

УДК 539.9

Н.Х. Бастыкова^{1,*}, С.К. Коданова¹, Т.С. Рамазанов¹, С.А. Майоров²¹НИИЭТФ, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан²Институт общей физики РАН, Москва, Россия

*e-mail: bastykova_nuriya@physics.kz

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДИНАМИКУ ПЫЛИНКИ В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Аннотация. В данной работе изучено влияние магнитного поля на динамику пылинки в пристеночной плазме термоядерного реактора. На основе методов частиц в ячейке и Монте-Карло построена вычислительная модель эволюции вольфрамовой пылинки, сформированных на поверхности стенки реактора. В модели решены уравнения движения, уравнения массового и энергетического баланса и уравнения для заряда пылевой частицы. Определены зависимости характерных параметров (заряд, температура, радиус и тепловые потоки) пылевых частиц. На основе этих расчетов была оценена время жизни вольфрамовой пылинки в плазме. Было обнаружено, что магнитное поле может оказывать значительное влияние на процессы зарядки и времени жизни пылинки в плазме. Полученные результаты показывают, что магнитное поле приводит к уменьшению модуля заряда пылевой частицы, что приводит к подавлению теплового потока частиц плазмы на пылинку, тем самым увеличивая его время жизни. Кроме того, магнитное поле увеличивает время зарядки мелких пылевых частиц из-за ограничения траектории вдоль линий магнитного поля.

Ключевые слова: пристеночная плазма термоядерного реактора, заряд пылинки, время жизни пылинки.

Введение

Механизмы появления пылевых частиц и их удержания в плазменном объеме являются актуальными задачами, поэтому исследуются многими учеными как теоретически, так и экспериментально [1-10]. Пристеночная пылевая плазма, которая образуется в результате взаимодействия мощных энергетических потоков с материалами стенки, вследствие чего в плазму инжектируются частицы макроскопических (микронных) размеров, называемых пылинками. Образовавшиеся таким образом пылевые частицы, удерживаясь в плазме, могут влиять не только на полный перенос тепла, но и играют важную роль в общей концепции взаимодействия плазмы со стенками реактора и формировании положительного энергетического выхода. Перенос пылинок от поверхности стенки вглубь реактора и их последующее испарение могут оказывать значительное влияние на работу реактора.

Исследование процесса зарядки пылевых частиц является одной из ключевых задач физики пылевой плазмы, так как позво-

ляет получить информацию о заряде и потенциале взаимодействия пылевых частиц [11-13]. Эта информация необходима для построения теории пылевой плазмы, способной описать процессы формирования, существования, эволюции и разрушения пылеобразования в термоядерных реакторах. Инжектированные пылинки попадая в плазму приобретают большой отрицательный заряд так как тепловые скорости электронов намного превосходят соответствующие скорости ионов. Также частицы могут зарядиться положительно, если потеря электронов из-за облучения ультрафиолетовым излучением в разряде превысит электронный ток зарядки.

Результаты исследования пыли из установки TEXTOR с помощью сканирующего электронного микроскопа показывают, что большинство частиц являются хлопьями осажденных слоев [6]. Было установлено, что около 15% пыли являются ферритмагнитными, в этом случае магнитные частицы будут взаимодействовать с магнитными полями и их градиентами.

В связи с этим очень важно учитывать магнитное поле в процессе зарядки пылевых частиц в пристеночной плазме термоядерных

реакторов. Учет влияния сильного магнитного поля на процессе зарядки пылевых частиц в пристеночной плазме необходим для исследования влияния пылинок на работу термоядерных реакторов. В работах [14-15] заряд пылинок с учетом магнитного поля рассчитывался в приближении ограниченных орбит (OML). Было получено, что влияние магнитного поля на заряд пылинки начинается с некоторого критического значения магнитного поля, которое определяется из равенства ларморовского радиуса электрона и диаметра пылинки.

Значение заряда или плавающий потенциал пылинки может также повлиять на время жизни, поскольку они заметно влияют на ионные и электронные потоки на пылинку. Время жизни является одним из самых важных характеристик динамики пылевых частиц в термоядерной плазме, поскольку именно оно определяет их проникновения вглубь реактора и их последующее влияние на работу реактора.

Влияние индукции магнитного поля на заряд пылевой частицы

Магнитное поле влияет на процесс зарядки пылинки в первую очередь за счет замедления электронов [14,16]. 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.

В данной работе было исследовано влияние магнитного поля на процессы зарядки пылинки в пристеночной плазме термоядерного реактора. Заряд пылевой частицы рассчитывался методом частиц в ячейках и Монте-Карло. В процедуре розыгрыша столкновений методом Монте-Карло проводился учет столкновений ионов с атомами [17,18]. 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.

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 пристеночной плазмы термоядерного реактора: плотности электронов и ионов равны 10^{18} м^{-3} , температура электронов и ионов 18.7 эВ. Были получены значения заряда для пылинок радиусом 0,5 - 6 мкм при различных значениях магнитного поля $B \div (4-10) \text{ Т}$.

На рисунке 1 показано временное распределение заряда пылевой частицы при различных значениях магнитного поля. Как видно из рисунка, с увеличением значения магнитного поля заряд пылевой частицы уменьшается, а время зарядки увеличивается. При сильных магнитных полях электроны и ионы намагничены и двигаются по

силовым линиям магнитного поля и могут попасть, только если силовые линии магнитного поля будет пересекать поверхность пылинки. Полученные результаты по определению заряда и времени зарядки пылевой частицы в присутствии магнитного поля были анализированы для различных значений радиуса пылинки (рисунок 2 и 3). На рисунке 2 приведены отношение заряда пылевой частицы в присутствии магнитного поля к заряду пылевых частиц без учета магнитного поля. При значениях магнитного поля 4Т и 6Т видно умеренное влияние магнитного поля на заряд пылевой частицы. В случае, когда магнитное поле 10Т видно сильное различие заряда пылевых частиц с увеличением радиуса пылинки.

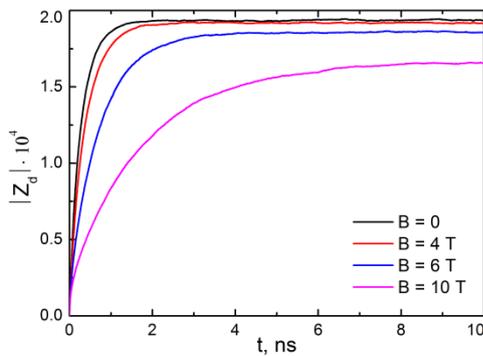


Рисунок 1 – Временное распределение заряда пылевой частицы ($a=3\mu\text{m}$) при различных значениях магнитного поля

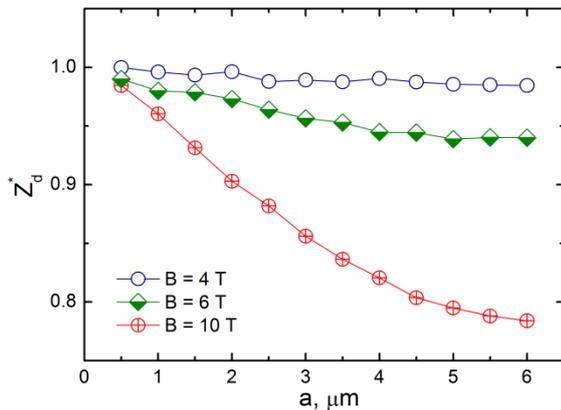


Рисунок 2 - Отношение заряда пылевых частиц в присутствии/без учета магнитного поля в зависимости от радиуса пылинки

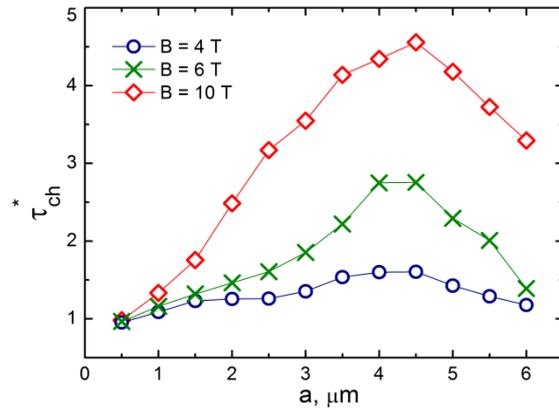


Рисунок 3 – Отношение времени зарядки пылевых частиц в присутствии/без учета магнитного поля в зависимости от радиуса пылинки

Как видно из рисунка 3, учет магнитного поля увеличивает время зарядки пылевых частиц при $a < 5 \mu\text{m}$ за счет ограничения траектории по силовым линиям магнитного поля. С увеличением радиуса пылинки время зарядки уменьшается, вследствие чего их отношение уменьшается. Чем больше размер пылинки тем меньше будет время зарядки.

Влияние магнитного поля на время жизни пылинки

Для определения время жизни пылевых частиц необходимо исследовать их динамические характеристики в пристеночной области термоядерного реактора. Для этих целей разработана модель, которая основана на решении уравнений движения, уравнений баланса массы и энергии, а также уравнения для заряда пылинки. Предполагается, что процессы массовой абляции являются сферически симметричными и пылинка сохраняет свою сферическую форму.

Рассматривается время жизни индивидуальной пылинки в пристеночной плазме термоядерного реактора. Расчеты проводились для следующих параметров плазмы, $T_e = T_i = 18.7 \text{ eV}$, $T_a = 0.3 T_i$, $n_e = n_i = n_a = 10^{18} \text{ m}^{-3}$ температуры и плотности электронов, ионов и нейтральных атомов, электронов, ионов и соответственно. Фоновая плазма предполагается дейтериевой плазмы без примесей.

На рисунке 4 показано зависимость времени жизни пылинки в однородной дейтериевой плазме в зависимости от начального радиуса пылевой частицы при напря-

женности магнитного поля $B = 10$ Т. Как показывают результаты, с учетом сильного магнитного поля происходит увеличение время жизни пылевой частицы. Как видно из рисунка 2, чем больше размер пылинки, тем сильнее магнитное поле влияет на заряд пылинки, что приводит к подавлению теплового потока частиц плазмы на поверхность пылинки и к увеличению ее времени жизни.

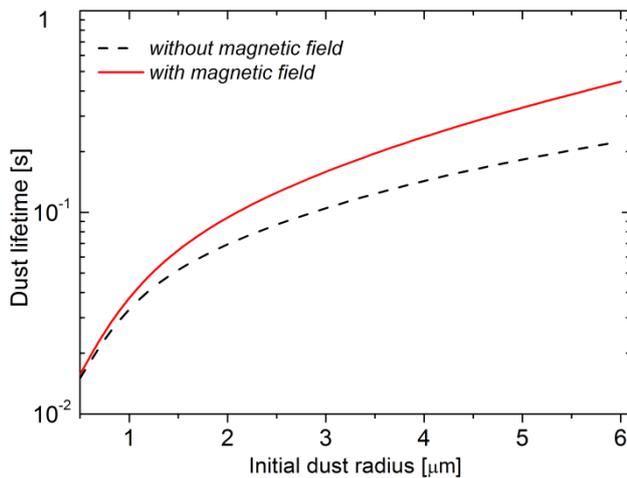


Рисунок 4 - Время жизни пылинки в однородной дейтериевой плазме в присутствии (сплошная линия) и без учета (пунктирная) магнитного поля в зависимости от радиуса пылинки

Благодарности. Работа поддержана грантами Министерства образования и науки Республики Казахстан № 3112/GF4.

Список литературы

- 1 J. Winter (2000, February). Dust: A new challenge in nuclear fusion research. *Physics of Plasmas* 7, p. 3862.
- 2 A. Yu. Pigarov, S. I. Krasheninnikov, T.K. Soboleva, T.D. Rognlien (2005, December). Dust-particle transport in tokamak edge plasmas. *Physics of Plasmas* 12, p. 122508.
- 3 V.N. Tsytoich and J. Winter (1998, August). On the role of dust in fusion devices. *Physics - Uspekhi* 41, p. 815.
- 4 G. Federici, C.H. Skinner, J.N. Brooks, J.P. Coad, C. Grisolia, A.A. Haasz, A. Hasanein, V. Philipps, C.S. Pitcher, J. Roth, W.R. Wampler and D.G. Whyte (2001, July). Plasma-material interactions in current tokamaks and their implications for next step fusion reactors. *Nucl. Fusion* 41, p. 1967.
- 5 J. Winter (2004, November). Dust in fusion devices – a multi-faceted problem connecting high- and low-temperature plasma physics. *Plasma Phys. Control. Fusion* 46, p. B583.
- 6 J. Winter (1998, January). Dust in fusion devices – experimental evidence, possible sources and consequences. *Plasma Phys. Control. Fusion* 40, p. 1201.
- 7 J.P. Sharpe, V. Rohde (2003, March). [Characterization of dust collected from ASDEX-Upgrade and LHD](#). *J. Nucl. Mater.* 313-316, p. 455.
- 8 A. Yu. Pigarov, R.D. Smirnov, S.I. Krasheninnikov, T.D. Rognlien, M. Rosenberg, and T.K. Soboleva (2007, June). Transport of dust particles in tokamak devices. *J. Nucl. Materials* 363-365, p. 216.
- 9 L. Vignitchouk, P. Tolia and S. Ratynskaia (2014, July). Dust-wall and dust-plasma interaction in the MIGRAINE code. *Plasma Physics and Controlled Fusion* 56, p. 095005.
- 10 G.I. Sukhinin, A.V. Fedoseev, T.S. Ramazanov, K.N. Dzhumagulova, R.Z. Amangaliyeva (2007, December). Dust particle charge distribution in a stratified glow discharge. *Journal of Physics D - Applied Physics* 40, pp. 7761-7765.
- 11 T.S. Ramazanov, S.K. Kodanova, K.N. Dzhumagulova, N.Kh. Bastykova (2011, November). Dust particle charge distribution in a stratified glow discharge. *EPL* 96, p. 45004.
- 12 N.Kh. Bastykova, A.Zs. Kovács, S.K. Kodanova, T.S. Ramazanov, I. Korolov, P. Hartmann, Z. Donkó (2015, October). Controlled levitation of dust particles in RF+DC discharges. *Contributions to Plasma Physics* 55, pp.671-676.
- 13 V. N. Tsytoich, N. Sato, G.E. Morfill (2003, May). Note on the charging and spinning of dust particles in complex plasmas in a strong magnetic field. *New Journal of Physics* 5, p. 43.1.
- 14 Y. Tomita, G. Kawamura, T. Yamada, O. Ishihara (2009, September). Charging of dust particles in Magnetic field. *J. Plasma Fusion Res. Series* 8, pp. 273-276.
- 15 S.K. Kodanova, N.Kh. Bastykova, T.S. Ramazanov, S.A. Maiorov (2016, April). The Dust Particle Evolution in Divertor Plasma. *IEEE Transactions on Plasma Science* 44, p. 525.
- 16 S.A. Maiorov, S.V. Vladimirov, and N.F. Cramer (2002, November). Calculation of the

Grain Charge Fluctuations in a Dusty Plasmas. Plasma Physics Reports 28, p. 946.
17 S.A. Maiorov (2005, August). Influence of the Trapped Ions on the Screening Effect and

Frictional Force in a Dusty Plasmas. Plasma Physics Reports 31, p. 749.

Принято к печати 04.10.2017

Н.Х. Бастыкова^{1,*}, С.К. Коданова¹, Т.С. Рамазанов¹, С.А. Майоров²

¹*НИИЭТФ, КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

²*Институт общей физики РАН, Москва, Россия*

**e-mail: bastykova_nuriya@physics.kz*

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДИНАМИКУ ПЫЛИНКИ В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Аннотация. В данной работе изучено влияние магнитного поля на динамику пылинки в пристеночной плазме термоядерного реактора. На основе методов частиц в ячейке и Монте-Карло построена вычислительная модель эволюции вольфрамовой пылинки, сформированных на поверхности стенки реактора. В модели решены уравнения движения, уравнения массового и энергетического баланса и уравнения для заряда пылевой частицы. Определены зависимости характерных параметров (заряд, температура, радиус и тепловые потоки) пылевых частиц. На основе этих расчетов была оценена время жизни вольфрамовой пылинки в плазме. Было обнаружено, что магнитное поле может оказывать значительное влияние на процессы зарядки и времени жизни пылинки в плазме. Полученные результаты показывают, что магнитное поле приводит к уменьшению модуля заряда пылевой частицы, что приводит к подавлению теплового потока частиц плазмы на пылинку, тем самым увеличивая его время жизни. Кроме того, магнитное поле увеличивает время зарядки мелких пылевых частиц из-за ограничения траектории вдоль линий магнитного поля.

Ключевые слова: Пристеночная плазма термоядерного реактора, заряд пылинки, время жизни пылинки.

Н.Х. Бастыкова^{1,*}, С.К. Коданова¹, Т.С. Рамазанов¹, С.А. Майоров²

¹*ЭТФЗИ, Эл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан*

²*РАФ жалпы физика институты, Мәскеу, Ресей*

ТЕРМОЯДРОЛЫҚ РЕАКТОРДЫҢ ҚАБЫРҒАЛЫҚ ПЛАЗМАСЫНДА ТОЗАҢДЫ БӨЛШЕКТІҢ ДИНАМИКАСЫНА МАГНИТ ӨРІСІНІҢ ӘСЕРІ

Аннотация. Бұл жұмыста термоядролық реактордың қабырғалық плазмасында тозаңды бөлшектердің динамикасына магнит өрісінің әсері зерттелді. Ұяшықтағы бөлшектер және Монте-Карло әдістері негізінде реактордың қабырға бетінде түзілген вольфрам тозаңды бөлшектерінің жетілуі есептеу моделі тұрғызылды. Модельде қозғалыс теңдеулері, массалық және энергетикалық баланс теңдеулері және де тозаңды бөлшектердің зарядының теңдеуі шешілді. Тозаңды бөлшектердің параметрлерінің (заряд, температура, радиус және жылу ағындары) тәуелділігі анықталды. Осы есептеулердің негізінде плазмадағы вольфрам тозаңды бөлшектерінің өмір сүру уақыты бағаланды. Магнит өрісінің плазмадағы тозаңды бөлшектердің зарядталу процесстеріне және өмір сүруіне әсер етуі мүмкін екендігі анықталды. Алынған нәтижелер магнит өрісінің тозаңды бөлшектердің бетіне жылу ағынының бәсеңдеу себебінен оның зарядының модулін азайта отырып, өмір сүру мерзімін арттыратынын көрсетті. Сонымен қатар, магнит өрісі магнит өрісінің сызықтарының бойымен шектелген

зарядталған бөлшектердің қозғалысына байланысты ұсақ тозаңды бөлшектердің зарядталу уақытын арттырды.

Түйін сөздер: Термоядролық реактордың қабырғалық плазмасы, тозаңды бөлшектің заряды, Тоzaңды бөлшектің өмір сүру мерзімі.

N.Kh. Bastykova¹, S.K. Kodanova¹, T.S. Ramazanov¹, S.A. Maiorov²

¹IETP, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan

²General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

THE EFFECT OF MAGNETIC FIELD ON DUST DYNAMIC IN THE EDGE FUSION PLASMA

Abstract. The effect of the magnetic field on dust dynamic and lifetime in the edge fusion plasma has been studied. On the basis of particle-in-the-cell and Monte Carlo methods, a computational model of evolution of tungsten dust particle formed on the surface of the reactor wall was constructed. In the model the equations of motion, the equations of mass and energy balance, and equations for the dust particle charge are solved. The time dependence of the characteristic parameters (charge, temperature and radius, heat fluxes) of the dust particle were determined. On the basis of these calculations, the tungsten dust lifetime in the edge fusion plasma was estimated. It was found that the magnetic field can have a significant effect on charging processes and the lifetime of dust particles in the edge fusion plasma. The obtained results show that the magnetic field causes a decrease in the charge modulus of the dust particle, which leads to suppression of the heat flux of plasma particles on the dust particle, thereby increasing its lifetime. Also, the magnetic field increases the charging time of small dust particles due to the limitation of the trajectory along the magnetic field lines.

Keywords: Edge fusion plasma, Dust particle charge, Dust lifetime.