

ТЕМПЕРАТУРА ЭЛЕКТРОНОВ В МЕЖЭЛЕКТРОДНОМ ЗАЗОРЕ ТЕРМОЭМИССИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

© 2020 г. А. В. Белкин^{1,*}, Н. В. Щукин^{1,**}

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, 115409 Россия*

**e-mail: abw1991@autorambler.ru*

***e-mail: NVShchukin@mephi.ru*

Поступила в редакцию 09.05.2020 г.

После доработки 29.11.2020 г.

Принята к публикации 08.12.2020 г.

В работе представлено описание математической модели температуры электронов термоэмиссионного преобразователя в дуговом режиме. Поскольку физические процессы в дуговом режиме не всегда возможно точно описать, то предложено использовать обоснованные допущения для анализа работы преобразователя. Одной из главных характеристик низкотемпературной плазмы в термоэмиссионном преобразователе является температура электронов в межэлектродном зазоре. Температура электронов в термоэмиссионном преобразователе в различной степени зависит от условий преобразования тепловой энергии в электрическую, например от межэлектродного зазора, давления паров цезия, силы тока. Однако большинство характеристик плазмы зависит от процессов ионизации и рекомбинации частиц в межэлектродном зазоре. Приближения в математической модели термоэмиссионного преобразователя связаны с определением физических характеристик низкотемпературной плазмы в межэлектродном зазоре. В работе введено предположение о зависимости скорости образования ионов в межэлектродном пространстве преобразователя. Оценка скорости образования ионов в межэлектродном зазоре позволяет определить характеристики процесса термоэмиссионного преобразования энергии. Анализ характеристик термоэмиссионного преобразователя приводит к оптимизации конструкции и режима его работы. Представленная модель позволяет получить параметры термоэмиссионного преобразователя в дуговом режиме работы.

Ключевые слова: термоэмиссионный реактор-преобразователь, термоэмиссионный преобразователь энергии, дуговой режим работы преобразователя, низкотемпературная плазма, температура электронов

DOI: 10.1134/S2304487X20060024

ВВЕДЕНИЕ

Диффузионный режим не является единственным возможным режимом работы термоэмиссионного преобразователя при высоких давлениях паров цезия. Ядерно-энергетические установки с термоэмиссионным преобразованием энергии используют диффузионный режим термоэмиссионного преобразователя энергии (ТЭП) на промежуточных уровнях мощности. На номинальном уровне мощности ТЭП переходит в дуговой режим работы. Существующие термоэмиссионные установки используют именно этот режим преобразования энергии [1]. Однако возникают сложности в определении параметров низкотемпературной плазмы. Температура электронов зависит от многих факторов в процессе работы термоэмиссионного преобразователя, но характер таких зависимостей не всегда удается численно определить. На этом основании необходимо предложить новый механизм определения харак-

теристик процесса термоэмиссионного преобразования.

ОПИСАНИЕ ДУГОВОГО РЕЖИМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Расчет состояния дуговой плазмы сводится к нахождению распределения по зазору следующих параметров: концентрации заряженных частиц, концентрации нейтральных атомов, потенциала, температуры электронов и температуры атомов. Вследствие интенсивного обмена энергией при столкновениях между ионами и атомами температуру ионов можно считать равной температуре атомов. С увеличением тока через преобразователь температура электронов и концентрация заряженных частиц в плазме возрастают. При этом скорость ионизации возрастает линейно с увеличением концентрации и экспоненциально с увеличением температуры электронов, в то время

как отвод образующихся ионов на электроды за счет амбиполярной диффузии, хотя и возрастает линейно с увеличением концентрации, но сравнительно слабо зависит от температуры электронов. Это приводит к тому, что с увеличением температуры электронов генерация ионов уже не может уравниваться их отводом на стенки. В результате концентрация возрастает до тех пор, пока генерация ионов не начинает уравниваться их рекомбинацией. В этом случае концентрация заряженных частиц в каждой точке равна своему термодинамически равновесному значению. Таким образом, при большой плотности тока плазма в преобразователе переходит в состояние локального термодинамического равновесия [2].

Перенос электронов через дуговую плазму в преобразователе носит своеобразный характер. Наибольший вклад в ток дают полевая и диффузионная составляющие электронного тока. Ток, связанный с градиентом температуры, как правило, мал. В прикатодной части плазмы полевая составляющая преобладает над диффузионной, которая до максимума концентрации направлена против полного тока. Напротив, в прианодной области полный ток направлен против поля и преобладает диффузионная составляющая. Таким образом, физическая картина протекания тока в узком зазоре преобразователя отлична от обычного однородного газового разряда, когда идет ток, в основном, под действием поля, а выделяющееся тепло передается от электронов атомам, излучается или отводится за счет рекомбинации на стенки трубки. В дуге термоэмиссионного преобразователя однородный положительный столб, как таковой, отсутствует. Из распределения ионного тока можно определить скорость генерации (рекомбинации) в межэлектродном зазоре преобразователя. Обычно у катода преобладает ионизация, а у анода — рекомбинация. Ионизация максимальна в прикатодной области, где температура электронов достаточно высока. Напротив, в прианодной области температура электронов низкая, и рекомбинация ионов преобладает над их генерацией. Однако скорость рекомбинации у анода обычно невелика и ионный ток в этой области меняется слабо [3].

При увеличении напряжения на преобразователе с ростом тока увеличивается катодное падение потенциала и возрастает электронная температура. Рост температуры электронов приводит к увеличению количества рождающихся ионов и соответственно к росту концентрации и увеличению ионного тока на катод. Однако увеличение концентрации заряженных частиц приводит и к росту столкновительной рекомбинации. В результате размер области, откуда ионы, не рекомбинируя, могут достигать катода, сокращается [3].

Сильные изменения концентрации по зазору приводят к тому, что в разных областях плазмы имеют место различные механизмы рассеяния электронов. В прикатодной части плазмы, где при достаточных токах концентрация ионов большая, преобладает рассеяние электронов на ионах [4]. Так как при этом механизме рассеяния коэффициент диффузии обратно пропорционален концентрации, то для обеспечения прохождения электронного тока за максимумом концентрации, где ток является диффузионным, значение концентрации должно возрастать с увеличением тока быстрее, чем по линейному закону.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ В ДУГОВОМ РЕЖИМЕ

В рассматриваемой модели расчета дугового режима используется приближение локального термодинамического равновесия плазмы в межэлектродном зазоре, а также приближение слабоионизованной плазмы. Предполагается, что объемная ионизация не влияет на величину электронного тока ($j_e = \text{const}$), поскольку подвижность электронов больше подвижности ионов ($u_e/u_i \gg 1$) [5].

Вследствие объемной ионизации:

$$\frac{dj}{dx} = q, \quad (1)$$

где q — число ионов, возникающих в единице объема в единицу времени в данной точке.

Следующее предположение заключается в том, что $q = \alpha n$, где $\alpha = \alpha(T_e)$. Этот закон выполняется в случае ступенчатой ионизации, если наиболее медленным процессом оказывается возбуждение резонансного уровня, и если функция распределения свободных электронов близка к равновесной. Поскольку точной зависимости $\alpha(T_e)$ неизвестно, то можно сделать следующее предположение. Коэффициент α является показателем того, насколько быстро происходит ионизация в данной точке пространства. В межэлектродном пространстве электроны представляют те заряженные частицы, с помощью которых происходит образование ионов цезия из нейтральных атомов. Появление ионов в межэлектродном зазоре (МЭЗ) определяется характеристиками электронов и нейтральных атомов. Чтобы вызвать ионизацию электроны, попадающие в МЭЗ, должны обладать достаточной для этого энергией, т.е. кинетической энергией. Кинетическая энергия электронов напрямую зависит от температуры электронного газа, т.е. от T_e . Средняя тепловая скорость электронов составляет характеристику их кинетической энергии. Поскольку в объеме плазмы происходят процессы,

которые описаны в предыдущих разделах, то необходимо учитывать число электронов и атомов цезия в объеме образованной плазмы. И, воспользовавшись предположением о локальном термодинамическом равновесии, число атомов в плазме ТЭП определяется как n_R . И наконец, необходимо определить характеристику, с помощью которой возможно сопоставить число электронов и атомов цезия в межэлектродном зазоре с процессом генерации ионов. Такой характеристикой выступает эффективное сечение ионизации цезия σ_0 . Объединив все предположения выше, коэффициент α определится как:

$$\alpha = v_e \sigma_0 n_R \quad (2)$$

Исходя из полученного выражения, коэффициент α представляет из себя эффективное время ионизации, т.е. время, в течение которого в межэлектродном пространстве, появляются заряженные частицы до достижения равновесной концентрации плазмы.

Получаем следующее уравнение [5]:

$$\frac{d^2 n}{dx^2} = -\frac{q}{D_a} \quad (3)$$

где D_a – коэффициент амбиполярной диффузии.

Пренебрегая поверхностной ионизацией по сравнению с объемной, граничные условия имеют вид:

на катоде ($x = 0$) (все параметры обозначаются одним штрихом)

$$-j^i = D_a \frac{dn}{dx_{x=0}} + \frac{u_i}{u_e} j_e = \frac{1}{4} n' v_i \quad (4)$$

на аноде ($x = d$) (все параметры обозначаются двумя штрихами)

$$j'' = -D_a \frac{dn}{dx_{x=d}} - \frac{u_i}{u_e} j_e = \frac{1}{4} n'' v_i \quad (5)$$

Тогда решение имеет вид:

$$n = n' \cos(\gamma x) + \frac{n'' - n' \cos(\gamma d)}{\sin(\gamma d)} \sin(\gamma x), \quad (6)$$

где $\gamma = \sqrt{\alpha/D_a}$.

Затем, используя граничные условия, получается уравнение:

$$\left(D_a \gamma \frac{\cos(\gamma d)}{\sin(\gamma d)} + \frac{1}{4} v_i - \frac{D_a \gamma}{\sin(\gamma d)} \right) (n' + n'') = 0 \quad (7)$$

Откуда следует, что $n' + n'' = 0$, что несовместимо с требованием положительной определенности при $n', n'' \neq 0$. Следовательно:

$$D_a \gamma \frac{\cos(\gamma d)}{\sin(\gamma d)} + \frac{1}{4} v_i = \frac{D_a \gamma}{\sin(\gamma d)} \quad (8)$$

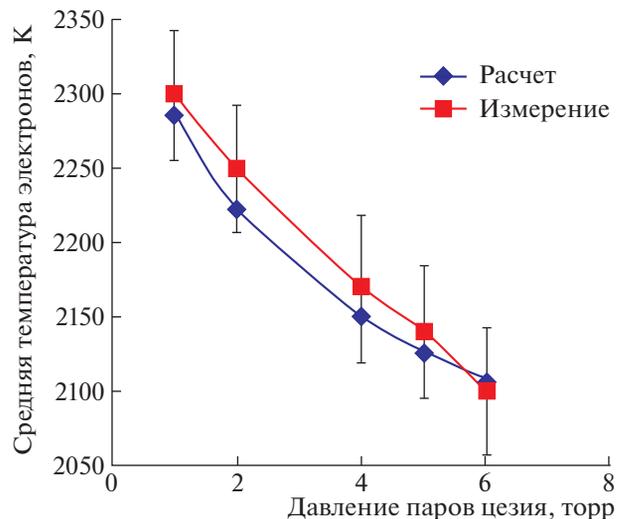


Рис. 1. Зависимость средней температуры электронов от давления паров цезия.

После преобразований:

$$\frac{\gamma d}{2} \operatorname{tg} \left(\frac{\gamma d}{2} \right) = \frac{v_i d}{8 D_a} \quad (9)$$

Если ограничиться первой гармоникой, то в результате [5]:

$$\gamma d = \pi - \beta, \quad (10)$$

где $\beta \ll \pi$. Откуда следует, что:

$$\gamma d = \pi \left(1 - \frac{8 D_a}{v_i d} \right) \quad (11)$$

Уравнение (11) определяет среднюю температуру электронов T_e в зависимости от расстояния между электродами d и давления паров цезия p . Поскольку зависимость γ от T_e экспоненциальная, а от p – степенная, можно ожидать, что T_e достаточно слабо зависит от давления или расстояния между электродами d , причем с увеличением давления или расстояния температура дуги убывает. Полученное уравнение не зависит от тока, следовательно, температура электронов в дуге также не должна зависеть от тока, или, если учесть возможность отклонения от предположений, принятых в расчете, то зависимость T_e от тока будет достаточно слабой.

Полученная зависимость средней температуры электронов T_e от параметров термоэмиссионного преобразователя определяет состояние плазмы в межэлектродном зазоре. На рис. 1–3 представлены графики зависимости средней температуры горения дуги в термоэмиссионном преобразователе от давления паров цезия, межэлектродного зазора и температуры эмиттера [2, 6, 7]. Измерения температуры электронов в межэлектродном зазоре проводились для лабораторного

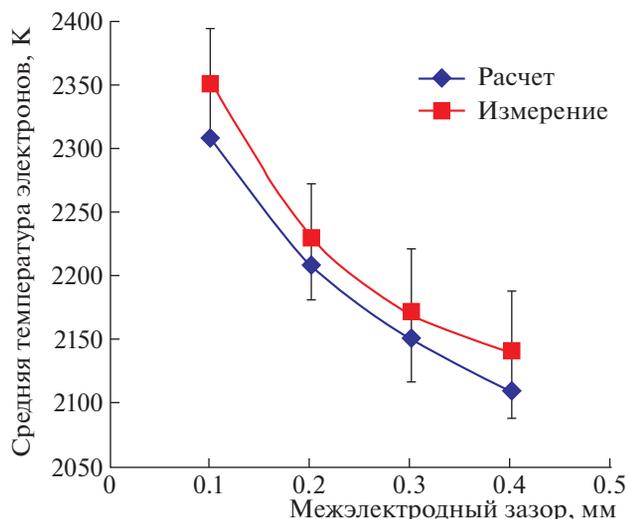


Рис. 2. Зависимость средней температуры электронов от межэлектродного зазора.

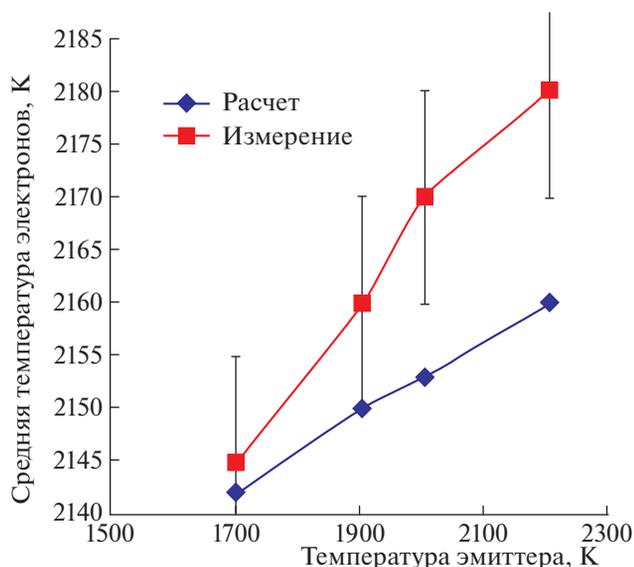


Рис. 3. Зависимость средней температуры электронов от температуры эмиттера.

термоэмиссионного преобразователя зондовым методом [2]. К особенностям зондового метода относится локальное определение параметров плазмы (преимущество метода) и появление некоторого возмущения плазмы в области зонда (недостаток метода).

Сложность определения характеристик плазмы в межэлектродном зазоре термоэмиссионного преобразователя в составе электрогенерирующего канала в реакторе-преобразователе заключается в размещении соответствующих датчиков внутри конструкции [8]. Именно по этой причине невозможно непосредственно измерить ос-

новные параметры термоэмиссионного преобразования энергии. Используя совокупность косвенных измерений и расчетных методик, возможно определить режим работы ТЭП [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена модель определения средней температуры электронов в межэлектродном зазоре. Полученная модель позволяет оценить состояние плазмы в термоэмиссионном преобразователе, находящемся в дуговом режиме. Рассчитанная величина средней температуры электронов закладывает итерационный процесс по нахождению основных характеристик термоэмиссионного преобразования энергии. С помощью расчетного итерационного моделирования происходит определение характеристик ТЭП.

Зависимость скорости образования ионов в МЭЗ, основанная на теоретических соотношениях, позволяет не привязываться к конкретной конструкции лабораторного ТЭП. Более того, предложенная модель согласуется с экспериментальными измерениями для таких термоэмиссионных преобразователей энергии. Полученная расчетная модель позволяет расширить область применения уже используемых методов проектирования ТЭП [10] в составе ядерно-энергетических установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков Б.А., Никитин В.Д., Емельянов И.Я. Основы термоэмиссионного преобразования энергии. М., Атомиздат, 1974. С. 288.
2. Бахит Ф.Г., Дюжев Г.А., Марциновский А.М., Мойжес Б.Я., Пикус Г.Е., Сонин Э.Б., Юрьев В.Г. Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1973. С. 479.
3. Квасников Л.А., Кайбышев В.З., Каландаришвили А.Г. Рабочие процессы в термоэмиссионных преобразователях ядерных энергетических установок. М.: Изд-во МАИ, 2001. С. 208.
4. Королев Ю.Д. Элементарные и кинетические процессы в газоразрядной плазме: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. С. 128.
5. Касиков И.И. Моделирование рабочих процессов в термоэмиссионных преобразователях тепловой энергии. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Обнинск, 2002. С. 125.
6. Стаханов И.П., Щербинин П.П. Распределение плотности плазмы и напряженности электрического поля на границе с электродом // ПМТФ. № 2. 1970. С. 4–6.
7. Александров А.Ф., Амбарян С.С., Мицук В.Е., Погосян В.А. Стационарное распределение заряжен-

- ных частиц в диффузионном приближении // ПМТФ. 1969. № 2. С. 62–66.
8. Куландин А.А., Тимашев С.В., Атамасов В.Д. Основы теории, конструкции и эксплуатации космических ЯЭУ. Л.: Энергоатомиздат, 1987. С. 328.
 9. Синявский В.В., Бержатый В.И., Маевский В.А. Проектирование и испытания термоэмиссионных твэлов. М.: Атомиздат, 1981. С. 96.
 10. Полоус М.А., Алексеев П.А., Ехлаков И.А. Современные расчетные технологии обоснования характеристик ядерных электродвигательных установок в проектных работах создания термоэмиссионных космических ядерных энергетических установок нового поколения. Электронный журнал “Труды МАИ”. Выпуск № 68. С. 26. <http://trudymai.ru/upload/iblock/3d4/3d4a7018e93b08e50921f8144d2f4788.pdf>

Vestnik Nacional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta “MIFI”, 2020, vol. 9, no. 6, pp. 511–516

Electron Temperature in the Interelectrode Gap of a Thermionic Energy Converter

A. V. Belkin^{a,#} and N. V. Schukin^{a,##}

^a National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

[#]e-mail: abw1991@autorambler.ru

^{##}e-mail: NVShchukin@mephi.ru

Received May 09, 2020; revised November 29, 2020; accepted December 08, 2020

Abstract—A mathematical model of the temperature of electrons of a thermionic converter in an arc mode has been described. Since the physical processes in the arc operation mode of the thermionic converter sometimes cannot be accurately described, it is proposed to use reasonable assumptions to analyze the operation of the converter. One of the main characteristics of a low-temperature plasma in the thermionic converter is the temperature of the electrons in the interelectrode gap. The temperature of electrons in the thermionic converter depends to varying degrees on the conditions for converting the thermal energy into the electrical energy, for example, on the interelectrode gap, cesium vapor pressure, and current in the thermionic converter. However, most of the plasma characteristics depend on the ionization and recombination of particles in the interelectrode gap. Approximations in the mathematical model of the thermionic converter are associated with the determination of the physical characteristics of a low-temperature plasma in the interelectrode gap. The dependence of the rate of formation of ions in the interelectrode space of the converter is assumed. The estimate of the formation rate of ions in the interelectrode gap makes it possible to determine the characteristics of thermionic energy conversion. The analysis of the characteristics of the thermionic converter allows the optimization of the design and its operation mode. The presented model makes it possible to obtain the parameters of the thermionic converter in the arc mode of operation.

Keywords: thermionic converter reactor, thermionic energy converter, arc mode of a thermionic energy converter, low temperature plasma, electron temperature, bulk ionization and recombination of charged particles

DOI: 10.1134/S2304487X20060024

REFERENCES

1. Ushakov B.A., Nikitin V.D., Emelyanov I.A. *Osnovy termoemissionnogo preobrazovaniya energii* [Basics of thermionic energy conversion]. M., Atomizdat, 1974, p. 288.
2. Baksht F.G., Dyugev G.A., Marcinovskiy A.M., Moyges B.A., Pikus G.E., Sonin E.B., Yurev V.G. *Termoemissionnye preobrazovateli i nizkotemperaturnaya plazma* [Thermionic Converters and Low-Temperature Plasma]. M., Publisher “Science”, Main edition of the physical and mathematical literature, 1973, p. 479.
3. Kvasnikov L.A., Kaybyshev B.Z., Kalendarishvili A.G. *Rabochie processy v termoemissionnykh preobrazovatelyakh yadernykh energeticheskikh ustanovok* [The work processes in thermionic converters of nuclear power plants]. M., Publisher MAI, 2001, p. 208.
4. Korolev Yu.D. *Elementarnye i kineticheskie processy v gazorazryadnoy plazme: uchebnoe posobie* [Elementary and kinetic processes in gas-discharge plasma: a tutorial]. Tomsk: Publisher of Tomsk Polytechnic University, 2008, p. 128.
5. Kasikov I.I. *Modelirovanie rabochih processov v termoemissionnykh preobrazovatelyakh teplovoj energii. Diss. kand. fiz.-mat. nauk* [Modeling of working processes in thermionic converters of thermal energy. Dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences]. Obninsk, 2002, p. 125.
6. Stahanov I.P., Sherbinin P.P. *Raspredelenie plotnosti plazmy i napryazhennosti elektricheskogo polya na*

- granice s elektrodom [Plasma density distribution and electric field strength at the interface with the electrode]. *Prikl. Mekh. Tekh. Fiz.* № 2. 1970, pp. 4–6. (in Russian)
7. Aleksandrov A.F., Ambaryan S.S., Micyk V.E., Pogoyan V.A. Stacionarnoe paspredelenie zaryazhennykh chastic v diffuzionnom priblizhenii [Stationary distribution of charged particles in the diffusion approximation]. *Prikl. Mekh. Tekh. Fiz.* № 2. 1969, pp. 62–66. (in Russian)
 8. Kulandin A.A., Timashev S.V., Atamasov V.D. *Osnovy teorii, konstrukcii i ekspluatacii YAEU* [Fundamentals of the theory, design and operation of space NPU]. L., Energoatomizdat, 1987, p. 328.
 9. Sinyavskiy V.V., Berjatiy V.I., Maevskiy V.A. *Proektirovanie i ispytaniya termoemissionnykh tvelov* [Design and testing of thermal emission fuel rods]. M., Atomizdat, 1981, p. 96.
 10. Polous M.A., Alekseev P.A., Ehlov I.A. [Modern computational technologies for substantiating the characteristics of nuclear electromotive installations in the design work for the creation of a new generation of thermionic space nuclear power plants. Electronic journal “Proceedings of the MAI”]. *Sovremennye raschetnye tekhnologii obosnovaniya harakteristik yadernykh elektrodvigatel'nykh ustanovok v proektnykh rabotakh sozdaniya termoemissionnykh kosmicheskikh yadernykh energeticheskikh ustanovok novogo pokoleniya. Elektronnyy zhurnal “Trudy MAI”*, 2013, no. 68, p. 26. (in Russ.) Available at: <http://trudymai.ru/upload/-iblock/3d4/3d4a7018e93b08e50921f8144d2f4788.pdf> (accessed 05.07.2019)