

Исследование зависимости электрической мощности высоковольтного плазменного термоэмиссионного диода от теплофизических параметров и типа рабочего тела

© Д.А. Анциферов, В.В. Онуфриев, Е.В. Онуфриева

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Разработка высокотемпературных систем преобразования тока на основе приборов плазменной электроэнергетики, таких, например, как сеточные ключевые элементы и высоковольтные плазменные термоэмиссионные диоды (ВПТД) является актуальной в связи с разработкой мощных ядерных энергодвигательных установок космических аппаратов. Представлены результаты исследований зависимости удельной электрической мощности ВПТД от теплофизических параметров наполнителя межэлектродного зазора — его температуры и давления. Показана зависимость мощности ВПТД от материалов, применяемых для изготовления электродов. Приведены зависимости удельной электрической мощности ВПТД как функции температуры (анода и эмиттера) и давления паров цезия и бинарной смеси. Показана целесообразность применения бинарного наполнения ВПТД с вольфрамным эмиттером для увеличения его удельной электрической мощности.

Ключевые слова: высокотемпературный диод, пробойное напряжение, ток эмиссии, удельная мощность, материалы электродов, цезий, барий, бинарная смесь

Введение. В настоящее время особое внимание уделяется разработке мощных ядерных энергетических установок (ЯЭУ) на основе термоэмиссионных реакторов-преобразователей (ТРП) [1, 2] и совершенствованию систем преобразования тока (СПТ) [3] с целью более эффективного согласования выходных электрических параметров ТРП и электроракетной двигательной установки (ЭРДУ). Ядерные энергетические установки как стабильные высокомоощные источники электрической энергии, работа которых не зависит от внешних факторов (таких, например, как расстояние от Солнца) являются безальтернативным решением при проектировании космических аппаратов (КА) для дальних миссий. Однако применение ЯЭУ сопряжено с воздействием негативных факторов как космического пространства, так и самой установки [4]. К ним в первую очередь относятся ионизирующее излучение и высокотемпературные тепловые потоки, исходящие от ТРП. В этих условиях снижается массовая и энергетическая эффективность применения СПТ на основе полупроводниковых материалов [2, 4]. При использовании полупроводниковой базы необходима дополнительная защита от ионизирующего излучения, что уменьшает возможную полезную нагрузку (ПН) КА. Для обеспечения требуемого

температурного режима (300...400К) работы СПТ на основе полупроводниковой электроники необходимо применять холодильные машины и использовать холодильник-излучатель (ХИ) значительных размеров [3, 4]. Так, для ЯЭУ мощностью 0,55 МВт при коэффициенте полезного действия СПТ на полупроводниковой базе, равном 0,95, и степени черноты поверхности ХИ, составляющего 0,8, оценочная площадь ХИ должна быть 40 м².

Использование приборов плазменной электроэнергетики исключает дополнительную защиту от радиационного и ионизирующего излучения, а высокая рабочая температура термоэмиссионных приборов позволяет уменьшить размеры ХИ и расположить сами элементы преобразования в непосредственной близости от ТРП [5]. Все эти преимущества высокотемпературных СПТ свидетельствуют об актуальности исследования особенностей их функционирования.

Цель работы — теоретическое определение мощности высоковольтного плазменного термоэмиссионного диода при различных теплофизических параметрах системы и составление ряда рекомендаций на основе полученных результатов.

Методика расчета. Определить зависимость удельной электрической мощности высоковольтного плазменного термоэмиссионного диода (ВПТД) от давления насыщенных паров цезия в межэлектродном зазоре (МЭЗ) можно по формуле

$$P_{\text{эл.уд}}(p_{\text{Cs}}) = j_p U_{\text{п}}, \quad (1)$$

где j_p — плотность термоэмиссионного тока с катода, А/см²; $U_{\text{п}}$ — напряжение обратного дугового пробоя МЭЗ, В.

Напряжение обратного дугового пробоя определяет в данном случае рабочее напряжение ВПТД.

Плотность термоэмиссионного тока может быть вычислена по закону Ричардсона — Дешмана [6–8]:

$$j_p(p_{\text{Cs}}, T_{\text{Э}}) = AT_{\text{Э}}^2 \exp\left(-\frac{e \varphi_{\text{Э}}(p_{\text{Cs}}, T_{\text{Э}})}{k T_{\text{Э}}}\right), \quad (2)$$

где $T_{\text{Э}}$ — температура эмиттера, К; $A = 120,4 \text{ А}/(\text{см}^2 \cdot \text{К}^2)$ — постоянная Зоммерфельда [8]; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ — заряд электрона; $\varphi_{\text{Э}}(p_{\text{Cs}}, T_{\text{Э}})$ — эффективная работа выхода эмиттера в парах цезия, эВ; $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}/\text{К}$ — постоянная Больцмана.

В работе использованы данные S -образных кривых Рейзора [1], которые характеризуют эмиссионную способность поверхности эмиттера от степени покрытия ее атомами цезия. Типичная S -образная кривая для низких значений давления пара цезия в МЭЗ ВПТД представлена на рис. 1 [6, 7].

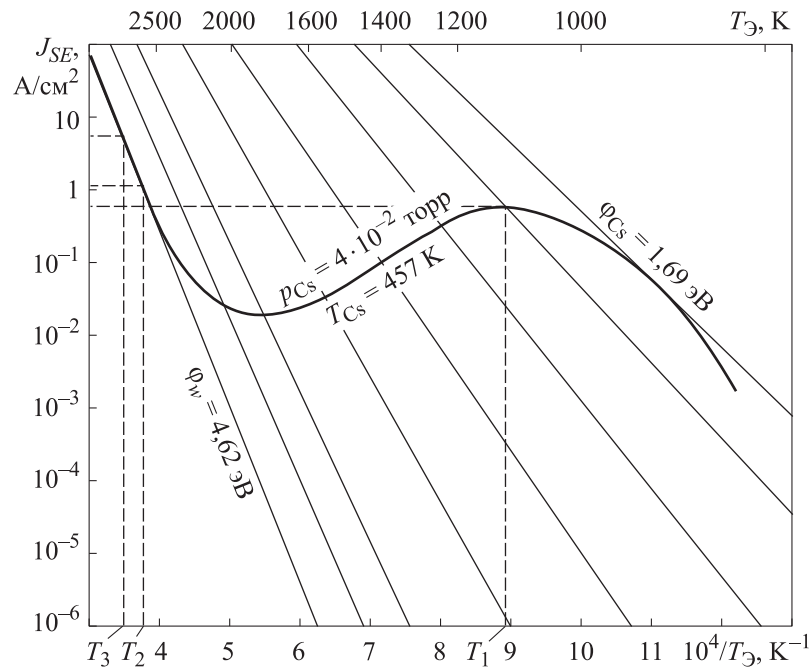


Рис. 1. Типичная S-образная кривая для вольфрамового катода в парах цезия при температуре 457 К

Оптимальная величина плотности тока (см. рис. 1) соответствует низкотемпературному экстремуму на S-образной кривой (T_1), однако в то же время можно достичь подобных значений плотности тока, перейдя в высокотемпературную область кривой Рейзора (T_2 и T_3). Исходя из этих условий, можно выбрать два температурных режима эмиттера с одинаковой плотностью тока. Отметим, что в данной работе был исследован именно высокотемпературный режим функционирования эмиттера. Конкретно температуру эмитирующего электрода принимали с учетом технической целесообразности использования ВПТД, т. е. такой, чтобы соответствующая плотность тока на S-образной кривой была не ниже 1 A/cm^2 [9].

Рабочее напряжение ВПТД обычно составляет $(0,8 \dots 0,9)U_n$ [9], поэтому для определения удельной электрической мощности можно использовать значение напряжения обратного дугового пробоя МЭЗ, или взятое из экспериментальных данных, или вычисляемое по формуле [9]

$$U_n = \left[\frac{\chi_{ar}^2 m_{Cs}}{\epsilon_0 k e} \frac{1}{n_a} (T_a^{кр}(d_{кр}) - T_a(0)) \right]^{1/3}, \quad (3)$$

где χ_{ar} — коэффициент теплопроводности с учетом реактивной составляющей, Вт/(м·К) [10]; $m_{Cs} = 2,21 \cdot 10^{-21}$ кг — масса атомов цезия [11];

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — диэлектрическая постоянная; n_a — концентрация нейтральных атомов, $1/\text{м}^3$; $T_a^{\text{кр}}(d_{\text{кр}})$ — критическая температура атомов в ионном слое в момент зажигания самостоятельного дугового разряда, К; $T_a(0)$ — температура атомов пара цезия в МЭЗ, К.

Здесь рассматривается метод, основанный на экспериментальных данных по критической плотности обратного тока ВПТД в предпробойный момент и зависимости пробойного напряжения от давления насыщенных паров цезия, представленных в [9]. Экспериментальные данные относительно пробойного напряжения приведены на рис. 2.

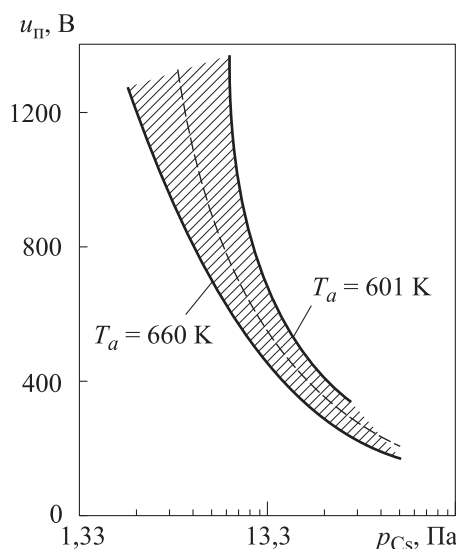


Рис. 2. Экспериментальный график зависимости $U_{\text{п}}(p_{\text{Cs}})$

Давление пара цезия может быть определено по формуле [6, 7, 12]

$$\lg(p_{\text{Cs}}) = 6,78 - \frac{3740}{T_{\text{Cs}}}. \quad (4)$$

Расчет плотности термоэмиссионного тока проводился по (2) с учетом материала эмиттера. В качестве материала эмиттера рассмотрены тантал Та, молибден Мо, вольфрам W и рений Re. Для параметра Рейзора $T_{\text{Э}}/T_{\text{Cs}} > 2,7$ [7, 13] (что соответствует условиям задачи) эффективная работа выхода может быть определена по зависимости

$$\varphi_{\text{Э}}(p_{\text{Cs}}, T_{\text{Э}}) = \varphi_1 + \varphi_2 \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{\beta T_{\text{Cs}}}{T_{\text{Э}}} - \alpha\right]}, \quad (5)$$

где φ_1 , φ_2 , β , α — безразмерные коэффициенты (представлены для исследуемых материалов в табл. 1); $T_{\text{Э}}$ — температура эмиттера, К; T_{Cs} — температура цезиевого резервуара, К.

Соответствующие коэффициенты в (5) взяты из [7] и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты для определения эффективной работы выхода исследуемых материалов

Коэффициент	Рений (Re)	Вольфрам (W)	Молибден (Mo)	Тантал (Ta)
φ_1	1,57	2,08	2,15	1,86
φ_2	3,57	2,48	2,35	2,44
α	5,63	11,76	10,76	11,15
β	20,89	40,77	37,83	36,75

Результаты расчета и их анализ. Результаты расчета эмиссионных характеристик эмиттеров ВПТД даны в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Эффективная работа выхода эмиттера ВПТД при различных температурах цезиевого резервуара

Условия расчета			φ_e , эВ			
$p_{Cs} \cdot 10^{-2}$, торр	T_{Cs} , К	T_{Δ} , К	Рений (Re)	Вольфрам (W)	Молибден (Mo)	Тантал (Ta)
4	$4,57 \cdot 10^2$	2570	4,08	4,68	4,53	4,46
5	$4,63 \cdot 10^2$	2600	4,07	4,68	4,53	4,46
8	$4,70 \cdot 10^2$	2600	3,93	4,64	4,53	4,46
9	$4,78 \cdot 10^2$	2630	3,96	4,65	4,53	4,46
10	$4,81 \cdot 10^2$	2680	4,03	4,67	4,53	4,46

Таблица 3

Плотность термоэмиссионного тока с эмиттера

Условия расчета			j_p , А/см ²			
$p_{Cs} \cdot 10^{-2}$, торр	T_{Cs} , К	T_{Δ} , К	Рений (Re)	Вольфрам (W)	Молибден (Mo)	Тантал (Ta)
4	$4,57 \cdot 10^2$	2570	$5,37 \cdot 10^{-1}$	1,05	1,46	3,33
5	$4,63 \cdot 10^2$	2600	$7,02 \cdot 10^{-1}$	1,36	1,89	4,26
8	$4,70 \cdot 10^2$	2600	$8,39 \cdot 10^{-1}$	1,39	1,95	4,35
9	$4,78 \cdot 10^2$	2630	1,05	1,78	2,49	5,50
10	$4,81 \cdot 10^2$	2680	1,46	2,65	3,66	8,04

Исходя из полученных результатов расчета эмиссионных характеристик и пробойного напряжения определена удельная электрическая мощность ВПТД как функция давления пара цезия в межэлектродном зазоре (рис. 3).

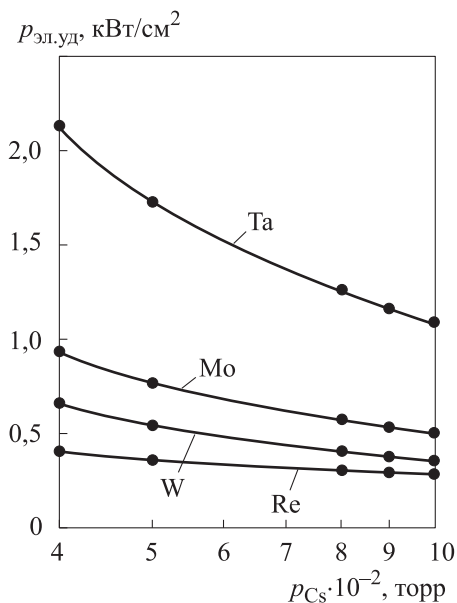


Рис. 3. Зависимость удельной электрической мощности ВПТД от давления насыщенных паров цезия для эмиттеров из разных материалов при их постоянной температуре $T_3 = 2500\text{K}$

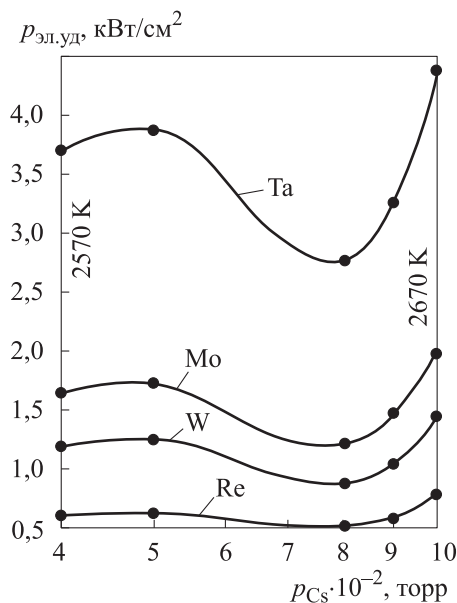


Рис. 4. Зависимость удельной электрической мощности от давления паров цезия для катодов из разных материалов при их оптимизированных температурах

Как показали расчеты, при низких давлениях цезия плотность термоэмиссионного тока эмиттера ВПТД почти постоянна, форма полученной зависимости аналогична зависимости $U_n(p_{Cs})$. Это связано с тем, что при высоких температурах эмиттера эффективная работа выхода слабо зависит от давления паров цезия в МЭЗ и близка к эффективной работе выхода чистого металла. Следовательно, удельная мощность ВПТД изменяется аналогично зависимости его пробойного напряжения (см. рис. 2).

График зависимости удельной электрической мощности от давления насыщенных паров при оптимизированной по плотности температуре эмиттера ВПТД представлен на рис. 4.

Анализ кривых на рис. 4 приводит к выводу, что тантал является наилучшим из рассматриваемых материалов эмиттера, а для наиболее распространенного в термоэмиссионной электронике эмиттера из вольфрама значение удельной электрической мощности ВПТД составляет $1,5 \text{ кВт/см}^2$, что в 3 раза ниже, чем у ВПТД с эмиттером из тантала.

Бинарная смесь газов. Для увеличения удельной электрической мощности ВПТД с вольфрамовым эмиттером в рамках данной работы проведено исследование эмиссионных характеристик в случае бинарного (цезий-бариевого) наполнения МЭЗ. С использованием

данных [9, 14] были выбраны три характерных значения работы выхода эмиттера в зависимости от давления пара бария:

φ_1 , эВ	2,5
φ_2 , эВ	2,8
φ_3 , эВ	3,0

Плотность термоэмиссионного тока с эмиттера определялась аналогично предыдущим вычислениям при температуре эмиттера 1800К, принятой по рекомендации [7]. Пробойные напряжения МЭЗ ВПТД брались по рис. 1, такие же, как для ВПТД с цезиевым наполнением.

Результаты расчета удельной электрической мощности ВПТД с бинарным наполнением приведены на рис. 5 (массовая доля бария составляет от 1 до 5 % массы смеси).

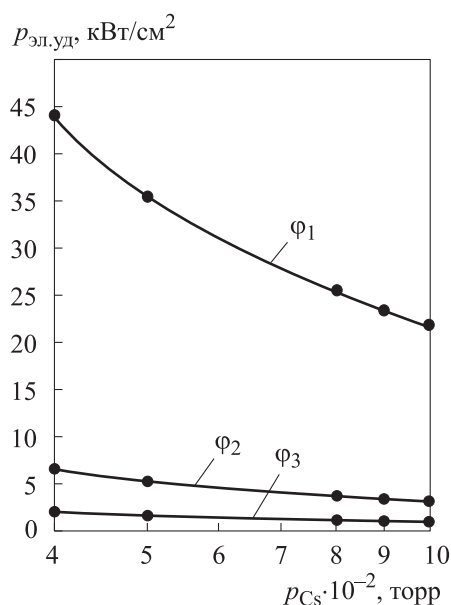


Рис. 5. Зависимости удельной электрической мощности от давления бинарной смеси газов для трех рассматриваемых работ выхода

Заключение. Результаты расчетного исследования привели к выводу, что существует ярко выраженный максимум зависимости $P_{эл.уд.}(p_{Cs})$, и это может быть использовано для оптимизации работы ВПТД. Кроме того, было показано, что при цезиевом наполнении МЭЗ применение танталового эмиттера позволяет получить значительный выигрыш в мощности ВПТД, а использование бинарного цезий-бариевого наполнения является наиболее эффективным решением при проектировании ВПТД мощностью более 10 кВт с вольфрамовым эмиттером.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Андреев П.В., Жаботинский Е.Е., Никонов А.М. Использование термоэмиссионных ЯЭУ в составе космических энергодвигательных комплексов. *Атомная энергия*, 1992, т. 75, № 4, с. 249–254.
- [2] Грязнов Г.М. *Космическая атомная энергетика и новые технологии (Записки директора)*. Москва, Изд-во ЦНИИАтоминформ, 2007, 135 с.
- [3] Кузнецов В.И., Бабанин В.И., Пашина А.С. Экспериментальные исследования бессточного сильноточного модулятора на основе термоэмиссионного диода для космических систем преобразования тока. *Космическая техника и технологии*, 2017, № 1 (16), с. 103–113.
- [4] Кайбышев В.З. Термоэмиссии в космических ядерных энергоустановках. *Энергия: Экономика, Техника, Экология*, 2018, № 4, с. 13–21.
- [5] Онуфриева Е.В., Алиев И.Н., Онуфриев В.В., Синявский В.В. Энергетические характеристики высокотемпературных плазменных вентилей систем преобразования тока космических энергодвигательных установок. *Известия Российской Академии наук. Энергетика*, 2016, № 3, с. 127–140.
- [6] Рябиков С.В. *Технология термоэмиссионных преобразователей*. Москва, Атомиздат, 1974, 232 с.
- [7] Ушаков Б.А., Никитин В.Д., Емельянов И.Я. *Основы термоэмиссионного преобразования энергии*. Москва, Атомиздат, 1974, 286 с.
- [8] Протасов Ю.С., Чувашев С.Н. *Физическая электроника газоразрядных устройств. Эмиссионная электроника*. Москва, Высшая школа, 1992, 463 с.
- [9] Онуфриева Е.В., Онуфриев В.В., Ивашкин А.Б. *Физические основы построения высокотемпературных систем преобразования тока космических энергодвигательных установок*. Москва, МГТУ, 2021, 168 с.
- [10] Варгафтик Н.Б., Керженцев В.В. Экспериментальное исследование коэффициента теплопроводности паров цезия. *Академия наук СССР. Теплофизика высоких температур*, 1972, № 10, с. 59–65.
- [11] Кикоин И.К. *Таблицы Физических Величин*. Москва, Атомиздат, 1976, 1008 с.
- [12] Devis R.H., Mason E.A., Munn R.J. High-temperature transport properties of alkali metal vapors. *Physics of Fluids*, 1965, vol. 8, pp. 444–452.
- [13] Фоменко В.С. *Эмиссионные Свойства Материалов*. Киев, Наукова Думка, 1981, 339с.
- [14] Онуфриев В.В., Лошкарев А.И. Зажигание обратного дугового разряда в цезиевом термоэмиссионном диоде. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2005, № 8, с. 72–74.

Статья поступила в редакцию 30.06.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Анциферов Д.А., Онуфриев В.В., Онуфриева Е.В. Исследование зависимости электрической мощности высоковольтного плазменного термоэмиссионного диода от теплофизических параметров и типа рабочего тела. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 9. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-9-2210>

Анциферов Дмитрий Андреевич — студент кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: плазменные системы преобразования тока, плазменная электроэнергетика, электрические ракетные двигатели, космические аппараты низких околоземных орбит.
e-mail: antsiferovda@student.bmstu.ru

Онуфриев Валерий Валентинович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: прямое преобразование энергии, термоэмиссионные преобразователи, приборы плазменной электроэнергетики, космические ядерные энергодвигательные установки, плазменные системы преобразования тока.
e-mail: evgeni.bmstu@yandex.ru

Онуфриева Евгения Валерьевна — старший преподаватель кафедры «Техническая физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: evgeni.bmstu@yandex.ru

Investigation of the high-voltage plasma thermionic diode electric power dependence on the thermophysical parameters and the type of working fluid

© D.A. Antsiferov, V.V. Onufriev, E.V. Onufrieva

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Design and development of high-temperature current conversion systems based on the plasma power engineering devices, such as, for example, grid key elements and high-voltage plasma thermionic diodes (HPTD), is an urgent task and is connected to development of the high-power nuclear propulsion systems for spacecraft. The paper presents results of studying the HPTD specific electric power dependence on the thermophysical parameters of the interelectrode gap filler, i.e. on its temperature and pressure. Besides, dependence of the HPTD power was demonstrated on the materials used in the electrodes manufacture. HPTD specific electrical power dependences were obtained, as a function of temperature (anode and emitter) and vapor pressure of cesium and binary mixture. Expediency of using the HPTD binary filler with the tungsten emitter to increase its specific electric power was shown.

Keywords: high-temperature diode, breakdown voltage, emission current, specific power, electrode materials, cesium, barium, binary mixture

REFERENCE

- [1] Andreev P.V., Jabotinsky E.E., Nikonov A.M. Ispolzovanie termoemissionnykh YaEU v sostave kosmicheskikh energodvigatelnykh kompleksov [The use of thermionic nuclear power plants as part of the space power propulsion systems]. *Atomnaya energiya — Atomic Energy*, 1992, vol. 75, no. 4, pp. 249–254.
- [2] Gryaznov G.M. *Kosmicheskaya atomnaya energetika i novye tekhnologii (Zapiski direktora)* [Space nuclear power engineering and new technologies (Notes of the Director)]. Moscow, TSNIIatominform Publ., 2007, 135 p.
- [3] Kuznetsov V.I., Babanin V.I., Pashchina A.S. Experimentalnye issledovaniya bessetochnogo silnotochnogo modulyatora na osnove termoemissionnogo dioda dlya kosmicheskikh sistem preobrazovaniya toka [Experimental studies of a grid-less high-current modulator based on the thermionic diode for space current conversion systems]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii — Space Engineering and Technologies*, 2017, no. 1 (16), pp. 103–113.
- [4] Kaibyshev V.Z. Termoemissii v kosmicheskikh yadernykh energoustanovkakh [Thermal emissions in space nuclear power plants]. *Energiya: Ekonomika, Tekhnika, Ekologiya — Energy: Economics, Technology, Ecology*, 2018, no. 4, pp. 13–21.
- [5] Onufrieva E.V., Aliev I.N., Onufriev V.V., Sinyavsky V.V. Energeticheskiye kharakteristiki vysokotemperaturnykh plazmennykh ventiley sistem preobrazovaniya toka kosmicheskikh energodvigatelnykh ustanovok [Energy characteristics of the high-temperature plasma valves in current conversion systems of the space power propulsion systems]. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Energetika — Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2016, no. 3, pp. 127–140.
- [6] Ryabikov S.V. *Tekhnologii termoemissionnykh preobrazovateley* [Technology of thermionic converters]. Moscow, Atomizdat Publ., 1974, 232 p.

- [7] Ushakov B.A., Nikitin V.D., Emelyanov I.Ya. *Osnovy termoemissionnogo preobrazovaniya energii* [Fundamentals of thermionic energy conversion]. Moscow, Atomizdat Publ., 1974, 286 p.
- [8] Protasov Yu.S., Chuvashhev S.N. *Fizicheskaya elektronika gazorazryadnykh ustroystv. Emissionnaya elektronika* [Physical electronics of gas-discharge devices. Emission electronics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1992, 463 p.
- [9] Onufrieva E.V., Onufriev V.V., Ivashkin A.B. *Fizicheskiye osnovy postroyeniya vysokotemperaturnykh sistem preobrazovaniya toka kosmicheskikh energodvigatelnykh ustanovok* [Physical foundations of construction of high-temperature current conversion systems in the space power propulsion systems]. Moscow, BMSTU Publ., 2021, 168 p.
- [10] Vargaftik N.B., Kerzhentsev V.V. Eksperimentalnoe issledovanie koeffitsienta teploprovodnosti parov tseziya [Experimental study of the caesium vapor thermal conductivity coefficient]. *Akademiya nauk SSSR. Teplofizika vysokikh temperatur — USSR Academy of Sciences. Thermophysics of High Temperatures*, 1972, no. 10, pp. 59–65.
- [11] Kikoin I.K. *Tablitsy fizicheskikh velichin* [Tables of physical quantities]. Moscow, Atomizdat Publ., 1976, 1008 p.
- [12] Davis R.H., Mason E.A., Munn R.J. High-temperature transport properties of alkali metal vapors. *Physics of Fluids*, 1965, no. 8, pp. 444–452.
- [13] Fomenko V.S. *Emissionnye svoystva materialov* [Emission properties of materials]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1981, 339 p.
- [14] Onufriev V.V., Loshkarev A.I. Zazhiganiye obratnogo dugovogo razryada v tsezievom termoemissionnom diode [Ignition of the reverse arc discharge in a cesium thermionic diode]. *Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 2005, no. 8, pp. 72–74.

Antsiferov D.A., Student, Department of Plasma Power Plants, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: plasma current conversion systems, plasma electric power engineering, electric rocket engines, spacecraft of low Earth orbits.
e-mail: antsiferovda@student.bmstu.ru

Onufriev V.V., Professor, Department of Plasma Power Plants, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: direct energy conversion, thermionic converters, plasma electric power devices, space nuclear power propulsion systems, plasma current conversion systems. e-mail: evgeni.bmstu@yandex.ru

Onufrieva E.V., Senior Lecturer, Department of Technical Physics, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: evgeni.bmstu@yandex.ru