

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩЕГО КАНАЛА

Д.Г. Лазаренко

*Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск*



Рассмотрена более полная математическая модель для расчета теплоэлектрофизических характеристик электрогенерирующих каналов цилиндрической геометрии термоэмиссионных реакторов-преобразователей, включающая эмиттер, коллектор, охранный электрод и внешний чехол. Предложена расчетная методика, позволяющая проведение вариантных расчетов, в том числе для оптимизации выходных характеристик электрогенерирующих каналов.

Развитие программы космических исследований, возможности и качество ее реализации зависят от масштабов энергоснабжения бортовой аппаратуры космических аппаратов. Появление нового комплекса космических задач ставит вопрос о создании энергетических установок большей мощности. Разрабатываемые в настоящее время космические ядерные энергетические установки с термоэмиссионным преобразованием энергии способны перекрыть весь необходимый мощностной диапазон с приемлемыми эксплуатационными показателями. Целью данной работы является создание адекватной математической модели для расчета теплоэлектрофизических характеристик электрогенерирующих каналов (ЭГК) цилиндрической геометрии термоэмиссионных реакторов-преобразователей. Созданная методика позволяет проведение вариантных расчетов, в том числе для оптимизации выходных электрических характеристик ЭГК. Результаты расчетов теплоэлектрофизических характеристик ЭГК с использованием предложенной модели хорошо согласуются с результатами расчетов других авторов и экспериментальными данными.

ВВЕДЕНИЕ

Дальнейшее развитие программы космических исследований, возможности и качество ее реализации зависят от масштабов энергоснабжения бортовой аппаратуры космических аппаратов (КА) и систем жизнеобеспечения обитаемых космических кораблей, от технических и эксплуатационных характеристик бортовых энергоустановок. В этих условиях ориентация только на солнечные, химические

или радиоизотопные установки может стать серьезным препятствием прогрессу в данной области. Так, например, для решения задачи всепогодного круглосуточного наблюдения за техногенными объектами и природными процессами в различных регионах Земли, потребности в электрической мощности превышают десятки киловатт, а для решения задач глобальной связи и телекоммуникаций эти потребности могут составлять сотни киловатт, для обеспечения нужд межпланетных полетов необходимы мегаваттные мощности [1]. Отмеченная тенденция появления комплекса космических задач, требующих для своей реализации десятков и сотен киловатт электрической мощности, ставит вопрос создания энергетических установок большей мощности. Разрабатываемые в настоящее время космические ядерные энергетические установки (КЯЭУ) способны перекрыть весь необходимый мощностной диапазон с приемлемыми эксплуатационными показателями.

Проблема выбора вида преобразования энергии (прямое или машинное) и типа преобразователей тепловой энергии в электрическую (статические или динамические) остается актуальной и важной для исследователей и разработчиков различных преобразователей и КЯЭУ на их основе. Дискуссия по этой проблеме среди специалистов в области КЯЭУ обострилась в последнее время в связи с высказываемыми различными точками зрения в публикациях по оценке роли и места термоэмиссионных и динамических преобразователей в перспективных разработках КЯЭУ нового поколения, в частности, в работах [2,3]. НИОКР по созданию КЯЭУ нового поколения ведутся при значительном ужесточении требований по увеличению ресурса, величины выходной электрической мощности, ядерной и радиационной безопасности. И хотя КЯЭУ с прямым преобразованием энергии уступают КЯЭУ с динамическим преобразованием по системному к.п.д. в области мегаваттных мощностей, по системному критерию удельной массы они сопоставимы. До настоящего времени только термоэлектрические и термоэмиссионные преобразователи тепловой энергии в электрическую были и остаются единственными, прошедшими не только все стадии НИОКР, но и получившими реальный опыт использования в составе КЯЭУ [4–7].

Отечественные исследования в области систем прямого преобразования энергии закончились созданием и успешными летно-конструкторскими испытаниями КЯЭУ «БУК» с термоэлектрическим преобразователем в составе КА «УС-А» (1970–1988) и КЯЭУ «ТОПАЗ» с термоэмиссионным преобразователем энергии (ТЭП) в составе КА «Плазма-А» (1987). При этом КЯЭУ «ТОПАЗ» значительно превосходили КЯЭУ «БУК» по важнейшему ряду параметров, таких как системный к.п.д., полезная электрическая мощность и ресурс. С начала 90-х годов финансирование данного направления было существенно уменьшено, тем не менее продолжались исследовательские, расчетные и проектные работы. В настоящее время ведется разработка проектов термоэмиссионных КЯЭУ с мощностью до 0,5 МВт эл.[9].

Применение высокоэффективных низкотемпературных пар электродных материалов совместно с динамической подачей паров цезия в межэлектродный зазор привело к росту электродного к.п.д. ТЭП с 7% («ТОПАЗ») до уровня 25% [10], что позволяет рассматривать возможность не только космического, но и наземного применения ТЭП. Так в ГНЦ РФ-ФЭИ разработана концепция автономной атомной теплоэлектростанции малой мощности (2 МВт эл.) с термоэмиссионным преобразованием тепловой энергии в электрическую, отличающейся малым объемом капитального строительства, высокой внутренней безопасностью и надежностью, высокой степенью заводской готовности и простотой в эксплуатации [11,12].

УСТРОЙСТВО КЯЭУ С ТЭП

Основным элементом реактора термоэмиссионной КЯЭУ является электрогенерирующий канал (ЭГК), который, как правило, конструктивно представляет собой цилиндрическую сборку последовательно соединенных однотипных электрогенерирующих элементов (ЭГЭ), заключенных в общий корпус (чехол), который омывается жидкометаллическим теплоносителем, протекающим в кольцевом зазоре, окружающем ЭГК. Все ЭГЭ отделены от корпуса ЭГК слоем электроизоляции. Для вывода электроэнергии, которую генерирует ЭГК, служат два токовывода, которые обычно изолируются от корпуса ЭГК. Однако могут быть такие конструкции ЭГК, когда один из токовыводов соединен с корпусом [10].

В свою очередь, каждый ЭГЭ состоит из собственно ТЭП и коммутационной переключки, соединяющей его с соседним ЭГЭ. ТЭП состоит из двух тонких коаксиально расположенных цилиндрических электродов, разделенных межэлектродным зазором (МЭЗ), который в рабочем состоянии заполнен парами цезия при давлении несколько мм рт.ст. Внутренний электрод (эмиттер) разогрет до высокой температуры (1300–1800 К) за счет заключенного внутри него тепловыделяющего сердечника из ядерного топлива. Тепло с эмиттера посредством теплового излучения, теплопроводности через пары цезия и дистанционирующие элементы, а также за счет переноса электронов термоэмиссии (электронного охлаждения) передается с эмиттера на внешний электрод – коллектор (температура 700–900 К), с которого через слой электроизоляции и металлический корпус снимается теплоносителем. Кроме того, существуют утечки тепла с эмиттера ЭГЭ через коммутационную переключку на коллектор соседнего ЭГЭ и за счет излучения и теплопроводности через элементы конструкции свободного торца ЭГЭ.

Обычно тепловой и электрический расчет ЭГК проводится с целью получения таких его характеристик, как изомощностная вольтамперная характеристика при заданной тепловой мощности и давлении паров цезия, а также зависимости его электрической мощности и к.п.д. от тока или напряжения [13]. Часто эти характеристики называют выходными электрическими характеристиками ЭГК. Одновременно в ходе теплового и электрического расчета ЭГК можно получить температуры электродов (в первую очередь, эмиттеров), значения плотности тока, межэлектродного напряжения и их распределение по длине в каждом ЭГЭ для заданных значений тепловой мощности и электрического тока ЭГК.

Расчет многоэлементного ЭГК обычно сводится к последовательному расчету всех входящих в него ЭГЭ и суммированию их характеристик при заданной величине протекающего электрического тока I , одинакового для всех ЭГЭ ввиду их последовательного соединения. Таким образом, основным блоком такой методики является решение системы тепловых и электрических уравнений для ЭГЭ.

Основные уравнения математической модели тепловых и электрических процессов в ЭГЭ были получены в начале 60-х годов. Одновременно велась разработка математических методов решения системы уравнений ЭГЭ, которая осложнялась их существенной нелинейностью и необходимостью решать совместно несколько таких уравнений [14].

Первоначально, из-за отсутствия достаточно мощных вычислительных машин, разрабатывались методики аналитического решения системы уравнений ЭГЭ, что приводило к необходимости упрощения математической модели. В частности, приходилось вводить допущения о линейности локальной вольт-амперной характеристике (ВАХ) ТЭП, постоянстве температуры коллектора и плотности эмиссионного тока по длине ЭГЭ. При этих допущениях уравнение теплопроводности для коллектора, вообще, исключалось из математической модели, а уравнение тепло-

проводности для эмиттера (при условии линеаризации члена, описывающего теплопередачу излучением) и уравнение для межэлектродного напряжения становились линейными и допускали аналитическое решение. В дальнейшем (1965 г.) для решения нелинейного уравнения теплопроводности для эмиттера были применены вариационные методы и метод Галеркина [14], что позволило более точно рассчитать распределение температуры вдоль эмиттера, сравнить результаты расчета характеристик ЭГЭ с результатами по «линеаризованной» методике и показать, что несмотря на ряд довольно сильных упрощающих допущений, «линеаризованные» методики имеют право на существование и позволяют рассчитывать выходные энергетические характеристики ЭГЭ довольно точно.

Дальнейший прогресс в развитии расчетных методов исследования выходных характеристик ЭГК был связан с разработкой численных методов решения системы нелинейных дифференциальных уравнений ЭГЭ [13]. Достоинством численных методов расчета выходных характеристик является возможность учета всех связей при любом их характере и количестве, более высокая точность расчета искомых величин в пределах принятых допущений (распределение температуры, потенциала, плотности тока). Тем не менее, используемая при расчетах математическая модель тепловых и электрических процессов ЭГЭ даже при некоторых упрощающих допущениях (принцип аддитивности вольтамперной характеристики в рабочем процессе термоэмиссионного преобразования в ЭГК, азимутальная симметрия, пренебрежение радиальным распределением параметров ввиду «тонкости» электродов и др.), сводится к системе одномерных нелинейных дифференциальных уравнений 2-го порядка, описывающих только распределение температуры эмиттера, коллектора и разности потенциалов между электродами и их распределение по длине ЭГК. Нелинейность этих уравнений обусловлена наличием теплопередачи между электродами излучением и эмиссионным током электронов. Во все уравнения входит зависимость эмиссионного тока от температуры эмиттера, температуры коллектора, межэлектродного напряжения и ряда других параметров, которая и замыкает эти уравнения в единую систему. Расчет этой зависимости (локальной ВАХ ТЭП) является весьма сложной задачей, требующей рассмотрения элементарных процессов в низкотемпературной плазме МЭЗ, процессов, протекающих на электродах ТЭП, и обычно используется для оценок характеристик ЭГК. Локальная ВАХ ТЭП может быть получена также экспериментально при его лабораторных испытаниях [15]. Такие экспериментальные базы данных используются в согласованных с реальным уровнем технологии расчетах характеристик ЭГК и реактора-преобразователя.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы является создание адекватной математической модели для расчета теплоэлектрофизических характеристик ЭГК цилиндрической геометрии, в том числе более сложной геометрии, чем пара коаксиально расположенных электродов. Созданная методика должна позволять проведение многовариантных расчетов, в том числе, для оптимизации ВАХ ЭГК. Важной задачей, помимо развиваемых в работе расчетных моделей, является прямое обращение к экспериментальным базам данных локальных ВАХ и проведение требуемых выборок ВАХ внутри расчетного алгоритма.

Расчетная схема

Все многообразие конструктивных схем цилиндрических ЭГК можно свести к двум основным, представленным на рис.1. Это так называемый унифицированный ЭГК (а) и ЭГК с внешним расположением топлива (ВРТ) (б) [10]. Обе схемы вклю-

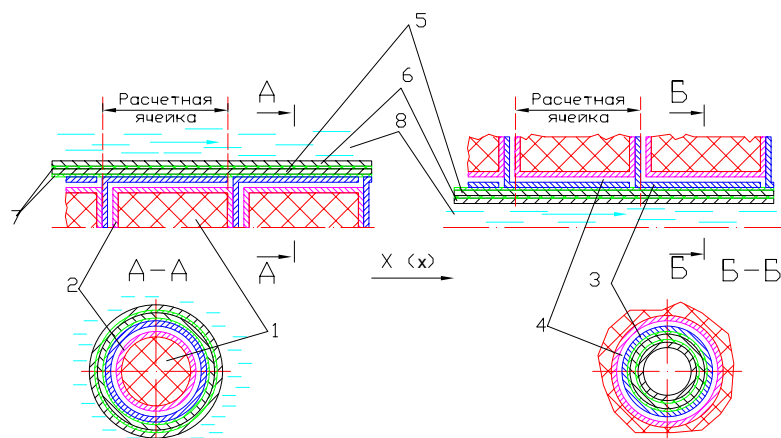


Рис. 1. Расчетная схема для ячеек ЭГЭ: а – ячейка унифицированного ЭГК, б – ячейка ЭГК с внешним расположением топлива; 1 – топливо, 2 – твэл-эмиттер, 3 – коллектор, 4 – межэлектродный зазор, 5 – охранный электрод, 6 – чехол, 7 – слой электроизоляции, 8 – теплоноситель

чают твэл, совмещенный с эмиттером, отделенный от него межэлектродным зазором коллектор, через слой «мокрой» (находящейся в парах цезия) электроизоляции контактирующий с охранным электродом, который, в свою очередь, через слой «сухой» электроизоляции контактирует с корпусом, омываемым теплоносителем. Рассмотренные выше расчетные схемы описывают процессы, происходящие в элементарном ТЭП, т.е. термоэмиссионной электродной паре, при достаточно грубых допущениях: коллектор рассматривается по модели в сосредоточенных параметрах, распределение тепловых потоков и температуры в охранным электроде, корпусе и теплоносителе не рассматривается.

В настоящей работе задача по определению распределения температуры и потенциалов в ЭГЭ ставится в наиболее полном и замкнутом для расчетной оптимизации характеристик и размеров ЭГЭ/ЭГК виде, с учетом продольных перетечек тепла не только в эмиттере, но и коллекторе, охранным электроде, корпусе. Кроме того, учтен подогрев теплоносителя вдоль ЭГК по ходу течения охлаждающего теплоносителя, зависимость теплофизических и электрофизических параметров от температуры, а также используются аппроксимированные в широком диапазоне изменения температуры эмиттера и коллектора экспериментальные вольтамперные характеристики. В такой постановке задачи появляется возможность не только увеличить адекватность расчетной модели реальной ячейки в смысле уточнения вольтамперных характеристик ЭГЭ, но и получить распределения температуры в «слоеном пироге» коллектор – охранный электрод – слой электроизоляции – корпус, что важно для оценки уровня термических напряжений и прогноза надежности и ресурса ЭГК.

Система уравнений

Конструкция ЭГЭ представляет собой систему коаксиальных оболочек с определенными законами теплообмена на цилиндрических поверхностях и описывается системой трехмерных (ρ, φ, x) дифференциальных уравнений теплопереноса и распределения потенциала второго порядка, дополненной балансным уравнением распределения температуры в теплоносителе первого порядка. Однако задача может быть существенно упрощена при условии аксиальной симметрии тепловыделения в твэл (что имеет место на большей части сечения активной зоны реактора-преобразователя) без существенного снижения точности расчета. Для это-

го поступаем следующим образом: проинтегрируем двумерные уравнения по радиусу и азимутальному углу, в результате получим систему одномерных уравнений второго порядка относительно средних по сечению конструктивных элементов значений температуры и потенциалов. Кроме того, в целях дальнейшего упрощения задачи целесообразно пренебречь продольными перетечками тепла в слоях изоляции (ввиду ее низкой, по сравнению с металлом, теплопроводности), а их термическое сопротивление включить в одномерные уравнения заменой поверхностных тепловых источников на эквивалентные объемные по зависимости $q_v = q_s / \delta^i$, где δ^i – толщина i -го слоя электроизоляции.

Далее в качестве примера проведенных расчетов рассматривается математическая модель ЭГЭ с внешним расположением топлива, которая включает в себя следующие уравнения (далее принято: *вн* и *нар* – внутренней и наружной поверхностям, уравнения нормированы на единицу длины ЭГЭ).

Уравнение баланса тепла для внутреннего эмиттера

$$Q_T + Q_{джэ} - Q_{расэ} - Q_{Cs} - Q_{изл} - Q_{элэ} = 0,$$

где $Q_T = (1 - \eta) \cdot Q_{топ}$ – тепловая мощность, выделяемая во внутренней части топливного сердечника ЭГЭ; $Q_{джэ} = J_{э}^2 \rho_{э} \pi (R_{энар}^2 - R_{эвн}^2)^{-1}$ – тепловая мощность выделяемая при протекании тока через эмиттер (джоулево тепло);

$Q_{расэ} = \frac{d}{dx} \left(l_{э} \frac{dT_{э}}{dx} \right) \rho (R_{энар}^2 - R_{эвн}^2)$ – тепловые потери за счет продольных растечек;

$Q_{элэ} = 2\pi R_{эвн} j_{Cs} (u + \Delta u_{э})$ – тепловые потери на электронное охлаждение эмиттера;

$Q_{Cs} = 2\pi R_{эвн} k_{Cs} (T_{э} - T_K)$ – тепловые потери за счет теплопроводности через пары Cs;

$Q_{изл} = 2\pi R_{эвн} \varepsilon \sigma (T_{э}^4 - T_K^4)$ – тепловые потери за счет лучистого переноса энергии.

Уравнение баланса тепла для внутреннего коллектора

$$Q_{изл} + Q_{Cs} + Q_{джк} + Q_{элк} - Q_{раск} - Q_{тоэ} = 0,$$

где $Q_{изл}$ – теплоприток за счет лучистого переноса энергии; Q_{Cs} – теплоприток за счет теплопроводности через пары Cs; $Q_{джк} = J_K^2 \rho_K \pi (R_{Кнар}^2 - R_{Квн}^2)^{-1}$ – тепловая мощность, выделяемая при протекании тока через коллектор;

$Q_{элк} = 2\pi R_{Квн} j_{Cs} (u + \Delta u_K)$ – тепловая мощность, выделяемая при электронном

нагреве коллектора; $Q_{раск} = \frac{d}{dx} \left(\lambda_K \frac{dT_K}{dx} \right) \pi (R_{Кнар}^2 - R_{Квн}^2)$ – тепловые потери за счет

продольных растечек; $Q_{тоэ} = 2\pi R_{Квн} k_{оэ} (T_K - T_{оэ})$ – тепловые потери на нагрев охранного электрода.

Уравнение баланса тепла для внутреннего охрannого электрода

$$Q_{тоэ} - Q_{расоэ} - Q_{тоб} = 0,$$

где $Q_{тоэ}$ – теплоприток от коллектора за счет теплопроводности;

$Q_{расоэ} = \frac{d}{dx} \left(\lambda_{оэ} \frac{dT_{оэ}}{dx} \right) \pi (R_{Квн}^2 - R_{оэнар}^2)$ – тепловые потери за счет продольных растечек;

$Q_{тоб} = \alpha (T_{об} - T_{тн}) 2\pi R_{обвн}$ – теплоотток к оболочке за счет теплопроводности.

Уравнение баланса тепла для внутренней оболочки

$$Q_{\text{ТОБ}} - Q_{\text{расОБ}} - Q_{\text{ТН}} = 0,$$

где $Q_{\text{ТОБ}}$ – теплоприток к оболочке за счет теплопроводности;

$Q_{\text{расОБ}} = \frac{d}{dx} \left(\lambda_{\text{ОБ}} \frac{dT_{\text{ОБ}}}{dx} \right) \pi (R_{\text{ОЭВН}}^2 - R_{\text{ОБНАР}}^2)$ – тепловые потери за счет продольных течек;

$Q_{\text{ТН}} = \alpha (T_{\text{ОБ}} - T_{\text{ТН}}) 2\pi R_{\text{ОБВН}}$ – теплоотток к теплоносителю за счет теплопроводности.

Уравнение баланса тепла для внутреннего потока теплоносителя

$$G c_p \frac{dT_{\text{ТН}}}{dx} = \alpha (T_{\text{ОБ}} - T_{\text{ТН}}) 2\pi R_{\text{ОБВН}}.$$

Напряжение на внутреннем эмиттере

$$\frac{d^2 U_{\text{Э}}}{dx^2} = \frac{\rho_{\text{Э}}}{S_{\text{Э}}} 2\pi R_{\text{ЭВН}} j_{\text{CS}}(x).$$

Напряжение на внутреннем коллекторе

$$\frac{d^2 U_{\text{К}}}{dx^2} = \frac{\rho_{\text{К}}}{S_{\text{К}}} 2\pi R_{\text{КНАР}} j_{\text{CS}}(x).$$

Здесь $Q_{\text{ТОП}}$ – полная тепловая мощность топливного сердечника; η – поправочный коэффициент разделения теплового потока, $T_{\text{Э}}$ – средняя температура эмиттера, $T_{\text{К}}$ – средняя температура коллектора, $T_{\text{ОЭ}}$ – средняя температура охрannого электрода, $T_{\text{ОБ}}$ – средняя температура оболочки, $T_{\text{ТН}}$ – средняя температура теплоносителя, $R_{\text{ЭВН}}$, $R_{\text{ЭНАР}}$, $R_{\text{КВН}}$, $R_{\text{КНАР}}$, $R_{\text{ОЭВН}}$, $R_{\text{ОЭНАР}}$, $R_{\text{ОБВН}}$, $R_{\text{ОБНАР}}$ – соответствующие радиусы эмиттера, коллектора, охрannого электрода и оболочки, $\lambda_{\text{Э}}$, $\lambda_{\text{К}}$, $\lambda_{\text{ОЭ}}$, $\lambda_{\text{ОБ}}$ – коэффициенты теплопроводности материалов эмиттера, коллектора, охрannого электрода и оболочки, k_{CS} – эффективный коэффициент теплопередачи через пары цезия, $k_{\text{ОЭ}}$ – эффективный коэффициент теплопередачи через охранный электрод, $s_{\text{Э}}$ – удельное сопротивление материала эмиттера, j_{CS} – плотность тока в МЭЗ, $J_{\text{Э}}$ – объемный ток эмиттера, $\rho_{\text{К}}$ – удельное сопротивление материала коллектора, $J_{\text{К}}$ – объемный ток коллектора, ε – приведенная степень черноты электродной пары, σ – постоянная Больцмана, G – расход теплоносителя через канал, c_p – теплоемкость теплоносителя, α – коэффициент теплопередачи теплоносителя.

Математическая модель ЭГЭ с внутренним расположением топлива (унифицированный ЭГК) записывается аналогичным образом.

Введением безразмерных величин температуры $\theta_i = T_i / T_{\text{CS}}$ и координаты $\xi = x / R_{\text{корп}}$ (T_{CS} – температура цезиевого резервуара, $R_{\text{корп}}$ – характерный размер корпуса в расчетной ячейке), система одномерных уравнений теплопереноса и распределения потенциала приводится к безразмерному виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2\theta_3}{d\xi^2} = \kappa_{51} \cdot f_{51} \cdot (\theta_3 - \theta_K) + \kappa_{52} \cdot f_{52} \cdot (\theta_3^4 - \theta_K^4) + \kappa_{53} \cdot f_{53} \cdot j_{C5} \cdot (U_3 - U_K + \Delta U_3) - \kappa_{54} \cdot f_{54} - \kappa_{55} \cdot f_{55} \cdot J_3^2 \\ \frac{d^2\theta_K}{d\xi^2} = \kappa_{41} \cdot f_{41} \cdot (\theta_K - \theta_{03}) - \kappa_{42} \cdot f_{42} \cdot (\theta_3 - \theta_K) - \kappa_{43} \cdot f_{43} \cdot (\theta_3^4 - \theta_K^4) - \kappa_{44} \cdot f_{44} \cdot j_{C5} \cdot \Delta U_K - \kappa_{45} \cdot f_{45} \cdot J_K^2 \\ \frac{d^2\theta_{03}}{d\xi^2} = \kappa_{31} \cdot f_{31} \cdot (\theta_{03} - \theta_{0B}) - \kappa_{32} \cdot f_{32} \cdot (\theta_K - \theta_{03}) \\ \frac{d^2\theta_{0B}}{d\xi^2} = \kappa_{21} \cdot f_{21} \cdot (\theta_{0B} - \theta_{TH}) - \kappa_{22} \cdot f_{22} \cdot (\theta_{03} - \theta_{0B}) \\ \frac{d\theta_{TH}}{d\xi} = \kappa_{11} \cdot f_{11} \cdot (\theta_{0B} - \theta_{TH}) \end{array} \right. .$$

Граничные условия

Как было отмечено выше, учет продольных перетечек тепла в математической модели приводит к системе нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка. Поиск решений системы для целей оптимизации производится при адиабатических граничных условиях на оболочке и охранным электроде для возможности сравнения результатов расчетов для различных ЭГЭ. При дальнейшем расчете ЭГК возможен переход к другим граничным условиям.

Граничные условия для эмиттера: $\frac{dT_{31}}{dx}(0) = 0$, $\frac{dT_{31}}{dx}(\xi_K) = -K_{TC3}(T_{31}(\xi_K) - T_{K1}(0))$.

Граничные условия для коллектора: $\frac{dT_{K1}}{dx}(\xi_K) = 0$, $\frac{dT_{K1}}{dx}(0) = -K_{TCk}(T_{31}(\xi_K) - T_{K1}(0))$.

Граничные условия для охранный электрода: $\frac{dT_{031}}{dx}(\xi_K) = 0$, $\frac{dT_{031}}{dx}(0) = 0$.

Граничные условия для оболочки корпуса: $\frac{dT_{0B}}{dx}(0) = 0$, $\frac{dT_{0B}}{dx}(\xi_K) = 0$.

Граничные условия для теплоносителя: $T_{TH}(0) = T_{TH\text{вход}}$.

Граничные условия для потенциала на эмиттере: $\frac{dU_3}{dx}(0) = 0$, $\frac{dU_3}{dx}(x_K) = \frac{\rho_3}{S_3} \cdot I$.

Граничные условия для потенциала на коллекторе: $\frac{dU_K}{dx}(0) = \frac{\rho_K}{S_K} \cdot I$, $\frac{dU_K}{dx}(x_K) = 0$.

РЕШЕНИЕ

Аппроксимация параметров, зависящих от температуры

В полученные уравнения входит ряд теплофизических и электрических параметров, зависящих от температуры. Значения данных параметров, как правило, приведены в виде таблиц для дискретного набора температур. В данной работе при проведении расчетов возникла необходимость учета температурных зависимостей на непрерывных интервалах температур. Для этой цели была выполнена аппроксимация дискретных данных аналитическими функциями. Аппроксимация проводилась на участках характерных температур полиномами различных степеней. Погрешность аппроксимации оценивалась по методу наименьших квадратов. Наибольшее значение погрешности не превышает 5%, что является вполне удовлетворительной точностью при проведении оптимизационных расчетов.

Метод решения

Решение системы дифференциальных уравнений второго порядка производилось численным интегрированием по методу аппроксимирующих функций, точно удовлетворяющим краевым условиям, с минимизацией ошибки аппроксимации методом наименьших квадратов [16].

Суть метода заключается в следующем. Пусть дана система дифференциальных уравнений для величин $\Theta_i(\xi)$, определенных на отрезке $[0, \xi_k]$. Требуется найти решения системы дифференциальных уравнений:

$$L_i \Theta_i(\xi) = f_i(\xi) \quad (\xi \in V), \\ i=1, 2, \dots, n$$

удовлетворяющие краевым условиям:

$$B_i \Theta_i(\xi) = b_i(\xi) \quad (\xi \in S),$$

где L, B – операторы, S – граница области V .

Аппроксимируем искомые решения $\Theta_i(\xi)$ некоторыми аппроксимирующими функциями $\varphi_i = \varphi_i(x)$, которые удовлетворяют краевым условиям и зависят от m_i параметров $a_{i_k}^i, a_{i_2}^i, \dots, a_{i_{m_i}}^i$, где m_i больше степени соответствующего уравнения. Ошибка аппроксимации есть функция от $a_{i_k}^i$:

$$E(\xi, a_{i_k}^i) \in L_i \varphi_i(\xi, a_{i_2}^i, \dots, a_{i_{m_i}}^i) - f_i(x).$$

Неизвестные параметры $a_{i_k}^i$ определяют по одной из следующих схем:

- методом коллокации (нулевая невязка на сетке) [16];
- среднеквадратическими приближениями (интегральный или на сетке) [16];
- методом Галеркина (минимизация с весовыми функциями) [14].

Для поиска решений был принят метод среднеквадратических приближений, согласно которому $a_{i_k}^i$ выбирают так, чтобы минимизировать средние квадратические ошибки

$$J_i(a_1^i, a_2^i, \dots, a_{m_i}^i) \equiv \int_V |E(\xi, a_1^i, a_2^i, \dots, a_{m_i}^i)|^2 d\xi.$$

Минимуму средних квадратических ошибок соответствуют нули частных производных по коэффициентам $a_{i_k}^i$:

$$\frac{\partial J_i(a_1^i, a_2^i, \dots, a_{m_i}^i)}{\partial a_{i_k}^i} = 0, \quad (*)$$

которые и являются уравнениями для определения величин $a_{i_k}^i$.

Применительно к рассматриваемой системе уравнений ввиду гладкости решений – распределений температуры и потенциала, представляется возможным использовать в качестве аппроксимирующих функций полиномов второго-третьего порядка. При этом два коэффициента каждого из полиномов следует определить из соответствующих граничных условий, а для нахождения последующих использовать систему уравнений, определяемых по (*).

Результаты тестового расчета

Проверка работоспособности предложенной математической модели и расчетной методики проводилась путем выполнения тестового расчета 14-элементного цилиндрического ЭГК сложной геометрии (объединяющего внутреннюю и внешнюю расчетные модели) и ЭГК ЯЭУ типа «Топаз». Для решения поставленной задачи использовался вычислительный комплекс MathCAD 12. Пример тестового расчета по внешней расчетной модели представлен на рис. 2. По оси ординат отложена безразмерная температура эмиттера (отношение температуры эмиттера к

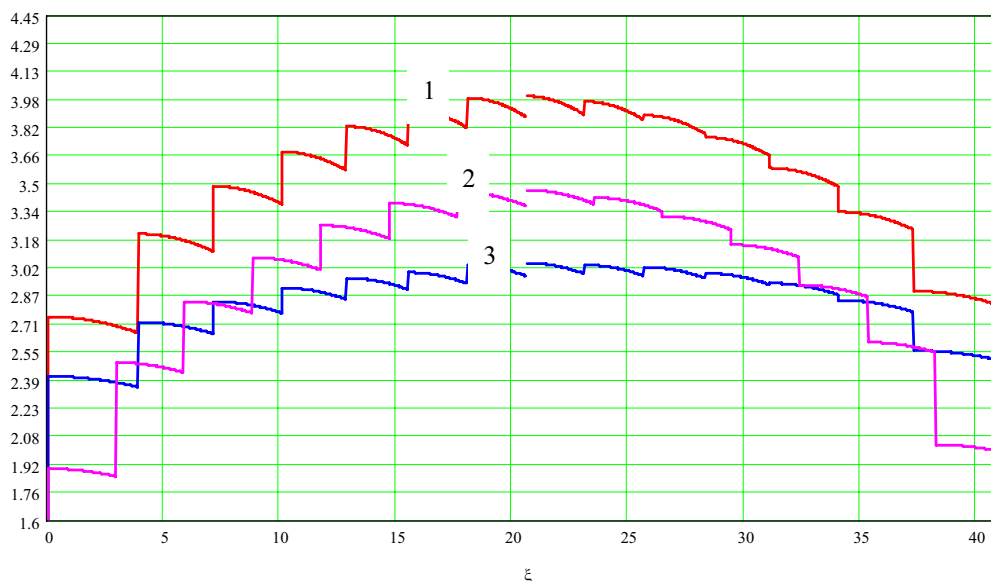


Рис. 2. Тестовый расчет по внешней расчетной модели (ЭГК с ВРТ): 1 – режим холостого хода $I = 0$, 2 – $I = 200$ А, непрофилированные по длине ЭГЭ, 3 – $I = 200$ А, профилированные по длине ЭГЭ

температуре цезиевого термостата), по оси абсцисс – безразмерная длина.

Полученные распределения температуры и потенциалов по длине эмиттера и коллектора качественно согласуются с приведенными в литературе данными [13]. Результаты расчетов распределений температуры на коллекторе, охранным электроде и оболочке свидетельствуют о существенной неизотермичности этих элементов вследствие байпасной перетечки тепла от эмиттера к коллектору по коммутационной перемычке. Следует отметить, что влияние этой неизотермичности практически не отражается на электрофизических характеристиках ЭГЭ, но оказывает значительное влияние на величину термических напряжений в межэлектродной изоляции и результаты теплового расчета могут быть использованы в качестве исходных данных в расчетах по подтверждению ее ресурса. Влияние оттока тепла по перемычке оказывает существенно большее влияние на эмиттер, нарушение изотермичности которого приводит к снижению эффективности работы ЭГЭ. Введение профилирования ЭГК по длинам ЭГЭ позволяет существенно выровнять неравномерность температур на эмиттерах ЭГЭ вследствие перераспределения плотности электронного охлаждения, тем самым устраняя перегревы эмиттеров и увеличивая рабочий ресурс ЭГК.

ВЫВОДЫ

1. Выполненный анализ используемых методик расчета характеристик ЭГК показал их ограниченную применимость, т.к. в заложенной в них математической модели рассматривается только термоэмиссионная электродная пара при недостаточно корректных допущениях о температурном поле коллектора. Методики не позволяют выполнять расчет температурных полей в конструктивных элементах ЭГЭ (кроме эмиттера).

2. Разработана полная математическая модель ЭГЭ, включающая уравнения теплопроводности во всех конструктивных элементах ЭГЭ.

3. Выполнены тестовые расчеты ЭГЭ, результаты согласуются с данными, полученными по другим методикам в пределах принятых в них ограничений.

4. Разработанная математическая модель процессов в ЭГЭ и предложенные методики могут быть использованы для расчета полей температур в конструктивных элементах ЭГК и потенциалов на электродах.

Автор выражает благодарность научному руководителю В.И. Ярыгину за постановку интереснейшей задачи, а также сотрудникам лаборатории «Исследования фундаментальных проблем преобразования различных видов энергии» ГНЦ РФ-ФЭИ В.А. Линнику, Е.Г. Виноградову и заместителю заведующего кафедрой «Перспективных методов получения и преобразования энергии» ИАТЭ В.Л. Шаблову за полезные дискуссии.

Литература

1. Коротеев А.С. Анализ перспективных космических задач и место ядерных энергодвигательных установок в их решении / Международная конференция «Ядерная энергетика в космосе – 2005» (Москва-Подольск, 2005): Сб. докл. – Т.1. – С.1-7.
2. El-Genk M. Energy Conversion Options for NASAs Space Nuclear Power Systems Initiative / Международный конгресс по усовершенствованным ядерным энергетическим установкам (ICAPP03) (Испания, 2003): Докл. №3001.
3. Ярыгин В.И., Сидельников В.Н., Миронов В.С. Выбор вида преобразования энергии для инициативы НАСА по космическим ядерным энергетическим системам – недооцененные возможности термоэмиссии / 2-я Международная конференция по инженерным проблемам преобразования энергии (2nd IECEC2004) (США, 2004 г): Докл. №-AIAA-2004-5586: Сб. трудов на CD.
4. Грязнов Г.М., Пупко В.Я. «Топаз-1». Советская космическая ядерно-энергетическая установка // Природа. – 1991. – Вып.10. – С.29-36.
5. Ponomarev-Stepnoi N.N., Talyzin V.M., Usov V.A. Russian Space Nuclear Power and Nuclear Thermal Propulsion Systems // Nuclear News. – 2000. – P.33-46.
6. Truscello V.C. SP-100 Power System / Отраслевая юбилейная конференция «Ядерная энергетика в космосе» (Обнинск, 1990): Сб. докл. – Ч.2. – С.497-512.
7. Зродников А.В., Забудько А.Н., Дубинин А.А. и др. Взгляд на космическую ядерную энергетику: 50 лет назад, 50 лет вперед / Международная конференция МАГАТЭ «Атомной энергетике – 50 лет» (Обнинск, 2004): Тез. докл. – С.221-222.
8. Полетаев Б.И., Лянной Е.Г., Романов А.В., Павлов А.Ю. Работы КБ «Арсенал» по созданию космических аппаратов с ядерными энергетическими установками / Международная конференция «Ядерная энергетика в космосе – 2005» (Москва-Подольск, 2005): Сб. докл. – Т.1. – С.247-250.
9. Овчаренко М.К., Забудько А.Н., Ярыгин В.И. и др. Концепция долгоресурсной ЯЭУ “Эльбрус-400/200” с эффективными низкотемпературными термоэмиссионными преобразователями, вынесенными из активной зоны / Международная конференция «Ядерная энергетика в космосе – 2005» (Москва-Подольск, 2005): Сб. докл. – Т.1. – С.144-150.
10. Ярыгин В.И. Термоэлектричество и термоэмиссия в космических ядерных энергетических установках прямого преобразования. Современное состояние и перспективы / Международная конференция «Ядерная энергетика в космосе – 2005» (Москва-Подольск, 2005): Сб. докл. – Т.1. – С.27-45.
11. Кротов А.Д., Кузнецов Р.В., Лазаренко Д.Г. и др. Концептуальный проект атомной теплоэлектростанции малой мощности с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую / Каталог тезисов проектов научно-технических коллективов молодых ученых, аспирантов и студентов, представленных на всероссийский конкурсный отбор по приоритетным направлениям науки и высоких технологий. – М.: Изд-во РГУИТП, 2006. – С.77-79
12. Лазаренко Г.Э., Ярыгин В.И., Пышко А.П., Овчаренко М.К., Михеев А.С., Линник В.А., Кротов А.Д., Лазаренко Д.Г., Сонько А.В. Автономная ядерная энергетическая установка электро- и теплоснабжения прямого преобразования тепловой энергии в электричество / Международная научно-практическая конференция «Малая энергетика – 2006» (Москва 2006): Тез. докл. – С.68-70.
13. Ружников В.А. Методы расчета тепловых и электрических характеристик систем прямого преобразования энергии. Ч.1. Термоэмиссионный электрогенерирующий канал ЭГК. – Обнинск: ФЭИ, 2001. – 25 с.

14. *Линник В.А.* Расчетно-теоретические методы исследования выходных характеристик термоэмиссионных электрогенерирующих элементов, электрогенерирующих сборок (каналов) и реакторов преобразователей космических ЯЭУ/Препринт ФЭИ-3058. – Обнинск, 2005. – 70 с.
15. *Ярыгин В.И.* Физические основы термоэмиссионного преобразования энергии: Учебное пособие. Ч.1. Введение в специальность. – Обнинск: ИАТЭ, 2006. – 104 с.
16. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Наука, 1974. – 822 с.

Поступила в редакцию 26.12.2006

code that is a model of degradation of a water-cooled reactor fuel rod under severe accidents.

УДК 621.039.5+519.85

Monte Carlo Precise Solution of Electron Transport Problem \ P.A. Androsenko, V.I. Belousov, A.G. Tsarina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 6 pages, 2 illustrations. – References – 8 titles.

The approach of the work is to consider questions of the semi-analytic Monte Carlo method application for the problems decision of charged particles deep transmission, and also albedo, in conditions of barrier geometry. Estimation recurrent formulas for building of the sampling process without simulating of the particles free path length are deduced that allow the researcher to solve problems of deep penetration by simulating of electrons transport with the individual collisions technique successfully. The results of calculations from new BRAND version code that based on developed algorithms are given.

УДК 621.039.5+519.85

Monte Carlo Simulation of Ionizing Radiation Influence on Chemical Composition of Human Tissues \ P.A. Androsenko, V.I. Belousov, A.G. Tsarina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 5 pages, 1 table, 1 illustration. – References – 4 titles.

The description and justification of the algorithm for modeling of radiation influence on tissue cells structure is developed on the basis of a statistical testing method. The main researched parameter is a dynamics of the concentration changes of free radicals and substances that are structural elements of cells. The received results agree well with theoretical and experimental data.

УДК 621.362

Universal mathematical model of electricity generation channel for heat, electrical and physical characteristics calculation \ D.G. Lazarenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 12 pages, 2 illustrations. – References – 16 titles.

Mathematical model of cylindrical geometry electricity generation channel for termionic reactor-converter for heat, electrical and physical characteristics calculation is considered. Proposed calculation method is suitable for multivariate calculations including optimization of output characteristics of electricity generation channels.

УДК 621.039.58

Mathematical Model of the Automated Technological Complex «Protection Object - Safety System» Function Process with Renewable Unit and Recurrent Control of Safety System \ A.I. Pereguda, D.A. Timashov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 9 pages, 2 illustrations. – References – 9 titles.

In the paper mathematical model of the automated technological complex «protection object - safety system» function process is proposed, in which system of scheduled recovery procedures is considered. The aim of this system is to provide safety operation of protection object. Cascade of integral equations was obtained and solved to calculate propability of complex crash on time interval $[0, t]$.

УДК 621.534: 519.7

Scattering Problem for Model Potential of Fission for Heavy Nucleus and Program Systems in Applied Mathematical Programs \ A.V. Tikhonenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages, 5 tables, 8 illustrations. – References – 16 titles.

Models of two- and tree-peaked fission barriers for heavy nucleus are formulated and program systems are developed in order to obtain exact solutions for wave functions, calculate transmission