

INVESTIGATION OF W-FUZZ CATHODE VACUUM ARCS OPERATION TIME

Pavel Sergeevich Mikhailov^{1a}, *Ilya Lvovich Muzyukin*¹,
*Yuriy Igorevich Mamontov*¹, *Yury Aleksandrovich Zemskov*¹,
*Igor Vladimirovich Uimanov*¹, *Sergey Aleksandrovich Barengolts*^{2,3}

¹ Institute of Electrophysics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Amundsen str., 106, 620016, Ekaterinburg, Russia

² Prokhorov General Physics Institute, RAS, Vavilov str., 38, 119991, Moscow, Russia

³ Lebedev Physical Institute, RAS, Leninsky Av., 53, 119991, Moscow, Russia

^a gmgm01@mail.ru

ABSTRACT

An experimental technique was developed to determine the vacuum arc operation time in the microsecond range on tungsten cathodes with a nanostructured fuzz layer. The samples used were tungsten plates exposed to helium plasma for 4 hours. As a result of exposure tungsten surface with helium ions, nanostructures called fuzz appear. They are thin tungsten filaments with a thickness of 10–50 nm. The average thickness of the W fuzz layer was 1 μm . A power source with a voltage of 200 V and a direct current of 0.1 to 0.7 A was used as arc supply. It is shown that, as for ordinary metal cathodes, the statistical integral distribution of the arc burning time for cathodes with a fuzz layer is random, has an exponential dependence. Vacuum arc operation time with W fuzz layer is an order of magnitude longer than for ordinary tungsten. Based on the experimental results, the average arc operation time was determined: $\sim 1 \mu\text{s}$ for a current of 0.17 A and $\sim 40 \mu\text{s}$ for a current of 0.7 A.

KEYWORDS

Fuzz layer; vacuum arc.

ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ГОРЕНИЯ ВАКУУМНОЙ ДУГИ
С W-FUZZ КАТОДОМ

Павел Сергеевич Михайлов^{1a}, *Илья Львович Музюкин*¹,
*Юрий Игоревич Мамонтов*¹, *Юрий Александрович Земсков*¹,
*Игорь Владимирович Уйманов*¹, *Сергей Александрович Баренгольц*^{2,3}

¹ Институт Электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

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

³ Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 53

^a gmgm01@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В данной работе представлена экспериментальная методика определения времени горения вакуумной дуги в микросекундном диапазоне на вольфрамовых катодах с наноструктурированной поверхностью. В качестве образцов использовались вольфрамовые пластины, подвергнутые воздействию гелиевой плазмы, в течении 4 часов. В результате бомбардировки поверхности вольфрама ионами гелия появляются наноструктуры, называемые вольфрамовым пухом (*W fuzz*). Они представляют собой тонкие вольфрамовые нити толщиной 10–50 нм. Средняя толщина *W fuzz* слоя составила 1 мкм. В работе использован триггерный метод поджига дуги. Для питания дуги использовался источник питания с напряжением 200 В и постоянным током от 0,1 до 0,7 А. Показано, что, как и для обычных металлических катодов, статистическое интегральное распределение времени горения дуги для катодов с *fuzz* слоем носит случайный характер, имеет экспоненциальную зависимость. Но время горения вакуумной дуги на *W fuzz* слое на порядок больше, чем для обычного вольфрама. На основе результатов эксперимента определено среднее время горения дуги, оно составило ~1 мкс для тока 0,17 А и ~40 мкс для тока 0,7 А.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Вакуумная дуга; *fuzz*; вольфрамовый пух.

Введение

Униполярные дуги – это крайне нежелательные явления в термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы [1–4]. Следствием появления дуги является загрязнение термоядерной плазмы металлическими каплями, микрочастицами и нетемпературными атомами. Одни из факторов, увеличивающих вероятность появления униполярных дуг, – это возможное изменение морфологии поверхности вольфрамовых диверторов под действием гелиевой плазмы [5, 6]. В результате на поверхности вольфрама появляются наноструктуры, называемые вольфрамовым пухом (*fuzz*). Они представляют собой тонкие вольфрамовые нити толщиной 10–20 нм, которые образуются на поверхности под воздействием ионов He^+ (<60 эВ) при температурах выше 1000 К [7–9]. Наноструктуры образуются не только на поверхности вольфрама, но и на других тугоплавких металлах, таких как тантал и молибден [10].

Наноструктурный слой значительно меняет дуговые свойства поверхности металлов. Дугу значительно легче зажечь на вольфрамовом пухе [11–13]. Также резко воз-

растает скорость эрозии электродов [14, 15], средний заряд ионов и температура плазмы снижаются по сравнению с обычным вольфрамом [16, 17]. Автоэмиссионные свойства вольфрамового пуха широко исследованы, и получены значения усиления поля от 200 до 3000 [18, 19].

1. Экспериментальное оборудование и методика исследования

Образец с вольфрамовым пухом был выполнен в виде тонкой вольфрамовой пластины размерами 12×15 мм. Он был изготовлен на кафедре физики плазмы НИЯУ «МИФИ». Образцы выполнены из чистого вольфрама 99,7%, облученного ионами He^+ . При воздействии ионов He^+ температура образца достигала 1300 К. Энергия ионов задавалась приложенным к образцу напряжением –150 В. Время облучения образца составляло 4 часа с потоком ионов He^+ $1,2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. Подробно про методику производства образца можно прочитать в [20]. На рис. 1 показаны СЭМ фотографии скола образца. По ним видно, что средняя величина наноструктурированного слоя составляет примерно 1 мкм.

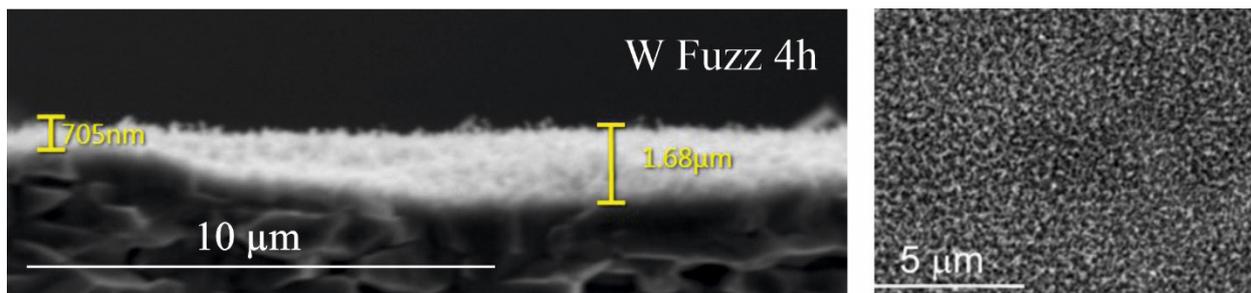


Рис. 1. СЭМ изображение образца с вольфрамовым пухом

Fig. 1. SEM micrographs of tungsten fuzz

На рис. 2 показана схема экспериментальной установки. Установка выполнена на основе универсальной вакуумной камеры с остаточным давлением не хуже $1 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст. При планировании экспериментов большое внимание уделялось разрушению вольфрамового пуха при дуговом разряде. Поэтому было важно локализовать место возбуждения дуги на образце. Для этого использовался триггерный метод поджига дуги.

Электродная система состояла из проволочного анода, плоского катода и триггерного электрода (рис. 3). Триггер располагался

вблизи поверхности катода и на него подавался импульс 20 кВ, 3,5 А, 500 нс. Этого импульса было достаточно для пробоя промежутка триггер-катод и создания плазмы, которая начинала основной дуговой разряд. Триггерный электрод был выполнен из тонкой вольфрамовой проволоки диаметром 90 мкм и располагался на подвижном вводе. После серии экспериментов 15–40 дуг триггер передвигался на расстояние ~ 1 мм. Для определения времени длительности горения дуги необходимо было набрать статистику около 500 дуг для каждого тока.

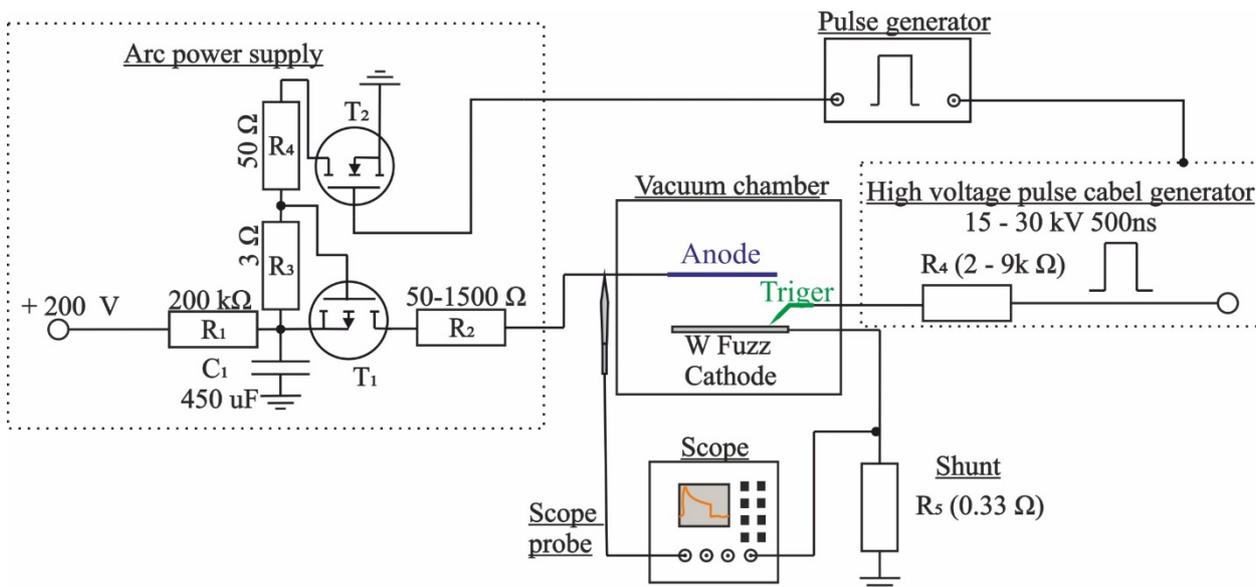


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup

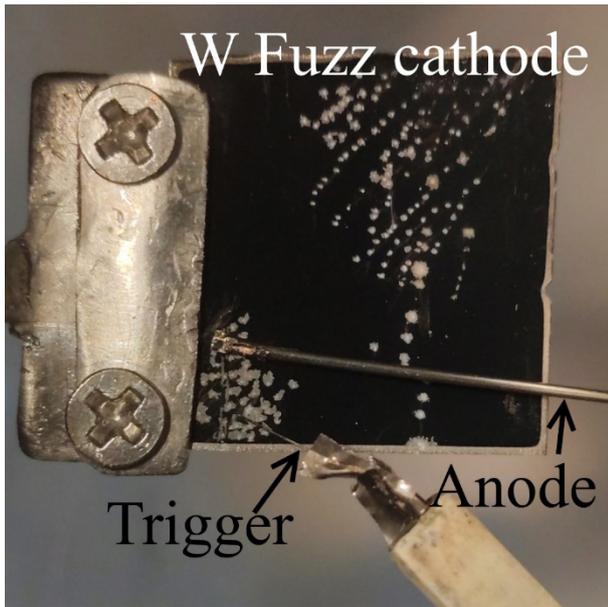


Рис. 3. Фотография электродов
 Fig. 3. Photo of the electrode assemblies

Для питания дуги использовался регулируемый источник питания с конденсатором C_1 450 мкф, поэтому ток дуги можно было считать постоянным. Ток разряда ограничивался набором резисторов R_2 . Подача напряжения на дугу осуществлялась низкоомным транзистором, который управлялся генератором. Длительность импульсов генератора определяла время подачи напряжения. Это время устанавливалось в зависимости от R_2 таким образом, чтобы дуга гасла самопроизвольно, а не из-за выключения источника питания. Ток дуги измерялся при помощи быстрого низкоиндуктивного шунта R_5 0,33 Ом. Напряжение снималось с анода при помощи щупа с ослаблением $\times 10$.

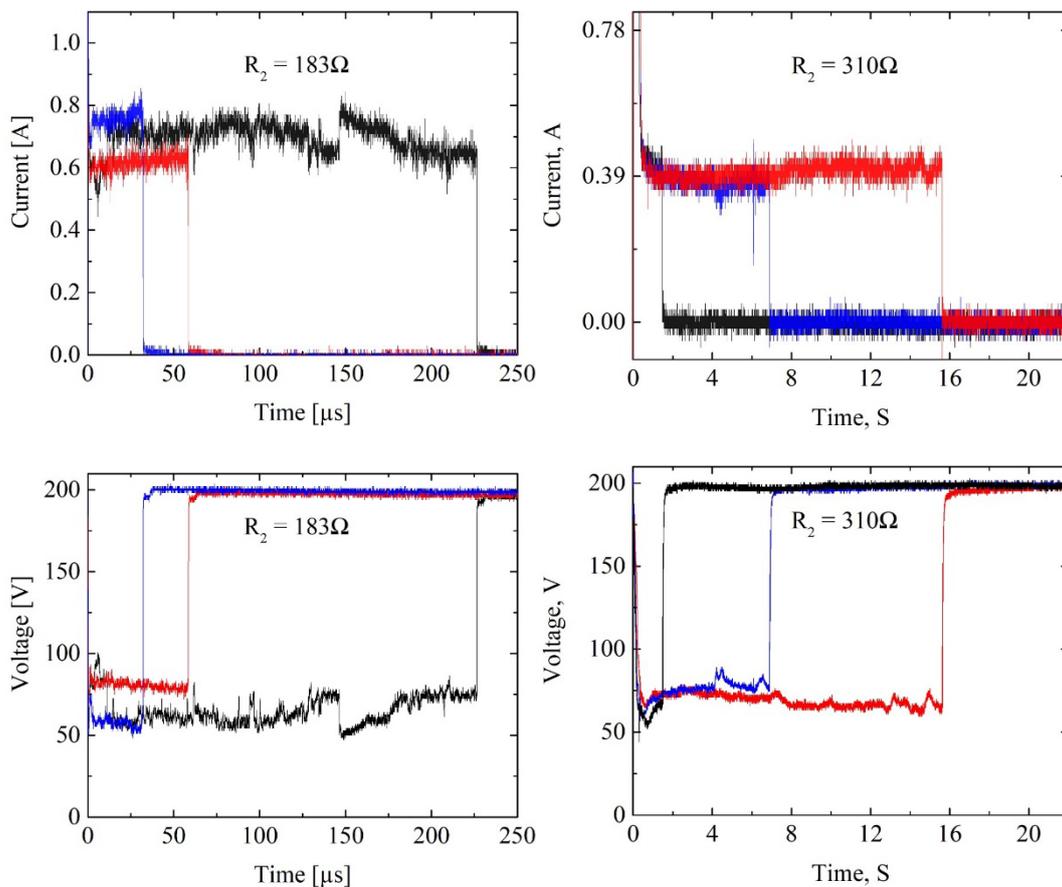


Рис. 4. Примеры осциллограмм тока и напряжения для образцов с вольфрамовым пухом

Fig. 4. Examples of waveforms of the arc current and voltage obtained for W-fuzz sample

2. Результаты

На рис. 4 показаны типичные осциллограммы тока и напряжения для дуги на вольфрамовом пухе. Можно увидеть, что значение напряжения изменяется во время горения дуги и может сильно отличаться для дуг при одинаковом значении ограничивающего сопротивления. Поэтому для определения тока использовалось 3 уровня усреднения. Сначала ток усреднялся на одной осциллограмме. Потом по формуле

$$i_{av}^s = \sum_n i_n \tau_n / \sum_n \tau_n. \quad (1)$$

определялся средний ток одной серии, где i_n – средний ток n -й дуги; τ_n – время горения n -й дуги. Затем вычислялось среднее значения для всех серий измерений (положительный триггера).

На рис. 5 показаны результаты измерения времени горения для ограничивающего резистора 525 Ом. Они изображены в виде гистограммы и хорошо аппроксимируются экспоненциальной функцией. Соответственно, как и для обычных металлов, зависимость хорошо описывается формулой

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right), \quad (2)$$

где N – число дуг с длительность горения большей, чем t ; N_0 – общее число дуг; θ – среднее время горения. Из формулы следует, что в логарифмических координатах зависимость представлена прямой линией и среднее время горения дуги можно найти из тангенса угла наклона к оси абсцисс.

На рис. 6 и табл. 1 показаны результаты. Как видно из рисунка, все гистограммы хорошо аппроксимируются прямой линией, наибольшее отклонение наблюдается в области коротких времен горения дуги (ги-

стограммы 4, 5 ,6). Это могло быть вызвано разрушением наноструктурированного вольфрамового слоя.

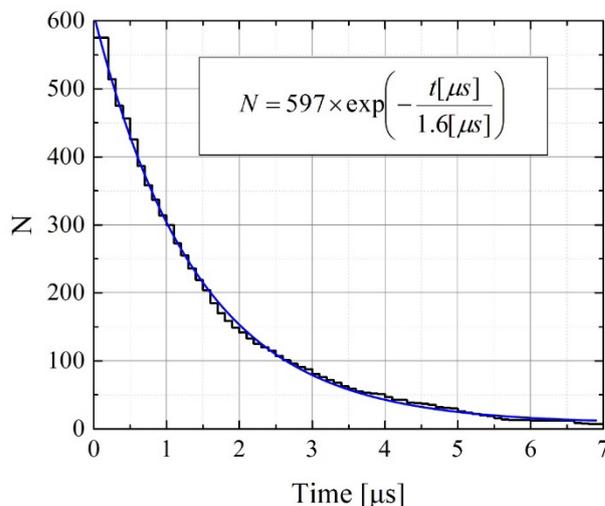


Рис. 5. Гистограмма времени горения дуги, $R_2 = 525 \Omega$ ($i_{av} = 0,24 \text{ A}$), и аппроксимация экспоненциальной функцией

Fig. 5. Histogram of the arc operation time and their approximation by an exponential function for the resistance $R_2 = 525 \Omega$ ($i_{av} = 0.24 \text{ A}$)

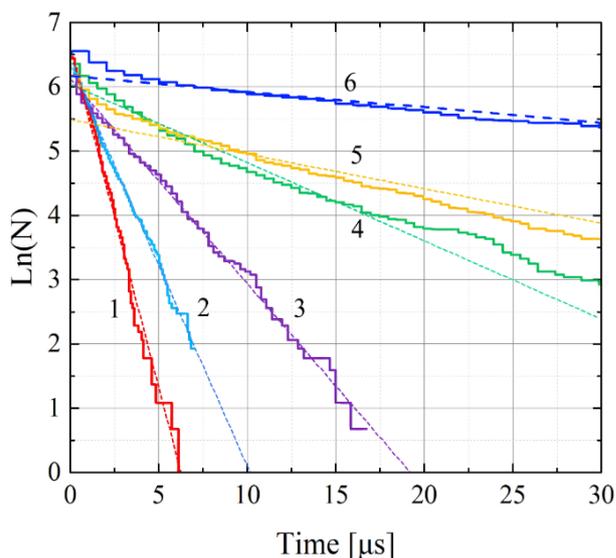


Рис. 6. Гистограммы времени горения дуги для различных значений R_2

Fig. 6. Histograms of the arc operation time for the different R_2

Таблица 1. Результаты

Table 1. Results

Номер гистограммы / Histogram number	Сопротивление / Resistance R_3 , Ω	Количество дуг / Количество позиций триггера / Number of triggered arcs / Number of trigger positions	Средний ток дуги / Average arc current i_{av} , A	Среднеквадратичное отклонение тока / Standard deviation i , %	Среднее время горения дуги / Average arc operation time Θ , μ s
1	841	627/27	0,17	9,8	0,95
2	525	575/20	0,24	10,3	1,6
3	398	469/18	0,27	7,7	3,2
4	310	575/20	0,35	9,9	8,3
5	243	478/25	0,48	10,6	18,8
6	183	702/45	0,70	6,9	41,8

Выводы

В соответствии с результатами экспериментов время горения дуги на наноструктурированном вольфрамовом катоде с fuzz слоем получилось на порядок больше, чем для обычного вольфрама. При среднем токе 0,17 А – порядка 1 мкс, при токе 0,70 А ~0,42 мкс. В то время как для обычных вольфрамовых дуг среднее время горения составляет 10 мкс при 3,5 А.

Благодарности / Acknowledgments

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 20-19-00323-П.

The work was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 20-19-00323-П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McCracken G. M., Stott P. E. Plasma-surface interactions in tokamaks // Nuclear Fusion. 1983. V. 19, Iss. 7. Article number 2135. DOI: 10.1088/0029-5515/19/7/004.
2. Stampa A., Kruger H. Simulation experiments on unipolar arcs // Journal of Physics D: Applied Physics. 1983. V. 16, No. 11. Article number 2135. DOI: 10.1088/0022-3727/16/11/016.
3. Rohde V., Balden M., Endstrasser N., Udo von Toussaint, ASDEX Upgrade Team. Arc erosion on W plasma facing components in ASDEX Upgrade // Journal of Nuclear Materials. 2013. V. 438. P. S800–S804. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2013.01.172.

4. Tokitani M., Kajita S., Masuzaki S., Hirahata Y., Ohno N., Tanabe T., LHD Experiment Group. Exfoliation of the tungsten fibreform nanostructure by unipolar arcing in the LHD divertor plasma // Nuclear Fusion. 2011. V. 51, No. 10. Article number 102001. DOI: 10.1088/0029-5515/51/10/102001.

5. Takamura S., Ohno N., Nishijima D., Kajita S. Formation of nanostructured tungsten with arborescent shape due to helium plasma irradiation // Plasma and fusion research. 2006. V. 1. P. 051. DOI: 10.1585/pfr.1.051.

6. Baldwin M. J., Doerner R. P. Helium induced nanoscopic morphology on tungsten under fusion relevant plasma conditions // Nuclear Fusion. 2008. V. 48, No. 3. Article number 035001. DOI: 10.1088/0029-5515/48/3/035001.

7. Kajita S., Sakaguchi W., Ohno N., Yoshida N., Saeki T. Formation process of tungsten nanostructure by the exposure to helium plasma under fusion relevant plasma conditions // Nuclear Fusion. 2009. V. 49, No. 9. Article number 095005. DOI: 10.1088/0029-5515/49/9/095005.

8. Brezinsek S., Hakola A., Greuner H., Balden M., Kallenbach A., Oberkofler M., De Temmerman G., Douai D., Lahtinen A., Böswirth B., Brida D., Caniello R., Carralero D., Elgeti S., Krieger K., Mayer H., Meisl G., Potzel S., Rohde V., Sieglin B., Linsmeier Ch. Surface modification of He pre-exposed tungsten samples by He plasma impact in the divertor manipulator of ASDEX Upgrade // Nuclear materials and energy. 2017. V. 12. P. 575–581. DOI: 10.1016/j.nme.2016.11.002.

9. De Temmerman G., Hirai T., Pitts R. A. The influence of plasma-surface interaction on the performance of tungsten at the ITER divertor vertical targets // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2018. V. 60, No. 4. Article number 044018. DOI: 10.1088/1361-6587/aaaf62.

10. Hwangbo D., Kajita S., Ohno N., Sinelnikov D. Field emission from metal surfaces irradiated with helium plasmas // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. V. 45, Iss. 8. P. 2080–2086. DOI: 10.1109/TPS.2017.2679211.
11. Barenholts S. A., Mesyats G. A., Tsventoukh M. M. Explosive electron emission ignition at the “W-Fuzz” surface under plasma power load // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2011. V. 39, Iss. 9. P. 1900–1904. DOI: 10.1109/TPS.2011.2159996.
12. Kajita S., Takamura S., Ohno N. Prompt ignition of a unipolar arc on helium irradiated tungsten // *Nuclear Fusion*. 2009. V. 49, Iss. 3. Article number 032002. DOI: 10.1088/0029-5515/49/3/032002.
13. Hwangbo D., Kajita Sh., Barenholts S. A., Tsventoukh M. M., Kawaguchi S., Mesyats V. G., Ohno N. Ignition and erosion of materials by arcing in fusion-relevant conditions // *Contributions to Plasma Physics*. 2018. V. 58, Iss. 6–8. P. 608–615. DOI: 10.1002/10.1002/ctpp.201700157.
14. Ueda Y., Coenen J. W., De Temmerman G., Doerner R. P., Linke J., Philipps V., Tsitrone E. Research status and issues of tungsten plasma facing materials for ITER and beyond // *Fusion engineering and design*. 2014. V. 89, Iss. 7–8. P. 901–906. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2014.02.078.
15. Kajita S., Ohno N., Yoshida N., Yoshihara R., Takamura S. Arcing on tungsten subjected to helium and transients: ignition conditions and erosion rates // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2012. V. 54, Iss. 3. Article number 035009. DOI: 10.1088/0741-3335/54/3/035009.
16. Hwangbo D., Kajita S., Osaka M., Ohno N. Spectroscopic study and motion analysis of arc spot initiated on nanostructured tungsten // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2013. V. 52., No. 11S. Article number 11NC02. DOI: 10.7567/JJAP.52.11NC02.
17. Barenholts S. A., Hwangbo D., Kajita S., Ohno N., Frolova V. P., Nikolaev A. G., Oks E. M., Shmelev D. L., Tsventoukh M. M., Yushkov G. Yu. Dynamics of the changes in the parameters of the arc plasma during the destruction of a helium-induced tungsten fuzz by arc pulses // *Nuclear Fusion*. 2020. V. 60, Iss. 4. Article number 044001. DOI: 10.1088/1741-4326/ab73c3.
18. Sinelnikov D., Bulgadaryan D., Hwangbo D., Kajita S., Kurnaev V., Ohno N. Field emission from nanostructured tendril bundles // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2019. V. 47, Iss. 11. P. 5186–5190. DOI: 10.1109/TPS.2019.2942725.
19. Mikhailov P. S., Muzyukin I. L. Field electron emission from a nanostructured tungsten surface // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. 2021. V. 2024, Iss. 1. Article number 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/2064/1/012059.
20. Ogorodnikova O. V., Klimov K. S., Poskakov A. G., Kaziev A. V., Kharkov M. M., Efimov V. S., Gasparyan Yu. M., Volkov N. V., Alimov V. Kh., Tokitani M. Deuterium and helium retention in W with and without He-induced W ‘fuzz’ exposed to pulsed high-temperature deuterium plasma // *Journal of Nuclear Materials*. 2019. V. 515. P. 150–159. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2018.12.023.