

Т.С. Рамазанов\*, С.К. Коданова, Н.Х. Бастыкова

НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

\*E-mail: ramazan@physics.kz

## ВЛИЯНИЕ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

**Аннотация.** В данной работе исследовано влияние пылевых частиц на характеристики пристеночной плазмы термоядерного реактора. Предложена математическая модель, где пылинка нагревается за счет потоков электронов и ионов и их рекомбинации на поверхности, а также за счет эмиссионных процессов и охлаждается за счет теплового излучения и испарения. Получены потоки энергии на пылинку и мощность поглощения энергии пылевыми частицами в пристеночной плазме термоядерного реактора. Показано, что инжекция пылевых частиц вследствие взаимодействия плазмы со стенкой термоядерного реактора приводит к потерям энергии плазменного шнура и уменьшению положительного энергетического выхода термоядерных реакций.

**Ключевые слова:** термоядерный реактор, пристеночная плазма, пылевая частица, тепловое излучение, эмиссионные процессы.

### Введение

Исследование влияния пыли в установках управляемого термоядерного синтеза стало важным направлением в ходе реализации крупномасштабных экспериментов с термоядерной плазмой. Определение механизмов образования пыли, исследование взаимодействия пылинок с плазмой и с поверхностью реактора, моделирование переноса пылинок и оценка их влияния на характеристики реактора, безопасность термоядерных установок – все эти вопросы занимают большое место в современных исследованиях проблем управляемого термоядерного синтеза.

Механизмы появления пылевых частиц и их удержания в плазменном объеме являются актуальными задачами, поэтому исследуются многими учеными как теоретически, так и экспериментально [1-6]. Поток горячей примеси из центральной области реактора на стенки может привести к поверхностным разрушениям, то есть к испарению поверхности стенки, вследствие чего, в плазму могут инжектироваться не только нейтральные частицы в виде газа, но и твердые частицы различных форм, от неправильной формы до почти идеальных сфер. Также существует другой механизм формирования пылевых частиц в термоядерных реакторах, такой как конденсация вещества из перенасыщенного пара сложных молекул и

кластеров. В работах [3-6] были предложены различные механизмы формирования пылевых частиц в термоядерных устройствах, в том числе при эрозии стенок, ионно-молекулярных реакциях и слипании пылевых частиц до достижения больших размеров. Размеры частиц варьируются в очень широком диапазоне, от нанометров до сотен микрометров. Состав частиц включает в себя материалы, используемые для пластин дивертора, первой стенки и других внутренних элементов конструкций, которыми обычно являются графит, титан, вольфрам, бериллий и сталь.

### Математическая модель

Пылевая частица, находящаяся в плазме, подвергается воздействию потоков ионов, электронов, атомов и радиации. 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.

В предложенной модели пылинка нагревается за счет потоков электронов и ионов и их рекомбинации на поверхности, а также за счет эмиссионных процессов и охлаждается за счет радиационного излучения и испарения.

Поток энергии за счет поглощенных электронов и ионов определяется следующими уравнениями:

$$\Delta Q_e^{z \leq 0} = 2A_d T_e \Gamma_e^{th} (1 - z + \frac{z^2}{2}) \quad (1)$$

$$\Delta Q_e^{z \geq 0} = 2A_d T_e \Gamma_e^{th} e^{-z} \quad (2)$$

$$\Delta Q_i^{z \leq 0} = A_d T_i \Gamma_i^{th} \left\{ \left[ \frac{1}{2} (u_{i,+}^2) u_{i,+} + \frac{3}{4} u_{i,+} - \frac{1}{2} u_{i,+}^3 \right] \frac{e^{-u_{i,+}^2}}{2u_{i,+}} + \right.$$

$$\left. + \left[ \frac{1}{2} (u_{i,-}^2) u_{i,-} + \frac{3}{4} u_{i,-} - \frac{1}{2} u_{i,-}^3 \right] \frac{e^{-u_{i,-}^2}}{2u_{i,-}} + \frac{\sqrt{\pi} \operatorname{erf} u + \operatorname{erf} u}{2} \Psi_i(z) \right\} \quad (4)$$

$$\Delta Q_i^{z \geq 0} = A_d T_i \Gamma_i^{th} \left\{ \left[ \frac{5}{4} + \frac{Z_i z}{\tau_i} + \frac{1}{2} u_i^2 \right] e^{-u_i^2} + \right.$$

$$\left. + \frac{\sqrt{\pi} \operatorname{erf} u}{2} \Psi_i(z) \right\}, \quad (5)$$

$$\Psi_i(z) = \frac{3}{4} + \frac{Z_i z}{\tau_i} + \left( \frac{Z_i z}{\tau_i} \right)^2 + (3 + 2 \frac{Z_i z}{\tau_i} + u_i^2) u_i$$

где  $A_d$  - площадь пылевой частицы,  $v_{T_s} = \sqrt{T_s / m_s}$  тепловая скорость  $s$  частиц плазмы,  $\Gamma_s^{th} = n_s v_{T_s} / \sqrt{2\pi}$  - поток случайных частиц,  $\tau_i = T_i / T_e$  - отношение температуры ионов к температуре электронов,  $u_i = |v_i - v_d| / \sqrt{2} v_{Ti}$  - нормированная скорость потока ионов и  $u_{i,\pm} = u_i \pm \sqrt{-Z_i z / T_i}$ .

При достаточно большой температуре пылинки, электроны пылинки находящиеся вблизи ее поверхности, могут преодолеть потенциальный барьер и покинуть его, затратив на это энергию, равную работе выхода  $W_f$ . Следовательно, полная энергия за счет термоэлектронной эмиссии определяется следующим образом:

$$Q_{te}^{z \leq 0} = A_d \Gamma_{te}^{z \leq 0} \left( W_f + \frac{2 + 2\xi + \xi^2}{1 + \xi} T_d \right) \quad (6)$$

$$Q_{te}^{z \geq 0} = A_d \Gamma_{te}^{z \geq 0} \left( W_f + 2T_d - e \sqrt{z T_e} \right), \quad (7)$$

где  $\xi = -z T_e / T_d$  и  $\Gamma_{te} = -I_{te} / e A_d$ ,  $I_{te}$  - потоки электронов за счет термоэлектронной эмиссии (более подробно описано в главе 2.1).

Эмиссия электронов из поверхности пылинки под действием падающего пучка электронов также уносит энергию, равную соответствующей работе выхода из материала пылинки и средней кинетической энергии электрона. Таким образом, уравнение полной энергии за счет вторичной электронной эмиссий выражается следующими выражениями:

$$Q_{see}^{z \leq 0} = 3A_d W_f \frac{(1 + \zeta)(1 + 2\zeta)}{1 + 3\zeta} \Gamma_{see}^{z \leq 0} \quad (8)$$

$$Q_{see}^{z \geq 0} = 3A_d W_f \Gamma_{see}^{z \geq 0} \quad (9)$$

$$\Gamma_{see} = -I_{see} / e A_d$$

где, Ионы в непосредственной близости от металлических поверхностей (на расстоянии нескольких ангстрем) подвергаются с высокой вероятностью нейтрализации на поверхности. Существуют различные механизмы, которые могут привести к переносу заряда, среди которых более характерными являются процессы, не связанные с внутренней оболочкой металла и названные оже нейтрализацией и резонансной нейтрализацией. Вклад каждого процесса в общую скорость нейтрализации зависит от электронной структуры на поверхности металла и сорта иона, и также его энергии.

В данной работе предполагается, что вероятность нейтрализации, равна единице. Так как электростатическое взаимодействие с заряженной пылинкой будет влиять на энергетический баланс. Для простоты будем считать, что это увеличит наиболее вероятное расстояние нейтрализации  $z_m$  таким образом, сдвиг уровня будет примерно 2 эВ. Следовательно, нейтрализация ионов приведет к потенциальному энергосвободению  $E_{isn} = U_{iz} - W_f - 2 \text{ эВ}$  на один ион, достигающий поверхности

сти. Для водородоподобных ионов, падающих на W и Be, приближенными значениями  $E_{isn}$  являются 7 эВ и 6,6 эВ, соответственно, поток энергии задается следующим выражением:

$$Q_{isn} = A_d E_{isn} \Gamma_i, \quad (10)$$

где  $\Gamma_i = -I_i / Z_i e A_d$ .

Теряемая в виде излучения тепловая энергия в соответствии с законом излучения черного тела определяется следующим образом:

$$Q_{rad} = -A_d \sigma_{SB} \varepsilon_d(R_d, T_d) (T_d^4 - T_{wall}^4) \quad (11)$$

где  $\sigma_{SB}$  - постоянная Стефана-Больцмана,

$\varepsilon_d(R_d, T_d)$  - коэффициент излучения пылевой частицы, который вычисляется из теории Ми, [7], для вольфрама  $\varepsilon_d(R_d, T_d) = 0,4$ .

Тепловые потоки от окружающей плазмы могут вызвать фазовые переходы веществ пылинки. В данной работе рассматриваются переходы из твердого состояния в жидкое, а между этими состояниями происходит плавление при постоянной температуре.

Потеря массы за счет испарения пылинки оценивается по формуле Герца-Кнудсена, которая обеспечивает теоретически максимальный поток атомов, покидающих поверхность пылинки [8], и определяется следующим формулой:

$$\Delta M_d = -S_d \sqrt{\frac{m}{2\pi T_d}} P_{vap}(T_d) \Delta t \quad (12)$$

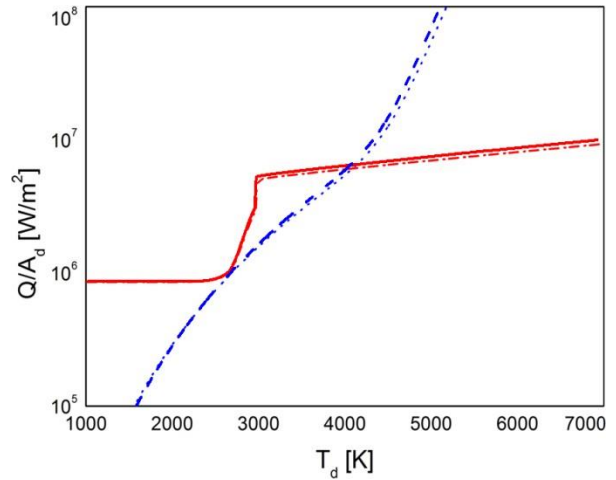
где  $m_{at}$  - масса атома,  $P_{vap}(T_d)$  - давление насыщающих паров материала пылинки, которое зависит от температуры пылинки  $T_d$  [9,10].

Потеря энергии за счет испарения пылинки определяется следующим выражением [11]:

$$\Delta Q_{vap} = \Delta M_d \times \begin{cases} h_d + \Delta h_{sub} & \text{if solid} \\ h_{d,sol}^{melt} + \Delta h_{sub} & \text{if melting} \\ h_d + \Delta h_{vap} & \text{if liquid} \end{cases} \quad (13)$$

где  $\Delta h_{sub}$  и  $\Delta h_{vap}$  - удельные энтальпии плавления и испарения, соответственно.

На рисунке 1 приведены нагревающий и охлаждающий потоки энергии в зависимости от температуры пылинки.



(- · - · -) - нагревающий поток энергии, результаты работ [192];  
 (·····) - охлаждающий поток энергии, результаты работ [192];  
 (—) - нагревающий поток энергии, результаты данной работы;  
 (- - -) - охлаждающий поток энергии, результаты данной работы

Рисунок 1 – Потоки энергии на пылинку в зависимости от температуры пылинки в однородной дейтериевой плазме с параметрами:  $T_e = T_i = 10eV$ ,

$$n_e = n_i = 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

Как видно из рисунка, при низких температурах нагревающий поток энергии является доминирующим, а при возрастании температуры увеличивается охлаждающий поток энергии за счет радиационного излучения и испарения. Потоки энергии на пылинку были сравнены с результатами работ [12] и имеют хорошие согласие.

На рисунке 2 показана мощность поглощения энергии пылевыми частицами при инжекции пылевых частиц со скоростью 1 мг/с. Как видно, из рисунка мощность поглощения энергии микронными пылевыми частицами имеет порядок около 15МВт. В процентных соотношениях это приводит к потерям энергии плазменного шнура термоядерного реактора до 25% на нагрев пыли (мощность плазменного шнура термоядерного реактора составляет около 70 МВт).

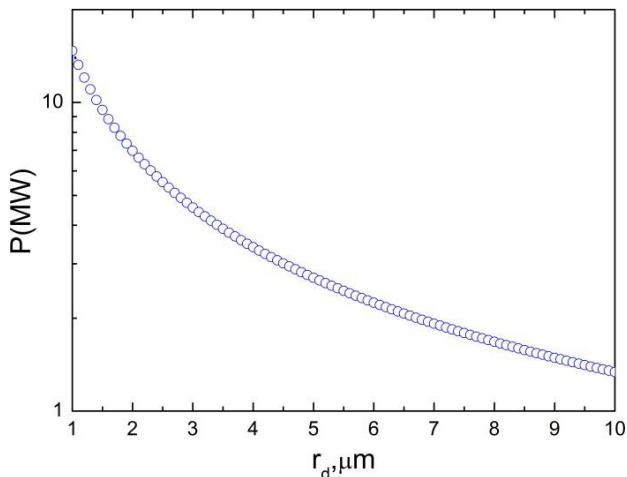


Рисунок 2 – Мощность поглощения энергии пылевыми частицами при инъекции пылевых частиц со скоростью 1 мг/с

### Заключение

Исследовано влияние пылевых частиц на характеристики пристеночной плазмы термоядерного реактора на основе разработанной математической модели. Получены потоки энергии на пылинку и мощность поглощения энергии пылевыми частицами в пристеночной плазме термоядерного реактора. Показано, что инъекция пылевых частиц вследствие взаимодействия плазмы со стенкой термоядерного реактора приводит к потерям энергии плазменного шнура и уменьшению положительного энергетического выхода термоядерных реакций.

### Список литературы

- 1 Winter J. Dust: A new challenge in nuclear fusion research? // *Physics of Plasmas*. – 2000. – Vol. 7. – P. 3862.
- 2 Pigarov A. Yu., Krasheninnikov S. I. et al. Dust-particle transport in tokamak edge plasmas // *Physics of Plasmas*. – 2005. – Vol. 12. – P. 122508.

3 Tsytovich V.N. and Winter J. On the role of dust in fusion devices // *Physics Uspekhi*. – 1998. – Vol. 41. – P. 815.

4 Federici G., Skinner C.H., Brooks J.N., Coad J.P., Grisolia C., Haasz A.A., Hassanein A., Philipps V., Pitcher C.S., Roth J., Wampler W.R. and Whyte D.G. Plasma-material interactions in current tokamaks and their implications for next step fusion reactors // *Nucl. Fusion*. – 2001. – Vol. 41. – P. 1967.

5 Winter J. Dust in fusion devices—a multi-faceted problem connecting high- and low-temperature plasma physics // *Plasma Phys. Control. Fusion*. – 2004. – Vol. 46. – P. B583.

6 Ohkawa T. Dust particles as a possible source of impurities in tokamaks // *Kakuyugo Kenkyu*. – 1977. – Vol. 37. – P. 117.

7 Tanaka Y., Smirnov R. D., Pigarov A. Yu., and Rosenberg M. Influence of emissivity on behavior of metallic dust particles in plasmas // *Phys. Plasmas*. – 2008. – Vol. 15. – P. 073704.

8 Marek R. and Straub J. Analysis of the evaporation coefficient and the condensation coefficient of water // *Int. J. Heat. Mass Transfer*. – 2001. – Vol. 44. – P. 39-53.

9 Haynes W.M. *Handbook of Chemistry and Physics* 94th edn. – Boca Raton, FL: CRC, 2013. – P. 68.

10 Plante E. and Sessoms A. // *J. Res. Natl Bur. Stand.* – 1973. – Vol. 77A. – P. 237.

11 Vignitchouk, P. Tolia and S. Ratynskaia Dust-wall and dust-plasma interaction in the MIGRAINE code // *Plasma Phys. Control. Fusion*. – 2014. – Vol. 56. – P. 095005.

12 Brown B.T., Smirnov R.D., Krasheninnikov S. I. Dynamics and transport of dust particles in tokamak edge plasmas // *Phys. Plasmas*. – 2014. – Vol. 21. – P. 024501.

*Принято в печать 25.01.2016*

**Т.С. Рамазанов\*, С.К. Коданова, Н.Х. Бастыкова**

*НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

*\*E-mail: ramazan@physics.kz*

## **ВЛИЯНИЕ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

**Абстракт.** В данной работе исследовано влияние пылевых частиц на характеристики пристеночной плазмы термоядерного реактора. Предложена математическая модель, где пылинка нагревается за счет потоков электронов и ионов и их рекомбинации на поверхности, а также за счет эмиссионных процессов и охлаждается за счет теплового излучения и испарения. Получены потоки энергии на пылинку и мощность поглощения энергии пылевыми частицами в пристеночной плазме термоядерного реактора. Показано, что инжекция пылевых частиц вследствие взаимодействия плазмы со стенкой термоядерного реактора приводит к потерям энергии плазменного шнура и уменьшению положительного энергетического выхода термоядерных реакций.

**Ключевые слова:** термоядерный реактор, пристеночная плазма, пылевая частица, тепловое излучение, эмиссионные процессы.

**Т.С. Рамазанов, С.К. Коданова, Н.Х. Бастыкова**

*Аль-Фарабиатындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан*

## **ТЕРМОЯДРОЛЫҚ РЕАКТОРДЫҢ ҚАБЫРҒАЛЫҚ ПЛАЗМА ҚАСИЕТТЕРІНЕ ТОЗАҢДЫ БӨЛШЕКТИҢ ӘСЕРІ**

**Аннотация.** Бұл жұмыста термоядролық реактордың қабырғалық плазма қасиеттеріне тозаңды бөлшектің әсері зерттелді. Тоzaң электрондар мен иондар ағындарынан, олардың тозаң бетінде бірігуінен, эмиссиондық процесстер негізінде қызатын және жылулық сәуле шығару, булану салдарынан сұйытын математикалық модель ұсынылды. Термоядролық реактордың қабырғалық плазмасында тозаңды бөлшекпен энергия қуатының жұтылуы және тозаңды бөлшекке келетін энергия ағындары алынды. Плазманың термоядролық реактор қабырғасымен әсерлесу нәтижесінде тозаңды бөлшектің инжекциялануы плазмалық баудың энергиясының және термоядролық реакцияның пайдалы энергияны шығарудың азаюына әкеледі.

**Түйін сөздер:** термоядролық реактор, қабырғалық плазма, тозаңды бөлшек, жылулық сәуле шығару, эмиссиялық процесстер.

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

*Al-Farabi Kazakh National University, IETP, Almaty, Kazakhstan*

## **EFFECT OF DUST PARTICLE ON CHARACTERISTIC OF EDGE FUSION PLASMA**

**Abstract.** In this work effect of dust particle on characteristic of edge fusion plasma is investigated. The given mathematic model, where the dust particle is heating by the fluxes of electrons and ions, their recombination on its surface, emission processes and are cooling by radiation and evaporation. The energy fluxes to the dust particle and recombination power energy by the dust particles are obtained. It is shown that the injection of dust particles, due to the interaction of the plasma with the wall of the fusion reactor, leads to a loss of energy of the plasma column and reduction of the positive energy yield of thermonuclear reactions.

**Keywords:** thermonuclear reactor, edge plasma, dust particle, thermal radiation, emission's processes.