

## КОМПЛЕКС ТРЕХМЕРНОГО РАСЧЕТА ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОЭЛЕМЕНТНОГО ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩЕГО КАНАЛА ТЕРМОЭМИССИОННЫХ ЯЭУ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**М.А. Полоус, Д.И. Соловьев, В.И. Ярыгин**

*АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А. И. Лейпунского»*

*249033, Россия, г. Обнинск, Калужская обл., пл. Бондаренко, 1*



В обеспечение государственных программ освоения арктического региона России кооперацией предприятий ГК «Росатом» ведутся НИ-ОКР по созданию линейки автономных атомных электростанций малой мощности (АСММ) до 1 МВт<sub>эл</sub>. Для снабжения теплом и электричеством потребителей в интервале установленной электрической мощности 10 – 100 кВт<sub>эл</sub> наиболее привлекательными являются АСММ прямого преобразования энергии с внутризонной термоэмиссионной системой как обладающие высокой автономностью, компактностью и простотой в обслуживании. Важнейшими составными элементами термоэмиссионной ЯЭУ являются электрогенерирующие каналы (ЭГК), в которых конструктивно объединены тепловыделяющие и электрогенерирующие элементы. Экспериментальные исследования и испытания термоэмиссионных установок являются сложными и дорогостоящими, поэтому значительное место в проектировании термоэмиссионных ЯЭУ занимает математическое моделирование физических процессов, протекающих в ЭГК. В работе рассмотрены результаты трехмерного численного моделирования тепловых и электрических характеристик одноэлементного ЭГК для термоэмиссионной ЯЭУ в составе одного из возможных исполнений АСММ, полученные с помощью методики, разработанной на базе современного программного кода COMSOL Multiphysics и названной авторами COMSOL-ЭГК-SC. Сформулированы исходные данные для расчета одноэлементного ЭГК, описаны этапы разработки математической модели ЭГК в программной среде COMSOL-ЭГК-SC, приведены полученные результаты численного расчета тепловых и электрических характеристик с использованием экспериментальных баз данных о вольтамперных характеристиках (ВАХ) термоэмиссионного преобразователя (ТЭП) и результатов нейтронно-физического расчета возможной структуры активной зоны термоэмиссионной ЯЭУ в составе АСММ.

**Ключевые слова:** термоэмиссионная ЯЭУ, одноэлементный электрогенерирующий канал, конечно-элементный анализ, трехмерное численное моделирование.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Преобразование тепловой энергии в электрическую, выделяемой в результате реакции деления ядерного топлива, рассматривается в качестве одного из наиболее эффективных

© М.А. Полоус, Д.И. Соловьев, В.И. Ярыгин, 2017

тивных методов, обеспечивающих решение ряда перспективных наземных и космических задач, связанных с длительным электроснабжением потребителей на уровне десятков и более киловатт [1 – 3]. В обеспечение государственных программ освоения арктического региона Российской Федерации [4, 5] кооперацией предприятий ГК «Росатом» ведутся НИОКР по созданию линейки автономных АСММ мощностью до 1 МВт<sub>эл</sub>, обеспечивающих требования радиационно-экологической и ядерной безопасности [6]. Для снабжения теплом и электричеством потребителей в интервале установленной электрической мощности 10 – 100 кВт<sub>эл</sub> наиболее привлекательными являются АСММ прямого преобразования энергии с внутризонной термоэмиссионной системой как обладающие высокой автономностью, компактностью и простотой в обслуживании [7, 8], референтность которых подтверждена испытанной в космосе ЯЭУ «Топаз» и прошедшей наземные испытания ЯЭУ «Енисей» [9, 10].

В настоящее время кооперацией предприятий ГК «Росатом» разрабатывается проект создания термоэмиссионной ядерной энергетической установки (ТЯЭУ) для АСММ, предназначенной для обеспечения электрической и тепловой энергией объектов, расположенных в северных труднодоступных и удаленных районах Российской Федерации, в условиях отсутствия централизованного электроснабжения и путей сообщения [6 – 8].

Концепция такой ТЯЭУ основана на имеющемся научно-техническом заделе с использованием передовых технических решений, последних достижений науки и высоких технологий. Важнейшим составным элементом ТЯЭУ являются ЭГК, в которых конструктивно объединены электрогенерирующие элементы и твэлы. Выходные и эксплуатационные характеристики этих устройств в значительной степени определяют тактико-технические характеристики ТЯЭУ рассматриваемого типа в целом. В качестве базового ЭГК ТЯЭУ АСММ может быть выбран разработанный для ЯЭУ «Енисей» одноэлементный ЭГК (рис. 1), обладающий наибольшими возможностями обеспечения длительного ресурса (кампании реакторной установки) без деградации выходных характеристик [8, 11].

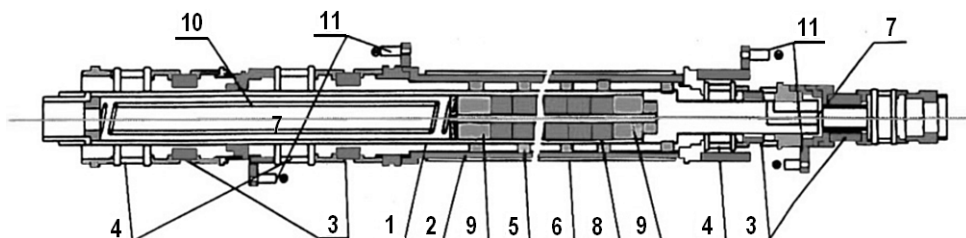


Рис. 1. Конструктивная схема одноэлементного ЭГК для ТЯЭУ в составе АСММ [8]: 1 – эмиттер; 2 – коллектор; 3 – гермоводы; 4 – сильфоны; 5 – дистанционаторы; 6 – электроизоляция; 7 – межэлектродный зазор; 8 – ядерное топливо; 9 – торцевые отражатели; 10 – фиксирующее устройство; 11 – токовыводы

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В ЭГК в составе ТЯЭУ протекают различные сопряженные физические процессы: нейтронно-физические, эмиссионные, плазменные, адсорбционные, теплоэлектрические, теплогидравлические, термомеханические и др. Экспериментальные исследования и испытания термоэмиссионных установок являются сложными и дорогостоящими, поэтому значительное место в проектировании ТЯЭУ занимает математическое моделирование.

Такое моделирование позволяет прогнозировать величину выходной электрической мощности ЭГК, а также определять его внутренние параметры, которые из-за специфики конструкции полномасштабного ЭГК не могут быть непосредственно изме-

рены в ходе испытаний, – величина тепловой мощности, выделяемой в твэле, распределение температуры и потенциалов электродов и др. Таким образом, численное моделирование физических процессов, протекающих в одно- и многоэлементных ЭГК, на основе современных трехмерных математических моделей является актуальной и практически важной задачей.

В работе рассмотрены результаты трехмерного численного моделирования тепловых и электрических характеристик одноэлементного ЭГК для ТЯЭУ в составе одного из возможных вариантов исполнения АСММ, полученные с помощью методики, разработанной на базе современного программного кода COMSOL Multiphysics [12, 13] и названной авторами COMSOL-ЭГК-SC, явившейся модификацией разработанной ранее методики COMSOL-ЭГК (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ») для расчета характеристик многоэлементных ЭГК. Сформулированы исходные данные для расчета одноэлементного (Single-Cell – SC) ЭГК, описаны этапы разработки математической модели ЭГК в программной среде COMSOL-ЭГК-SC [14], приведены полученные результаты численного расчета тепловых и электрических характеристик с использованием экспериментальных данных о ВАХ ТЭП и результатов нейтронно-физического расчета возможной структуры активной зоны ТЯЭУ в составе АСММ.

### **ПРОГРАММНЫЙ КОД COMSOL-ЭГК-SC**

Существующие методики расчета характеристик ЭГК обладают рядом особенностей и допущений, зачастую значительно снижающих точность получаемых результатов. Связанно это, в первую очередь, с тем, что используемые в методиках математические модели в большинстве являются одномерными. Другая особенность заключается в том, что они являются узкоспециализированными для расчета конкретной конструкции ЭГК и не позволяют производить качественный расчет ЭГК более сложной геометрии. Таким образом, усовершенствованная методика расчета ЭГК должна осуществить переход от одномерного к трехмерному численному расчету характеристик ЭГК, выполнить детальный учет влияния свойств конструкционных материалов и сред на тепловые и электрические процессы в ЭГК и реализовать возможность проведения расчетов ЭГК в геометрии, отличной от геометрии ЭГК первого поколения (ЯЭУ «Топаз» и «Енисей»).

COMSOL Multiphysics – программа для конечно-элементных расчетов сложных научно-технических задач. Решение любой задачи базируется на численном решении уравнений в частных производных методом конечных элементов в одно-, двух- и трехмерных измерениях. На базе программного кода COMSOL Multiphysics в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» в 2012 г. авторами была разработана методика трехмерного расчета тепловых и электрических характеристик ЭГК, названная COMSOL-ЭГК [13, 15, 16]. Следует отметить, что COMSOL-ЭГК разрабатывалась для моделирования многоэлементных ЭГК, однако ее использование для расчета характеристик одноэлементного ЭГК в составе ТЯЭУ АСММ оказалось невозможным в оригинальном виде программного кода. Таким образом, для расчета одноэлементного ЭГК потребовалась модификация кода COMSOL-ЭГК, в результате этого был получен новый программный код COMSOL-ЭГК-SC.

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОЭЛЕМЕНТНОГО ЭГК В СРЕДЕ COMSOL-ЭГК-SC**

**Расчетная геометрическая модель ЭГК.** Рассматриваемое устройство имеет сложную структуру из разнородных и взаимосвязанных элементов. Расчетная модель ЭГК, разработанная с помощью средств геометрического моделирования в программной среде COMSOL-ЭГК-SC, представлена на рис. 2. Настоящая модель одноэлементного ЭГК раз-

работана в трехмерной геометрии. На рисунке представлено продольное сечение разработанной модели ЭГК.

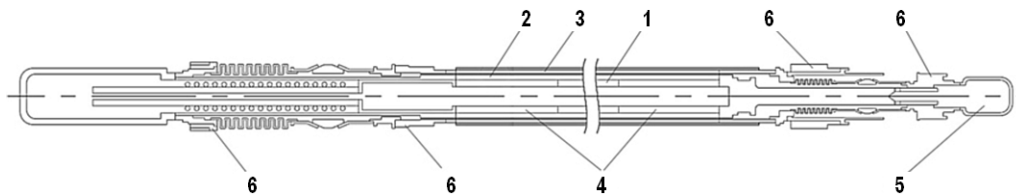


Рис. 2. Продольное сечение трехмерной модели одноэлементного ЭГК: 1 – ядерное топливо; 2 – эмиттер; 3 – коллектор; 4 – торцевые отражатели; 5 – генератор паров рабочего тела (ГПРТ); 6 – концевые элементы (токовыводы)

Особенности конструкции одноэлементного термоэмиссионного ЭГК обуславливают значительную пространственную неравномерность тепловых потоков и температуры в конструктивных элементах устройства.

**Математическая модель одноэлементного ЭГК.** Математическая модель электростатических процессов многоэлементных ЭГК, реализованная в программном коде COMSOL-ЭГК [13, 15, 16], обладает рядом существенных допущений, которые не позволяют проводить анализ электростатики в одноэлементных ЭГК по причине того, что одноэлементные ЭГК имеют иную схему протекания электрического тока по конструктивным элементам устройства, иными словами, отличную форму электрической цепи. По сути, одноэлементный ЭГК представляет собой четырехполюсник, включающий в себя четыре точки подключения, две из которых являются входом (токовводы), другие – выходом (токовыводы). Важно отметить, что выходные электрические характеристики ЭГК существенно зависят от конструкции и электротеплофизических свойств материалов его концевых элементов. Это приводит к невозможности использования упрощенных одномерных моделей для расчета выходных электротеплофизических характеристик ЭГК без существенной потери точности. Поэтому одной из особенностей разработанного кода COMSOL-ЭГК-SC является модификация математической модели ЭГК, позволяющая проводить моделирование электростатики и теплообмена в четырехполюснике с детальным учетом неоднородностей, связанных со сложной геометрией и материальным составом токовыводов одноэлементного ЭГК. Электрическая схема одноэлементного ЭГК, реализованная в программном коде COMSOL-ЭГК-SC, показана на рис. 3.

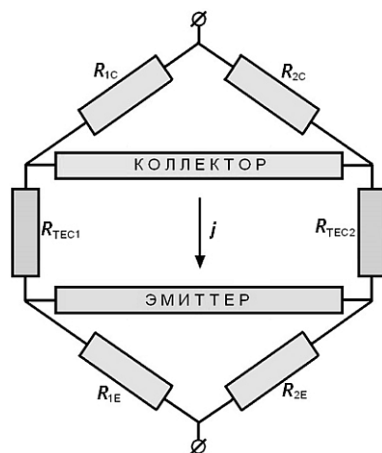


Рис. 3. Схема электрической цепи одноэлементного ЭГК

**Расчетная сетка и материальный состав модели ЭГК.** Разбиение модели одноэлементного ЭГК на конечно-разностные элементы производилось программой COMSOL-ЭГК-SC в полуавтоматическом (адаптивном) режиме с ручным выбором типа разбиения, а также минимального и максимального размеров генерируемых ячеек. Расчетная модель ЭГК в результате примененного разбиения насчитывает свыше 300000 расчетных ячеек. Фрагмент созданной расчетной сетки представлен на рис. 4.

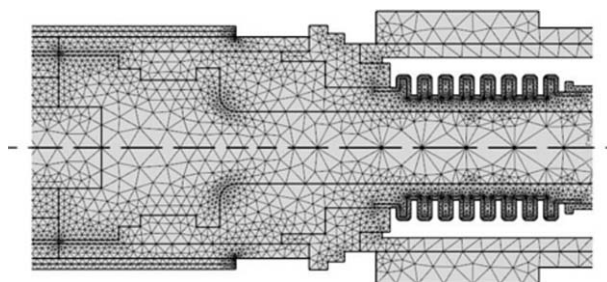


Рис. 4. Фрагмент расчетной сетки ЭГК

Материальный состав конструктивных элементов рабочей области ЭГК детально представлен в [8]. Важно отметить, что программный код COMSOL-ЭГК-SC обладает встроенной библиотекой физических свойств материалов, которые были использованы для последующего расчета выходных электротеплофизических характеристик ЭГК.

**Замыкающие соотношения задачи электротеплофизического расчета ЭГК.**

К граничным условиям, которые по своей сути являются замыкающими соотношениями в задаче расчета выходных характеристик ЭГК, относятся следующие:

- распределение энерговыделения топливного сердечника ЭГК, полученное в результате нейтронно-физического расчета активной зоны возможного исполнения ТЯЭУ АСММ и переданное в виде табличных данных в программный код COMSOL-ЭГК-SC (рис. 5);



Рис. 5. Распределение энерговыделения топливной композиции ЭГК

- массив обработанных экспериментальных данных о ВАХ ТЭП, соответствующих дуговому режиму работы ТЭП с электродными парами  $W_{\text{моно}}-\text{Mo}$  и Pt-VX2У [17 – 19], для задания плотности электрического тока с поверхности эмиттеров и связи задач теплового и электрического расчетов ЭГК;

- распределение теплового потока на внешней поверхности чехловой трубы ЭГК, определяемое процессом течения и свойствами теплоносителя и заданное в COMSOL-



ЭГК-SC на основании оценочных теплогидравлических расчетов ТЯЭУ АСММ.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ЭГК

Основным результатом расчетов электротеплофизических характеристик ЭГК с помощью программного кода COMSOL-ЭГК-SC являются двумерные распределения температуры и электрического потенциала эмиттеров, коллекторов и других конструктивных элементов ЭГК. По найденным распределениям рассчитываются ВАХ ЭГК и зависимости электрической мощности и системного к.п.д. от протекающего в ЭГК электрического тока [20]. Как отмечалось ранее, для проведения численного расчета характеристик ЭГК были использованы две выборки экспериментальных ВАХ ТЭП для различных материалов электродной пары (W<sub>МОНО</sub>-Мо и Pt-BX2Y). Расчеты были выполнены для различных величин тепловой мощности. На рисунках 6 – 8 приводятся расчетные характеристики одноэлементного ЭГК в составе ТЯЭУ АСММ, полученные с помощью модифицированного программного кода COMSOL-ЭГК-SC.

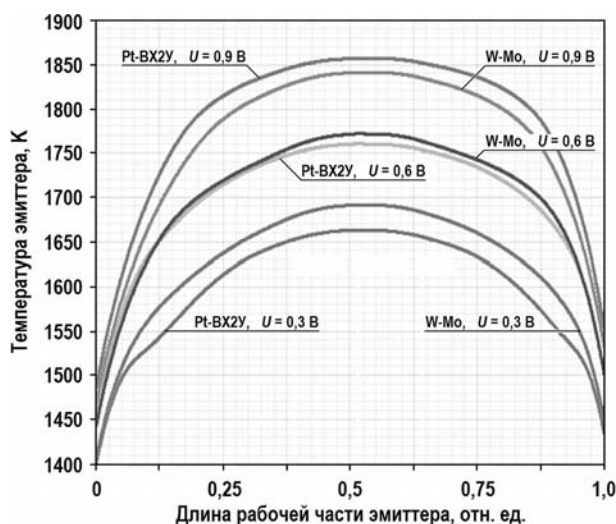


Рис. 6. Распределение температуры эмиттера по длине ЭГК для двух видов материалов электродных пар при различных величинах электрического напряжения

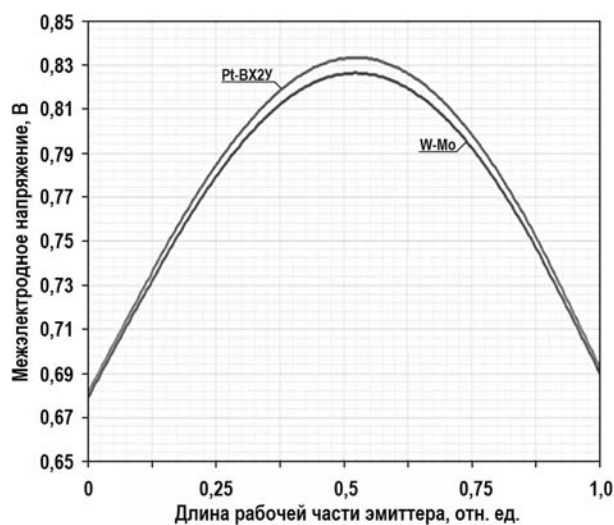


Рис. 7. Распределение межэлектродного напряжения по длине ЭГК для двух видов материалов электродных пар при величине электрического напряжения 0,6 В

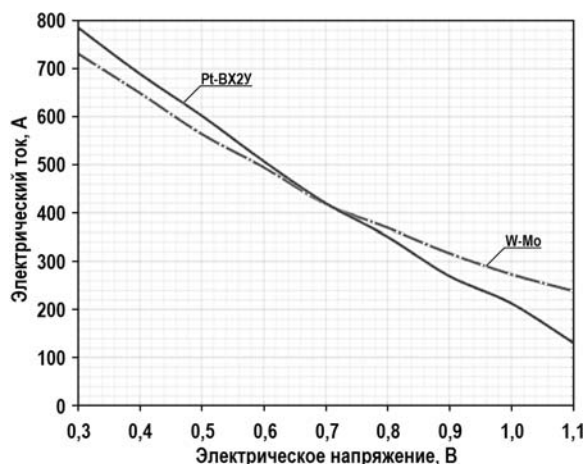


Рис. 8. Вольтамперные характеристики ЭГК для двух видов материалов электродных пар

Полученные результаты расчетов подтверждают значительное влияние на выходные энергетические характеристики ЭГК пространственных эффектов, которые невозможно учесть с достаточной точностью с применением одномерных математических моделей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан программный комплекс COMSOL-ЭГК-SC, являющийся модификацией программного комплекса COMSOL-ЭГК, для расчетного обоснования характеристик одноэлементного ЭГК в составе ТЯЭУ различного назначения. В этом комплексе

- разработана детализированная трехмерная геометрическая модель одноэлементного ЭГК в составе ТЯЭУ АСММ;

- модифицирована математическая модель, позволяющая провести моделирование электростатики и теплообмена в четырехполюснике с учетом неоднородностей, связанных со сложной геометрией и материальным составом токовыводов одноэлементного ЭГК;

- для расчета характеристик ЭГК применены две базы экспериментальных данных о ВАХ ТЭП с электродными парами  $W_{\text{моно}}\text{-Mo}$  и Pt-BX2Y;

- применено распределение энерговыделения топливного сердечника одноэлементного ЭГК, полученное в результате нейтронно-физического расчета одного из вариантов возможной структуры активной зоны ТЯЭУ в составе АСММ.

Достижение высокой точности расчета в полной мере связано с учетом реальной структуры и физических свойств материалов моделируемых устройств, а также использования экспериментальных данных из базы данных ВАХ ТЭП, распределения энерговыделения топливной композиции ЭГК и распределения теплового потока на внешней поверхности чехловой трубы ЭГК, которые являются замыкающими соотношениями в задаче расчета выходных характеристик ЭГК. Использование программного кода COMSOL-ЭГК-SC для расчетов электротеплофизических характеристик одноэлементного ЭГК с использованием трехмерной математической модели показало эффективность и гибкость разработанной методики.

Приведенный в работе пример применения разработанного программного комплекса COMSOL-ЭГК-SC не ограничивает его использование только для обоснования характеристик одноэлементных ЭГК. Он может быть использован и для других типов ЭГК (различный материальный состав, геометрическая структура, граничные условия и др.) как с ядерным, так и неядерным нагревом.

Полученные результаты являются составной частью выполненных по государственному заказу Госкорпорации «Росатом» НИОКР кооперацией предприятий АО «Красная Звезда», ФГУП «НИИ НПО «Луч» и АО «ГНЦ РФ-ФЭИ».

### **Литература**

1. *Ярыгин В.И., Ружников В.А., Синявский В.В.* Космические и наземные ядерные энергетические установки прямого преобразования энергии. / Монография. – М: НИЯУ МИФИ, 2016. – 364 с.
2. *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, 238-260.
3. *Андреев П.В., Гулевич А.В., Зарицкий Г.А., Легостаев В.П., Никонов А.М., Овчаренко М.К., Пышко А.П., Синявский В.В., Ярыгин В.И.* Физико-технические возможности термоэмиссии для современных проектов создания КЯЭУ субмегаваттного класса. / Международная конференция «Ядерные и инновационные технологии для космоса» (NETS-2012), секция 2 «Ядерная энергетика и двигатели», 2012.
4. Стратегия развития арктической зоны Российской Федерации и обеспечение национальной безопасности на период до 2020 года. / Указ Президента Российской Федерации от 20.02.2013. – Электронный ресурс: <http://www.government.ru/info/18360/>. Дата обращения: 01.09.2016.
5. Государственная программа социально-экономического развития арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года. / Постановление от 21.04.2014 №366. – Электронный ресурс: <http://www.government.ru/docs/11967/>. Дата обращения: 01.09.2016.
6. Росатом предложил производить реакторы, не требующие постоянного персонала. / РИА Новости от 10.06.2016. – URL: <http://www.vpk.name/news/>. Дата обращения: 01.09.2016.
7. *Лазаренко Г.Э., Ярыгин В.И., Пышко А.П.* Автономная ядерная энергетическая установка электро- и теплоснабжения прямого преобразования тепловой энергии в электричество. / Сб. докл. Международной научно-практической конференции «Малая энергетика – 2006». Москва, 2006. – С. 68-70.
8. *Кухарчук О.Ф., Ярыгин В.И., Выбыванец В.И.* Атомная станция малой мощности АСММ 10/100 кВтэл в северном исполнении на основе термоэмиссионной ЯЭУ. / В трудах круглого стола Международного форума «Армия-2015», КВЦ «Патриот», Московская обл., пос. Кубинка, 2015.
9. *Грязнов Г.М., Пупко В.Я.* «Топаз-1». Советская космическая ядерно-энергетическая установка // Природа. – 1991. – Вып. 10. – С. 29-36.
10. *Кухаркин Н.Е., Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А.* Космическая ядерная энергетика (ядерные реакторы с термоэлектрическим и термоэмиссионным преобразованием – «Ромашка» и «Енисей») / Под ред. акад. РАН Н.Н. Пономарева-Степного – М.: ИздАт, 2008. – 146 с.
11. *Гонтарь А.С., Еремин С.А., Лапочкин Н.В.* Усовершенствованный одноэлементный электрогенерирующий канал для термоэмиссионной ЯЭУ повышенной мощности. / Сб. докл. Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе – 2005», Москва-Подольск, 2005. – Т.2. – С. 279-283.
12. Официальный сайт производителя «Comsol Multiphysics». Электронный ресурс: <http://www.comsol.com/>. Дата обращения: 01.09.2016.
13. *Полоус М.А., Ярыгин В.И., Виноградов Е.Г.* Программный комплекс для трехмерного численного расчета тепловых и электрических характеристик многоэлементного электрогенерирующего канала термоэмиссионной ЯЭУ. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – № 2. – С. 151-160.
14. *Соловьев Д.И., Полоус М.А.* Программный код COMSOL-ЭГК-СС для трехмерного расчета электротеплофизических характеристик одноэлементного электрогенерирующего канала термоэмиссионной ЯЭУ в составе атомной станции малой мощности. / Тезисы доклада на Российской конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов, студентов «Атомные электростанции сверхмалой мощности для прикладных и учебных це-



лей» – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2016. – С. 39-41.

15. Полоус М.А., Ярыгин В.И. Методика трехмерного расчета выходных характеристик экспериментального термоэмиссионного преобразователя // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 2.

16. Полоус М.А., Алексеев П.А., Ехлаков И.А. Современные расчетные технологии обоснования характеристик ЯЭДУ в проектных работах создания термоэмиссионных КЯЭУ нового поколения // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2013. – № 68.

17. Ярыгин В.И. Физические основы термоэмиссионного преобразования энергии. Ч.1. Введение в специальность. / Учебное пособие. Обнинск: ИАТЭ, 2006, 104 с.

18. Виноградов Е.Г., Миронов В.С., Смольникова Г.И. Банк данных вольтамперных характеристик термоэмиссионного преобразователя // Атомная энергия. – 2000. – Т. 89. – Вып. 1. – С. 71-74.

19. Ярыгин В.И. Электродные материалы для энергонапряженных электрогенерирующих каналов термоэмиссионного реактора-преобразователя. // Ракетно-космическая техника, серия XII. – 1998. – Вып. 1-2. – С. 105-115.

20. Виноградов Е.Г., Линник В.А., Лазаренко Д.Г. Методика расчета вольтамперных характеристик термоэмиссионных ЭГК сложной геометрии // Атомная энергия. – 2009. – Т. 106. – Вып. 5. – С. 257-262.

Поступила в редакцию 19.10.2016 г.

#### Авторы

Полоус Михаил Александрович, инженер-исследователь, к.т.н.

E-mail: m.polous.a@gmail.com (+7 953 330 95 43)

Соловьев Дмитрий Игоревич, инженер-исследователь

E-mail: dmitri.solov@gmail.com

Ярыгин Валерий Иванович, главный научный сотрудник, профессор, д.т.н.

E-mail: ecs-yar@ippe.ru

UDC 621.039.578:629.7

### **PROGRAM CODE FOR THREE-DIMENSIONAL CALCULATION OF OUTPUT CHARACTERISTICS FOR SINGLE-CELL THERMIONIC FUEL ELEMENT OF THERMIONIC NUCLEAR POWER PLANT FOR VARIOUS PURPOSES**

Polous M.A., Solov'yev D.I., Yarygin V.I.

JSC «SSC RF-IPPE n.a. A.I. Leypunsky»

1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

#### ABSTRACT

In support of the state programs for development of the Arctic region of the Russian Federation, the Rosatom State Corporation is engaged in R&D activities to create a line of autonomous low capacity nuclear power plants (LCNPP) producing electric power up to 1 MW(e). To supply heat and electricity to consumers in the rated output power range of 10–100 kW(e), the most attractive are LCNPPs of direct energy conversion with an in-core thermionic system due to their high autonomy, compactness and easy servicing. The most important component of a thermionic nuclear power plant (TNPP) is a thermionic fuel element (TFE), in which the electrogenerating and fuel elements are

structurally integrated. As the basic TFE of a TNPP for a LCNPP, the single-cell TFE developed for the TNPP «Yenisey» can be chosen. Experimental studies and tests of thermionic reactors are complex and expensive; therefore, an integral part of designing TNPPs is mathematical modeling of physical processes occurring in the TFE. The paper presents the results of three-dimensional numerical modeling of thermal and electrical characteristics of a single-cell TFE for a TNPP as part of one possible LCNPP designs. These results were obtained using a technique developed on the basis of the modern software package COMSOL Multiphysics® and named by the authors «COMSOL-TFE-SC». Initial data for a single-cell TFE calculation are formulated. A description is made of the TFE mathematical model development stages in the COMSOL-TFE-SC program. The results are presented of a three-dimensional numerical calculation of TFE thermal and electrical characteristics with the use of experimental databases on current-voltage characteristics of the thermionic converter with electrode pairs  $W_{\text{mono}}\text{-Mo}$  and Pt-(Cr-V)-alloy and results of neutronic calculations for a possible TNPP core structure as part of LCNPP and the heat flux distribution on an external surface of the sheet pipe of TFE received on the basis of estimated thermal-hydraulic calculations of TNPP.

**Key words:** thermionic NPP, single-cell thermionic fuel element, finite element analysis, three-dimensional numerical modeling.

#### REFERENCES

1. Yarygin V.I., Rujnikov V.A., Sinyavsky V.V. Kosmicheskie i nazemnye jadernye jenergeticheskie ustanovki prjamogo preobrazovanija jenergii [Space and terrestrial nuclear power plants of direct energy conversion]. Moscow. NRNU «MEPhI» Publ., 2016. 364 p. (in Russian).
2. Romanov A.V. Teoriya kompleksnoy optimizatsii proyektirovaniya kosmicheskikh apparatov s yadernymi termoemissionnymi energeticheskimi ustanovkami [The complex optimization theory of the design of spacecraft with thermionic nuclear power plants]. St. Petersburg. NPO «Professional» Publ., 2010, pp. 15-95, 238-260 (in Russian).
3. Andreyev P.V., Gulevich A.V., Zaritskiy G.A., Legostayev V.P., Nikonov A.M., Ovcharenko M.K., Pyshko A.P., Sinyavsky V.V., Yarygin V.I. Fiziko-tekhnicheskiye vozmozhnosti termoemissii dlya sovremennykh proyektov sozdaniya kosmicheskikh YaEU submegavattного класса [Physical and technical capabilities of thermal emission for modern projects for the design of space NPP of submegawatt class]. *Trudy mezhdunarodnoy konferentsii «Yadernyye i innovatsionnyye tekhnologii dlya kosmosa» (NETS-2012), sektsiya 2 «Yadernaya energetika i dvigateli»* [Proc. Int. Conf. «Nuclear and Innovative Technologies for Space» (NETS-2012), sec. 2 «Nuclear power and engines»]. USA, 2012, Report No. 3014 (in Russian).
4. Strategiya razvitiya arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii i obespecheniye natsional'noy bezopasnosti na period do 2020 goda. [The strategy of development for the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2020]. *Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 20.02.2013* [Presidential Decree from 20.02.2013]. Available at: <http://www.government.ru/info/18360/> (accessed 1 Sep. 2016) (in Russian).
5. Gosudarstvennaya programma sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii na period do 2020 goda. [The state program of social and economic development of the Arctic zone of the Russian Federation for the period up to 2020]. *Postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 21.04.2014* [The Order of the Government of the Russian Federation from 21.04.2014]. Available at: <http://www.government.ru/docs/11967/> (accessed 1 Sep. 2016) (in Russian).
6. Rosatom predlozhit' proizvodit' reaktory, ne trebuyushchiye postoyannogo personala [Rosatom offered to produce reactors that do not require permanent staff]. *RIA Novosti ot*

10.06.2016 [RIA News from 10.06.2016]. Available at:

<http://www.vpk.name/news/> (accessed 1 Sep. 2016) (in Russian).

7. Lazarenko G.E., Yarygin V.I., Pyshko A.P. Avtonomnaya yadernaya energeticheskaya ustanovka elektro- i teplosnabzheniya pryamogo preobrazovaniya teplovoy energii v elektrichestvo [Autonomous nuclear power plant electricity and heat of direct conversion of thermal energy into electricity]. *V trudakh mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Malaya energetika – 2006»* [Proc. Int. Conf. «Small-scale Power Generation – 2006»]. Moscow, 2006, pp. 68-70 (in Russian).

8. Kukharchuk O.F., Yarygin V.I., Vybyvanets V.I. Atomnaya stantsiya maloy moshchnosti ASMM 10/100 kVtel v severnom ispolnenii na osnove termoemissionnoy YAEU [Nuclear power station of plant capacity LCNPP 10/100 kW<sub>el</sub> for northern-based thermionic NPP]. *V trudakh kruglogo stola Mezhdunarodnogo foruma «Armiya – 2015»* [Proc. Int. Round Table Forum «Army – 2015»]. Moscow reg., Cubinka. KVC «Patriot» Publ., 2015 (in Russian).

9. Gryaznov G.M., Pupko V.Y. «Topaz-1». Sovetskaya kosmicheskaya yaderno-energeticheskaya ustanovka [«Topaz-1». Soviet space nuclear power plant]. *Priroda*. 1991, no. 10, pp. 29-36 (in Russian).

10. Kukharkin N.E., Ponomarev-Stepnoy N.N., Usov V.A. Kosmicheskaya yadernaya energetika (yadernyye reaktory s termoelektricheskim i termoemissionnym preobrazovaniyem – «Romashka» i «Yenisey») [Space nuclear power (nuclear reactors with thermoelectric and thermionic conversion – «Romashka» and «Yenisey»)]. Moscow. IzdAt Publ., 2008. 146 p. (in Russian).

11. Gontar' A.S., Eremin S.A., Lapochkin N.V. Usovershenstvovannyi odnoelementnyy elektrogeneriruyushchiy kanal dlya termoemissionnoy YAEU povyshennoy moshchnosti [Advanced single-cell fuel element for thermionic NPP with increased power]. *V trudakh Mezhdunarodnoy konferentsii «Yadernaya energetika v kosmose – 2005»* [Proc. Int. Conf. «Nuclear Power in Space – 2005»]. Moscow-Podolsk, 2005, v. 2, pp. 279-283 (in Russian).

12. Ofitsial'nyy sayt proizvoditelya «Comsol Multiphysics» [Official site of «Comsol Multiphysics» producer]. Available at: <http://www.comsol.com/> (accessed 1 Sep. 2016) (in Russian).

13. Polous M.A., Yarygin V.I., Vinogradov E.G. Programmnyy kompleks dlya trekhmernogo chislennogo rascheta teplovykh i elektricheskikh kharakteristik mnogoelementnogo elektrogeneriruyushchego kanala termoemissionnoy YaEU [Software for three-dimensional numerical calculation of thermal and electrical characteristics of the multi-cell thermionic fuel element for thermionic NPP]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2012, no. 2, pp. 151-160 (in Russian).

14. Solov'yev D.I., Polous M.A. Programmnyy kod COMSOL-EGK-SC dlya trekhmernogo rascheta elektroteploffizicheskikh kharakteristik odnoelementnogo elektrogeneriruyushchego kanala termoemissionnoy YAEU v sostave atomnoy stantsii maloy moshchnosti [The program code COMSOL-TFE-SC for three-dimensional calculation of characteristics for single-cell thermionic fuel element of thermionic NPP as a part of low capacity nuclear power plant]. *V trudakh Rossiyskoy konferentsii molodykh uchenykh, spetsialistov, aspirantov, studentov «Atomnyye elektrostantsii sverkhmaloy moshchnosti dlya prikladnykh i uchebnykh tseley»* [Proc. Russian Conf. of young scientists, specialists, graduate students «Nuclear power for ultra-low power applications and educational purposes»]. Ozninsk. INPE NRNU «MEPhI» Publ., 2016, pp. 39-41 (in Russian).

15. Polous M.A., Yarygin V.I. Metodika trekhmernogo rascheta vykhodnykh kharakteristik eksperimental'nogo termoemissionnogo preobrazovatelya [The technique of three-dimensional calculation of output characteristics of an experimental thermionic converter]. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzh'ya*, 2012, no. 2 (in Russian).

16. Polous M. A., Alekseev P. A., Ekhlakov I. A., Sovremennyye raschetnyye tekhnologii obosnovaniya kharakteristik YAEDU v proyektnykh rabotakh sozdaniya termoemissionnykh KYAEU novogo pokoleniya [Modern computational technologies for justification the characteristics of nuclear power propulsion systems in design works of creation a new

generation of thermionic space nuclear power unit]. *Trudy MAI*, 2013, no. 68, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php/ID=41822> (in Russian).

17. Yarygin V.I. Fizicheskiye osnovy termoemissionnogo preobrazovaniya energii. CH. 1. Vvedeniye v spetsial'nost' [Physical basis of thermionic energy conversion. Part 1. Introduction to Specialty]. Obninsk, INPE Publ., 2006, 104 p. (in Russian).

18. Vinogradov E.G., Mironov V.S., Smolnikova G.I. Bank dannykh vol'tampernykh kharakteristik termoemissionnogo preobrazovatelya [The data bank of current-voltage characteristics of the thermionic converter]. *Atomnaya energiya*. 2000, v. 89, iss. 1, pp. 71-74 (in Russian).

19. Yarygin V.I. Elektrodnyye materialy dlya energonapryazhennykh elektrogeniruyushchikh kanalov termoemissionnogo reaktora-preobrazovatelya [The electrode material for energy-intensive thermionic fuel elements of thermionic converter reactor]. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika*, ser. XII, 1988, no. 1-2, pp. 105-115 (in Russian).

20. Vinogradov E.G., Linnik V.A., Lazarenko D.G. Metodika rascheta vol'tampernykh kharakteristik termoemissionnykh EGK slozhnoy geometrii [The method of calculation of current-voltage characteristics of TFE with complex geometry]. *Atomnaya energiya*. 2009, v. 106, iss. 5, pp. 257-262 (in Russian).

#### Authors

Polous Mikhail Alexandrovich, Research engineer, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: m.polous.a@gmail.com

Solov'yev Dmitriy Igorevich, Research Engineer

E-mail: dmitri.solov@gmail.com

Yarygin Valeriy Ivanovich, Chief Researcher, Professor, Dr. Sci (Engineering)

E-mail: ecs-yar@ippe.ru