҚАҢТАР АЙЫНАН ШЫҒА БАСТАҒАН  
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1963 ГОДА  
PUBLISHED SINCE JANUARY 1963

ЖЫЛЫНА 6 РЕТ ШЫҒАДЫ  
ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД  
PUBLISHED 6 TIMES A YEAR

АЛМАТЫ, ҚР ҰҒА  
АЛМАТЫ, НАН РК  
ALMATY, NAS RK

Б а с р е д а к т о р

ҚР ҰҒА академигі,

**Мұтанов Г. М.**

Р е д а к ц и я а л қ а с ы:

физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Әшімов А.А.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Байғұнчечков Ж.Ж.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Жұмаділдаев А.С.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Қалменов Т.Ш.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Мұқашев Б.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Өтелбаев М.О.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Тәкібаев Н.Ж.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Харин С.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбішев М.Е.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Жантаев Ж.Ш.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Қалимолдаев М.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Косов В.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Мұсабаев Т.А.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Ойнаров Р.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Рамазанов Т.С.** (бас редактордың орынбасары); физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Темірбеков Н.М.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Өмірбаев У.У.**

Р е д а к ц и я к ең е с і:

Украинаның ҰҒА академигі **И.Н. Вишневский** (Украина); Украинаның ҰҒА академигі **А.М. Ковалев** (Украина); Беларусь Республикасының ҰҒА академигі **А.А. Михалевич** (Беларусь); Әзірбайжан ҰҒА академигі **А. Пашаев** (Әзірбайжан); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **И. Тигиняну** (Молдова); мед. ғ. докторы, проф. **Иозеф Банас** (Польша)

Главный редактор

академик НАН РК

**Г. М. Мутанов**

Редакционная коллегия:

доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.А. Ашимов**; доктор техн. наук, проф., академик НАН РК **Ж.Ж. Байгунчеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.С. Джумадильдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Т.Ш. Кальменов**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Б.Н. Мукашев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **М.О. Отелбаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Н.Ж. Такибаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **С.Н. Харин**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Е. Абишев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Ж.Ш. Жантаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Н. Калимолдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **В.Н. Косов**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.А. Мусабаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Р. Ойнаров**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.С. Рамазанов** (заместитель главного редактора); доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Н.М. Темирбеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **У.У. Умирбаев**

Редакционный совет:

академик НАН Украины **И.Н. Вишневский** (Украина); академик НАН Украины **А.М. Ковалев** (Украина); академик НАН Республики Беларусь **А.А. Михалевич** (Беларусь); академик НАН Азербайджанской Республики **А. Пашаев** (Азербайджан); академик НАН Республики Молдова **И. Тигиняну** (Молдова); д. мед. н., проф. **Иозеф Банас** (Польша)

«Известия НАН РК. Серия физико-математическая». ISSN 1991-346X

Собственник: РОО «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы)

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов Министерства культуры и информации Республики Казахстан №5543-Ж, выданное 01.06.2006 г.

Периодичность: 6 раз в год.

Тираж: 300 экземпляров.

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, ком. 219, 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18,  
www.nauka-nanrk.kz / physics-mathematics.kz

---

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2015

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

Editor in chief

**G. M. Mutanov**,  
academician of NAS RK

Editorial board:

**A.A. Ashimov**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **Zh.Zh. Baigunchekov**, dr. eng. sc., prof., academician of NAS RK; **A.S. Dzhumadildayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **T.S. Kalmenov**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **B.N. Mukhashev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.O. Otelbayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **N.Zh. Takibayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **S.N. Kharin**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.Ye. Abishev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **Zh.Sh. Zhantayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **M.N. Kalimoldayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **V.N. Kosov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.A. Mussabayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **R. Oinarov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.S. Ramazanov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK (deputy editor); **N.M. Temirbekov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **U.U. Umirbayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK

Editorial staff:

**I.N. Vishnievski**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.M. Kovalev**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.A. Mikhalevich**, NAS Belarus academician (Belarus); **A. Pashayev**, NAS Azerbaijan academician (Azerbaijan); **I. Tighineanu**, NAS Moldova academician (Moldova); **Joseph Banas**, prof. (Poland).

**News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physical-mathematical series.**  
**ISSN 1991-346X**

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of information and archives of the Ministry of culture and information of the Republic of Kazakhstan N 5543-Ж, issued 01.06.2006

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 300 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, 220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,

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

---

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2015

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

**N E W S**

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

**PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES**

ISSN 1991-346X

Volume 5, Number 303 (2015), 140 – 144

**THE DUST DYNAMICS  
IN THE EDGE OF FUSION PLASMA**

**N. Kh. Bastykova<sup>1</sup>, S. K. Kodanova<sup>1</sup>, T. S. Ramazanov<sup>1</sup>, S. A. Maiorov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>IETP, Kazakh National University named after al-Farabi, Almaty, Kazakhstan,

<sup>2</sup>General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

E-mail: bastykova\_nuriya@physics.kz

**Key words:** Fusion plasma, divertor, dust particle, the charge of dust particle.

**Abstract.** In this work, the influence of magnetic field on the charge of dust particles, dust dynamics and lifetime in the edge of fusion plasma are studied. The magnetic field can have a significant effect on charging of dust particles in the edge plasma. Dust transport and evaporation of dust particles determine composition of the edge plasma, and, hence, its transport properties. The charges of dust particles taking into account the magnetic field were calculated. As a result of these calculations the dependence of the dust charge and fluxes of plasma particles on its surface were obtained. The evolution of dust formed on the surface of the reactor walls was studied for typical parameters of the edge plasma. The dependence of the temperature and radius of dust particles on time was determined. Based on these calculations, we obtained estimates of lifetime and paths of dust particles in the edge of fusion plasma.

## ДИНАМИКА ПЫЛИНКИ В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Н. Х. Бастыкова<sup>1</sup>, С. К. Коданова<sup>1</sup>, Т. С. Рамазанов<sup>1</sup>, С. А. Майоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

<sup>2</sup>Институт общей физики РАН, Москва, Россия

**Ключевые слова:** термоядерная плазма, дивертор, пылевая частица, заряд пылевой частицы.

**Аннотация.** В работе исследованы влияния магнитного поля на заряд пылинок, а также динамика и время жизни пылинки в пристеночной плазме термоядерного реактора. Магнитное поле может оказывать значительное влияние на процессы зарядки пылинок в пристеночной плазме. Перенос пылинок, их испарение во многом определяет состав пристеночной плазмы, и соответственно, ее транспортные характеристики. Были рассчитаны характеристики зарядки пылинок с учетом магнитного поля. В результате этих расчетов получены зависимости заряда пылинки и потоков частиц плазмы на ее поверхность. Для характерных параметров пристеночной плазмы исследовалась эволюция образовавшихся пылинок на поверхности стенки реактора. В результате этих расчетов определяются температура и радиус пылинки, как функции времени. На основе этих расчетов получены оценки времени жизни и пути пылинки пристеночной плазме термоядерного реактора.

**Введение.** Исследование образования и эволюции пылевых частиц в установках управляемого термоядерного синтеза стали важным направлением при реализации крупномасштабных экспериментов с термоядерной плазмой [1-4]. Поток горячей примеси из центральной области реактора на стенки может привести к поверхностным разрушениям, к испарению поверхности стенки, вследствие чего в плазму могут инжектировать твердые частицы различных форм - от неправильной формы до почти идеальных сфер. Состав частиц включает в себя материалы, используемые для пластин дивертора, первой стенки и других внутренних элементов конструкции, которыми - это графит, титан, вольфрам, бериллий, сталь.

Пылевые частицы в плазме обычно приобретают отрицательный заряд, так как скорость электронов намного превосходит скорость ионов. Среднее значение заряда, величина его флуктуаций, в основном, определяется соотношением масс ионов и электронов, их температур и размером пылинки. Кроме того, существенное влияние оказывают даже редкие столкновения ионов вблизи пылинки, как на величину заряда пылинки, так и формируя облако связанных ионов на финитных орбитах. Более подробное рассмотрение процессов зарядки без учета магнитного поля можно найти в [2, 5-7].

Магнитное поле может также оказывать значительное влияние на процессы зарядки пылинок в плазме. Учет влияния сильного магнитного поля на процессе зарядки пылевых частиц в пристеночной плазме необходим для исследования влияния пылинок на работу термоядерных реакторов. Заряд пылинок с учетом магнитного поля рассчитывался только в приближении ограниченных орбит (OML) в работах [8, 9]. В данной работе методом Монте-Карло проводился учет столкновений ионов с атомами и получены зависимости заряда пылинки и потоков частиц плазмы на нее от величины магнитного поля.

Перенос пылинок от поверхности стенки вглубь реактора, их испарение во многом определяют состав и характеристики пристеночной плазмы, и поэтому могут оказывать значительное влияние на работу реактора. Для учета миграции пылинок в реакторе решаются уравнения ее движения в заданных электрических и магнитных полях, а также уравнения баланса массы и энергии.

**Процесс зарядки пылинки.** На первом этапе настоящей работы рассчитывался заряд неподвижной, первоначально нейтральной пылинки бесконечно большой массы. Для расчета использовался метод частиц в ячейке, а с помощью процедуры розыгрыша столкновений методом Монте-Карло проводился учет столкновений ионов с атомами [5, 6, 9, 10]. Рассматривался куб с центром в начале системы координат, где помещалась нейтральная сферическая пылинка заданного радиуса, поглощающая заряд всех падающих на нее ионов и электронов. Начальное

распределение электронов и ионов по координатам выбиралось равновероятным в объеме куба. Распределение по скоростям соответствовало распределению Максвелла на бесконечности. В зависимости от начального расстояния до макрочастицы распределение Максвелла по модулю скорости сдвигалось на величину энергии взаимодействия с макрочастицей. Направление скорости выбиралось изотропным. Таким образом, формировалось начальное распределение без связанных частиц, которые при определенных условиях могут сильно влиять на кинетические характеристики [5, 6, 11].

Далее для электронов и ионов решались уравнения движения с учетом постоянного и однородного магнитного поля:

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_k}{dt^2} = \frac{q_k}{m_k} (\mathbf{E}_k + \frac{1}{c} [\mathbf{v}_k \times \mathbf{B}]), k = 1, 2 \dots N_p \quad (1)$$

где,  $\mathbf{E}_k = Q \mathbf{r}_k / |\mathbf{r}_k|^3$ ,  $\mathbf{r}_k$  - радиус вектор  $k$ -ой частицы с массой  $m_k$ , и зарядом  $q_k$ , зарядом пылинки  $Q$ ,  $N_p$  - общее число ионов и электронов. Здесь радиус-вектор пылинки равен нулю и не меняется. Формула для напряженности электрического поля  $\mathbf{E}_k = Q \mathbf{r}_k / |\mathbf{r}_k|^3$  соответствует точному решению для сферически симметричной функции распределения плотности заряда, когда поле на поверхности сферы определяется только суммарным зарядом внутри данной сферы согласно теореме Гаусса.

Расчеты по определению заряда пылинок проводились для следующих параметров плазмы дивертора [12]: плотности электронов и ионов равны  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ , температура ионов 0,7 эВ и электронов 3 эВ. Были получены значения заряда для пылинок радиусом  $0,5; 1; 2 \mu\text{m}$  при различных значениях магнитного поля  $B = (10-10^5) \text{ Гс}$ . На рисунке 1 показаны зависимости от времени заряда пылевой частицы с радиусом  $0,5 \mu\text{m}$ , первоначально нейтральной, полученные методом частиц в ячейке и рассчитанные по теории OML.

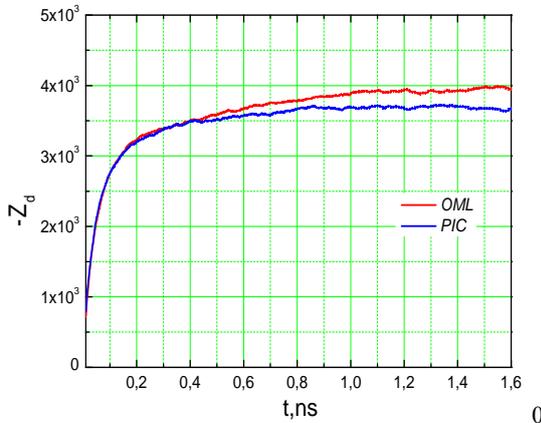


Рисунок 1 – Заряд пылинки в зависимости от времени (нс)

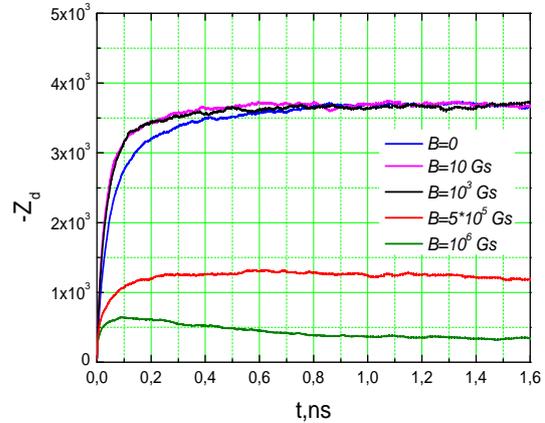


Рисунок 2 – Заряд пылинки в зависимости от времени (нс) при различных значениях магнитного поля

На рисунке 2 приведены распределения заряда пылевой частицы в зависимости от времени при различных значениях магнитного поля. В плазме без магнитного поля большая часть электронов отражается от кулоновского барьера пылинки, и только малая часть быстрых электронов могут достигать пылинки. А ионы наоборот, притягиваются пылинкой и сечение столкновений становится много больше, чем геометрическое сечение пылинки  $\pi a^2$ .

В работе [8] исследовано влияние магнитного поля на заряд пылинки в приближении OML теории. Было получено, что влияние на заряд пылинки начинается с некоторого критического значения магнитного поля  $B_{cr}^e (kG) a (\mu\text{m}) > 41.37 \sqrt{T_e (eV) / 3 (eV)}$ . В данной работе для параметров плазмы дивертора и пылинки с радиусом  $a = 0.5 \mu\text{m}$  значение критического магнитного поля равна  $B_{cr}^e = 8.5 \cdot 10^4 \text{ Г}$ .

Магнитное поле влияет на процесс зарядки пылинки в первую очередь за счет замагничивания электронов. В слабом магнитном поле  $B < B_{cr}^{dr}$ , когда гирорадиус электрона больше размера пылинки, это влияние очень мало. При увеличении магнитного поля до значений, когда гирорадиус электрона равен радиусу захвата электронов пылевой частицей, картина меняется. Электроны движутся только вдоль магнитных силовых линий и могут достигать пылинки только, если магнитная силовая линия пересекает ее поверхность. Но электроны с низкой энергии, как и раньше, в случае без магнитного поля, отражаются кулоновским барьером пылинки в обратном направлении.

**Баланс энергии для пылевой частицы в плазме.** Пылевая частица, находящаяся в плазме, подвергается воздействию потоков ионов, электронов, атомов и радиации. Кинетическая энергия падающих электронов и ионов, а также энергия их рекомбинации на поверхности пылинки вносят свой вклад в нагрев частицы. Кроме того, на поверхности происходит тепловыделение при осаждении, экзотермические реакции, рекомбинация диссоциированных молекул и т.д. (более подробное описание модели см. [3, 4]).

В модели настоящей работы учитывается нагрев за счет потоков электронов и ионов, их рекомбинации на поверхности и охлаждение за счет радиационного излучения и испарения. Каждое поглощение ионов на пылинке приводит к образованию атома, и энергия, выделяемая в этом случае, равна потенциалу ионизации атома газа. Потеря энергии в виде излучения учитывалась в соответствии с законом излучения черного тела с учетом поправки из теории Ми. При повышении температуры пылинки могут происходить фазовые переходы вещества пылинки. В проведенных расчетах она переходит вначале из твердого состояния в жидкое, а затем, при достижении температуры кипения, интенсивно теряет массу за счет испарения. Во время фазового перехода температура остается постоянной.

Были проведены расчеты процесса нагрева первоначально холодной пылинки в однородной дейтериевой плазме вблизи стенки дивертора. Для расчета выбраны следующие параметры [12]:  $T_e = 3.0 eV$ ,  $T_i = 0.7 eV$ ,  $T_a = 0.2 eV$ ,  $n_e = n_i = n_a = 2 \times 10^{14} cm^{-3}$ , начальная температура пылинки  $T_{d0} = 1000 K$ , радиус  $R_{d0} = 0.5 \mu m$ .

На рисунке 3 приведены зависимости температуры и радиуса пылинки от времени. На рисунке 3 виден фазовый переход из твердого в жидкое состояние при температуре плавления материала пылинки  $T_{melting} = 3695 K$ . В первые  $20 \mu s$  температура пылинки растет до значения  $3695 K$ , потом в интервале времени и от  $20 \mu s$  до  $100 \mu s$  температура не меняется, так как поступающая энергия затрачивается на процесс плавления пылинки. После перехода в жидкое состояние температура начинает быстро расти до начала кипения пылинки при  $T_{vaporation} = 4850 K$ . В процессе кипения пылинка начинает усиленно терять массу, ее радиус уменьшается до нуля при  $3000 \mu s$ .

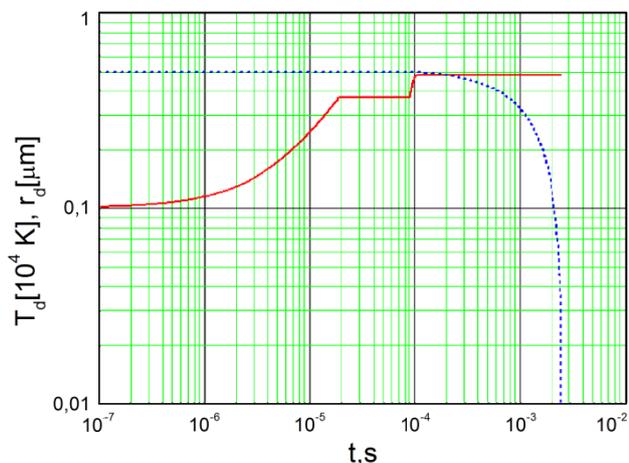


Рисунок 3 – Изменение температуры (сплошная линия) и радиуса (пунктирная линия) пылинки при ее нагреве

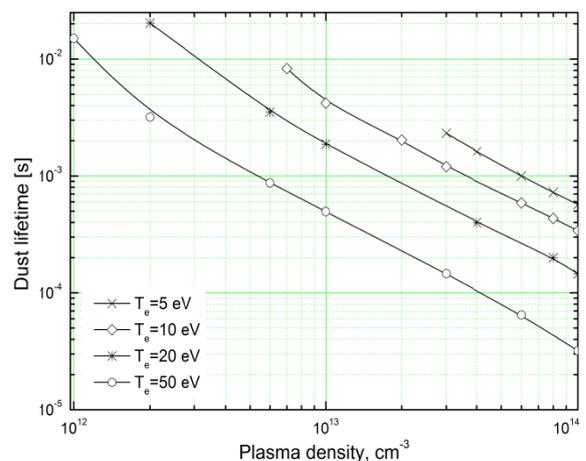


Рисунок 4 – Время жизни пылинки в однородной дейтериевой плазме

На рисунке 4 показаны зависимости время жизни пылинки в дейтериевой плазме от плотности при различных значениях температуры электронов. Видно, что с ростом температуры электронов время жизни пылинки уменьшается и анализ показывает, что основной причиной является увеличение заряда пылинки.

**Заключение.** В работе исследовано влияние магнитного поля на заряд пылинок, динамика и время жизни пылинки в пристеночной плазме дивертора. На основе методов частиц в ячейке и Монте Карло построена вычислительная модель и выполнены расчеты зависимости заряда пылинки и потоков частиц плазмы на ее поверхность от времени. Показано, что сильное магнитное поле оказывает значительное влияние на процесс зарядки пылинок в плазме дивертора.

Построена вычислительная модель для описания нагрева и испарения пылинки в плазме, выполнены расчеты, которые позволяют оценить время жизни и путь пылинки в пристеночной плазме дивертора.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках гранта 3112/ГФ4 2015(ЭП-6) и Российского фонда фундаментальных исследований - грант 14-02-00779.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] V.N. Tsytoich and J. Winter // *Phys.-Usp.* - 1998. - №41. – P. 815.
- [2] V.E. Fortov, A.G. Khrapak, S.A. Khrapak, V.I. Molotkov, and O.F. Petrov // *Phys. Usp.* - 2004. - №47. – P. 447.
- [3] A. Yu. Pigarov, S. I. Krashennnikov and et al. // *Physics of Plasmas*. - 2005. - №12. – P. 122508.
- [4] L. Vignitchouk, P. Tolias and S. Ratynskaia // *Plasma Phys. Control. Fusion*. - 2014. - №56. – P. 095005.
- [5] S.A. Maiorov, S.V. Vladimirov, and N.F. Cramer // *Plasma Physics Reports*. - 2002. - №28. – P. 946.
- [6] S.A. Maiorov // *Plasma Physics Reports*. - 2005. - №31. – P. 749.
- [7] T.S. Ramazanov, S.K. Kodanova et al., // *Eur. Phys. Letters*. - 2011. - №96. – P. 45004.
- [8] V. N. Tsytoich, N. Sato, G.E. Morfill // *New Journal of Phys.* - 2003. - №5. – P. 43.1-43.9.
- [9] Y. Tomita, G. Kawamura, T. Yamada, O. Ishihara // *J. Plasma Fusion Ser.* - 2009. - №8. – P. 273-276.
- [10] S.A. Maiorov // *Plasma Physics Reports*. - 2006. - №32. – P. 802.
- [11] S.A. Maiorov, B.A. Klumov // *Bulletin of the Lebedev Phys. Inst.* - 2013. - №40. – P. 285.
- [12] F. Taccogna, R. Schneider, K. Matyash, S.Longo, M. Capitelli, D. Tshhakaya // *Contrib. Plasma Phys.* - 2008. - №48. – P. 147-152.

#### REFERENCES

- [1] V.N. Tsytoich and J. Winter *Phys.-Usp.*, **1998**, 41, 815 (in Eng.).
- [2] V.E. Fortov, A.G. Khrapak, S.A. Khrapak, V.I. Molotkov, and O.F. Petrov *Phys. Usp.*, **2004**, 47, 447 (in Eng.).
- [3] A. Yu. Pigarov, S. I. Krashennnikov and et al. *Physics of Plasmas* **2005**, 12, 122508 (in Eng.).
- [4] L. Vignitchouk, P. Tolias and S. Ratynskaia *Plasma Phys. Control. Fusion*, **2014**, 56, 095005 (in Eng.).
- [5] S.A. Maiorov, S.V. Vladimirov, and N.F. Cramer *Plasma Physics Reports* **2002**, 28, 946 (in Eng.).
- [6] S.A. Maiorov *Plasma Physics Reports* **2005**, 31, 749 (in Eng.).
- [7] T.S. Ramazanov, S.K. Kodanova et al. *Eur. Phys. Letters* **2011**, 96, 45004 (in Eng.).
- [8] V. N. Tsytoich, N. Sato, G.E. Morfill *New Journal of Phys.* **2003**, 5, 43.1-43.9 (in Eng.).
- [9] Y. Tomita, G. Kawamura, T. Yamada, O. Ishihara *J. Plasma Fusion Ser.* **2009**, 8, 273-276 (in Eng.).
- [10] S.A. Maiorov *Plasma Physics Reports* **2006**, 32, 802 (in Eng.).
- [11] S.A. Maiorov, B.A. Klumov *Bulletin of the Lebedev Phys. Inst.* **2013**, 40, 285 (in Eng.).
- [12] F. Taccogna, R. Schneider, K. Matyash, S.Longo, M. Capitelli, D. Tshhakaya *Contrib. Plasma Phys.* **2008**, 48, 147-152 (in Eng.).

### ТЕРМОЯДРОЛЫҚ РЕАКТОРДЫҢ ҚАБЫРҒАЛЫҚ ПЛАЗМАСЫНДА ТОЗАНДЫ БӨЛШЕКТИҢ ДИНАМИКАСЫ

Н. Х. Бастықова, С. К. Коданова, Т. С. Рамазанов, С. А. Майоров

**Тірек сөздер:** термоядролық плазма, дивертор, тозанды бөлшек, тозанды бөлшектің заряды.

**Аннотация.** Жұмыста тозанды бөлшектің зарядына магнит өрісінің әсері, сондай-ақ термоядролық реактор қабырғасы маңындағы плазмада тозанды бөлшектің динамикасы мен өмір сүру ұзақтығы зерттелінді. Қабырғалық плазмада магнит өрісі тозанды бөлшектің зарядталу процесіне елеулі әсер етуі мүмкін. Тозанды бөлшектердің қозғалысы, олардың булануы, негізінен, плазма құрамын, және тиісінше оның транспорттық қасиеттерін анықтайды. Магнит өрісінің әсерін ескере отырып тозанды бөлшектің зарядының сипаттамалары есептелген. Осы есептеулер нәтижесінде тозанды бөлшектің заряды және оның бетіндегі плазма бөлшектерінің ағыны алынды. Қабырғааралық плазмасының типтік параметрлері үшін реактор қабырғасында пайда болатын тозанды бөлшектің эволюциясы зерттелді. Бұл есептеулер нәтижесінде уақыт бойынша тозанды бөлшектің температурасы мен радиусының таралулары анықталды. Осы есептеулер негізінде, термоядролық реактордың қабырғалық плазмада тозанды бөлшектің өмір сүру ұзақтығы мен жүрілген жолы бағаланды.

Поступила 15.15.2015 г.

---

**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](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 сайте:

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

<http://www.physics-mathematics.kz>

Редактор *М. С. Ахметова*

Верстка на компьютере *Д. Н. Калкабековой*

Подписано в печать 25.09.2015.

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

11,0 п.л. Тираж 300. Заказ 5.