

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. 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.

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. Бастыкова¹, С. К. Коданова¹, Т. С. Рамазанов¹, С. А. Майоров²

¹НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

²Институт 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 зарядка пылинок с учетом магнитного поля. В результате этих расчетов получены зависимости заряда пылинки и потоков частиц плазмы на ее поверхность. Для характеристических 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} см $^{-3}$, температура ионов 0,7 эВ и электронов 3 эВ. Были получены значения заряда для пылинок радиусом $0,5; 1; 2 \mu m$ при различных значениях магнитного поля $B = (10-10^5)$ Гс. На рисунке 1 показаны зависимости от времени заряда пылевой частицы с радиусом $0,5 \mu m$, первоначально нейтральной, полученные методом частиц в ячейке и рассчитанные по теории OML.

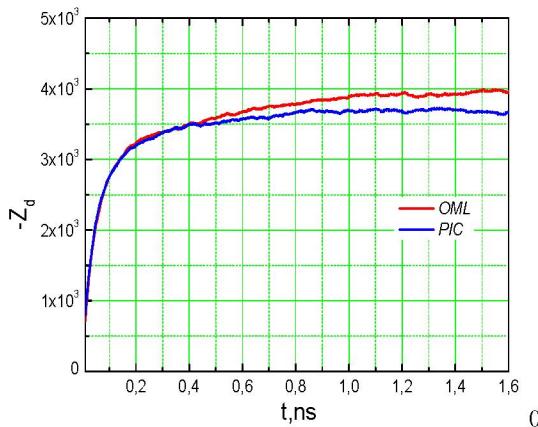


Рисунок 1 – Заряд пылинки в зависимости от времени (нс)

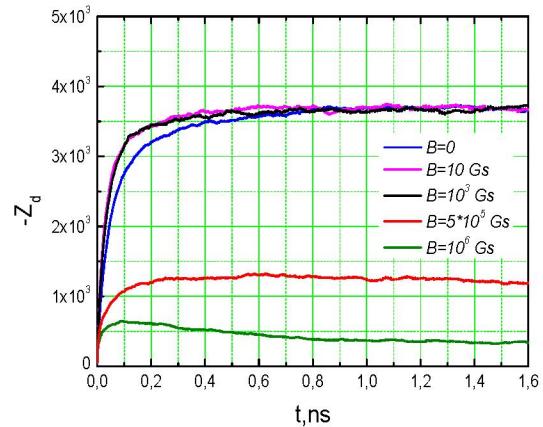


Рисунок 2 – Заряд пылинки в зависимости от времени (нс) при различных значениях магнитного поля

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 πa^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 $B_{cr}^e (kG)a(\mu m) > 41.37 \sqrt{T_e(eV)/3(eV)}$. В данной работе для параметров плазмы дивертора и пылинки с радиусом $a = 0.5 \mu m$ значение критического магнитного поля равна $B_{cr}^e = 8.5 \cdot 10^4 G$.

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 энергией, 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 поправкой 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]: $T_e = 3.0\text{ eV}$, $T_i = 0.7\text{ eV}$, $T_a = 0.2\text{ eV}$, $n_e = n_i = n_a = 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, начальная температура пылинки $T_{d0} = 1000\text{ K}$, радиус $R_{d0} = 0.5\text{ }\mu\text{m}$.

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 $T_{melting} = 3695\text{ K}$. В первые 20 μs температура пылинки растет до значения 3695 K, потом в интервале времени от 20 μs до 100 μs 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 $T_{vaporation} = 4850\text{ K}$. В процессе кипения пылинка начинает усиленно терять массу, ее радиус уменьшается до нуля при 3000 μs .

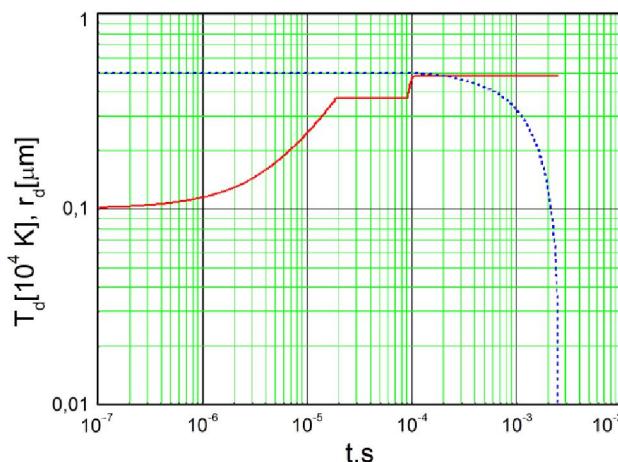


Рисунок 3 – Изменение температуры (сплошная линия) и радиуса (пунктирная линия) пылинки при ее нагреве

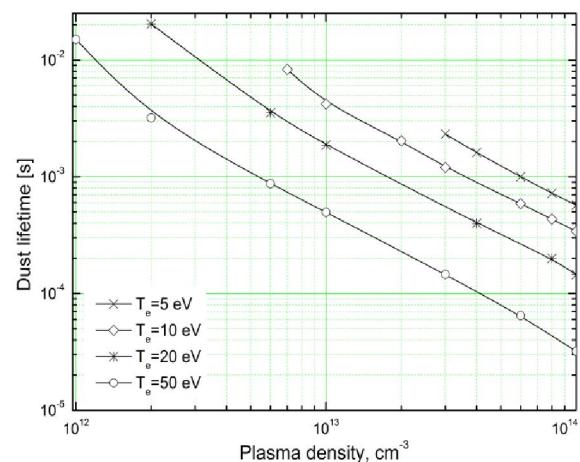


Рисунок 4 – Время жизни пылинки в однородной дейтериевой плазме

На рисунке 4 показаны зависимости времени 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. Tsytovich 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. Krasheninnikov 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. Tsytovich, 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. Tskhakaya // Contrib. Plasma Phys. - 2008. - №48. – P. 147-152.

REFERENCES

- [1] V.N. Tsytovich 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. Krasheninnikov 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. Tsytovich, 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. Tskhakaya *Contrib. Plasma Phys.* **2008**, 48, 147-152 (in Eng.).

ТЕРМОЯДРОЛЫҚ РЕАКТОРДЫҢ ҚАБЫРҒАЛЫҚ ПЛАЗМАСЫНДА ТОЗАНДЫ БӨЛШЕКТИҢ ДИНАМИКАСЫ

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

Тірек сөздер: термоядролық плазма, дивертор, тозанды бөлшектек, тозанды бөлшектің заряды.

Аннотация. Жұмыста тозанды бөлшектің зарядына магнит өрісінің әсері, сондай-ак термоядролық реактор қабырғасы маңындағы плазмада тозанды бөлшектің динамикасы мен өмір сүру ұзактығы зерттелінді. Қабырғалық плазмада магнит өрісі тозанды бөлшектің зарядталу процесіне елеулі әсер етуі мүмкін. Тозанды бөлшектердің козғалысы, 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 таралу лары анықталды. Осы есептеулер негізінде, термоядролық реактордың қабырғалық плазмада тозанды бөлшектің өмір сүру ұзактығы мен жүрілген жолы бағаланды.

Поступила 15.15.2015 г.