

**Исследование эволюции пылинок из Be, Ni, Mo и W
в термоядерном реакторе***Н. Х. Бастыкова, Р. И. Голятина, С. К. Коданова, Т. С. Рамазанов, С. А. Майоров*

В работе исследована эволюция пылинок из различных материалов, используемых в термоядерных энергетических установках, построена модель для описания пылеобразования. В модели учитывались термохимические, электрические и другие свойства материалов стенок термоядерного реактора. Показано, что доминирующим процессом, приводящим к уменьшению массы пылинки, является термическое испарение, которое определяется давлением насыщенного пара при температуре теплового равновесия. Получены оценки времени жизни пылинок из разных материалов в зависимости от параметров плазмы. Представленные результаты могут быть полезны для оценки длины проникновения пылевых частиц в глубину реактора. Показана разница в динамике частиц из легких и тяжелых элементов. Из рассмотренных четырех элементов (Be, Ni, Mo и W), пылинки из никеля демонстрируют наиболее высокую проникающую способность из-за длительного времени жизни и умеренного веса.

Ключевые слова: пылевая частица, время жизни пылинки, пристеночная плазма, термоядерный реактор.

Ссылка: Бастыкова Н. Х., Голятина Р. И., Коданова С. К., Рамазанов Т. С., Майоров С. А. // Прикладная физика. 2020. № 3. С. 21.

Reference: N. Kh. Bastykova, R. I. Golyatina, S. K. Kodanova, T. S. Ramazanov, and S. A. Maiorov, Applied Physics, No. 3, 21 (2020).

Введение

Исследование влияния пылевых частиц в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС) 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.

Для больших термоядерных установок, таких как TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) [1], DIII-D (Doublet-III-D) [2] и токамак TEXTOR, в рамках проведенных для ITER [3] исследований были получены данные об общем количестве пыли, распределении пылинок по размерам, определена их эффективная площадь. Отметим, что токамак TEXTOR был сконструирован специально для исследования взаимодействия плазмы с первой стенкой.

В установке TEXTOR было обнаружено, что размеры пылинок находятся в диапазоне от нескольких десятков нм до 1 мм, а массовая концентрация пылинок – в диапазоне от 0,1

Бастыкова Нурия Хамитбековна¹, н.с.

Голятина Русудан Игоревна², н.с.

Коданова Сандугаш Кулмагамбетовна¹, в.н.с.

Рамазанов Тлеккабул Сабитович¹, гл.н.с.

Майоров Сергей Алексеевич^{2,3}, в.н.с.

¹ Институт экспериментальной и теоретической физики, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Казахстан, 050040, Алматы, пр. ал-Фараби, 71.

E-mail: kodanova@physics.kz

² Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

³ Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2

E-mail: mayorov_sa@mail.ru

Статья поступила в редакцию 09 июня 2020 г.

© Бастыкова Н. Х., Голятина Р. И., Коданова С. К., Рамазанов Т. С., Майоров С. А., 2020

до 1 мг/см^2 на вертикальной поверхности и $10\text{--}100 \text{ мг/см}^2$ на нижней горизонтальной поверхности. Общее количество нарабатываемой за несколько часов пыли оценивается величиной порядка 100 г в плазме [2]. Для экспериментального реактора ITER оценки, в зависимости от режима работы реактора, дают значения в диапазоне от нескольких кг до десятков кг.

Механизмы появления пылевых частиц, их эволюция в плазменном объеме являются актуальными задачами, которые исследуются как теоретически, так и экспериментально [4–18]. Поток горячей примеси из центральной области реактора на стенки может привести к поверхностным разрушениям, испарению поверхности стенки, вследствие чего в плазму могут инжектироваться не только нейтральные частицы в виде газа, но и твердые частицы различных форм, начиная от неправильной формы до почти идеальных сфер.

Различные механизмы формирования пылевых частиц в термоядерных устройствах были рассмотрены в работах [6–8]. Пылинки больших размеров появляются из-за эрозии стенок, ионно-молекулярных реакций и слипания пылевых частиц. Размеры частиц варьируются в широком диапазоне, от нанометров до миллиметра. Состав частиц определяется материалами, которые используются для изготовления пластин дивертора, первой стенки и других элементов конструкций. Выбор материала конструктивных элементов термоядерных устройств определяется характеристиками термоядерной плазмы, необходимыми термохимическими и конструкционными свойствами, стоимостью и т. д. Обычно в качестве таких материалов используются бериллий, графит, титан, вольфрам и сталь.

Авторами работы [18] уже исследовалось поведение пылевых частиц из различных материалов, используемых в термоядерных устройствах. В ней рассмотрена модель временной эволюции температуры и массы пылинки в плазме с параметрами, характерными для дивертора DIII-D токамака. Проанализировано также влияние материала пылинки на их ускорение, нагрев, испарение и сублимацию. Для уменьшения загрязнения плазмы

примесями тяжелых элементов были рассмотрены различные материалы (Li, Be, B, C, Mo и Fe) и их комбинации. С помощью численного моделирования была сделана попытка снижения скорости разрушения поверхности из-за взаимодействия с плазмой.

Постановка задачи для расчета эволюции пылинок

Рассмотрим модель, которая описывает эволюцию пылеобразования из возможных материалов (Be, Ni, Mo, W). Они отличаются термохимическими свойствами и, соответственно, временем жизни в пристеночной плазме реактора. Модель была построена на основе уравнений, описывающих динамику пылинки в плазме [19]:

$$\begin{aligned} \frac{dr_d}{dt} &= v_d, \\ m_d \frac{dv_d}{dt} &= F_e + F_i + \\ &+ q_d \left(\mathbf{E} + \frac{v_d}{c} \times \mathbf{B} \right) + m_d \mathbf{g} \end{aligned} \quad (1)$$

где t – время; r_d , v_d , m_d , q_d – радиус-вектор, скорость, масса и заряд пылинок, плазмы; F_e и F_i – силы, действующие на пылинку со стороны электронов и ионов; c – скорость света; g – ускорение силы тяжести; \mathbf{E} и \mathbf{B} – напряженности электрического и магнитного полей.

Потеря массы за счет испарения пылинки оценивается по формуле Герца-Кнудсена [20], которая дает оценку максимальной величины потока атомов, покидающих поверхность пылинки:

$$\Delta M_d = -S_d \sqrt{\frac{m_a}{2\pi T_d}} P_{\text{исп}}(T_d) \Delta t \quad (2)$$

где ΔM_d – изменение массы пылинки за время Δt ; S_d – площадь поверхности пылинки; m_a – масса атома; $P_{\text{исп}}(T_d)$ – давление насыщающих паров материала пылинки, которое определяется температурой пылинки T_d [21, 22].

Уравнение баланса энергии может быть записано в виде:

$$\frac{d}{dt}(m_d h_d) = Q_e + Q_i + Q_{\text{инп}} - Q_{\text{тэ}} - Q_{\text{вээ}} - Q_{\text{рад}} - Q_{\text{исп}}. \quad (3)$$

Здесь h_d – молярная энтальпия пылинки; $Q_{e(i)}$ – поток энергии за счет поглощенных электронов и ионов; $Q_{\text{инп}}$ – поток энергии за счет нейтрализации на поверхности пылинки; $Q_{\text{тэ}}$, $Q_{\text{вээ}}$ – поток энергии за счет термоэлектронной и вторичной электронной эмиссий; $Q_{\text{рад}}$ – поток энергии за счет радиационного излучения и $Q_{\text{исп}}$ – поток энергии за счет испарения.

Электрический заряд пылевой частицы определяется из условия равенства нулю суммарного тока на пылинку:

$$I_i - I - I_{\text{тэ}} - I_{\text{вээ}} = 0, \quad (4)$$

где $I_{i(e)}$ – потоки ионов и электронов; $I_{\text{тэ}}$, $I_{\text{вээ}}$ – поток за счет термоэмиссии и вторичной электронной эмиссии.

Алгоритм расчета

Заряд пылинки в присутствии магнитного поля рассчитывался методами частиц в ячейках и Монте-Карло [23–25]. 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.

Алгоритм расчета состоит из следующих этапов:

- задаются начальные и входные данные, такие как радиус, температура и скорость, заряд пылинки, параметры плазмы (T_e, T_i, n_e, n_i);

- далее в цикле делаются вычисления с шагом по времени Δt , на каждом из которых вычисляются:

- методами частиц в ячейках и Монте Карло с учетом магнитного поля определяют потоки электронов и ионов;

- решаются уравнения движения (1), баланса массы (2), баланса энергии (3);

- определяются радиус и температура пылинки;

- в приближении ограниченных орбит (OML – orbit motion limit) определяется заряд пылинки, следуя формуле (4);

- расчеты проводятся до тех пор, пока отношение радиуса пылинки к начальному радиусу пылинки, не становится меньше, чем 0,01.

Результаты расчетов и обсуждение

Динамика пылевых частиц, состоящих из разных материалов, сильно зависит от их свойств, поэтому на основе построенной модели эволюции пылеобразования было выполнено исследование влияние материала пылинок на их эволюцию: нагрев и испарение. Скорость тепловой сублимации (испарения) пылевых частиц зависит от давления насыщенных паров, которое в свою очередь определяется температурой поверхности пылинки. Поэтому, чем ниже давление насыщенного пара у материала пылинки при заданной температуре, тем дольше у нее при этой температуре время жизни. Из всех рассмотренных элементов наибольшая скорость испарения у бериллия, а у вольфрама – самая низкая.

На рисунках 1 и 2 для пылевых частиц из различных материалов приведены графики зависимостей температуры и радиуса от времени. В начальный момент времени размер всех пылинок был выбран равным 1 мкм. Временные зависимости температуры и радиуса пылинки были рассчитаны для однородной плазмы. Наблюдались следующие характерные стадии эволюции пылинки: начальный рост температуры и испарение (сублимация), при достижении температуры плавления происходит переход к тепловому равновесию и продолжается процесс испарения при равновесной температуре. Тяжелые пылевые частицы характеризуются монотонным возрастанием температуры с плато во время процесса плавления. Плавление легких частиц происходит более быстро во время начальной стадии нагрева при относительно низких температурах. На рис. 2 показано, что после первоначального резкого изменения

температуры пылевой частицы, они начинают быстро терять свою массу из-за испарения при достижении температуры плавления.

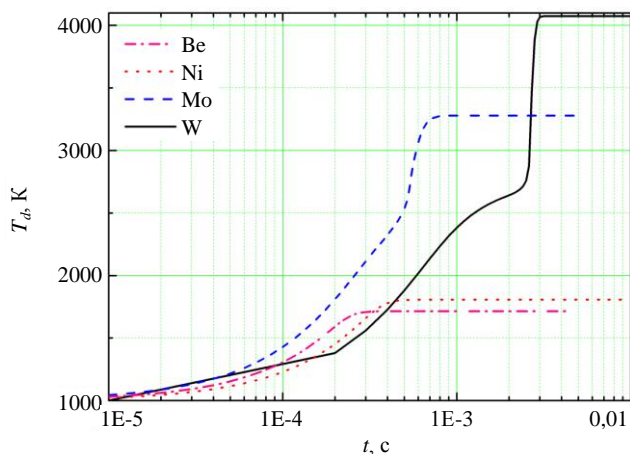


Рис. 1. Зависимости температуры пылевых частиц от времени для Be, Ni, Mo, W.

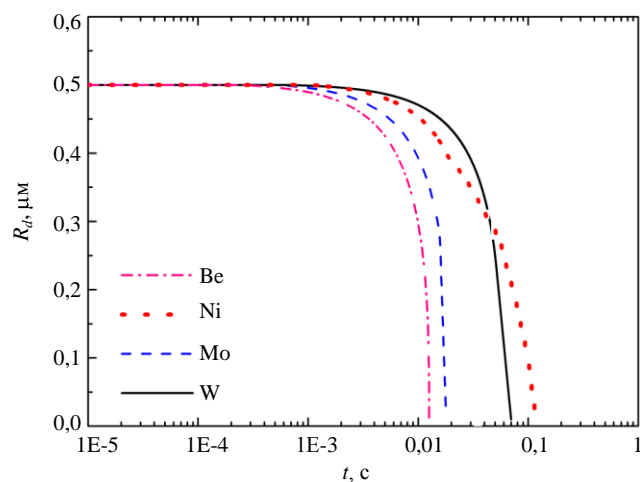


Рис. 2. Зависимости радиуса пылевых частиц от времени для Be, Ni, Mo, W.

На рисунке 3 показаны зависимости времени жизни пылевых частиц с первоначальным диаметром 1 мкм из Be, Ni, Mo и W от плотности плазмы n_e при температуре $T_e = T_i = 10$ эВ. Приведенные на этом рисунке графики показывают, что время жизни пылинок для всех рассмотренных материалов сильно зависит от плотности плазмы. При увеличении плотности плазмы время жизни пылинок монотонно уменьшается из-за большего потока энергии на пылинку. Например, время жизни пылинок из Mo и Be широким диапазоне n_e от $0,3 \times 10^{13}$ см⁻³ до 2×10^{13} см⁻³, значительно короче, чем время жизни пыли-

нок из Ni и W. В то же время, при плотности плазмы $n_e < 10^{13}$ см⁻³ время жизни пылинок вольфрама больше, чем время жизни других материалов. Это связано с тем, что вольфрам имеет относительно небольшую теплоемкость и высокую температуру плавления. Из рассмотренных материалов никелевые пылинки оказываются наиболее долгоживущими при высокой плотности плазмы.

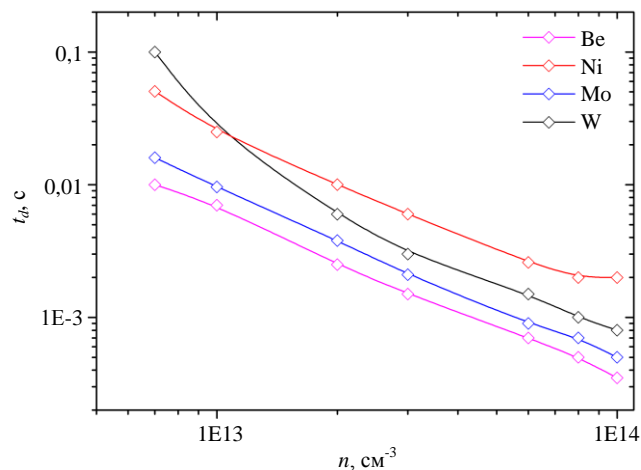


Рис. 3. Время жизни пылевых частиц из материалов Be, Ni, Mo, W в зависимости от плотности плазмы при первоначальном диаметре 1 мкм.

Заключение

В работе исследовано влияние материала пылинки на ее нагрев и испарение, проведены оценки времени жизни пылевых частиц. Построена модель, учитывающая термохимические, электрические и другие свойства материалов. Показано, что доминирующим процессом, приводящим к уменьшению массы пылинки, является термическое испарение, которое зависит от давления насыщенного пара при температуре теплового равновесия. Получены оценки времени жизни пылинок из разных материалов в зависимости от параметров плазмы. Представленные результаты могут использоваться для оценки глубины проникновения пылевых частиц реактора. Показана разница в динамике частиц из легких и тяжелых материалов. Из рассмотренных материалов никель из-за более длительного времени жизни и умеренного веса демонстрирует наиболее высокую подвижность и способность проникать вглубь реактора.

Выполненные исследования проведены в рамках НТП № AP05134671 «Влияние радиационной и тепловой нагрузки на внутрикамерные материалы и пылеобразование при срыве плазменного шнура в термоядерных энергетических реакторах (2018–2020 гг.)» МОН РК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brooks N. H., Petersen P., and the DIII-D Group // J. Nucl. Mater. 1987. Vol. 145–147. P. 770.
2. Winter J., Gebauer G. // J. Nucl. Mater. 1999. Vol. 266–269. P. 228.
3. Cecchi J. L., Bell M. G., Bitter M. et al. // J. Nucl. Mater. 1984. Vol. 128–129. P. 1.
4. Winter J. // Physics of Plasmas. 2000. Vol. 7. P. 3862.
5. Pigarov A. Yu., Krasheninnikov S. I. et al. // Physics of Plasmas. 2005. Vol. 12. P. 122508.
6. Tsytoich V. N., Winter J. // Physics Uspekhi. 1998. Vol. 41. P. 815.
7. 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., Whyte D. G. // Nucl. Fusion. 2001. Vol. 41. P. 1967.
8. Winter J. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2004. Vol. 46. P. B583.
9. Ohkawa T. // Kakuyugo Kenkyu. 1977. Vol. 37. P. 117.
10. Goodall D. H. J. // J. Nucl. Mater. 1982. Vol. 111–112. P. 11.
11. Hino T., Yoshida H., Yamauchi Y., Hirohata Y., Nakamura K., Akiba M. // Fusion Eng. Des. 2002. Vol. 61–62. P. 605.
12. Winter J. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1998. Vol. 40. P. 1201.
13. Sharpe J. P., Rohde V. // J. Nucl. Mater. 2003. Vol. 313–316. P. 455.
14. Smirnov R. D., Tomita Y., Takizuka T., Takayama A., Chutov Yu. // Contr. Plasma Phys. 2004. Vol. 44. P. 150.
15. Krasheninnikov S. I., Tomita Y., Smirnov R. D., Janev R. K. // Phys. Plasmas. 2004. Vol. 11. P. 3141.
16. Pigarov A. Yu., Smirnov R. D., Krasheninnikov S. I., Roglien T. D., Rosenberg M., Soboleva T. K. // J. Nucl. Mater. 2007. Vol. 363–365. P. 216.
17. Roquemore A. L., Davis W., Kaita R., Skinner C. H., Maqueda R., Nishino N. // Rev. Sci. Instrum. 2006. Vol. 77. P. 10E526.
18. Tanaka Y., Pigarov A. Yu., Smirnov R. D., Krasheninnikov S. I., Ohno N., Uesugi Y. // Phys. Plasmas. 2007. Vol. 14. P. 052504.
19. Ratynskaia S. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2011. Vol. 53. P. 074009.
20. Marek R., Straub J. // Int. J. Heat. Mass Transfer. 2001. Vol. 44. P. 39.
21. Haynes W. M. Handbook of Chemistry and Physics 94th edn. – Boca Raton, FL: CRC, 2013.
22. Plante E., Sessoms A. // J. Res. Natl Bur. Stand. 1973. Vol. 77A. P. 237.
23. Kodanova S. K., Bastykova N. Kh., Ramazanov T. S., Maiorov S. A. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2016. Vol. 44. P. 525.
24. Kodanova S. K., Bastykova N. Kh., Ramazanov T. S., Nigmatova G. N., Maiorov S. A. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2018. Vol. 46. P. 832.
25. Kodanova S. K., Bastykova N. Kh., Ramazanov T. S., Nigmatova G. N., Maiorov S. A., Moldabekov Zh. A. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2019. Vol. 47. P. 3052.

PACS: 52.27.Lw; 52.40.Hf

Investigation of the evolution of Be, Ni, Mo and W dust particles in fusion plasma

N. Kh. Bastykova¹, R. I. Golyatina², S. K. Kodanova¹, T. S. Ramazanov¹,
and S. A. Maiorov^{2,3}

¹ Institute of Experimental and Theoretical Physics, Al-Farabi Kazakh National University
71 Al-Farabi Ave., Almaty, 050040, Kazakhstan

² Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilov st., Moscow, 119991, Russia

³ Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia

Received June 09, 2020

In this work the evolution of dust particles from various materials used in fusion power devices is investigated. A model for describing dust formation is constructed, and estimates of the dust lifetimes in the edge fusion plasma are obtained. The model is taken into account thermochemical, electrical and other properties of materials. It is shown that the dominant process of reducing the dust mass is thermal evaporation, which depends on the pressure of saturated vapor at a temperature of thermal equilibrium. Estimates of the dust lifetime from different materials depending on the plasma parameters are obtained. The presented results can be useful for estimating the length of the dust penetration into the depth of the fusion reactor. The difference in the dynamics of particles from light and heavy elements is shown. Of the four elements examined (Be, Ni, Mo, and W), nickel exhibits the highest mobility due to its long life and moderate weight.

Keywords: dust particle, dust lifetime, edge plasma, fusion plasma.

REFERENCES

1. N. H. Brooks, P. Petersen, and the DIII-D Group, *J. Nucl. Mater.* **145–147**, 770 (1987).
2. J. Winter and G. Gebauer, *J. Nucl. Mater.* **266–269**, 228 (1999).
3. J. L. Cecchi, M. G. Bell, M. Bitter, et al., *J. Nucl. Mater.* **128–129**, 1 (1984).
4. J. Winter, *Physics of Plasmas* **7**, 3862 (2000).
5. A. Yu. Pigarov, S. I. Krasheninnikov, et al., *Physics of Plasmas* **12**, 122508 (2005).
6. V. N. Tsytovich and J. Winter, *Physics Uspekhi*. **41**, 815 (1998).
7. G. Federici, C. H. Skinner, J. N. Brooks, J. P. Coad, C. Grisolia, A. A. Haasz, A. Hassanein, V. Philipps, C. S. Pitcher, J. Roth, W. R. Wampler, and D. G. Whyte, *Nucl. Fusion*. **41**, 1967 (2001).
8. J. Winter, *Plasma Phys. Control. Fusion*. **46**, B583 (2004).
9. T. Ohkawa, *Kakuyugo Kenkyu*. **37**, 117 (1977).
10. D. H. J. Goodall, *J. Nucl. Mater.* **111–112**, 11 (1982).
11. T. Hino, H. Yoshida, Y. Yamauchi, Y. Hirohata, K. Nakamura, and M. Akiba, *Fusion Eng. Des.* **61–62**, 605 (2002).
12. J. Winter, *Plasma Phys. Control. Fusion*. **40**, 1201 (1998).
13. J. P. Sharpe and V. Rohde, *J. Nucl. Mater.* **313–316**, 455 (2003).
14. R. D. Smirnov, Y. Tomita, T. Takizuka, A. Takayama, and Yu. Chutov, *Contr. Plasma Phys. Vol.* **44**, 150 (2004).
15. S. I. Krasheninnikov, Y. Tomita, R. D. Smirnov, and R. K. Janev, *Phys. Plasmas* **11**, 3141 (2004).
16. A. Yu. Pigarov, R. D. Smirnov, S. I. Krasheninnikov, T. D. Rognlien, M. Rosenberg, and T. K. Soboleva, *J. Nucl. Mater.* **363–365**, 216 (2007).
17. A. L. Roquemore, W. Davis, R. Kaita, C. H. Skinner, R. Maqueda, and N. Nishino, *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 10E526 (2006).
18. Y. Tanaka, A. Yu. Pigarov, R. D. Smirnov, S. I. Krasheninnikov, N. Ohno, and Y. Uesugi, *Phys. Plasmas*. **14**, 052504 (2007).
19. S. Ratynskaia, and et al., *Plasma Phys. Control. Fusion*. **53**, 074009 (2011).
20. R. Marek and J. Straub, *Int. J. Heat. Mass Transfer* **44**, 39 (2001).
21. W. M. Haynes, *Handbook of Chemistry and Physics 94th edn.* (Boca Raton, FL:CRC, 2013).
22. E. Plante and A. Sessoms, *J. Res. Natl Bur. Stand.* **77A**, 237 (1973).
23. S. K. Kodanova, N. Kh. Bastykova, T. S. Ramazanov, and S. A. Maiorov, *IEEE Transactions on Plasma Science*. **44**, 525 (2016).
24. S. K. Kodanova, N. Kh. Bastykova, T. S. Ramazanov, G. N. Nigmatova, and S. A. Maiorov, *IEEE Transactions on Plasma Science*. **46**, 832 (2018).
25. S. K. Kodanova, N. Kh. Bastykova, T. S. Ramazanov, G. N. Nigmatova, S. A. Maiorov, and Zh. A. Moldabekov, *IEEE Transactions on Plasma Science*. **47**, 3052 (2019).