

## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ТРЕХМЕРНОГО ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩЕГО КАНАЛА ТЕРМОЭМИССИОННОЙ ЯЭУ

**М.А. Полоус\*, В.И. Ярыгин\*, Е.Г. Виноградов\*\***

\* *Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск*

\*\* *ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*



Проведена модификация существующего программного кода конечно-элементного анализа COMSOL с целью расчета электротеплофизических характеристик термоэмиссионного электрогенерирующего канала со сложной геометрией конструктивных элементов для ЯЭУ прямого преобразования энергии нового поколения на основе его трехмерной математической модели с использованием дискретных экспериментальных данных о вольт-амперных характеристиках термоэмиссионного преобразователя.

**Ключевые слова:** термоэмиссионный преобразователь, электрогенерирующий канал, электрогенерирующий элемент, реактор-преобразователь, электроды, эмиттер, коллектор, вольт-амперная характеристика, математическое моделирование, программный комплекс.

**Key words:** thermionic converter, thermionic fuel element, thermionic cell, reactor-converter, electrodes, emitter, collector, current-voltage characteristic, mathematical simulation, software.

### ВВЕДЕНИЕ

Отечественная космонавтика в настоящее время претерпевает глубокую реформу. Для реформирования этой отрасли необходимы, в первую очередь, выработка новой концепции, долгосрочной политики и программы космической деятельности России, реализация новых экономических отношений, оборонной доктрины, соблюдение интересов отечественных и зарубежных потребителей. При этом важно сохранить и эффективно использовать созданный научно-технический и интеллектуальный космический потенциал. Федеральной космической программой России на период 2006–2015 гг. запланировано выполнение более двух десятков проектов научного назначения. Среди них полномасштабные космические проекты, в рамках которых должны быть созданы специализированные космические аппараты, снабженные целевыми комплексами научной аппаратуры [1].

© М.А. Полоус, В.И. Ярыгин, Е.Г. Виноградов, 2012

В связи с появлением нового комплекса космических задач, для решения которых требуются десятки и сотни киловатт электрической мощности, возникает необходимость создания энергетических установок большей мощности. Разрабатываемые в настоящее время космические ядерные энергетические установки (КЯЭУ) с термоэмиссионным преобразованием энергии способны перекрыть весь необходимый мощностной диапазон с приемлемыми эксплуатационными показателями [2]. 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, не только прошедшими все стадии НИОКР, но и получившими реальный опыт использования в составе КЯЭУ [3].

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Для обоснования проектных решений термоэмиссионных КЯЭУ нового поколения необходимы модернизация существующих и разработка новых методик расчета теплоэлектрофизических характеристик электрогенерирующих каналов (ЭГК) вследствие существенного изменения конструктивных форм и условий протекания термоэмиссионного процесса. В настоящее время совершенствование методик расчета выходных характеристик ЭГК сводится, в основном, к сохранению созданных ранее методик и их адаптации под современную вычислительную технику. Отсутствие развития в данном направлении может существенно затруднить проектные работы по перспективным ЯЭУ прямого преобразования энергии со сложной геометрией конструктивных элементов. Поэтому одной из актуальных задач, возникающих при разработке и совершенствовании термоэмиссионных ЯЭУ нового поколения, является развитие методик расчета, учитывающих как новые экспериментальные данные о характеристиках электродов, так и более сложную геометрическую структуру ЭГК, характеризующуюся большим набором тепловых сред разной теплопроводности, сложной формой электродных оболочек, коммутационных переключателей и других конструктивных элементов. В последние годы начали развиваться методики расчета теплоэлектрофизических характеристик ЭГК сложной геометрии [4, 5]. Однако развитие методик расчета осуществлялось лишь в рамках одномерных математических моделей, обладающих рядом серьезных допущений и упрощений.

Методы расчетно-проектного обоснования технических решений изменились коренным образом благодаря развитию информационных технологий и численных методов анализа. Применение численных методов сделало возможным решение самых сложных задач для сложных физических моделей. Широкое распространение получили интерактивные программы графического представления информации, основанные на решении краевых задач математической физики с помощью метода конечных элементов, такие как ANSYS, COMSOL, Star-CD и другие. Это позволило более компактно описывать геометрические и физические свойства объектов по сравнению с ранее используемыми методами. В настоящее время численные методы и интерактивная графическая техника составляют единое целое в программах систем автоматизированного проектирования.

В работе решается задача проведения численного расчета выходных электрических и тепловых характеристик многоэлементного термоэмиссионного ЭГК в трехмерной геометрии с использованием экспериментальных данных о вольт-

амперных характеристиках (ВАХ) термоэмиссионных преобразователей (ТЭП) в широком диапазоне изменения параметров рабочего процесса для обоснования проектных решений термоэмиссионных ЯЭУ прямого преобразования энергии нового поколения. Следует отметить, что существует большое количество программных комплексов, предназначенных для проведения теплофизических, электромагнитных и термомеханических расчетов, хорошо зарекомендовавших себя при обосновании проектных решений ЯЭУ нового поколения и элементов их систем. Тем не менее, ни один из них не может быть напрямую использован для расчета теплоэлектрофизических характеристик термоэмиссионной электрогенерирующей системы (ТЭС) из-за отсутствия блока, моделирующего процессы в межэлектродном зазоре (МЭЗ) и на электродах. В связи с необходимостью проведения расчетов ТЭС на современном уровне в работе была выполнена и описывается модификация стандартного численного решателя современного программного комплекса конечно-элементного анализа COMSOL.

В результате был получен новый численный решатель, позволяющий моделировать сопряженную термоэмиссионную задачу в трехмерной постановке с использованием экспериментальных ВАХ ТЭП. Настоящий программный комплекс, оптимизированный под задачи расчета термоэмиссионных ЭГК и ТЭС, предоставляет пользователям полный спектр инструментов для моделирования поставленной задачи: построение трехмерной геометрической модели, описание физических процессов на языке математической физики, построение конечно-элементной расчетной сетки геометрической модели, интерполяция и экстраполяция исходных экспериментальных ВАХ ТЭП и постобработка результатов расчета. Программа позволяет моделировать физические процессы электромагнетизма и сопряженного теплообмена в трехмерной геометрии как в пределах одного электрогенерирующего элемента (ЭГЭ), так и внутри коммутационного пространства ЭГК. Процесс моделирования может учитывать различные свойства материалов, источники воздействия и граничные условия. Важным достоинством описываемого в работе комплекса является возможность прямого использования чертежей ТЭС, выполненных в среде автоматизированного проектирования AutoCAD.

### **ЭТАПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧИ**

COMSOL используется для конечно-элементных расчетов сложных научно-технических задач [6]. Решение любой задачи базируется на численном решении уравнений в частных производных методом конечных элементов в одно-, двух- и трехмерных измерениях. Программное обеспечение запускает конечно-элементный анализ вместе с расчетной сеткой, учитывающей геометрическую конфигурацию тел, и контролем ошибок с использованием разнообразных численных решателей. Как было отмечено выше, в результате модификации встроенного в программный комплекс решателя была осуществлена возможность численного моделирования сопряженной термоэмиссионной задачи в трехмерной постановке с использованием экспериментальных ВАХ ТЭП. Этапы моделирования поставленной задачи проводились в следующей последовательности:

- выбор размерности физической модели (1D, 2D или 3D) и определение физического раздела (сопряженный стационарный анализ температурных и электрических полей);
- определение рабочей области и построение геометрической модели ЭГК;
- задание исходных данных и зависимостей переменных от координат и времени;
- задание экспериментальных ВАХ ТЭП;

- указание теплофизических и электромагнитных свойств конструкционных материалов ЭГК и начальных условий;
- задание граничных условий (объемные источники тепла, тепловые потоки через моделируемые поверхности ЭГК, источники электрического тока, заземление и др.);
- генерация конечно-элементной расчетной сетки модели;
- определение параметров решающего устройства и запуск расчета;
- постобработка полученных результатов.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭГК

**Конструктивная форма ЭГК.** Основным функциональным элементом термоэмиссионного реактора-преобразователя является ЭГЭ. Наиболее широкое практическое применение получили ЭГЭ цилиндрической геометрии. Сборка последовательно соединенных ЭГЭ, заключенных в общий корпус (чехол), омываемый теплоносителем, получила название ЭГК. Все ЭГЭ отделены от корпуса ЭГК слоем электроизоляции. Для вывода электроэнергии, генерируемой в ЭГК, служат два токовывода, изолированные от корпуса ЭГК. Каждый ЭГЭ состоит из собственно ТЭП и коммутационной перемычки, соединяющей его с соседним ТЭП. ТЭП состоит из двух тонких коаксиально расположенных цилиндрических электродов, разделенных МЭЗ, который в рабочем состоянии заполнен парами цезия при давлении несколько миллиметров ртутного столба. Внутренний электрод (эмиттер) поддерживается при температуре 1500 – 1900 К, источником тепла служит заключенный внутри него тепловыделяющий сердечник из ядерного топлива. Принципиальная схема цилиндрического ЭГЭ представлена на рис. 1 [7].

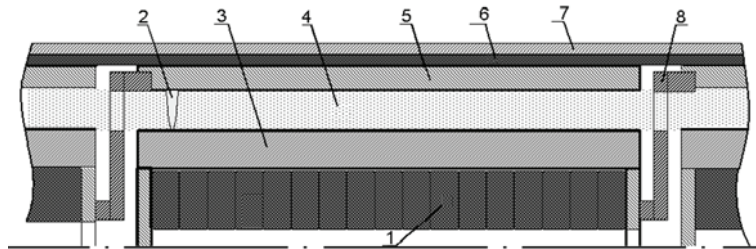


Рис. 1. Конструктивная схема многоэлементного ЭГК: 1 – топливные таблетки; 2 – дистанционный элемент; 3 – эмиттер; 4 – МЭЗ; 5 – коллектор; 6 – изоляция (керамика); 7 – чехол; 8 – межэлектродная коммутационная перемычка

**Уравнение переноса тепла в ЭГК.** Пространственное распределение температуры в моделируемом устройстве описывается двумерным осесимметричным нестационарным уравнением энергии в цилиндрических координатах. Предполагается, что некоторые компоненты среды, находящиеся в жидком или газообразном состоянии, могут двигаться с заданной скоростью. Таким образом, обеспечивается возможность моделирования конвективного теплообмена в элементах устройства. Тепловыделение в материале конструктивных элементов, обусловленное ядерными реакциями и прохождением электрического тока, учитывается источниками тепла в правой части уравнения энергии. Действие теплового излучения и электронного охлаждения на теплообмен также учитывается введением в уравнение соответствующих источников-стоков тепла [3]. Уравнение энергии имеет вид

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r U c_p T)}{\partial r} + \frac{\partial(W c_p T)}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v^{nucl} + q_v^{joul} + q_v^{elec} + q_v^{rad}, \quad (1)$$

где  $T$  – температура среды;  $\rho$  – плотность среды;  $c$  – теплоемкость среды;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности среды;  $q_v^{nucl}$  – объемная плотность тепловыделения за счет ядерных реакций;  $q_v^{joul}$  – объемная плотность тепловыделения от проходящего электрического тока (джоулево тепловыделение);  $q_v^{elec}$  – объемная плотность тепловыделения, учитывающая электронное охлаждение;  $q_v^{rad}$  – объемная плотность тепловыделения, учитывающая радиационный теплообмен. Второе и третье слагаемые в левой части уравнения описывают конвективный перенос тепловой энергии. Для неподвижных сред эти члены уравнения энергии равны нулю. Правая часть уравнения описывает перенос тепловой энергии за счет теплопроводности конструкционных материалов, а также источники, моделирующие генерацию и перенос тепловой энергии за счет ядерных, радиационных и электрических процессов.

**Уравнение для электрического потенциала.** Сложность структуры и разнородность материалов рассматриваемых устройств приводят к пространственной неравномерности распределения электрического потенциала, включая поверхность электродов. Вместе с тем разность потенциалов поверхности эмиттера и коллектора существенно влияет на генерацию тока, распределение тока по электропроводным материалам и, как следствие, на джоулево тепловыделение в конструкционных материалах. Распределение потенциала в неоднородной электропроводящей среде описывается уравнением Пуассона с пространственно зависимым коэффициентом электропроводности. В цилиндрических координатах уравнение имеет вид

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \kappa \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + q_v^{curr} = 0, \quad (2)$$

где  $\varphi$  – электрический потенциал;  $\kappa$  – коэффициент удельной электропроводности среды;  $q_v^{curr}$  – объемная плотность источника-стока электрического заряда.

Плотность электрического тока пропорциональна градиенту электрического потенциала и определяется соотношением

$$\vec{i} = -\kappa \cdot \text{grad}(\varphi). \quad (3)$$

На поверхности электродов нормальная к поверхности составляющая вектора плотности тока  $i_n$  равна плотности генерируемого тока  $j$ :

$$i_n = (\vec{n} \cdot \vec{i}) = j. \quad (4)$$

В уравнении должны быть учтены внешние и внутренние граничные условия. В качестве внешних граничных условий обычно задается распределение потенциала по внешней границе расчетной области, которое соответствует напряжению на клеммах устройства.

**Уравнение генерации электрического тока.** Замыкающим соотношением в любой задаче электротеплофизического расчета ЭГК является зависимость плотности тока в МЭЗ от величины межэлектродного напряжения. Такая зависимость получила название локальной ВАХ ТЭП. В наиболее общем случае в расчетных методиках принимается, что плотность тока в МЭЗ является функцией нескольких переменных:

$$j = j(u, T_E, T_C, P_{Cs}, d, \varphi_E, \varphi_C), \quad (5)$$

где  $u$  – величина межэлектродного напряжения;  $T_E$  – температура эмиттера;  $T_C$  – температура коллектора;  $P_{Cs}$  – давление паров цезия в МЭЗ;  $d$  – величина МЭЗ;  $\varphi_E$  – работа выхода эмиттера;  $\varphi_C$  – работа выхода коллектора. При проведении расчетов электротеплофизических характеристик ЭГК важнейшими требованиями, предъявляемыми к методике задания локальной ВАХ, являются возможность встра-

ивания их в расчетный алгоритм и быстродействие предлагаемых расчетов.

В работе для проведения расчета выходных характеристик ЭГК были использованы две выборки экспериментальных ВАХ ТЭП, основанных на различных материалах электродной пары. В первом случае в основе электродной пары лежат материалы  $W(110) - W(110)$ . Для низкотемпературных ТЭП/ЭГЭ/ЭГК с соответствующей низкой энергонапряженностью наиболее предпочтительной является электродная пара типа  $Pt - VX_2Y$ , обеспечивающая более высокую эффективность преобразования. Свойства материалов этой электродной пары были использованы на втором этапе моделирования выходных характеристик ЭГК. В качестве экспериментальных баз данных (БД) о ВАХ были использованы БД из [8, 9]. В качестве примера на рис. 2 изображена выборка из БД семейства использованных в расчете экспериментальных ВАХ ТЭП с электродной парой  $Pt - VX_2Y$  в низкотемпературных режимах работы ТЭП при величине МЭЭ 0,4 мм, температуре коллектора 860 К и давлении паров цезия 1,25 мм рт. ст. (по осям отложены плотность электрического тока  $[A/cm^2]$ ; межэлектродное напряжение  $[В]$  и температура эмиттера  $[К]$ ).

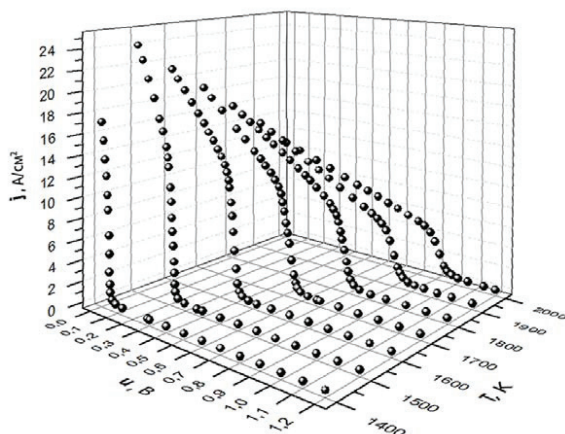


Рис. 2. Семейство экспериментальных ВАХ ТЭП с электродной парой  $Pt - VX_2Y$

Алгоритм расчета плотности генерируемого тока в зависимости от межэлектродного напряжения, температуры поверхности эмиттера и коллектора на основе экспериментальных ВАХ ТЭП был введен в расчетный код конечно-элементного анализа COMSOL с использованием процедур сплайновой интерполяции и экстраполяции для вычисления плотности генерируемого тока во всех расчетных ячейках расчетной области, моделирующих эмиттер, коллектор, пространство между ними и межэлектродную коммутационную перемычку.

### **СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО ЭГК В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ COMSOL**

**Геометрическое моделирование ЭГК.** Распределения температуры эмиттера и коллектора вдоль МЭЭ, плотности генерируемого тока определяются не только конструкцией электродов и узла их межэлектродной коммутации, но и конструкцией и условиями охлаждения всего ЭГК или ТЭС. Это приводит к необходимости включения в расчетную область практически всех конструктивных элементов ЭГК в составе термоэмиссионного реактора-преобразователя. Рассматриваемое устройство имеет сложную структуру из разнородных и взаимосвязанных элементов. Расчетная модель ЭГК, разработанная с помощью средств геометрического моде-

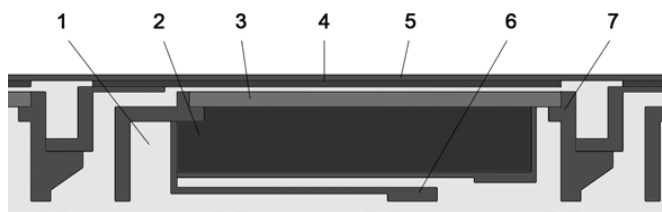


Рис. 3. Фрагмент геометрической 2D-осесимметричной модели многоэлементного ЭГК, разработанной в программной среде COMSOL: 1 – цезиевая среда; 2 – ядерное топливо; 3 – эмиттер; 4 – коллектор; 5 – коллекторный пакет; 6 – газоотводящее устройство; 7 – межэлектродная коммутационная перемычка [10]

лирования в программной среде COMSOL, представлена на рис. 3. Настоящая модель многоэлементного ЭГК имеет 2D-осесимметричное приближение. На рисунке представлен один ЭГЭ и области его межэлектродной коммутации.

Особенности конструкции многоэлементного термоэмиссионного ЭГК обуславливают значительную пространственную неравномерность тепловых потоков и температуры в элементах устройства, что приводит к невозможности использования упрощенных одномерных моделей для расчета выходных электротеплофизических характеристик ЭГК без существенной потери точности. Конструкция многоэлементного термоэмиссионного ЭГК моделировалась многокомпонентной средой из более десяти компонентов, представляющих собой конструкционные материалы и области, отличающиеся как теплофизическими, так и электрическими свойствами.

**Задание физических свойств конструкционных материалов и сред.** После определения начальных и граничных условий (распределение тепловыделения в топливной композиции, начальное распределение потенциала, плотности тока с поверхности электродов и вектора скорости движущихся компонентов среды) следуют построение расчетной сетки и задание физических свойств конструкционных материалов и сред. Программный комплекс COMSOL обладает встроенной библиотекой свойств материалов и содержит свойства более 1000 материалов [6]. В библиотеке представлены химические элементы, минералы, сплавы металлов, окислы, стали, термоизоляторы, полупроводники, оптические материалы и т.д. Для каждого из них содержатся 24 ключевые свойства, в том числе тепловые, электромагнитные и механические, представленные как функции параметров температуры и ряда других. Некоторые дополнительные теплофизические и электромагнитные свойства конструкционных материалов и сред, необходимых для расчета, были взяты из [11].

**Создание конечно-элементной сетки твердотельной модели ЭГК.** Проблема оптимального разбиения пространства геометрической модели на конечные элементы подчас является очень сложной. На каждый элемент разбиения могут накладываться довольно жесткие ограничения. К тому же в пространстве задачи могут быть некие характерные области, где параметры меняются довольно резко. Например, такие области образуются вблизи поверхности электродов, межэлектродных коммутационных перемычек и в МЭЭ. По этой причине в этих областях сетка генерировалась более сгущенной. Разбиение модели ЭГК на конечные элементы производилось программой COMSOL в полуавтоматическом режиме с выбором типа разбиения (квадратная или треугольная форма расчетных ячеек), а также минимального и максимального размеров ячеек, которые варьировались для различных сред расчетной сетки. В ходе работы была построена расчетная сетка ЭГК, состоящая из более 50000 расчетных ячеек, имеющих треугольную форму. Фрагмент созданной расчетной сетки представлен на рис. 4.

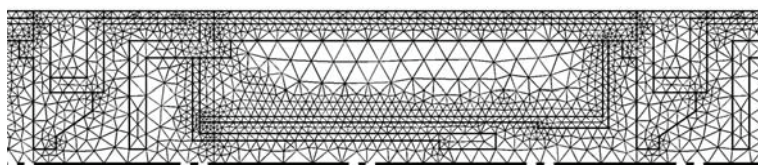


Рис. 4. Фрагмент сгенерированной расчетной сетки геометрической модели многоэлементного ЭГК

### Общий алгоритм численного решения задачи в среде модифицированного программного комплекса COMSOL

Алгоритм решения полной системы конечно-разностных уравнений позволяет рассчитывать нестационарный процесс на каждом шаге по времени Дф. Стационарное решение задачи получается как установившиеся распределения в нестационарном процессе. Общий алгоритм решения задачи представляет собой последовательность действий:

- задание начальных распределений температуры, потенциала, распределения вектора скорости движущихся компонентов среды и энерговыделения топлива;
- расчет распределения плотности генерируемого тока на основе внедренных в программный комплекс экспериментальных ВАХ ТЭП для момента времени  $t$  по распределениям температуры и потенциала;
- расчет распределения температур для момента времени  $t + \Delta t$  с учетом электронного охлаждения эмиттера (генерируемого тока);
- расчет распределения потенциала для момента времени  $t + \Delta t$  по распределениям генерируемого тока и температуры.

Итерационный процесс производится в модифицированном программном комплексе COMSOL (начиная со второго пункта – в автоматическом режиме).

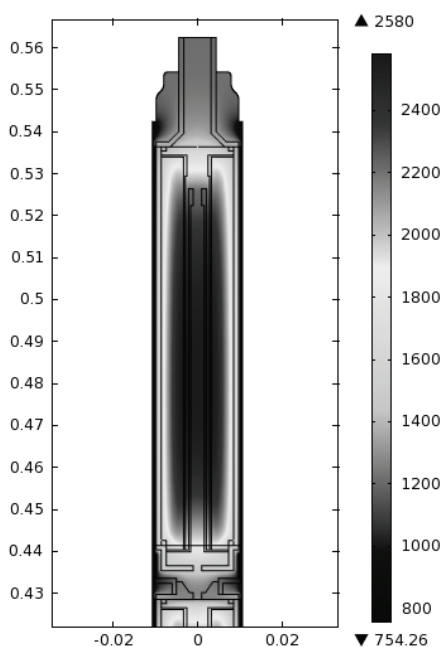


Рис. 5. Распределение температурного поля многоэлементного ЭГК – коллекторная концевая секция при величине протекающего электрического тока 100 А (электродная пара Pt – ВХ2У)

### РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО ЭГК

Основным результатом расчетов тепло-электрофизических характеристик ЭГК с помощью модифицированного программного комплекса COMSOL являются стационарные двумерные распределения температуры, потенциала и плотности генерируемого тока эмиттеров и коллекторов, а также других конструктивных элементов ЭГК. Программа позволяет рассчитывать распределение тепловых потоков в любой рассматриваемой области задачи, например, тепловой поток через МЭЭ. По найденным распределениям были рассчитаны ВАХ ЭГК, электрическая мощность и к.п.д. Как было отмечено выше, для проведения расчета выходных характеристик ЭГК были использованы две выборки экспериментальных ВАХ ТЭП для различных материалов электродной пары. Тепловая мощность в обоих вариантах принималась равной 5 кВт, давление паров цезия 1,25 мм рт. ст.,



что соответствует исходным данным для ЭГК. На рисунках 5–8 приводятся расчетные выходные энергетические характеристики 9-элементного ЭГК, полученные с помощью модифицированного программного комплекса COMSOL.

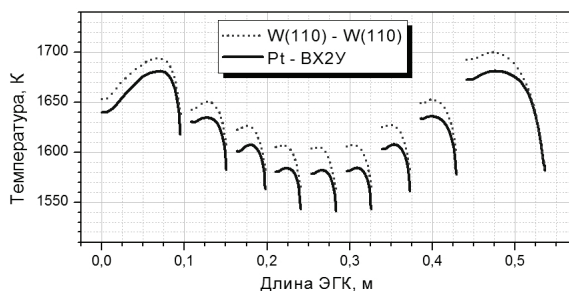


Рис. 6. Распределение температуры эмиттеров по длине ЭГК при величине протекающего электрического тока 100 А для различных материалов электродных пар

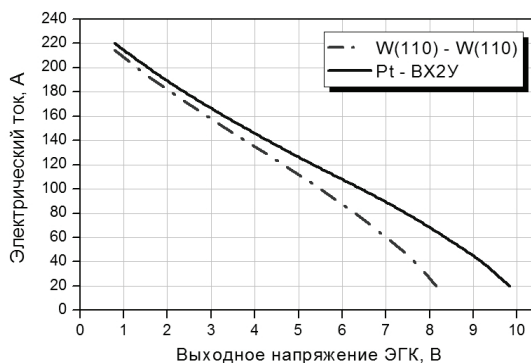


Рис. 7. Зависимость электрического тока ЭГК от выходного напряжения для различных материалов электродных пар

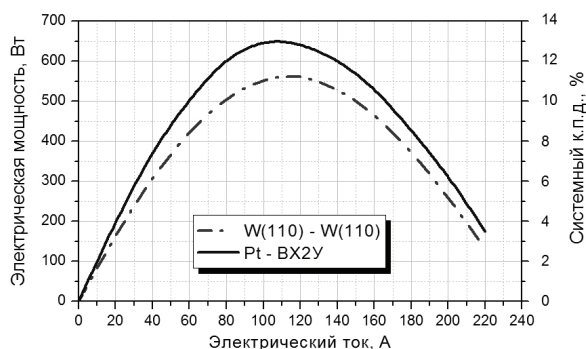


Рис. 8. Зависимость генерируемой ЭГК электрической мощности от электрического тока для различных материалов электродных пар

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование модифицированного программного комплекса COMSOL с созданным авторами численным решателем, позволяющим моделировать термоэмиссионную задачу в трехмерной постановке с использованием экспериментальных ВАХ ТЭП, показало достаточную гибкость и эффективность данного подхода для выпол-

нения массовых вариантных расчетов ЭГК и ТЭС со сложной геометрической структурой. Результаты расчетов подтвердили существенное влияние на выходные характеристики ЭГК пространственных эффектов, которые не могли быть учтены в полной мере в рамках одномерных моделей. Решающее значение для достижения высокой точности расчета имеет полнота учета реальной структуры и разнообразия физических свойств материалов моделируемых устройств, а также использование экспериментальных данных о локальных ВАХ, что позволяет учитывать в расчете влияние технологии изготовления и рабочих условий электродной пары.

В работе были использованы две экспериментальные базы данных, основанные на различных видах материалов электродной пары –  $W(110) - W(110)$  и  $Pt - W(110)$ . В результате анализа полученных результатов расчета выходных характеристик ЭГК можно сделать вывод о хорошем качественном и количественном соответствии характеристик в сравнении с результатами, полученными с помощью одномерных математических моделей. В ходе работы были впервые получены расчетные данные об электростатике и сопряженном теплообмене в трехмерной геометрии внутри коммутационного пространства ЭГК.

### Литература

1. Роскосмос. Федеральная космическая программа России. – URL: <http://www.federspace.ru/main.php?id=24>. Дата обращения: 03.01.2012.
2. Андреев П.В., Гулевич А.В., Зарицкий Г.А., Легостаев В.П., Никонов А.М., Овчаренко М.К., Пышко А.П., Синявский В., Ярыгин В.И. Физико-технические возможности термоэмиссии для современных проектов создания КЯЭУ субмегаваттного класса/Материалы Международной конференции «Ядерные и инновационные технологии для космоса» (NETS-2012) (19–23 марта 2012 г., Woodlands, штат Техас, США). Секция 2 «Ядерная энергетика и двигатели», доклад №3014.
3. Романов А.В. Теория комплексной оптимизации проектирования космических аппаратов с ядерными термоэмиссионными энергетическими установками/Под ред. Б.И. Полетаева, А.П. Ковалева. – СПб.: ООО «НПО «Профессионал», 2010. – С. 15-95.
4. Лазаренко Д.Г. Математическая модель для расчета теплоэлектрофизических характеристик цилиндрического электрогенерирующего канала//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – № 3. – С. 89-100.
5. Полоус М.А. Усовершенствование методики расчета выходных характеристик многоэлементного термоэмиссионного электрогенерирующего канала реактора-преобразователя//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 1. – С. 164-172.
6. Официальный сайт производителя «Comsol Multiphysics». – URL: <http://www.comsol.com/>. Дата обращения: 03.01.2012.
7. Виноградов Е.Г., Ярыгин В.И. Методика расчета электротеплофизических характеристик термоэмиссионного электрогенерирующего канала: Учебное пособие по курсу «Перспективные методы получения и преобразования энергии». – Обнинск: ИАТЭ, 2008. – С. 9-11.
8. Виноградов Е.Г., Ярыгин В.И. Демонстрационная база экспериментальных данных лабораторного термоэмиссионного преобразователя. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, ИАТЭ (кафедра ПМПЭ): Материалы кафедры. – 2007.
9. Ярыгин В.И. Электродные материалы для энергонапряженных электрогенерирующих каналов термоэмиссионного реактора-преобразователя//Ракетно-космическая техника. Сер. XII. – 1998. – Вып. 1-2. – С. 105-115.
10. Выбыванец В.И., Гонтарь А.С., Еремин С.А. и др. Базовый электрогенерирующий канал двухрежимных термоэмиссионных ЯЭУ. Научно-технические проблемы разработки и создания/Сборник докладов Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе – 2005». – Москва-Подольск. – 2005. – Т. 1. – с. 79-82.
11. Справочник по свойствам для перспективных реакторных технологий. Том 1. Свойства жидкометаллических теплоносителей. Том 2. Свойства газовых сред/Под общ. ред. д.т.н., проф. В.М. Поплавского. – М.: ИздАт. – 2011. – С. 73-80.

Поступила в редакцию 5.04.12

**УДК 621.039.51**

*Investigation of Consequences the Leak from Tank of VVR-c Reactor (IBB.10M) after Design Modernization* \V.V. Sergeev, O.Uy. Kochnov, A. A. Kazantsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 4 tables, 9 illustrations. – References, 4 titles.

In the paper are presented the calculation results of transient cooling of reactor facility (RF) in the natural circulation mode under anticipated accident with coolant leak that is postulated by safety analysis report (SAR). The postulated initial even of accident is leak appearance from reactor tank that bring to fast level decreasing into tank. It was shown that used at modernization of RF design steps (setting the hydraulic lock at down-flow pipeline from RF directly into tank in combination with upper positioning of coolant inlet to core) significantly increase the degree of reactor facility safety at considered maximal design accident. Calculations were performed based on TRAC code. International thermal hydraulic network code TRAC was designed for the safety analysis of water-cooled NPP.

**УДК 539.1.07; 621.384.8**

*Panoramic Plasma-Optical Mass Separation not Monoenergetic and Multiply Charged Ions* \V.M. Bardakov, Vo Nhu Dan, N.A. Strokin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 11 pages, 4 illustrations. – References, 14 titles.

Proposed method and installation, extending the functionality of the plasma separators that improve their performance and provides a panoramic multi-component separation of the plasma flow to the masses. On the example of the spent nuclear fuel shows features plasma-separation of a mixture containing multiply charged ions.

**УДК 621.039.548: 669.2**

*The Synthesis and Physicochemical Investigation of Gadolinium Hydroxide Powders for Fuel Pellets Alloying* \L.V. Myakishcheva, V.Y. Lopatin, V.S. Panov, I.A. Vlasovec; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 8 pages, 1 table, 5 illustrations. – References, 6 titles.

This research is devoted to obtaining of fine Gd(OH)<sub>3</sub> powders as small alloying additive to UO<sub>2</sub> for fuel pellet enhancement.

**УДК 621.039.5**

*Program for Three-Dimensional Numerical Computation of Thermal and Electrical Properties of a Multicell Thermionic Fuel Element for the Direct Energy Conversion NPP* \M.A. Polous, V.I. Yarygin, E.G. Vinogradov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 8 illustrations. – References, 11 titles.

The existing COMSOL finite element analysis code has been modified to calculate the electro-thermophysical properties of a thermionic fuel element with a complex geometry of structural components for the new generation direct energy conversion NPP on a basis of its three-dimensional mathematical model using the discreet experimental data on the current-voltage characteristics of a thermionic converter.