

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 9. С. 430–439
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 9, pp. 430–439

Научная статья
УДК 621.36+537.58
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186289>
EDN: <https://www.elibrary.ru/EWGHAO>

Исследование теплового состояния электродов термоэмиссионного преобразователя с косвенным нагревом

И.Д. Акатьев¹✉, М.С. Яшин², В.В. Онуфриев³

^{1,3}МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

²АО «НИИ НПО «ЛУЧ», Подольск, Российская Федерация

¹akatevid@student.bmstu.ru✉

Аннотация. Статья посвящена исследованию теплового состояния электродов термоэмиссионного преобразователя (ТЭП) с лучистым нагревом раскаленными продуктами сгорания природного топлива. Авторами проведено исследование теплового состояния электродов с использованием программного комплекса конечно-элементного (КЭ) анализа COMSOL Multiphysics, позволяющего решать мультифизические задачи, представленные системой дифференциальных уравнений в частных производных. Рассмотрена упрощенная трехмерная геометрия, состоящая из плоских цилиндрических электродов, металлокерамического узла и внутреннего заполненного цезием межэлектродного зазора. Использованы модули «Heat Transfer in Solids and Fluids» и «Surface-to-Surface Radiation» при заданных граничных условиях, соответствующих работе термоэмиссионного преобразователя в режиме холостого хода – при отсутствии электронного охлаждения эмиттера. Расчетным методом получено поле температур в электродах и изоляторе термоэмиссионного преобразователя, которое позволяет судить о влиянии тепловых режимов элементов конструкции на их температуры.

Ключевые слова: термоэмиссионный преобразователь, плоские электроды, тепловое состояние, конечно-элементная модель, нагрев, охлаждение

Для цитирования. Акатьев И.Д., Яшин М.С., Онуфриев В.В. Исследование теплового состояния электродов термоэмиссионного преобразователя с косвенным нагревом // Термовые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 9. С. 430–439. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186289>

Original article

The research of thermal condition of electrodes of thermionic converter with indirect heating

I.D. Akatev¹✉, M.S. Yashin², V.V. Onufriev³

^{1,3}Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

²LUCH JSC, Podolsk, Russian Federation

¹akatevid@student.bmstu.ru✉

Abstract. The article is devoted to the study of the thermal state of electrodes of a thermionic emission converter (TEC) with radiant heating by incandescent products of natural fuel combustion. The authors conducted a study of the thermal state of electrodes using the COMSOL Multiphysics finite element (FE) analysis software package, which allows solving multiphysical problems represented by a system of partial differential equations. A simplified three-dimensional geometry consisting of flat cylindrical electrodes, a metal-ceramic assembly, and an internal interelectrode gap filled with cesium is considered. The modules «Heat Transfer in Solids and Fluids» and «Surface-to-Surface Radiation» were used under the specified boundary conditions corresponding to the operation of the TEC in idle mode – in the absence of electronic cooling of the emitter. The calculated method has obtained the temperature field in the electrodes and insulator of the TEC, which allows us to judge the effect of the thermal conditions of the structural elements on their temperatures. It is established that one of the main factors influencing the efficiency of a TEC with a plane-parallel geometry of electrodes is the thermal resistance of the structural elements. The heat fluxes in the geometry under consideration are estimated using the heat balance equations for the elements of the TEC structure. It is determined that the main part of the heat flow from the emitter to the collector in the geometry under study is transmitted through an insulator. It is necessary to increase the thermal resistance of the structural elements between the electrodes to ensure the required temperatures of the TEC electrodes. However, additional research is required depending on the chosen method of increasing the thermal resistance of structural elements – the use of materials with very low thermal conductivity or the use of geometric profiling of structural elements. It is advisable to take into account additional heat flows in the proposed model for a multiparametric study and optimization of the thermal condition of the TEC structure for various modes of its operation. A parameterized model of the three-dimensional geometry of TEC with various designs of insulator structures and the materials used can be a development of the presented model.

Keywords: thermionic emission converter, flat electrodes, thermal state, finite element model, heating, cooling

For citation. Akatev I.D., Yashin M.S., Onufriev V.V. The research of thermal condition of electrodes of thermionic converter with indirect heating. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 9, pp. 430–439. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186289>

Введение

Термоэмиссионный преобразователь энергии представляет собой устройство, которое преобразует высокотемпературное тепло непосредственно в электрическую энергию, используя явление термоэмиссии и легко ионизуемый цезий в качестве рабочего тела. Исходя из принципа работы ТЭП, источник тепловой мощности дол-

жен обеспечивать необходимую для термоэлектронной эмиссии температуру – более 1300 К. Таким источником может рассматриваться ядерный реактор деления, что в эпоху освоения космоса привело к созданию термоэмиссионных реакторов-преобразователей, использовавшихся на энерговооруженных космических аппаратах. Вместе с тем существует и другой высокотемп-

ратурный источник тепловой энергии – продукты сгорания природного топлива. Горение газа может быть использовано в термодинамическом цикле с верхней температурой не более 1300 К, что дает возможность использования термоэмиссионного преобразователя в качестве генерирующего элемента в процессе преобразования энергии. Можно сделать вывод о целесообразности создания компактных термоэмиссионных установок малой мощности, которые могут быть использованы во многих отраслях [1–6].

Следует добавить, что при исследовании теплоэлектрических характеристик ТЭП предпочтение отдается коаксиальной геометрии преобразователя [7–11]. В случае применения ТЭП с косвенным нагревом от пламени продуктов сгорания может быть использована плоскопараллельная геометрия электродов, как наиболее эффективная с точки зрения теплоподвода и теплоотвода. Актуальность исследования таких преобразователей подчеркивается необходимостью создания автономных энергоустановок прямого преобразования энергии на продуктах сгорания углеводородов для обеспечения электроэнергией удаленных и автономных территорий Севера, осуществляющих их добычу [12].

Реализация таких энергоустановок прямого преобразования энергии потребует создания новых схем, расчетных моделей, позволяющих рассчитать тепловое состояние преобразователя и факторы, влияющие на него, а также определить возможные пути совершенствования таких преобразователей, что и является целью данной работы.

Математическая постановка задачи

Для оценки теплового состояния ТЭП необходимо получить пространственное распределение температуры в конструкции путем решения стационарного уравнения теплопроводности, имеющего общий вид:

$$\nabla(\lambda \nabla T) + q_V = 0, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; q_V – мощность внутренних источников теплоты.

Уравнение (1) необходимо дополнить граничными условиями, а также определить систему координат. Введем следующую расчетную схему, представленную на рис. 1.

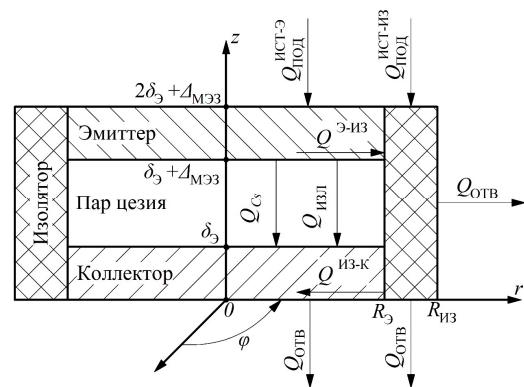


Рис. 1. Расчетная схема ТЭП: $R_{\text{Э}}$, $\delta_{\text{Э}}$ – радиус и толщина электродов; $\Delta_{\text{МЭЗ}}$ – величина межэлектродного зазора; $R_{\text{из}}$ – внешний радиус изолятора; $Q_{\text{под}}$ – подводимая тепловая мощность от источника к эмиттеру и изолятору; Q_{Cs} – тепловой поток, передаваемый от эмиттера к коллектору посредством теплопроводности цезия, $Q_{\text{из-Э}}$ – тепловой поток излучения от эмиттера на коллектор; $Q_{\text{из-К}}$ – тепловой поток из эмиттера в изолятор; $Q_{\text{отв}}$ – тепловой поток из изолятора в коллектор; $Q_{\text{отв}}$ – отводимая от коллектора и изолятора тепловая мощность

Расчетная схема представляет собой два плоскоцилиндрических электрода с равными диаметрами и толщинами, расположенных параллельно друг другу. Электроды разделены межэлектродным зазором (МЭЗ), наполненным паром цезия. Оба электрода размещены в диэлектрическом кольце – изоляторе ТЭП. Кольцо выполняет функции электрического и термического сопротивления, которое в общем случае зависит от его геометрии и теплопроводности материала. Таким образом можно оценить влияние конструктивного исполнения преобразователя на тепловое состояние электродов, в особенности на распределение температуры по рабочим поверхностям.

Исходя из описанной выше геометрии расчетной схемы, система координат выбирается цилиндрической с аксиальной симметрией. Сматриваемый режим работы термоэмиссионного преобразователя – режим холостого хода, что означает отсутствие внутренних источников теплоты. Каждые элемент конструкции преобразователя являются однородным по материалу – коэффициент теплопроводности не зависит от координат.

Таким образом, для каждого элемента конструкции ТЭП уравнение (1) в расчетной схеме имеет следующий вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \quad (1')$$

Подводимая тепловая мощность излучением от источника с температурой $T_{\text{ист}}$ определяет граничное условие на верхних торцевых поверхностях эмиттера ($z = 2 \times \delta_{\mathcal{E}} + \Delta_{\text{МЭЗ}}, 0 \leq r \leq R_{\mathcal{E}}$) (рис. 1) и изолятора ($z = 2 \times \delta_{\mathcal{E}} + \Delta_{\text{МЭЗ}}, R_{\mathcal{E}} \leq r \leq R_{\text{из}}$):

$$-\lambda_{\mathcal{E}} \frac{\partial T_{\mathcal{E}}}{\partial z} = \varepsilon_{\text{ист-}\mathcal{E}} \sigma_{\text{СБ}} (T_{\text{ист}}^4 - T_{\mathcal{E}}^4), \quad (2)$$

$$-\lambda_{\text{из}} \frac{\partial T_{\text{из}}}{\partial z} = \varepsilon_{\text{ист-из}} \sigma_{\text{СБ}} (T_{\text{ист}}^4 - T_{\text{из}}^4), \quad (2')$$

где $T_{\mathcal{E}}$, $T_{\text{из}}$ – соответственно температура эмиттера и изолятора, $\lambda_{\mathcal{E}}$, $\lambda_{\text{из}}$ – соответственно коэффициенты теплопроводности эмиттера и изолятора; $\varepsilon_{\text{ист-}\mathcal{E}}$, $\varepsilon_{\text{ист-из}}$ – соответственно приведенные степени черноты в системе источник-эмиттер и в системе источник-изолятор; $T_{\text{ист}}$ – температура источника – факела при горении природного топлива; $\sigma_{\text{СБ}}$ – постоянная Стефана–Больцмана.

Степень черноты в системе источник-эмиттер (источник-изолятор) определяется составом продуктов сгорания и степенью черноты внешней торцевой поверхности эмиттера (изолятора). Основными компонентами продуктов сгорания природного топлива являются углекислый газ и вода. Оценки, основанные на номограммах и зависимостях, полученных из экспериментальных данных, степеней черноты углекислого газа и паров воды, и оценки степени черноты внешней поверхности эмиттера (изолятора), дают величины степени черноты в системе источник-эмиттер (источник-изолятор) – $\varepsilon_{\text{ист-}\mathcal{E}}$ ($\varepsilon_{\text{ист-из}} = 0,6\text{--}0,8$ [13, 14]).

Температура источника энергии, факела при сгорании природного топлива, определяется, исходя из его состава, определяющего теплотворную способность, и коэффициента избытка воздуха. В зависимости от значения коэффициента избытка воздуха температура сгорания природного газа составляет 2000–2500 К [15, 16].

Отводимый от эмиттера тепловой поток в общем случае складывается из теплового потока теплопроводности пара цезия, излучения с эмиттера на коллектор и электронного охлаждения (при работе на нагрузку). В режиме холостого хода преобразователя в уравнении теплового баланса отсутствует член, учитывающий эффект электронного охлаждения. Таким образом, граничное условие на нижней торцевой поверхности эмиттера ($z = \delta_{\mathcal{E}} + \Delta_{\text{МЭЗ}}, 0 \leq r \leq R_{\mathcal{E}}$):

$$\begin{aligned} -\lambda_{\mathcal{E}} \frac{\partial T_{\mathcal{E}}}{\partial z} &= \\ &= \frac{\lambda_{\text{Cs}}}{\Delta_{\text{МЭЗ}}} (T_{\mathcal{E}} - T_{\text{K}}) + \varepsilon_{\text{ПР}} \sigma_{\text{СБ}} (T_{\mathcal{E}}^4 - T_{\text{K}}^4), \end{aligned} \quad (3)$$

где λ_{Cs} – коэффициент теплопроводности цезия; T_{K} – температура коллектора; $\varepsilon_{\text{ПР}} = 0,15\text{--}0,2$ – экспериментальные данные о приведенной степени черноты электрородов в зависимости от температуры эмиттера и материалов пары эмиттер–коллектор [17].

Тепловой поток из эмиттера по границе цилиндрической поверхности определяется тепловым контактом с изолятором и его теплопроводностью. В расчетной схеме все тепловые контакты считаются идеальными, и граничные условия в местах контакта определяются только теплопроводностью контактирующих материалов.

Приходящий в режиме холостого хода тепловой поток на коллектор определяется излучением с эмиттера и теплопроводностью цезия. Аналогично эмиттеру в режиме холостого хода преобразователя граничное условие для верхней торцевой поверхности коллектора ($z = \delta_{\mathcal{E}}, 0 \leq r \leq R_{\mathcal{E}}$) примет вид:

$$\begin{aligned} -\lambda_{\text{K}} \frac{\partial T_{\text{K}}}{\partial z} &= \\ &= \frac{\lambda_{\text{Cs}}}{\Delta_{\text{МЭЗ}}} (T_{\mathcal{E}} - T_{\text{K}}) + \varepsilon_{\text{ПР}} \sigma_{\text{СБ}} (T_{\mathcal{E}}^4 - T_{\text{K}}^4), \end{aligned} \quad (4)$$

где λ_{K} – коэффициент теплопроводности коллектора.

В следствие высоких температурброс тепла с элементов конструкции преобразователя может быть представлен в виде плотности теплового потока излучения.

В таком случае, граничное условия на нижних торцевых поверхностях коллектора ($z = 0, 0 \leq r \leq R_{\mathcal{E}}$) и изолятора ($z = 0, R_{\mathcal{E}} \leq r \leq R_{\text{из}}$):

$$-\lambda_{\text{K}} \frac{\partial T_{\text{K}}}{\partial z} = \varepsilon_{\text{P}} \sigma_{\text{СБ}} [T_{\text{K}}^4 - T_{\text{ОКР}}^4], \quad (5)$$

$$-\lambda_{\text{из}} \frac{\partial T_{\text{из}}}{\partial z} = \varepsilon_{\text{из}} \sigma_{\text{СБ}} [T_{\text{из}}^4 - T_{\text{ОКР}}^4], \quad (5')$$

где $\varepsilon_{\text{P}} = 0,85\text{--}0,9$ – степень черноты радиатора излучения, покрытого чернотным покрытием [18, 19]; $\varepsilon_{\text{из}}$ – степень черноты изолятора; $T_{\text{ОКР}}$ – температура окружающей среды.

Границное условия на внешней цилиндрической поверхности изолятора ($r = R_{из}$, $z = -0 \leq z \leq 2\delta_{Э} + \Delta_{МЭ}$) имеет вид:

$$-\lambda_{из} \frac{\partial T_{из}}{\partial r} = \varepsilon_{из} \sigma_{СВ} [T_{из}^4 - T_{OKP}^4]. \quad (6)$$

В качестве материала изолятора может быть рассмотрен оксид алюминия, теплопроводность которого при рабочих температурах преобразователя составляет $\lambda_{из} = 5-6 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К})$ [20], а степень черноты $\varepsilon_{из} = 0,4-0,8$ в зависимости от температуры и метода получения изолятора [21, 22].

Тепловая модель

Решение уравнения (1) с граничными условиями (2)–(6) проводилось в программном коде COMSOL Multiphysics, который позволяет решать мультифизические задачи, представленные системой дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов. Построение тепловой модели в программном коде осуществляется поэтапно. Основные этапы при построении модели в COMSOL Multiphysics:

- 1) выбор размерности пространства (0D, 1D, 1D Axisymmetric, 2D, 2D Axisymmetric, 3D);
- 2) выбор физического интерфейса в зависимости от поставленной задачи (The Heat Transfer in Solids, The Electrostatics и т.д.);
- 3) Выбор стационарного или нестационарного решателя [23].

Далее в модели строится или импортируется геометрия рассматриваемой схемы ТЭП. Задаются используемые материалы электродов и изолятора, задаются граничные условия, строится сетка и настраивается решатель.

Первоначально строится трехмерная геометрия исследуемого преобразователя, которая представлена на рис. 2.

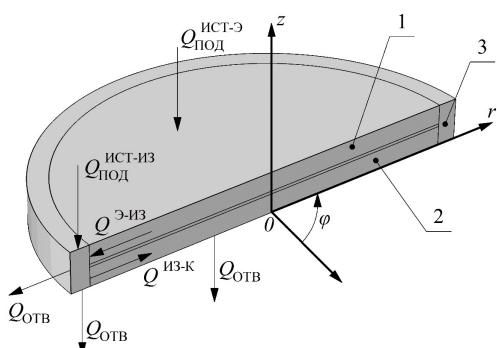


Рис. 2. Трехмерная КЭ модель: 1 – эмиттер; 2 – коллектор; 3 – изолятор

Трехмерная КЭ модель представляет собой два плоскоцилиндрических электрода радиусом $R_{Э} = 20 \text{ мм}$ и толщиной $\delta_{Э} = 2 \text{ мм}$, межэлектродный зазор $\Delta_{МЭ} = 0,3 \text{ мм}$, изолятор с наружным радиусом $R_{из} = 22 \text{ мм}$. Материалом электродов выбран вольфрам, материалом изолятора выбран оксид алюминия. Температурные зависимости теплофизических свойств выбранных материалов получены из библиотеки материалов COMSOL Multiphysics. МЭЗ заполнен паром цезия, теплопроводность цезия соответствует давлению 1 Торр (133,33 Па) [24].

Для исследования теплового состояния преобразователя были выбраны два модуля – «Heat Transfer in Solids and Fluids» и «Surface-to-Surface Radiation». Модуль «Heat Transfer in Solids and Fluids» позволяет получить температурное поле в объеме жидкых, газообразных и твердых тел. Модуль «Surface-to-Surface Radiation» расширяет возможности модуля «Heat Transfer in Solids and Fluids», позволяя рассчитывать лучистый теплообмен между поверхностями. В каждом из модулей выбраны соответствующие уравнения (2)–(6) граничные условия.

После определения граничных условий необходимо создать расчетную сетку. При создании сетки необходимо следить за качеством сетки, что непосредственно влияет на расчетное время. Основными параметрами качества сетки являются «Минимальное качество элемента» и «Среднее качество элемента», при этом минимальное качество не должно быть ниже 10 %, а среднее не ниже 60 %, для обеспечения быстрого получения решения [23].

Создание сетки реализовано с помощью генератора «Free Triangular» на верхней торцевой поверхности геометрии, далее с помощью инструмента «Swept» сетка создается во всем расчетном объеме. В этом случае достигается лучшее по сравнению со стандартным генератором «Free Tetrahedral» качество сетки.

Полученная сетка представлена на рис. 3.

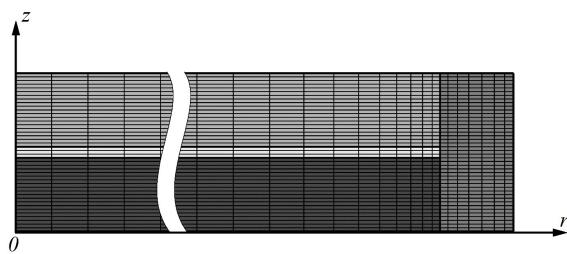


Рис. 3. Расчетная сетка в плоскости r - z

После построения сетки оценка дает следующие результаты:

- 1) вид элементов – призма;
- 2) количество элементов – 430 881;
- 3) минимальное качество элемента – 56 %;
- 4) среднее качество элемента – 85 %.

В настройке решателя нет необходимости, так как в большинстве задач достаточно настроек по умолчанию [23].

Результаты расчета и анализ

Основным результатом расчетов является температурное поле в элементах конструкции электродов и изоляторе ТЭП, а также в объеме МЭЗ. Результаты расчета температурного поля в КЭ модели ТЭП в плоскости r - z представлены на рис. 4.

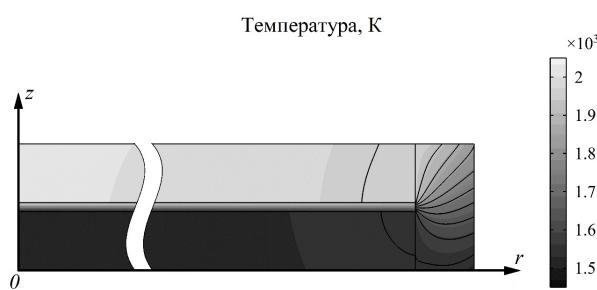


Рис.4. Температурное поле электродов и изолятора (изотермы с шагом 50 К): температура источника – $T_{ист} = 2273$ К [15, 16]; температура окружающей среды – $T_{окр} = 293$ К; приведенная степень черноты в системе источник-эмиттер (источник-изолятор) – $\varepsilon_{ист-э} = \varepsilon_{ист-из} = 0,7$ [13, 14]; приведенная степень черноты электродов – $\varepsilon_{пр} = 0,15$ [17]; степень черноты радиатора излучения – $\varepsilon_{р} = 0,9$ [18, 19]; степень черноты изолятора – $\varepsilon_{из} = 0,6$ [21, 22]; теплопроводности вольфрама и оксида алюминия заданы температурными зависимостями

В режиме холостого хода (рис. 4) наблюдается большая разница в температуре электродов – эмиттера и коллектора. Теплопроводность пара цезия при давлении 1 Торр крайне низкая, порядка 10^{-3} Вт/(м×К), поэтому основным механизмом передачи тепловой энергии в МЭЗ в режиме работы холостого хода является излучение. Так как приведенная степень черноты выбранной пары электродов (вольфрам – вольфрам) $\varepsilon_{пр} = 0,15$ [17], эффективная передача тепловой энергии может быть только при наличии существенной разницы температур излучающих поверхностей, что объясняет полученные результаты.

Значительный градиент температуры в объеме изолятора обусловлен его низкой теплопроводностью, при этом термическое сопротивление МЭЗ больше термического сопротивления изолятора – основная часть подводимой тепловой энергии, как будет показано ниже, идет к коллектору через изолятор. Это приводит к появлению теплового потока из изолятора в коллектор в радиальном направлении.

Влияние термического сопротивления элементов конструкции (электродов и изолятора) на их тепловой режим в КЭ модели показано на рис. 5.

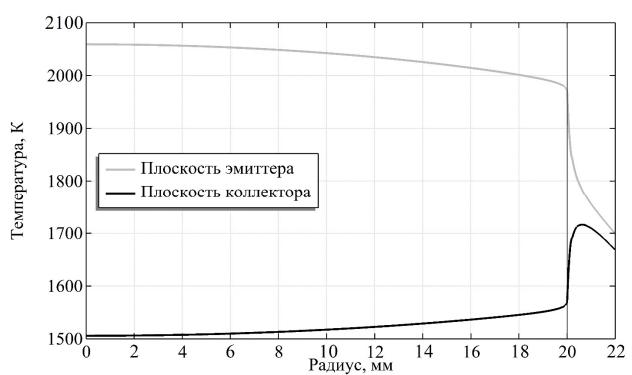


Рис. 5. Распределение температуры по радиусу на поверхности электродов ($r = 0$ –20 мм) и внутри изолятора ($r = 20$ –22 мм) при соответствующих координатах z

Расчетные зависимости распределения температур по поверхностям эмиттера и коллектора показывают, что температура эмиттера спадает в радиальном направлении, а температура коллектора, наоборот, растет вследствие описанного выше механизма теплопередачи. Разница температур между центром и периферией электродов достигает 100 К. Это связано с тем, что теплопроводность изолятора, оксида алюминия, при полученных температурах составляет 5–6 Вт/(м×К), а теплопроводность пара цезия на три порядка меньше – 5×10^{-3} Вт/(м×К). Так как термическое сопротивление изолятора существенно меньше термического сопротивления МЭЗ, основная часть (до 70 %) теплового потока от эмиттера к коллектору передается через изолятор, что и приводит к полученному распределению температур.

На рисунке 6 показано распределение температуры в КЭ модели по высоте (координате z) изолятора на контактных поверхностях ($r = R_3$, $z = 0$ –2,0 мм и $z = 2,3$ –4,3 мм) и области МЭЗ

($r = R_{\Theta}$, $z = 2,0 \dots 2,3$ мм) и на внешней поверхности изолятора ($r = R_{\text{из}}$).

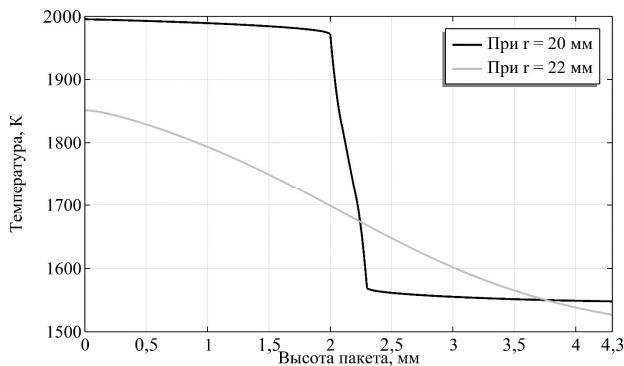


Рис. 6. Распределение температуры по высоте изолятора

На графике видно резкое снижение температуры внутренней поверхности изолятора ($r = R_3$) в области МЭЗ ($z = 2,0\text{--}2,3$ мм), что также связано с высоким термическим сопротивлением МЭЗ и лучистым характером теплопереноса.

Таким образом, одним из главных факторов, влияющих на эффективность термоэмиссионного преобразователя с плоскопараллельной геометрией электродов, является термическое сопротивление элементов конструкции (самого МЭЗ и изолятора). Регулирование теплового состояния может быть обеспечено за счет изменения термического сопротивления вышеуказанных элементов конструкции ТЭП. Увеличение термического сопротивления можно добиться двумя способами.

Во-первых, это использование материалов с очень низкой теплопроводностью – порядка 10^{-1} Вт/(м \times К) – позволит значительно повысить термическое сопротивление изоляции. Во-вторых, целесообразно применение геометрического профилирования элементов конструкции – снижение толщины, развитие поверхности и т.д. При таком способе необходимо принимать во внимание тот факт, что развитие поверхности может увеличить потери теплоты в окружающую среду.

Баланс тепловых потоков

Оценить тепловые потоки в рассматриваемой геометрии можно с применением уравнений теплового баланса. Схема баланса тепловых потоков для элементов конструкции ТЭП представлена на рисунке 7.

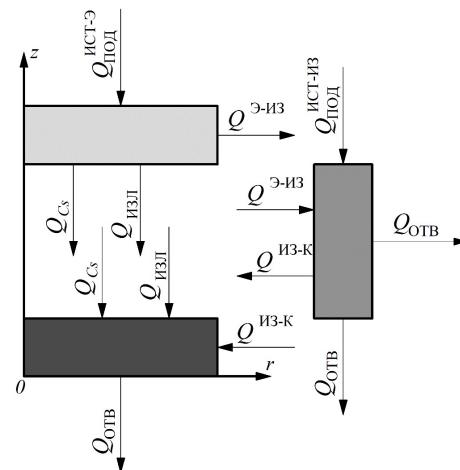


Рис. 7. Схема тепловых потоков в ТЭП

Уравнение теплового баланса для эмиттера включает в себя подводимый тепловой поток от источника и отводимые тепловые потоки теплопроводностью цезия, излучением на коллектор и тепловой поток в изолятор:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{ИСТ-}\Theta} \sigma_{\text{СБ}} (T_{\text{ИСТ}}^4 - T_{\Theta}^4) S_{\Theta} = \\ = \frac{\lambda_{Cs}}{\Delta_{M\Theta 3}} (T_{\Theta} - T_K) S_{\Theta} + \\ + \varepsilon_{\text{ПР}} \sigma_{\text{СБ}} (T_{\Theta}^4 - T_K^4) S_{\Theta} + Q_{\Theta-\text{ИЗ}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $S_{\mathcal{E}}$ – площадь эмиттера.

Уравнение теплового баланса для коллектора включает тепловой поток теплопроводностью цезия и излучения от эмиттера, теплового потока из изолятора, а также из отводимый тепловой поток излучением в окружающую среду:

$$\frac{\lambda_{Cs}}{\Delta_{M33}}(T_3 - T_K)S_K + \varepsilon_{\Pi P}\sigma_{CB}(T_3^4 - T_K^4)S_K + Q_{i3-K} = \varepsilon_P\sigma_{CB}[T_K^4 - T_{OKP}^4]S_K, \quad (8)$$

где S_K – площадь коллектора.

Уравнение теплового баланса для изолятора описывается подводимым тепловым потоком от источника, тепловым потоком из эмиттера, тепловым потоком из изолятора в коллектор и тепловым потоком излучения в окружающую среду:

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{\text{ист-из}} \sigma_{\text{СБ}} \left(T_{\text{ИСТ}}^4 - T_{\text{ИЗ}}^4 \right) S_{\text{ИЗ}}^{\text{T}} + \\ & + Q_{\text{Э-из}} = \\ & = \varepsilon_{\text{из}} \sigma_{\text{СБ}} \left[T_{\text{ИЗ}}^4 - T_{\text{ОКР}}^4 \right] \left(S_{\text{ИЗ}}^{\text{Б}} + S_{\text{ИЗ}}^{\text{T}} \right) + \\ & + Q_{\text{из-к}}, \end{aligned} \quad (9)$$

$S_{из}^T$ – площадь торцевой поверхности изолятора; $S_{из}^B$ – площадь цилиндрической поверхности изолятора.

Определение всех слагаемых уравнений (7)–(9) осуществляется итерационным методом относительно температур эмиттера, коллектора и изолятора T_E , T_K , и $T_{из}$ с шагом в 1 К. Погрешность при определении суммарных тепловых потоков менее 0,02 %. Исходные данные представлены в таблице 1, результаты расчета приведены в таблице 2.

Таблица 1. Исходные данные расчета

Температура источника, К	2273
Температура окружающей среды, К	293
Приведенная степень черноты в системе источник-эмиттер	0,7
Приведенная степень черноты в системе источник-изолятор	0,7
Приведенная степень черноты электродов (спр)	0,15
Степень черноты коллектора (ϵ_K)	0,9
Степень черноты изолятора ($\epsilon_{из}$)	0,6
Коэффициент теплопроводности цезия, Вт/(м·К)	$5,3 \times 10^{-3}$
Величина межэлектродного зазора, мм	0,3

Таблица 2. Результаты расчета

Температура эмиттера, К	2056
Температура коллектора, К	1542
Температура изолятора, К	1733
Общая подводимая мощность, Вт	625
Общая отводимая мощность, Вт	625
Тепловой поток излучением от источника к эмиттеру, Вт	440
Тепловой поток теплопроводностью цезия от эмиттера, Вт	11
Тепловой поток излучением от эмиттера к коллектору, Вт	131
Тепловой поток из эмиттера в изолятор, Вт	298
Тепловой поток излучением от источника к изолятору, Вт	185
Тепловой поток от изолятора в окружающую среду, Вт	263
Тепловой поток из изолятора в коллектор, Вт	220
Тепловой поток от коллектора в окружающую среду, Вт	362

Заключение

В работе проведено расчетное моделирование теплового состояния конструкции ТЭП с плоскоконформной геометрией электродов и лучистым нагревом эмиттера, работающего в режиме холостого хода.

Получены результаты расчета теплового состояния элементов конструкции ТЭП. Расчетным путем установлено, что термическое сопротив-

ление элементов конструкции напрямую влияет на температурный режим электродов термоэмиссионного преобразователя, характеризующийся значительным градиентом их температуры в радиальном направлении к изолятору.

Для обеспечения требуемых температур электродов ТЭП необходимо увеличивать термическое сопротивление элементов конструкции между электродами, однако это в зависимости от выбранного способа требует дополнительных исследований.

Целесообразно учесть в предложенной модели дополнительные тепловые потоки для много-параметрического исследования и оптимизации теплового состояния конструкции ТЭП для различных режимов его работы.

Развитием модели должно стать создание параметрической трехмерной геометрии преобразователя с различными исполнениями геометрии изолятора и используемыми материалами. Это позволит подбирать размеры элементов преобразователя для поиска оптимального теплового состояния.

Список источников

1. Khalid K.A.A., Leong T.J., Mohamed K. Review on Thermionic Energy Converters // IEEE Transactions on Electron Devices. 2016. Vol. 63. № 6. pp. 2231–2241. DOI: 10.1109/TED.2016.2556751
2. Campbell M.F., Celenza T.J., Schmitt F. et al. Progress Toward High Power Output in Thermionic Energy Converters // Advanced Science. 2021. Vol. 8. № 9. DOI: 10.1002/advs.202003812
3. Go D.B., Haase J.R., George J. et al . Thermionic Energy Conversion in the Twenty-first Century: Advances and Opportunities for Space and Terrestrial Applications // Frontiers in Mechanical Engineering. 2017. Vol. 3. DOI: 10.3389/fmec.2017.00013
4. Леонтьев А.И., Онищенко Д.О., Панкратов С.А. и др. Применение термоэлектрического генератора для обеспечения работоспособности турбины дизеля с частичной теплоизоляцией камеры сгорания // Тепловые процессы в технике. 2016. Т. 8. № 5. С. 227–232.
5. Колычев А.В., Керножицкий В.А., Левихин А.А. Система тепловой защиты керамических термоизолированных элементов спускаемых аппаратов и возвращаемых ступеней ракет-носителей // Тепловые процессы в технике. 2018. Т. 10. № 7–8. С. 325–333.
6. Зимин В.П., Ефимов К.Н., Овчинников В.А. и др. Математическое моделирование активной термоэмиссионной тепловой защиты при высокотемпературном обтекании оболочки // Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 93. № 3. С. 517–528.

7. Полоус М.А., Ярыгин В.И. Методика трехмерного расчета выходных характеристик экспериментального термоэмиссионного преобразователя // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 36–41.
8. Полоус М.А. Усовершенствование методики расчета выходных характеристик многоэлементного термоэмиссионного электрогенерирующего канала реактора-преобразователя // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2010. № 1. С. 164–172.
9. Гонтарь А.С., Давыдов А.А., Зазноба В.А. и др. Комплексное компьютерное моделирование выходных параметров и ресурсного поведения многоэлементного ЭГК на основе диоксида урана // Вопросы атомной науки и техники. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2014. № 1. С. 18–25.
10. Бабушкин Ю.В., Зимин В.П. Математическое обеспечение для моделирования термоэмиссионных систем // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. №1. С. 51–55.
11. Ушаков Б.А., Никтин В.Д., Емельянов И.Я. Основы термоэмиссионного преобразования энергии. М.: Атоиздат, 1974. 288 с.
12. Акатьев И.Д., Яшин М.С., Онуфриев В.В. Энергетическая модель плоского термоэмиссионного преобразователя с газопламенным нагревом эмиттера // Будущее машиностроения России: XVI всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием): сборник докладов. В 2-х томах, Москва, 19–22 сентября 2023 года. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. С. 391–399.
13. Торопов Е.В. Адаптация степени черноты продуктов сгорания топлив к интервалу температур 1000...2000 К // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2018. Т. 18. № 3. С. 22–29. DOI: 10.14529/power180303
14. Абдуллин А.М. Спектральные характеристики радиационного теплообмена в пламенных печах нефтехимической промышленности // Вестник Технологического университета. 2016. Т. 19. № 4. С. 40–42.
15. Юдин Р.А., Шестаков Н.И., Юдин И.Р. и др. Особенности расчета и регулирования процессов двухстадийного сжигания природного газа // Вестник Череповецкого государственного университета. 2014. № 4(57). С. 26–30.
16. Юдин Р.А., Шестаков Н.И., Юдин И.Р. и др. Особенности расчета неполного сгорания топлива произвольного химического состава // Череповецкие научные чтения – 2012: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. (Череповец, 01–02 ноября 2012 года / Ответственный редактор Н.П. Павлова. Том Часть 3. Череповец: Череповецкий государственный университет, 2013). С. 271–272.
17. Ярыгин В.И. Электродные материалы термоэмиссионных преобразователей энергетических установок различного назначения: Дисс. ... докт. техн. наук. Обнинск, 1999. 65 с.
18. Грибков А.С., Попов А.Н., Синявский В.В. Двухрежимная космическая ядерно-энергетическая установка на базе термоэмиссионного реактора-преобразователя и термоэлектрохимического генератора // Космическая техника и технологии. 2017. № 3(18). С. 42–52.
19. Пономарев-Степной Н.Н. (ред.). Изд. 2-е, доп. Космическая ядерная энергетика (ядерные реакторы с термоэлектрическим и термоэмиссионным преобразованием – «Ромашка» и «Енисей»). М.: ИздАТ, 2012. 227 с.
20. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. справочник. М.: Атомиздат, 1968. 484 с.
21. Сулейманов С.Х., Дыскин В.Г., Джанклич М.У. и др. Определение степени черноты керамического композиционного материала BMK-5 // Computational nanotechnology. 2021. Т. 8. № 2. С. 24–28. DOI: 10.33693/2313-223X-2021-8-2-24-28
22. Блох А.Г. Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 431 с.
23. COMSOL – Software for Multiphysics Simulation. 2025.
24. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическими свойствам газов и жидкостей. 2-е изд. М.: Физматгиз, 1972. 720 с.

References

1. Khalid KAA, Leong TJ, Mohamed K. Review on Thermionic Energy Converters. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2016;63(6):2231–2241. DOI: 10.1109/TE.2016.2556751
2. Campbell MF, Celenza TJ, Schmitt F et al. Progress Toward High Power Output in Thermionic Energy Converters. *Advanced Science*. 2021;8(9). DOI: 10.1002/advs.202003812
3. Go DB, Haase JR, George J et al. Thermionic Energy Conversion in the Twenty-first Century: Advances and Opportunities for Space and Terrestrial Applications. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2017;3. DOI: 10.3389/fmec.2017.00013
4. Leont'ev AI, Onishchenko DO, Pankratov SA et al. Application of a thermoelectric generator to ensure the operation of a diesel turbine with partial combustion chamber insulation. *Thermal processes in engineering*. 2016;8(5): 227–232. (In Russ.).
5. Kolychev AV, Kernozhitskiy VA, Levikhin AA. Thermal protection system for ceramic thermally stressed elements of landers and return stages of launch vehicles. *Thermal processes in engineering*. 2018;10(7–8):325–333. (In Russ.).
6. Zimin VP, Efimov KN, Ovchinnikov VA et al. Mathematical modeling of active thermoemissive thermal protection during high-enthalpy flow around a shell *Inzheenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2020;93(3):517–528. (In Russ.).
7. Polous MA, Yarygin VI. Methodology for three-dimensional calculation of the output characteristics of an ex-

- perimental thermionic converter. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ya*. 2012;(6):36–41. (In Russ.).
8. Polous MA. Improvement of the method for calculating the output characteristics of a multi-element thermionic power generation channel of a reactor-converter. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*. 2010; (1):164–172. (In Russ.).
 9. Davydov AA, Gontar AS, Sotnikov VN. Comprehensive computer modeling of the output parameters and resource behavior of a multi-element Uranium Dioxide-based EGC. *Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Fizika radiatsionnogo vozdeystviya na radioelektronnyu apparaturu*. 2014;(1):18–25. (In Russ.).
 10. Babushkin YuV, Zimin VP. Mathematical software for modeling thermionic emission systems. *Izvestiya TPU*. 2006;309(1):51–55. (In Russ.).
 11. Ushakov BA, Niktin VD, Emel'yanov IYa. *Fundamentals of Thermionic Energy Conversion*. Moscow: Atoizdat; 1974. 288 p. (In Russ.).
 12. Akatyev ID, Yashin MS, Onufriev VV. Energy model of a flat thermionic converter with gas-flame heating of the emitter. *Budushcheye mashinostroyeniya Rossii: XVI vserossiyskaya konferentsiya molodykh uchenykh i spetsialistov: sbornik dokladov*. 2024. p. 391–399. (In Russ.).
 13. Toropov EV. Adaptation of the blackness degree of combustion products to the temperature range 1000...2000 K. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*, 2018;18(3):22–29. (In Russ.). DOI: 10.14529/power180303
 14. Abdullin AM. Spectral characteristics of radiation heat transfer in flammable furnaces of the petrochemical industry *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*. 2016; 19(4):40–42. (In Russ.).
 15. Yudin RA, Shestakov NI, Yudin IR et al. Features of calculation and regulation of two-stage natural gas combustion processes. *Vestnik Cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014;(4(57)):26–30. (In Russ.).
 16. Yudin RA, Shestakov NI, Yudin IR et al. Features of calculating incomplete combustion of fuel with an arbitrary chemical composition. *Cherepoveckie nauchnye chteniya – 2012: Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. 2013. p. 271–272. (In Russ.).
 17. Yarygin VI. Electrode materials for thermionic converters in power plants for various purposes. *Electrode materials for thermionic converters for different types of power systems*. PhD thesis. Obninsk: IPPE JSC; 1999. 65 p. (In Russ.).
 18. Gribkov AS, Popov AN, Sinyavskiy VV. A two-mode space nuclear power plant based on a thermionic converter reactor and a thermoelectrochemical generator. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*. 2017;(3(18)):42–52. (In Russ.).
 19. Ponomarev-Stepnoy NN (eds.). *Space nuclear power (nuclear reactors with thermoelectric and thermionic conversion – «Romashka» and «Enisey»)*. Moscow: IzdAT; 2012. 227 p. (In Russ.).
 20. Chirkin VS. *Thermal and Physical Properties of Nuclear Engineering Materials Handbook*. Moscow: Atomizdat; 1968. 484 p. (In Russ.).
 21. Suleymanov SKh, Dyskin VG, Dzhanklich MU et al. Determination of the blackness degree of the ceramic composite material VMK-5 *Computational nanotechnology*. 2021;8(2):24–28. (In Russ.). DOI: 10.33693/2313-223X-2021-8-2-24-28
 22. Blokh AG, Zhuravlev YuA, Ryzhkov LN. *Heat exchange by radiation*. Moscow: Energoatomizdat; 1991. 431 p. (In Russ.).
 23. COMSOL – Software for Multiphysics Simulation. 2025.
 24. Vargaftik NB. *Handbook of Thermophysical Properties of Gases and Liquids*. Moscow: Fizmatgiz. 1972. 720 p. (In Russ.).