

**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, Prikl. Fiz., No. 3, 21 (2020).

*при срыве плазменного шнура в термоядерных энергетических реакторах (2018–2020 гг.)»  
МОН РК.*

**Бастыкова Нурия Хамитбековна**<sup>1</sup>, н.с.

**Голятина Русудан Игоревна**<sup>2</sup>, н.с.

**Коданова Сандугаш Кулмагамбетовна**<sup>1</sup>, в.н.с.

**Рамазанов Тлеккабул Сабитович**<sup>1</sup>, гл.н.с.

**Майоров Сергей Алексеевич**<sup>2,3</sup>, в.н.с.

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

E-mail: kodanova@physics.kz

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

<sup>3</sup> 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  
механизмов образования пыли, исследова-

*Выполненные исследования проведены в рамках НТП № AP05134671 «Влияние радиационной и тепловой нагрузки на внутрикамерные материалы и пылеобразование*

**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., Krashennnikov 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. Bastykova*<sup>1</sup>, *R. I. Golyatina*<sup>2</sup>, *S. K. Kodanova*<sup>1</sup>, *T. S. Ramazanov*<sup>1</sup>,  
and *S. A. Maiorov*<sup>2,3</sup>

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

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

<sup>3</sup> 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).