Государственная корпорация «Росатом»

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт» имени А.И. Лейпунского

На правах рукописи

Полоус Михаил Александрович

Методика комплексного трехмерного расчета выходных характеристик электрогенерирующих каналов термоэмиссионных ядерных энергетических установок второго поколения

Специальность

05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

профессор, доктор технических наук Ярыгин Валерий Иванович

Обнинск – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ....4
ВВЕДЕНИЕ....5
1. Обзор и анализ расчетных методик термоэмиссионных ЭГК....19
1.1. Термоэмиссионный способ преобразования энергии....19
1.2. Конструктивные формы ЭГК в составе термоэмиссионных ЯЭУ первого поколения....20
1.3. Конструктивные формы ЭГК в составе перспективных термоэмиссионных ЯЭУ....24
1.4. Методики расчета электро-теплофизических характеристик ЭГК....26
1.4.1. Расчет ЭГК по модели распределенных параметров....29
1.4.2. Расчет характеристик ТРП с помощью современных программных кодов....32
1.4.3. Результаты анализа расчетных методик ЭГК....35
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1....38
2. Разработка методики математической обработки экспериментальных ВАХ ТЭП....39
2.1. Способы определения локальной ВАХ ТЭП....39
2.2. Многопараметрическая аппроксимация экспериментальных ВАХ ТЭП в программной среде MATLAB....42
2.3. Результаты аппроксимации экспериментальных данных о ВАХ ТЭП в программной среде MATLAB....50
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2....55
3. Расчет тепловых и электрических характеристик лабораторного ТЭП в программной среде COMSOL-ЭГК....57
3.1. Общая характеристика программного кода конечно-элементного анализа COMSOL-ЭГК....57
3.2. Конструктивная форма лабораторного ТЭП....60
3.3. Основные этапы моделирования задачи в среде COMSOL-ЭГК....61
3.4. Разработка трехмерной численной модели лабораторного ТЭП....63
3.5. Математическая модель лабораторного ТЭП в среде COMSOL-ЭГК....65
3.5.1. Система математических уравнений....65
3.5.2. Начальные и граничные условия....67
3.5.3. Упрощения и допущения....68
3.6. Создание конечно-элементной сетки расчетной модели ТЭП....69

3.7. Результаты трехмерного расчета тепловых и электрических характеристик лабораторного ТЭП....70
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3 76
4. Расчет электро-теплофизических характеристик унифицированного ЭГК в составе петлевого канала исследовательского реактора ИВВ-2М....77
4.1. Современное состояние работ по термоэмиссионным КЯЭУ....77
4.2. Исходные данные для верификации кода COMSOL-ЭГК по результатам испытаний унифицированного ЭГК в составе петлевого канала ИВВ-2М 80
4.2.1. Исследовательский ядерный реактор ИВВ-2М 80
4.2.2. Петлевой канал в составе реактора ИВВ-2М 81
4.2.3. Унифицированный ЭГК в составе петлевого канала реактора ИВВ-2М 82
4.2.4. Распределение энерговыделения в топливных сердечниках ЭГК 84
4.2.5. Выборка исходных экспериментальных данных о ВАХ ТЭП для расчетного анализа в коде COMSOL-ЭГК 85
4.3. Численный расчет тепловых и электрических характеристик унифицированного ЭГК в составе петлевого канала реактора ИВВ-2М с использованием программной среды COMSOL-ЭГК 87
4.3.1. Трехмерная расчетная модель унифицированного ЭГК....87
4.3.2. Материальный состав конструктивных элементов унифицированного ЭГК....88
4.3.3. Конечно-элементная расчетная сетка унифицированного ЭГК....88
4.3.4. Начальные и граничные условия....90
4.3.5. Задание энерговыделения ядерного топлива в унифицированном ЭГК в программной среде COMSOL-ЭГК....91
4.3.6. Задание внешнего граничного условия на чехле рабочего участка петлевого канала 92
4.3.7. Упрощения и допущения 93
4.3.8. Результаты численного расчета электро-теплофизических характеристик унифицированного ЭГК 94
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4 99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 101
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 103
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 115
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 118
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 120

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

I – выходной электрический ток
V – напряжение постоянного тока
Q – тепловая мощность
P_{Cs} – давление паров цезия
$N_{эл}$ – электрическая мощность
η – полный (системный) коэффициент полезного действия
j – плотность электрического тока
u – межэлектродное напряжение
T – температура
S – площадь поперечного сечения электрода
F – площадь боковой поверхности электрода
L – длина электрода
Е – обозначение эмиттера
С – обозначение коллектора
ε – приведенная степень черноты
ζ – постоянная Стефана-Больцмана
V_b – барьерный индекс
k_{Cs} – эффективный коэффициент теплопередачи через пары цезия
k_w – эффективный коэффициент теплопередачи от коллектора к теплоносителю
λ – коэффициент теплопроводности
d – величина межэлектродного зазора
Φ – работа выхода электронов электрода
R – омическое сопротивление
q – плотность теплового потока
k_z – коэффициент неравномерности тепловыделения по высоте
ρ – удельное омическое сопротивление
r – радиус электрода
δ – толщина электрода
φ – электрический потенциал
АЗ – активная зона
БД – база данных
ВАХ – вольтамперная характеристика
ГП – геометрическое профилирование
ГПД – газообразные продукты деления
КА – космический аппарат
МНК – метод наименьших квадратов
МЭЗ – межэлектродный зазор
ПК – петлевой канал
ТРП – термоэмиссионный реактор-преобразователь
ТЭП – термоэмиссионный преобразователь
ХИ – холодильник-излучатель
ЭГК – электрогенерирующий канал
ЭГЭ – электрогенерирующий элемент
ЯЭУ – ядерная энергетическая установка

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие космической ядерной энергетики, которое началось в середине 60-х годов XX века, привело к созданию ядерных энергетических установок (ЯЭУ) с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую - «SNAP-10A», «Бук», «Топаз» (космические ЯЭУ первого поколения) [1]. Космическая ЯЭУ (КЯЭУ) «Топаз» с термоэмиссионным преобразованием энергии прошла летно-конструкторские испытания, а космическая ЯЭУ «Бук» с термоэлектрическим преобразованием энергии штатно эксплуатировалась с составе космического аппарата (КА) «УС-А» и «УС-АМ» в 70-80 годы как подсистема морской космической разведки и целеуказания по проекту «Легенда» [1-3]. Кроме того в 80-х годах была разработана и успешно прошла наземные испытания термоэмиссионная ЯЭУ «Енисей» [4]. Примерно в то же время в РКК «Энергия» им. С.П. Королева с кооперацией предприятий Росатома и Роскосмоса разрабатывалась термоэмиссионная ЯЭУ «Акация» мегаваттного диапазона электрической мощности для космического буксира «Геркулес» [5]. В результате был накоплен большой опыт конструирования, изготовления и испытаний перспективных электрогенерирующих каналов в составе ЯЭУ различного назначения (для космических, морских и наземных задач [3, 4]).

Постоянное усложнение задач вызывает необходимость своевременного развития конструкторских и расчетных подходов в проектировании наиболее перспективных термоэмиссионных ЯЭУ прямого преобразования энергии. Особенно это относится к одному из основных элементов энергетической установки – термоэмиссионному ядерному реактору-преобразователю.

Отечественная космонавтика сейчас претерпевает глубокую реформу. Реформирование космической отрасли предусматривает выработку новой концепции, долгосрочной политики и программы космической деятельности России, реализацию новых экономических отношений, оборонной доктрины, 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 - 2020 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 [8].

Важнейшей национальной задачей, в рамках которой будет, несомненно, использован опыт КЯЭУ первого поколения в рамках проекта «Легенда», является создание глобальной системы разведки и целеуказания, о которой было сообщено главнокомандующим ВС РФ – Президентом РФ В.В. Путиным в декабрьском послании Президента Федеральному собранию [2, 9].

Появление нового комплекса космических задач, требующих для своей реализации десятков и сотен киловатт электрической мощности, ставит вопрос о создании энергетических установок большей мощности. Разрабатываемые в настоящее время коммерчески привлекательные электрогенерирующие системы с прямым преобразованием энергии, основанные на термоэмиссионной технологии [10-13], прошедшей апробацию в космосе, способны перекрыть весь необходимый мощностной диапазон с приемлемыми эксплуатационными показателями. НИОКР по созданию термоэмиссионных ЯЭУ второго (термоэмиссионного реактора преобразователя в ЯЭУ-25, ЯЭУ-50 и др. с базовым (унифицированным) ЭГК [1, 14]) и нового поколений, в том числе космического [15-21] и наземного назначения [22, 23], ведутся при значительном ужесточении технических требований по увеличению ресурса и выходной электрической мощности, повышению ядерной и радиационной безопасности. И, хотя КЯЭУ с прямым преобразованием энергии уступают КЯЭУ с машинным преобразованием по полному к.п.д., но по системному критерию удельной массы КЯЭУ (кг/кВт$_{эл}$) они сопоставимы [24]. До настоящего времени только термоэлектрические и термоэмиссионные КЯЭУ остаются единственными, прошедшими не только все стадии НИОКР, но и получившими реальный опыт использования в космосе [1].

В данной работе для проведения расчетных исследований использованы опубликованные экспериментальные данные, полученные в результате выполненных, в том числе с моим участием, в Акционерном обществе «Государственном науч-

ном центре Российской Федерации – Физико-энергетический институт» имени А.И. Лейпунского (далее ГНЦ РФ-ФЭИ) проблемно-ориентированных исследований физических процессов, протекающих в высокоэффективном термоэмиссионном преобразователе (ТЭП), который используется при проектировании термоэмиссионных электрогенерирующих каналов (ЭГК) и ЯЭУ прямого преобразования энергии [25-28]. ТЭП нового поколения, разработанные в ГНЦ РФ-ФЭИ с применением высокоэффективных низкотемпературных электродных материалов, продемонстрировали существенное увеличение к.п.д. преобразования энергии при более низкой удельной энергонапряженности и температуре электродов [29]. Согласно экспериментальным данным о характеристиках рабочего процесса ТЭП, которые были получены в лаборатории Исследования фундаментальных и прикладных проблем прямого преобразования различных видов энергии отдела Инженерно-физических исследований фундаментальных и прикладных проблем специальных ЯЭУ отделения Космических энергосистем ГНЦ РФ-ФЭИ, открылась возможность разработки высокоэффективного низкотемпературного термоэмиссионного ЭГК для ЯЭУ нового поколения. Снижение удельной энергонапряженности в ТЭП с использованием низкотемпературных электродных материалов дает возможность разработчикам создавать новые типы ЭГК с увеличенной площадью эмиссионной поверхности и более сложной геометрической структурой электродов [30, 31].

Обоснование проектных решений при создании термоэмиссионных ЯЭУ второго и нового поколения требует усовершенствования существующих или разработки новых методов численного расчета физических характеристик ЭГК по причине значительного изменения конструктивных форм и технологий разрабатываемых устройств и, следовательно, условий протекания процесса термоэлектронной эмиссии. В настоящее время модернизация методов численного расчета выходных электро-теплофизических характеристик ЭГК сводится по большей части лишь к адаптации существующих расчетных методик под современную вычислительную технику. Отсутствие развития в направлении модернизации методик численного расчета характеристик ЭГК может значительно осложнить выполне-

ние проектных работ в области перспективных термоэмиссионных ЯЭУ. Поэтому одной из актуальных задач, возникающих при разработке и совершенствовании термоэмиссионных ЯЭУ, является создание методик расчета, учитывающих как новые экспериментальные данные о характеристиках электродов, так и более сложную геометрическую и материальную структуру ЭГК, характеризующуюся большим набором тепловых сред разной теплопроводности, сложной формой электродных оболочек, коммутационных перемычек и других конструкционных элементов. В последние годы начали развиваться методики расчета электро-теплофизических характеристик ЭГК сложной геометрии [32, 33]. Однако, развитие методик расчета осуществлялось лишь в рамках одномерных математических моделей, обладающих рядом необходимых допущений и упрощений, существенно ограничивающих развитие современных расчетно-проектных технологий.

В начале 60-х годов Ю.С. Юрьевым (ГНЦ РФ-ФЭИ) впервые была предложена основная система уравнений для математической модели тепловых и электрических процессов, протекающих в электрогенерирующем элементе (ЭГЭ) [34].

Последующее развитие методик решения системы нелинейных уравнений для расчета электро-теплофизических характеристик ЭГЭ в составе ЭГК проводилось Линником В.А. [35], Ружниковым В.А. [36-38], Шиманским А.А. [39], Синявским В.В., Бабушкиным Ю.В., Зиминым В.П., Мендельбаумом М.А., Савиновым А.П. [40-43], Виноградовым Е.Г. [44], Давыдовым А.А., Гонтарем А.С. [45] и др.

Самые ранние методики расчета характеристик ЭГЭ/ЭГК основывались на аналитическом решении системы уравнений для ЭГЭ ввиду отсутствия достаточных мощностей вычислительной техники, что в свою очередь приводило к необходимости создания различного рода упрощений физико-математической модели ЭГЭ [35]. К примеру, принималось допущение о линейности экспериментальной вольтамперной характеристики (ВАХ) ТЭП, температура коллектора и плотность эмиссионного тока по длине ЭГЭ полагались постоянными. Благодаря этим упрощениям система нелинейных уравнений для ЭГЭ сводилась к линейной, что позволяло применить аналитическое решение. Позднее для более точного расчета

распределения температуры поверхности эмиттера и решения нелинейных уравнений стали применять вариационные методы и метод Галеркина [35].

Дальнейшее развитие методик расчета электро-теплофизических характеристик ЭГЭ/ЭГК было связано с применением численных методов решения системы нелинейных дифференциальных уравнений для совокупности ЭГЭ в составе ЭГК [36-45]. Численные методы обладают рядом достоинств по сравнению с ранее разработанными методами расчета, тем не менее, применяемая расчетная модель ЭГЭ сводится к системе одномерных нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, которые описывают распределение температуры эмиттера и разности потенциалов между электродами по длине ЭГЭ, не исключая при этом описанных ранее допущений. Поэтому совершенствование методов расчета электро-теплофизических характеристик ЭГЭ/ЭГК в первую очередь должно идти по пути устранения всех возникших ранее допущений и упрощений. Кроме того, в одномерных методиках отсутствует возможность прямого использования в математической модели ЭГК его материального состава в реальной геометрической структуре (чертеже). Таким образом, для каждой новой конструкции ЭГК необходимо создавать новую расчетную математическую модель.

В настоящее время методы расчетно-проектного обоснования технических решений в науке и технике изменились коренным образом, благодаря развитию информационных технологий и методов численного анализа. Численные методы сделали возможным решение сложных задач для самых 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, SolidWorks и другие [46]. Это позволяет 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.

Актуальность работы в области создания современных методик расчетного обоснования проектных решений ЭГК в составе термоэмиссионных ЯЭУ второго и нового поколений обусловлена

- проведением проектных работ по созданию термоэмиссионных ЯЭУ второго и нового поколения космического и наземного назначения повышенной мощности и ресурса;
- необходимостью создания современного программного обеспечения для проведения комплексного численного расчета физических характеристик разрабатываемых ЭГК для перспективных ЯЭУ прямого преобразования энергии, а также для проведения расчетного сопровождения экспериментальных работ по ядерной термоэмиссионной технологии;
- ограниченной возможностью применения разработанных ранее методик численного расчета характеристик ЭГК и термоэмиссионного реактора преобразователя (ТРП) из-за одномерности математических моделей и существенных упрощений, лежащих в основе этих методик;
- наличием большого количества экспериментальных данных о рабочем процессе ТЭП при отсутствии эффективных методов их обработки и последующего использования в расчетах характеристик ТЭП/ЭГК/ТРП в проектных работах создания ЯЭУ различного назначения.

Таким образом, задачи настоящей диссертации, связанные с созданием современных методик расчета характеристик ЭГК с использованием баз экспериментальных данных о ВАХ ТЭП для обоснования проектных характеристик при разработках перспективных термоэмиссионных ЯЭУ являются актуальными.

Целью диссертационной работы является разработка современных методик расчета электро-теплофизических характеристик ТЭП/ЭГК/ТРП в трехмерной геометрии с использованием экспериментальных данных о ВАХ ТЭП для обоснования проектных решений термоэмиссионных ЯЭУ.

Для достижения данной цели в диссертационной работе решены следующие **задачи**.

- Проведен анализ ранее созданных методик расчета характеристик ЭГЭ/ЭГК/ТРП, а также выполнен обзор современных программных кодов конечно-элементного анализа и определено направление их модификации для проведения оптимизационных расчетов.
- В результате модификации современного программного кода конечно-элементного анализа COMSOL [47] разработана методика численного расчета выходных электро-теплофизических характеристик термоэмиссионных ЭГК с использованием трехмерной математической модели и обработанных экспериментальных данных о ВАХ ТЭП, названная мною COMSOL-ЭГК.
- Разработана методика математической обработки экспериментальных данных о ВАХ ТЭП, основанная на аппроксимации многомерными функциями содержимого банков экспериментальных данных, находящаяся в дружественном интерфейсе с программной средой COMSOL-ЭГК.

Научная новизна результатов, полученных в диссертационной работе, заключается в следующем:

- впервые в практике в рамках одной программной среды реализовано решение задачи трехмерного численного расчета электро-теплофизических характеристик ЭГК, при этом программная архитектура кода позволяет осуществлять моделирование задачи и в одномерном приближении, тем самым включая в себя все созданные ранее методики расчета ЭГЭ/ЭГК;
- разработанная методика позволила учесть в математической модели ТЭП/ЭГК реальную геометрическую структуру конструктивных элементов, разнообразие физических свойств материалов, а также влияние технологии изготовления и особенности рабочих условий электродных пар моделируемых устройств;
- впервые получены электрические и тепловые характеристики в трехмерной геометрии внутри межэлектродного коммутационного пространства многоэлементного термоэмиссионного ЭГК;

- впервые получен и интегрирован в разработанный программный код алгоритм поиска многомерных аппроксимирующих функций для экспериментальных данных о ВАХ ТЭП/ЭГЭ;
- разработанный программный код позволяет использовать как обрабатываемые в автоматизированном режиме экспериментальные данные о ВАХ ТЭП/ЭГЭ в виде аналитических функций, так и исходный набор дискретных экспериментальных данных.

Практическая значимость работы

Полученные в диссертации результаты являются составной частью выполненных по государственному заказу Госкорпорации «Росатом» НИОКР (2012 - 2015 гг.) кооперацией АО «Красная Звезда», ФГУП «НИИ НПО «Луч» (далее НИИ НПО «Луч») и АО «ГНЦ РФ-ФЭИ». Полученные результаты применяются в текущих проектных работах по созданию ЯЭУ-25, ЯЭУ-50 и др. для унифицированной космической платформы космического аппарата «Плазма-2010» [48], других перспективных НИР, в том числе по теме «Исследования в обоснование проекта создания термоэмиссионной ЯЭУ наземного применения» в рамках ФЦП «Ядерные энергетические технологии нового поколения»

Кроме того, методические наработки диссертанта используются в учебном процессе кафедры ПМППЭ ИАТЭ НИЯУ МИФИ при подготовке специалистов по направлениям 14.03.05.65 - «Ядерные реакторы и энергетические установки» и 14.05.02 - «Ядерные реакторы и материалы» и включены в учебник «Космические и наземные ядерные энергетические установки прямого преобразования энергии» авт. В.И.Ярыгин и др., издательство НИЯУ МИФИ, 2016 г., 364 с [49].

В рамках диссертации получены следующие практически важные результаты:

- решена задача трехмерного численного расчета характеристик ТЭП/ЭГЭ/ЭГК, что позволило провести обоснование проектных решений ЭГК/ТРП в составе КЯЭУ второго поколения;
- разработанный программный код COMSOL-ЭГК обладает редактируемой модульной архитектурой, что предусматривает возможность расширения функциональности математической модели ТЭП/ЭГК/ТРП/ЯЭУ путем до-

бавления новых физических разделов – нейтронной физики, термомеханики, теплогидравлики и др., что позволит в перспективе провести сквозной расчет ТРП/ЯЭУ средствами одного программного кода;

- разработанный программный код может быть использован для численного расчета не только реакторных ЭГК, но и термоэмиссионных элементов и сборок на органическом топливе, а также лабораторных ТЭП/ЭГЭ с электронагревом;
- расчетный код обладает возможностью импорта двумерных и трехмерных чертежей ЭГК/ТРП, выполненных в среде автоматизированного проектирования AutoCAD и других подобных приложениях.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

- Разработанный программный код конечно-элементного анализа COMSOL-ЭГК для расчета характеристик ЭГК, в том числе для термоэмиссионных ЯЭУ второго поколения с унифицированным ЭГК, с использованием трехмерной математической модели, экспериментальных и расчетных баз данных о ВАХ ТЭП.
- Разработанная путем сопряжения современных программных кодов COMSOL и MATLAB методика математической обработки дискретных экспериментальных данных, основанная на аппроксимации многомерными функциями содержимого банков экспериментальных ВАХ ТЭП.
- Результаты аппроксимации многомерными функциями экспериментальных баз данных о ВАХ ТЭП с эффективными электродными парами $W_{моно}$-$W_{поли}$ и Pt-ВХ2У.
- Результаты расчётно-теоретического сопровождения петлевых испытаний унифицированного ЭГК в составе петлевого канала (ПК) в исследовательском реакторе ИВВ-2М (АО «ИРМ», г. Заречный) в соответствии с детальным ходом распределения энерговыделения по ЭГЭ и использованием обработанной базы экспериментальных данных о ВАХ ТЭП.

– Результаты расчетов тепловых и электрических характеристик экспериментального лабораторного ТЭП с использованием двух актуальных электродных пар материалов – $W_{моно}$-$W_{поли}$ и Pt-ВХ2У.

Апробация результатов работы

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных семинарах и конференциях:

1. III стратегическая сессия Школы ЯРБ. – Обнинск: НОУ «ЦИПК», 19 – 23 мая 2008 г.
2. XV школа-семинар по проблемам физики реакторов («Волга-2008»): «Актуальные проблемы физики ядерных реакторов – эффективность, безопасность, нераспространение. – М.: НИЯУ МИФИ, 22 - 24 сентября 2008 г.
3. XI Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров – 2009». – Обнинск: НОУ «ЦИПК», 29 сентября - 2 октября 2009 г.
4. Доклад на ученом совете ГНЦ РФ-ФЭИ по итогам конкурса научных работ молодых ученых на соискание премии имени А.И.Лейпунского - 2010. – Обнинск: ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», 31 декабря 2010 г.
5. XXXI «Курчатовские чтения»-2012 в честь 20-летия Росэнергоатом. – СПб.: НОУ ДПО «ЦИПК», 12 января 2012 г.
6. X Межрегиональная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Применение кибернетических методов в решении проблем общества XXI века». – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 26-27 апреля 2012 г.
7. Всероссийский межотраслевой молодежный научно-технический форум «Молодежь и будущее авиации и космонавтики». – М.: МАИ, 30 октября 2012 г.
8. X Научно-техническая конференция «Молодежь в науке». – Саров.: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 7-9 ноября 2012 г.
9. Научно-техническая конференция «Возможности использования ЯЭУ для решения задач ближнего космоса и снабжения напланетных станций и КА исследования дальних планет». – М.: ОАО «Красная Звезда», 29-30 ноября 2012г.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в шести работах. Четыре из них являются статьями в журналах из перечня ВАК ведущих российских рецензируемых научно-технических изданий: «Известия вузов. Ядерная энергетика», «Научно-технический вестник Поволжья» и «Труды МАИ» [33, 50-52].

Личный вклад автора

Разработанные методики, выполненные расчетно-теоретические исследования и представленные в диссертационной работе результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Автор в рамках тематического сотрудничества с руководителем диссертации и сотрудниками отдела Инженерно-физических исследований фундаментальных и прикладных проблем специальных ЯЭУ отделения Космических энергосистем ГНЦ РФ-ФЭИ самостоятельно разработал модификацию существующего программного кода конечно-элементного анализа COMSOL, в результате этого был получен новый программный код COMSOL-ЭГК, предназначенный для расчетной оптимизации характеристик ТЭП/ЭГЭ/ЭГК/ТРП. Предложил новый алгоритм аппроксимации экспериментальных данных о ВАХ ТЭП с эффективными электродными парами $W_{моно}$-$W_{поли}$ и Pt-ВХ2У, который был реализован в программной среде MATLAB. Применил полученные алгоритмы аппроксимации в разработанном расчетном коде, выполнил верификацию разработанных методик и получил основные результаты трехмерного численного расчета выходных электро-теплофизических характеристик унифицированного ЭГК.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Работа изложена на 121 странице, содержит 46 рисунков и 5 таблиц. Список литературы включает 100 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность, научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, а также изложены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена анализу существующих методик расчета характеристик ЭГЭ/ЭГК/ТРП. Выполнен обзор основных существующих расчетных методик, разработанных во времена НИР и ОКР по созданию термоэмиссионных ЯЭУ первого поколения - «Топаз» и «Енисей». Также проведен обзор современных интерактивных программных комплексов графического представления информации, основанных на решении краевых задач математической физики с помощью метода конечных элементов. В результате проведенной работы сформулированы направления дальнейшего совершенствования расчетных методик, необходимых для проведения на современном уровне расчетного обоснования проектных работ по созданию термоэмиссионных ЯЭУ второго и нового поколений .

Глава 2 посвящена методике математической обработки дискретных экспериментальных ВАХ ТЭП, основанной на аппроксимации многомерными функциями содержимого банков экспериментальных данных, с целью дальнейшего использования обработанных и представленных в виде аналитических выражений ВАХ ТЭП в расчетных кодах ЭГК/ТРП. В главе представлен алгоритм поиска оптимальных с точки зрения погрешности аппроксимирующих функций, описан метод расчета искомых коэффициентов аппроксимации и представлены абсолютная и относительная погрешности аппроксимации для экспериментальных данных о ВАХ ТЭП с электродными парами $W_{моно}$-$W_{поли}$ и Pt-ВХ2У, используемых на современном этапе проектирования ТРП для термоэмиссионных ЯЭУ космического и наземного применения.

Глава 3 посвящена разработке расчетных методов определения электротеплофизических характеристик в экспериментальном лабораторном ТЭП с использованием трехмерной математической модели в разработанном программном коде конечно-элементного анализа COMSOL-ЭГК. Программный код позволяет использовать в расчете локальную ВАХ ТЭП как в виде дискретного набора экс-

периментальных данных, так и в аналитическом виде, полученном в результате обработки экспериментальных баз данных по методике, описанной в главе 2. В главе приведена общая характеристика и возможности программного кода COMSOL-ЭГК, описана разработанная математическая модель тепловых и электрических процессов лабораторного ТЭП. Глава также включает описание всех этапов моделирования задачи, принятые упрощения и допущения и полученные результаты расчета стационарных выходных электро-теплофизических характеристик экспериментального ТЭП с использованием двух эффективных материалов электродных пар – $W_{моно}$-$W_{поли}$ и Pt-ВХ2У. Расчетные результаты были верифицированы на экспериментальных данных о ВАХ, полученных в ТЭП с плоской и цилиндрической геометрией электродов (прибор 0100).

Глава 4 посвящена расчётно-теоретическому сопровождению петлевых испытаний унифицированного ЭГК в составе ПК исследовательского реактора ИВВ-2М (АО «ИРМ», г. Заречный) в соответствии с детальным ходом распределения энерговыделения по длине ЭГК с использованием его трехмерной математической модели в разработанном программном коде COMSOL-ЭГК. В главе представлена методика использования в программной среде COMSOL-ЭГК расчетных данных об энерговыделении топливных сердечников ЭГК, полученных в результате нейтронно-физического расчета активной зоны реактора ИВВ-2М и используемых в качестве исходных данных для проведения электро-теплофизического расчета характеристик ЭГК. Описана процедура создания трехмерной расчетной модели многоэлементного унифицированного ЭГК в составе ПК реактора ИВВ-2М в программной среде COMSOL-ЭГК и представлены результаты расчетного исследования его тепловых и электрических характеристик.

В **Заключении** представлены основные результаты и выводы диссертационной работы.

В **Приложении 1** представлен список многомерных аппроксимирующих функций, которые были использованы для обработки и интерпретации данных многофакторного эксперимента по определению локальных ВАХ ТЭП с электродными парами $W_{моно}$-$W_{поли}$ и Pt-ВХ2У.

В **Приложении 2** представлены результаты расчета абсолютной и относительной погрешности аппроксимации для экспериментальных данных о ВАХ ТЭП с электродными парами $W_{моно}$-$W_{поли}$ и Pt-ВХ2У.

В **Приложении 3** в качестве примера представлено графическое отображение результатов аппроксимации экспериментальных данных о локальных ВАХ ТЭП с электродной парой Pt-ВХ2У с использованием многомерных функций, описанных в главе 2.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю В.И. Ярыгину за постановку задачи и руководство исследованиями на протяжении всех этапов работы над диссертацией и специалистам отдела Инженерно-физических исследований фундаментальных и прикладных проблем специальных ЯЭУ А.П. Пышко, В.Р. Агафонову, В.А. Ружникову, С.М. Тулину, М.К. Овчаренко, Е.Г. Виноградову, В.А. Линнику за консультации и проведение сравнительных расчетов, результаты которых отражены в совместных публикациях.

Кроме того, автор выражает благодарность профессору В.Л. Шаблову и коллективу кафедры «Перспективных методов получения и преобразования энергии» ИАТЭ НИЯУ «МИФИ» за поддержку меня в процессе обучения в аспирантуре.

1. Обзор и анализ расчетных методик термоэмиссионных ЭГК

Рассмотрены основные расчетно-физические методики определения характеристик ЭГЭ/ЭГК, предшествующие написанию диссертации. Сформулированы направления дальнейшего совершенствования расчетных методик, необходимых для проведения на современном уровне расчетного обоснования проектных работ по созданию термоэмиссионных ЯЭУ второго и нового поколений.

1.1. Термоэмиссионный способ преобразования энергии

Термоэлектронная эмиссия является одним из наиболее привлекательных (особенно, для использования в космосе) и освоенных методов прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. Этот метод основан на явлении термоэлектронной эмиссии, открытом Эдисоном в конце XIX в. Первая исследовательская работа по применению термоэмиссии для генерации электроэнергии была опубликована Шлихтером в 1915 г.

ТЭП представляет собой диод, состоящий из высокотемпературного электрода (эмиттера) с температурой T_E, который благодаря термоэлектронной эмиссии излучает электроны на низкотемпературный электрод (коллектор) с температурой T_C, который собирает эти электроны. Принципиальная схема ТЭП представлена на рисунке 1.

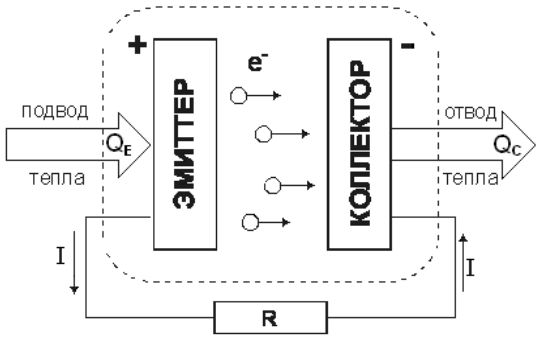


Рис. 1. Принципиальная схема ТЭП

Эмиттер и коллектор разделены межэлектродным зазором (МЭЗ) шириной, как правило, 0,2 - 0,5 мм. Внутри МЭЗ находится либо вакуум (вакуумный ТЭП), либо ионизированные пары щелочных металлов (обычно, цезий) [53-55]. Перенос энергии между эмиттером и коллектором определяется рядом процессов - излучением,

теплопроводностью межэлектродной среды, электронным и ионным токами. Кроме того, возникают перетечки тепла с эмиттера через межэлектродную коммутационную перемычку на коллектор соседнего ЭГЭ. Теплосъем с коллектора осуществляется теплоносителем через слой электроизоляции и металлический корпус ЭГК. Плотность электрического тока через МЭЗ описывается так называемыми локальными ВАХ ТЭП - зависимостями, полученными либо эмпирически, либо непосредственно на основании экспериментальных данных, либо в результате теоретического анализа [56-60]. Локальная ВАХ ТЭП - интегральная характеристика, отражающая все многообразие протекающих процессов в МЭЗ и на поверхности электродов ТЭП при термоэмиссионном преобразовании тепловой энергии в электрическую.

Теплоэлектрический расчет ТЭП проводится с целью получения таких его параметров и характеристик, как распределение температуры электродов, межэлектродного напряжения и плотности электрического тока в МЭЗ, а также генерируемой в рабочем процессе термоэмиссионного преобразования электрической мощности и к.п.д. [61].

1.2. Конструктивные формы ЭГК в составе термоэмиссионных ЯЭУ первого поколения

ЭГЭ является одним из основных функциональных элементов ЭГК. Наиболее широкое практическое применение получили ЭГЭ цилиндрической геометрии. ЭГК представляет из себя сборку из последовательно соединенных ЭГЭ, заключенных в общий корпус (чехол), который омывается теплоносителем. Каждый из ЭГЭ отделен от наружного чехла ЭГК слоем электрической изоляции. Для вывода генерируемой ЭГК электроэнергии служат токовыводы, также электрически изолированные от внешнего корпуса ЭГК. ЭГЭ состоит из двух тонких коаксиально расположенных цилиндрических электродов, разделенных средой МЭЗ, который в рабочем состоянии заполнен парами цезия при давлении порядка нескольких мм рт. ст. Прилегающие ЭГЭ соединяются коммутационными межэлектродными перемычками. Эмиттер поддерживается при высоких температурах в диапазоне

1500-2000 К, коллектор – при более низких температурах в пределах 800-1000 К, источником тепла в ЭГЭ служит заключенный внутри него тепловыделяющий сердечник из ядерного топлива. Принципиальная схема ЭГЭ цилиндрической формы изображена на рис. 2 [37,38,44].

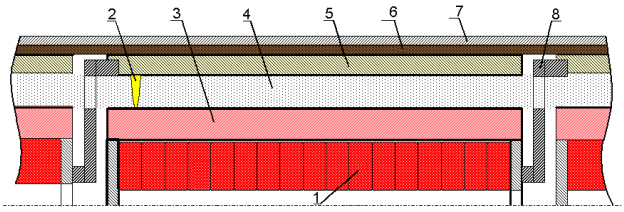


Рис. 2. Принципиальная схема цилиндрического ЭГЭ: 1 – топливный сердечник; 2 – дистанционатор; 3 – эмиттер; 4 – МЭЗ; 5 – коллектор; 6 – электроизоляция ; 7 – чехол ЭГК; 8 – межэлектродная коммутационная перемычка.

Описанная конструкция многоэлементного ЭГК впервые была применена в ТРП КЯЭУ «Топаз» [10-13, 62]. Активная зона ТРП в составе КЯЭУ «Топаз» включала 79 термоэмиссионных многоэлементных ЭГК и четыре диска замедлителя из гидрида циркония. Все ЭГК были разделены на две секции – рабочую из 62 ЭГК (для питания потребителей КА) и насосную из 17 ЭГК (для питания кондукционного электромагнитного насоса для охлаждения жидкометаллического контура). Коммутирование ЭГК в секциях осуществлялось в парах цезия в верхней и нижней коммутационных камерах, расположенных с обоих торцов ТРП. Вся совокупность ЭГК вместе с каналами охлаждения располагались в отверстиях дисков замедлителя и образовывали систему из пяти концентрических поясов. Функции регулирования тепловой мощности, компенсации реактивности и аварийной защиты выполняли расположенные в боковом отражателе 12 поворотных цилиндров. Общий вид и основные элементы конструкции КЯЭУ «Топаз» представлены на рис. 3 [63].

Вырабатываемая КЯЭУ «Топаз» электрическая мощность составляла ~ 5,5 кВт. Системный к.п.д. в начале ресурса составлял ~ 5.5%. Масса КЯЭУ «Топаз» ~ 1200 кг, а заданный ресурс работы установки – 4400 ч. Во время летно-конструкторских испытаний КЯЭУ «Топаз» проработала в составе КА «Космос 1818» в течение 142 суток и в составе КА «Космос 1867» – в течение 342 суток.

Прекращение работы ЯЭУ в обоих случаях было вызвано исчерпанием запасов цезия и выделением водорода из полости гидрид-циркониевого замедлителя, проникавшего в МЭЗ и вызывавшего процессы деградации в ЭГК [10-13].

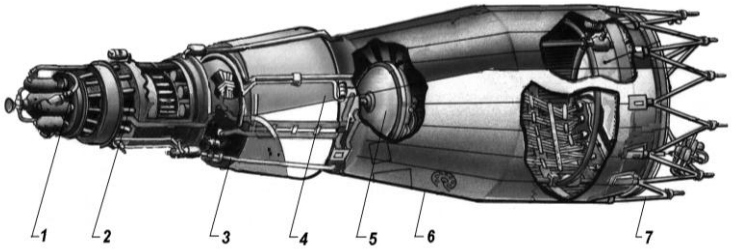


Рис. 3. Конструктивно-компоновочная схема КЯЭУ «Топаз» [63]: 1 – блок системы подачи паров цезия и приводов органов регулирования; 2 – ТРП; 3 – трубопровод жидкометаллического контура; 4 – радиационная защита; 5 – компенсационный бак жидкометаллического контура; 6 – холодильник-излучатель; 7 – силовая рама

Выбор многоэлементной конструкции ЭГК в ТРП КЯЭУ «Топаз», несмотря на ее относительную сложность и определенные трудности в отработке, был обусловлен необходимостью повысить выходное напряжение ЭГК до нескольких вольт, уменьшить при заданной выходной мощности ЭГК «джоулевы» потери на электродах (повысив тем самым его к.п.д.), выровнять и снизить максимальные температуры эмиттеров за счет электронного охлаждения. ЭГК реактора «Топаз» состоял из пяти последовательно соединенных ЭГЭ. С целью снижения и выравнивания максимальных температур эмиттеров ЭГЭ, находящихся в неравномерном по высоте поле энерговыделения активной зоны ТРП, их длины были выбраны различными – так называемое геометрическое профилирование. Все ЭГК имели трехслойный коллекторный пакет и устройство вывода газообразных продуктов деления (ГПД) из твэл в среду МЭЗ [14, 63].

В отличие от описанной выше КЯЭУ «Топаз» с пятиэлементными ЭГК, термоэмиссионная ЯЭУ «Енисей», предназначенная для КА с системой телевизионного вещания из космоса, создавалась на базе одноэлементных ЭГК с двусторонним выводом электрического тока [4, 62-64]. Конструкция одноэлементного ЭГК позволяет исключить из активной зоны межэлектродную коммутацию, а также выводить ГПД из объёма топливного сердечника ЭГЭ, минуя при этом МЭЗ, что способствует его большей надёжности и более высокому ресурсу. Кроме того, та-

кая конструкция ЭГК позволяет проводить полномасштабные тепловые испытания ЭГК и ТРП в целом, что сокращает затраты средств и времени при их наземной отработке. Тем не менее, одноэлементный ЭГК ЯЭУ «Енисей» имеет и существенный недостаток, заключающийся в значительных «джоулевых» потерях электрической мощности на электродах, которые быстро растут при увеличении длины электродов и величины тока, что резко ограничивает возможности создания ТРП большой мощности [4, 63]. Принципиальная схема ЭГК термоэмиссионной ЯЭУ «Енисей» представлена на рис. 4 [21].

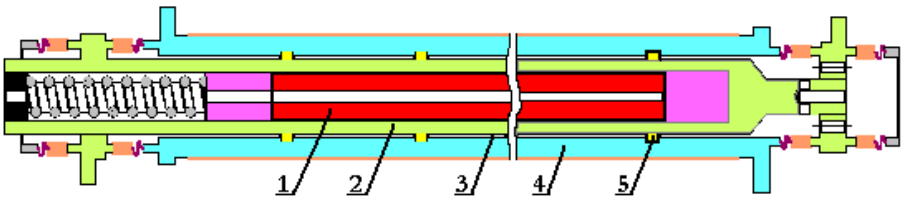


Рис. 4. Принципиальная схема одноэлементного ЭГК [21]: 1 – твэл; 2 – эмиттер; 3 – МЭЗ; 4 – коллекторный пакет; 5 – дистанционатор

Активная зона ТРП «Енисей» содержала 37 одноэлементных ЭГК, которые были скоммутированы в две секции: рабочую – из 34-х последовательно соединенных ЭГК и насосную – из трех параллельно соединенных ЭГК. Через гермовводы каждая из секций была выведена наружу и подключена к соответствующим реакторным токосъемным шинам. Электрическая мощность на клеммах рабочей секции варьировалась в диапазоне 4.5 – 5.5 кВт при напряжении около 30 В. ЯЭУ «Енисей» прошла полный цикл наземной отработки, включая восемнадцати месячные наземные реакторные испытания без заметных признаков деградации выходных электрических характеристик, при этом прогноз об эффективной работе реакторной установки был сделан до трех лет [63].

Термоэлектричесчкая ЯЭУ «Бук» и термоэмиссионные ЯЭУ «Топаз» и «Енисей» составили первое поколение бортовых отечественных ЯЭУ для КА, в процессе создания которых была создана организационная и промышленная инфраструктура в обеспечение всего цикла разработки, поставки комплектующих изделий и материалов, изготовления, экспериментальной отработки, наземных испытаний и выведения ЯЭУ на орбиту в составе КА. Был накоплен уникальный

опыт организации и проведения наземных и летных испытаний, а также опыт безопасной эксплуатации ЯЭУ на орбитальных КА. Помимо этого, были разработаны основные методики и прошедшие верификацию на экспериментальных данных программы расчета электро-теплофизических характеристик ЭГК и ТРП в целом. Были созданы программные коды для проведения оптимизационных расчетов в обоснование характеристик ЭГК и ТРП, которые включали программные блоки для моделирования нейтронно-физических, теплоэлектрических и термомеханических процессов.

1.3. Унифицированный ЭГК в составе термоэмиссионных ЯЭУ второго поколения

Успешные результаты испытаний ЯЭУ «Топаз» и «Енисей» показали принципиальную возможность создания в космосе ядерных реакторных энергетических систем электрической мощностью 10−100 кВт и более и положили начало разработкам проектов целого ряда термоэмиссионных установок электрической мощностью 25, 50, 100 кВт и более [1, 63].

Существенное увеличение мощности и ресурса термоэмиссионных ЯЭУ второго и нового поколений по сравнению с их прототипами (ЯЭУ «Топаз», «Енисей») достигается как за счет увеличения размерности отдельных систем (ТРП, система теплоотвода и др.), так и благодаря реализации качественно новых решений, к числу которых относятся [63]:

- модернизация термоэмиссионного ЭГК, увеличение его ресурса и мощности;
- создание новой долгоресурсной цезиевой системы с возможностью многократного использования запаса цезия при эффективном удалении из ЭГК газообразных продуктов деления и примесных газов;
- создание системы, обеспечивающей многолетнюю стабильность характеристик замедлителя в ТРП на промежуточных и быстрых нейтронах;
- обеспечение ядерной и радиационной безопасности ЯЭУ в течение 10 и более лет.

Основные требования, предъявляемые к ЭГК в составе термоэмиссионных ЯЭУ второго и нового поколений [63]:

- работа ЭГК в двух режимах: форсированный и номинальный (электрическая мощность в номинальном режиме в 2-3 раза меньше, а ресурс работы ~ в 10 раз больше, чем в форсированном режиме, что должно обеспечивать электрическую мощность ЯЭУ до нескольких сотен кВт, а ресурс работы 10 и более лет);
- надежная работа ЭГК при повышенном выходном напряжении ТРП (100 В и более), что необходимо для достижения высоких энергомассовых характеристик ЯЭУ.

В настоящее временя в НИИ НПО «Луч» разработана базовая конструкция многоэлементного ЭГК для широкого ряда ТРП ЯЭУ второго поколения (так называемый унифицированный ЭГК), которая является дальнейшим развитием конструкции ЭГК КЯЭУ «Топаз» и в наиболее полной мере удовлетворяет указанным выше требованиям. Принципиальная схема многоэлементного унифицированного ЭГК представлена на рис. 5 [14].

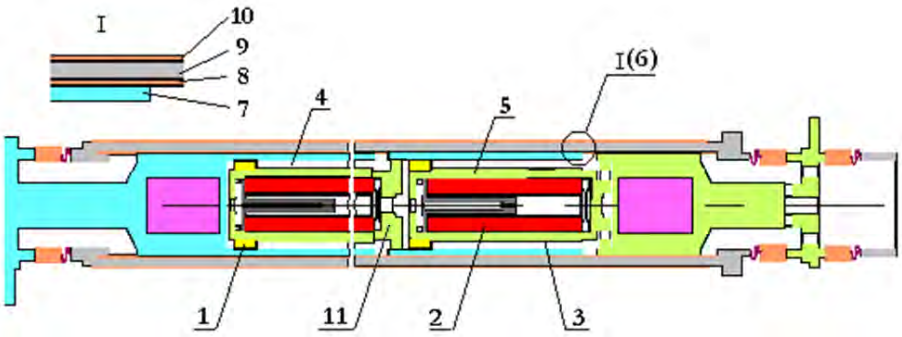


Рис. 5. Принципиальная схема многоэлементного ЭГК [14]: 1 – дистанционатор; 2 – твэл; 3 – эмиттер; 4 – МЭЗ; 5 – ЭГЭ; 6 – коллекторный пакет; 7 – коллектор; 8 – внутренняя изоляция; 9 – «охранный электрод»; 10 – внешняя изоляция; 11 – межэлектродная коммутационная перемычка.

Такая конструкция многоэлементного ЭГК продемонстрировала отсутствие отказов по герметичности и электропрочности, стабильность геометрических параметров и выходных электрических характеристик в течение длительного ресурса [14]. Экспериментальные исследования и испытания по отработке унифицирован-

ного ЭГК, в том числе в условиях двухрежимной работы, продолжаются в составе петлевого канала в исследовательском ядерном реакторе ИВВ-2М в Институте радиационного материаловедения (АО «ИРМ») в городе Заречный. В ходе этих экспериментальных и расчетных исследований была обоснована возможность создания термоэмиссионного ЭГК повышенной мощности с ресурсом до 10 лет для двухрежимных ЯЭУ с высокой надежностью.

Новые конструктивные решения многоэлементных ЭГК для перспективных термоэмиссионных ЯЭУ требуют значительного усложнения расчетных моделей протекающих в них физических процессов, а также разработки и верификации на имеющихся экспериментальных данных современных программных расчетных кодов. Современный уровень развития вычислительной техники и численных методов позволяет разрабатывать математические модели реальных конструкций ЭГК с максимально полным учётом влияющих на их работоспособность факторов в процессе трехмерного численного расчета.

1.4. Методики расчета электро-теплофизических характеристик ЭГК

Численный расчет тепловых и электрических характеристик ЭГК проводят с целью получения его ВАХ, а также определения температурного поля его конструктивных элементов. Затем по ВАХ ЭГК рассчитывают его электрическую мощность и к.п.д. Определение зависимости электрического тока от напряжения для многоэлементного ЭГК обычно сводится к расчету напряжений для каждого ЭГЭ и их интегрированию при заданной величине электрического тока ЭГК, одинакового для всех ЭГЭ вследствие их последовательного соединения. Основная задача любой расчетной методики ЭГК заключается в численном решении системы нелинейных тепловых и электрических уравнений для всей совокупности входящих в его состав ЭГЭ.

Как отмечалось ранее, основные уравнения тепловых и электрических процессов для ЭГЭ/ЭГК были получены в начале 60-х годов. В результате возникла необходимость создания математических методов, позволяющих выполнять совместное решение нелинейной системы уравнений для ЭГЭ/ЭГК [34, 35]. Самые ран-

ние методики расчета характеристик ЭГЭ/ЭГК основывались на аналитическом решении системы уравнений для ЭГЭ ввиду отсутствия достаточных мощностей вычислительной техники, что в свою очередь приводило к необходимости создания различного рода упрощений физико-математической модели ЭГЭ. К примеру, принималось допущение о линейности экспериментальной вольтамперной характеристики (ВАХ) ТЭП, температура коллектора и плотность эмиссионного тока по длине ЭГЭ полагались постоянными [34, 35]. Благодаря этим упрощениям система нелинейных уравнений для ЭГЭ сводилась к линейной, что позволяло применить аналитическое решение. Позднее для более точного расчета распределения температуры поверхности эмиттера и решения нелинейных уравнений стали применять вариационные методы и метод Галеркина [35].

Дальнейшее развитие методик расчета характеристик ЭГЭ/ЭГК было связано с применением численных методов решения системы нелинейных дифференциальных уравнений для совокупности ЭГЭ в составе ЭГК [36-45]. Численные методы обладают рядом достоинств по сравнению с ранее разработанными методами расчета, тем не менее, применяемая расчетная модель ЭГЭ сводится к системе одномерных нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, которые описывают распределение температуры эмиттера и разности потенциалов между электродами по длине ЭГЭ [36-45], не исключая при этом описанных ранее допущений.

Нелинейность тепловых и электрических уравнений ЭГЭ обусловлена передачей тепла между электродами за счет излучения и эмиссионного тока электронов. В каждое из уравнений включает зависимость тока эмиссии электронов, зависящая от температуры эмиттера, коллектора, межэлектродного напряжения и ряда других параметров. Эта зависимость является замыкающим соотношением для всей системы уравнений и имеет название локальной ВАХ ТЭП. Расчет локальной ВАХ ТЭП является сложной задачей, которая требует рассмотрения элементарных процессов, протекающих в низкотемпературной плазме МЭЗ и на электродах ТЭП. До настоящего времени эта задача в полном объеме не решена, поэтому экспериментальное определение локальных ВАХ ТЭП в ходе лабораторных ис-

следований является актуальной задачей [65, 66] как для использования в расчетном обосновании характеристик ЭГК и ТРП с существующими технологиями их изготовления, так и для идентификации «внутренних» параметров рабочего процесса, протекающего в ЭГК.

Как отмечалось ранее, вся совокупность существующих в настоящий момент методик расчета тепловых и электрических характеристик ЭГК основана на одномерных математических моделях ЭГЭ/ЭГК. По количеству допущений и упрощений эти методики можно разделить на две группы: расчет характеристик ЭГК по модели сосредоточенных параметров и распределенных параметров [35, 37, 38, 44].

Первая группа методик (модель сосредоточенных параметров или точечная модель) позволяет рассчитывать лишь средние значения температуры электродов, плотности электрического тока и межэлектродного напряжения для каждого ЭГЭ. Затем на основании полученных данных определяются выходные электрические характеристики – ВАХ ЭГК и зависимость электрической мощности от электрического тока. Расчетные методики этой группы являются наиболее упрощенными и используются лишь в грубых оценочных расчетах, когда необходимо с наименьшими трудозатратами провести инженерную оценку ВАХ ЭГК, которая на следующих этапах ОКР должна быть определена более точно. Методики расчета электро-теплофизических характеристик ЭГК второй группы (по модели распределенных параметров) на сегодняшний день имеют наиболее широкое распространение и отличаются в основном лишь программной средой, в которой они реализованы. Математическая модель ЭГК в этом случае сводится к системе одномерных нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, которые описывают распределение температуры эмиттера и разности потенциалов между электродами по длине ЭГЭ. Более детальное описание методики представлено в следующем разделе.

1.4.1. Расчет ЭГК по модели распределенных параметров

Расчет ЭГК по модели сосредоточенных параметров не позволяет получить распределение температуры электродов и плотности электрического тока по длине ЭГК, что существенно снижает область ее применения. Методики на основе математической модели ЭГЭ в распределенных параметрах явились следующим этапом в развитии расчетных методик ЭГК [37, 38, 44]. Несмотря на ряд преимуществ относительно точечной модели, математическая модель ЭГК в распределенных параметрах является одномерной и обладает следующими допущениями и упрощениями:

- Полагается, что радиальная теплопроводность топливного сердечника мала, что позволяет задавать плотность теплового потока от внешней границы сердечника к внутренней поверхности эмиттера.
- Полагается, что электроды имеют нулевую толщину, что позволяет пренебрегать радиальным и азимутальным распределением температуры и электрического потенциала эмиттера и коллектора - это допущение сводит математическую модель ЭГЭ/ЭГК к одномерной.
- Температура коллектора полагается постоянной ввиду ее незначительного изменения по длине ЭГЭ.
- Плотность эмиссионного тока по длине ЭГЭ считается постоянной величиной.

При принятых допущениях уравнение теплопроводности для эмиттера принимает вид [37, 38, 44]:

$$-\lambda_E S_E \frac{d^2 T_E}{dz^2} + 2\pi r_E \left[\varepsilon\sigma\left(T_E^4 - T_C^4\right) + k_{Cs}\left(T_E - T_C\right) + j\cdot\left(u + V_b\right) - q_f\right] = I_E^2 \frac{\rho_E}{S_E}, \qquad (1.1)$$

где $0 \le z \le L_{ЭГЭ}$, $L_{ЭГЭ}$ – длина ЭГЭ, T_E, T_C – температура эмиттера и коллектора, λ_E – коэффициент теплопроводности эмиттера, S_E – площадь поперечного сечения эмиттера, r_E – внешний радиус эмиттера, ε – приведенная степень черноты, ζ – постоянная Стефана-Больцмана, k_{Cs} – эффективный коэффициент теплопередачи через пары цезия, j – плотность электрического тока с эмиттера (локальная ВАХ ТЭП), u – межэлектродное напряжение, V_b – барьерный индекс, q_f – плотность те-

плового потока от топливного сердечника на эмиттер, I_E – электрический ток эмиттера, ρ_E – удельное электрическое сопротивление материала эмиттера.

Из уравнения видно, что тепловой баланс эмиттера определяется следующими компонентами [37, 38, 44]:

$\varepsilon\sigma(T_E^4 - T_C^4)$ – тепловое излучение эмиттера в результате его нагрева до высоких температур;

$k_{Cs} \cdot (T_E - T_C)$ – передача тепла за счет теплопроводности паров цезия в МЭЗ;

$j \cdot (u + V_b)$ – перенос энергии эмиттированными электронами (так называемое электронное охлаждение);

q_f – плотность теплового потока от топливного сердечника к эмиттеру;

$I_E^2 \dfrac{\rho_E}{S_E}$ – плотность джоулевого тепловыделения в эмиттере, обусловленного прохождением по нему электрического тока.

На практике функцию плотности потока тепла от топливного сердечника к эмиттеру q_f задают в виде параболы с помощью трех параметров: координаты вершины параболической функции z_{max}, полный поток тепла Q_{tot}, подводимой к поверхности эмиттера, и отношение максимума плотности потока к его средней величине, которое обозначают k_z (также называемый коэффициентом неравномерности энерговыделения по высоте ЭГК).

Распределение межэлектродного напряжения вдоль ЭГЭ описывается следующим дифференциальным уравнениям второго порядка [37, 38, 44]:

$$\frac{d^2u}{dz^2} + 2\pi r_E \left(\frac{\rho_E}{S_E} + \frac{\rho_C}{S_C} \right) \cdot j = 0 . \qquad (1.2)$$

Как отмечалось ранее, тепловая задача для коллектора рассматривается в рамках точечной модели, т.е. определяется только среднее значение температуры коллектора. Уравнение баланса тепла для определения температуры коллектора имеет следующий вид [37, 38, 44]:

$$k_w(T_C - T_{TH}) = \int_0^{L_{ЭГЭ}} \left[q_f - j \cdot V_b + I_C^2 \frac{\rho_C}{S_C} \right] dz . \qquad (1.3)$$

Здесь k_w – эффективный коэффициент теплопередачи от коллектора к теплоносителю, T_{TH} – средняя по ЭГЭ температура теплоносителя.

Для решения уравнений (1.1) и (1.2) необходимы граничные условия. Так уравнению (1.1) соответствуют следующие граничные условия третьего рода:

$$\frac{\lambda_E}{L_{ЭГЭ}}\frac{dT_E}{dz}\bigg|_{z=0} = \alpha_1\left(T_E - T_{amb}\right), \tag{1.4}$$

$$\frac{\lambda_E}{L_{ЭГЭ}}\frac{dT_E}{dz}\bigg|_{z=L_{ЭГЭ}} = -\alpha_2\left(T_E - T_{amb}\right), \tag{1.5}$$

где α_1 и α_2 – эффективные коэффициенты теплоотдачи на торцах эмиттера, значения которых определяются геометрией торцов и могут быть определены либо экспериментально, либо расчетным образом с детальным учетом геометрии этих областей. Важно отметить, что задание граничных условий для уравнения баланса тепла эмиттера в таком виде полностью исключает из рассмотрения области, прилегающие к торцам эмиттера (область межэлектродных коммутационных перемычек), что существенным образом упрощает задачу. T_{amb} – средняя температура окружения (полагается равной оптимальной температуре коллектора).

Для уравнения (1.2) граничные условия имеют вид:

$$\frac{du}{dz}\bigg|_{z=0} = \frac{\rho_C}{S_C}\cdot I\,, \tag{1.6}$$

$$\frac{du}{dz}\bigg|_{z=L_{ЭГЭ}} = -\frac{\rho_E}{S_E}\cdot I\,. \tag{1.7}$$

Основным замыкающим соотношением системы теплоэлектрических уравнений ЭГК является локальная ВАХ ТЭП – зависимость плотности электрического тока j через МЭЗ от ряда параметров. В наиболее общем случае в расчетных методиках принимается, что плотность тока через МЭЗ является функцией семи переменных:

$$j = f(u,\ T_E,\ T_C,\ P_{Cs},\ d,\ \Phi_E,\ \Phi_C), \tag{1.8}$$

где P_{Cs} – давление цезия, d – величина МЭЗ, Φ_E – работа выхода электронов эмиттера, Φ_C – работа выхода электронов коллектора.

Затем на основании полученных результатов вычисляется ВАХ ЭГК согласно следующей зависимости [39, 47]:

$$V = I(R_{токоввода} + R_{токовывода}) + \sum_{i=1}^{n}\left[u(z_i) - IR_{i\ перемычки} - \int_{z_i}^{z_i+l_i} I_E \nu_E dz \right] \qquad (1.9)$$

где n – число ЭГЭ в ЭГК; z_i, l_i – левая координата ЭГЭ и его длина; $u(z_i)$ – локальное межэлектродное напряжение между эмиттером и коллектором в точке z_i; I – ток ЭГК; $\nu_E dz$ – электрическое сопротивление элемента эмиттера длиной dz; R – электрическое сопротивление.

Таким образом, замкнутая система нелинейных одномерных дифференциальных уравнений для расчета электро-теплофизических характеристик ЭГК включает в себя уравнение (1.1) с граничными условиями (1.4) и (1.5) для определения распределения температуры эмиттеров, уравнение (1.3) для определения средней температуры коллектора, уравнение (1.2) с граничными условиями (1.6) и (1.7) для определения распределения межэлектродного напряжения, уравнение (1.8) для расчета локальных ВАХ ТЭП в качестве замыкающего соотношения для всей системы уравнений и уравнение (1.9) для определения искомой ВАХ ЭГК.

Для решения системы уравнений (1.1)-(1.8) на практике применяют численные методы. Нелинейные дифференциальные уравнения преобразуются в конечно-разностную форму, затем методом итераций с изначально заданной точностью рассчитываются искомые T_E и u и на основании полученных данных определяется ВАХ ЭГК [37, 38, 44, 67]. Описанная методика в настоящее время является наиболее используемой при проведении расчетов электро-теплофизических характеристик ЭГЭ/ЭГК в обоснование проектных работ по созданию перспективных ТРП.

1.4.2. Расчет характеристик ТРП с помощью современных программных кодов

В настоящее время методы расчетно-проектного обоснования технических решений изменились коренным образом, благодаря развитию информационных технологий и численных методов анализа. Численные методы сделали возмож-

ным решение самых сложных задач для самых сложных физических моделей. Все более широкое распространение получают интерактивные программы графического представления информации, основанные на решении краевых задач математической физики с помощью метода конечных элементов, такие как ANSYS, COMSOL, Star-CD, SolidWorks, ABAQUS и другие. Они позволяют в удобном для пользователя программном интерфейсе проводить полномасштабный численный анализ разрабатываемых устройств с учетом всех протекающих в них физических процессов и включают в себя большой перечень решаемых мультифизических задач. Тем не менее, на сегодняшний день программные комплексы конечно-элементного анализа не могут быть напрямую использованы для расчета характеристик ЭГК/ТРП по причине отсутствия в них программного модуля, способного рассчитывать термоэмиссионные процессы в МЭЗ и на электродах. Поэтому внедрение в современные коды конечно-элементного анализа программного блока для расчета термоэмиссии является следующим актуальным шагом в развитии расчетных методик ЭГК и ТРП.

Таким образом, создание программных комплексов, которые позволяют проводить трехмерный численный расчет нейтронно-физических, электро-теплофизических, теплогидравлических, термомеханических и других процессов в ЭГК/ТРП и ЯЭУ в целом, является конечным этапом эволюции развития расчетных методик. Подобные мультифические программные комплексы является наиболее эффективным средством для проведения оптимизационных расчетов ТРП и ЯЭУ в целом. На сегодняшний день существует несколько мультифизических программных комплексов на основе одномерных физико-математических моделей, среди них так называемые моделирующие системы KOPTES [41] и ИКАР [42].

Программный комплекс KOPTES предназначен в первую очередь для автоматизации процесса проектирования ТРП, которое включает

- определение оптимальных геометрических размеров ЭГЭ многоэлементного ЭГК для заданного распределения тепловыделения по а.з. и высоты а.з. (геометрическое профилирование),

- расчет температурного поля ЭГК,
- расчет статических и динамических характеристик ЭГК для различных режимов его работы (вакуумный, диффузионный, дуговой),
- определение оптимального расположения ЭГК по а.з. ТРП,
- расчет статических и динамических характеристик ТРП.

Кроме того, программного комплекс позволяет проводить расчетное сопровождение испытаний ТЭП, ЭГК и ТРП с возможностью определения оптимальных режимов работы, прогнозирования результатов, а также расчета электро-теплофизических характеристик ЭГК в нештатных ситуациях. Математические модели ЭГК и ТРП в KOPTES, позволяют исследовать влияние на выходные электро-теплофизические характеристики ЭГК/ТЭП процессов распухания ядерного топлива и эмиттерного блока, деградации тепловых и электрических характеристик коллекторной изоляции и дистанционаторов, различного рода тепловых и электрических утечек, изменения эмиссионных свойств электродов и др. [41].

Опытная эксплуатация KOPTES при проведении проектных работ с ТРП большой мощности показала высокую эффективность программного комплекса.

Важно отметить, что согласно выполненному анализу тематической литературы, реализованные в программном комплексе KOPTES расчетные методики [68-72], а также численные методики расчета выходных характеристик ЭГЭ/ЭГК, представленные в работах [45, 66] являются единственными, получившими развитие в настоящее время.

Другой программный комплекс, имеющий наименование ИКАР, был разработан с целью проведения численного расчета ТРП на быстрых нейтронах. Программный комплекс ИКАР предназначен для численного исследования следующих характеристик [42]:

- Статические характеристики ТРП:
  - ✓ распределение нейтронных полей активной зоны ТРП,
  - ✓ энерговыделение по активной зоне в RZ-геометрии,
  - ✓ распределение температурного и электрического полей в элементах конструкции ТРП,

- ✓ ВАХ точечного ЭГК и ТРП.

– Динамические характеристики ТРП:
  - ✓ запуск и расхолаживание ТРП,
  - ✓ переход с одного уровня мощности на другой,
  - ✓ изменение электрической нагрузки,
  - ✓ анализ ряда аварийных ситуаций,
  - ✓ регулировочные характеристики ТРП.

– Ресурсные характеристики ТРП:
  - ✓ изменение энергетических характеристик ТРП, обусловленное выгоранием, шлакованием или свеллингом твэлов.

Программный комплекс ИКАР эксплуатировался в РКК «Энергия» в рамках проектных работ по созданию КЯЭУ с ТРП на быстрых нейтронах и использовался при проведении большого объема расчетно-исследовательских работ в обоснование технических решений по ТРП и его конструктивным элементам.

Расчетные методики, реализованные в программных комплексах KOPTES и ИКАР, являются одномерными и в основном позволяют выполнять оценочные и инженерные расчеты. Помимо этого, входящие в состав кодов методики являются узкоспециализированными и предназначены для расчета конкретной конструкции ЭГЭ/ЭГК (типа «Топаз» и «Енисей»), тем самым не позволяют производить эффективный расчет и анализ характеристик ЭГЭ/ЭГК более сложной геометрии, используемых при проектировании перспективных термоэмиссионных ЯЭУ.

1.4.3. Результаты анализа расчетных методик ЭГК

Анализ существующих методик численного расчета электро-теплофизических характеристик ЭГК является в первую очередь основой для выработки предложений по направлениям дальнейшего развития расчетных методов, необходимых для проведения на современном уровне расчетно-исследовательских работ в обоснование конструкции ТРП в составе ЯЭУ второго и нового поколений с ЭГК различных типов.

В результате проведенного анализа расчетных методик ЭГЭ/ЭГК, представленных в публикациях с 1960 по 2015 гг., было установлено, что рассмотренные методики обладают рядом характерных особенностей и допущений, значительно снижающих точность получаемых результатов:

- расчет многоэлементного ЭГК сводится к последовательному расчету характеристик входящих в его состав ЭГЭ, тем самым полностью исключаются из численного анализа области межэлектродной коммутации;
- математическая модель ЭГЭ основана на ряде упрощающих допущений, которые существенно влияют на соответствие используемой модели реальным процессам;
- используемые математические модели ЭГЭ/ЭГК в большинстве методик являются одномерными;
- в используемых математических моделях теплоэлектрических процессов в ЭГЭ характерен некоторый произвол в выборе граничных условий (в области межэлектродных коммутационных перемычек, при задании энерговыделения топлива и отвода тепла теплоносителем).

Таким образом, совершенствование расчетных методик ТЭП/ЭГЭ/ЭГК должно идти по пути частичного или полного устранения описанных выше особенностей и допущений. Проведенный анализ позволяет сформулировать перечень требований к современным методам расчета ЭГК для нового качества получаемого результата при проведении расчетного обоснования выходных характеристик ТРП ЯЭУ нового поколения:

- переход от одномерного расчета к трехмерному численному расчету физических характеристик ЭГЭ/ЭГК/ТРП;
- детальный учет влияния свойств конструкционных материалов и сред на тепловые и электрические процессы в ЭГЭ/ЭГК;
- переход от математического расчета процессов в единичном ЭГЭ к ЭГК в целом, таким образом детальный учет всей геометрической структуры моделируемых устройств;

- возможность проведения расчетов ЭГЭ/ЭГК в геометрии отличной от геометрии ЭГК первого поколения (ЯЭУ «Топаз» и «Енисей»);
- возможность «сквозного» (мультифизичная задача) расчета ЭГК, а в перспективе ТРП и ЯЭУ в целом в рамках одного программного кода.

В настоящее время существует большое количество программных кодов конечно-элементного анализа, предназначенных для проведения теплофизических, электромагнитных, термомеханических и теплогидравлических расчетов, которые могли бы удовлетворить всем описанным выше требованиям. Тем не менее, ни один из этих кодов в своем базовом состоянии не может быть в полной мере использован для расчета электро-теплофизических характеристик ЭГК из-за отсутствия в кодах физических разделов, позволяющих корректно моделировать термоэмиссионные процессы в МЭЗ и на электродах. В связи с этим в работе была выполнена модификация стандартного численного решателя современного программного кода конечно-элементного анализа COMSOL [46, 47].

Программный код COMSOL позволяет решать мультифизические задачи методом конечных элементов, которые описываются комбинацией различных уравнений в частных производных и благодаря этому производится комплексный анализ физической модели. Главными особенностями программного кода COMSOL являются

- возможность создания собственных мультфизических задач с помощью комбинаций различных уравнений в частных производных,
- эффективное взаимодействие программных модулей – добавление новых и модификация имеющихся программных модулей,
- наличие инструментов автоматизированного проектирования для моделирования в одномерном, двухмерном и трехмерном пространстве,
- интеграция с другими системами автоматизированного проектирования - AutoCAD, SolidWorks и системами математического анализа - MatLab.

Таким образом, в результате внедрения в оригинальный COMSOL разработанного программного блока, отвечающего за численный расчет термоэлектронной эмиссии на конструктивных элементах ЭГК с использованием эксперименталь-

ных ВАХ ТЭП был разработан код COMSOL-ЭГК, реализующий новый подход к решению задачи трехмерного расчета электро-теплофизических характеристик термоэмиссионных ЭГК.

Разработанный на базе COMSOL программный код COMSOL-ЭГК предоставляет пользователям полный спектр инструментов для расчетного обоснования характеристик ЭГК, а в перспективе и всего ТРП: 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.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1

Обоснование проектных решений термоэмиссионных ЯЭУ второго поколения требует модернизации существующих и разработки новых методик расчета тепловых и электрических характеристик ЭГК из-за существенного усложнения его конструктивных форм и условий протекания термоэмиссионного процесса, ужесточения требований к адекватности математических моделей ЭГК и точности расчета его характеристик. В настоящее время совершенствование методов расчета электро-теплофизических характеристик ЭГК сводится, в основном, лишь к адаптации созданных ранее методик под современную вычислительную технику. Отсутствие развития в данном направлении может существенно затруднить проектные работы по перспективным термоэмиссионным ЯЭУ. Поэтому одной из актуальных задач, возникающих при разработке термоэмиссионных ЯЭУ второго и нового поколений, является развитие методик расчета ЭГК/ТРП, учитывающих реальную геометрическую структуру конструктивных элементов, разнообразие физических свойств материалов, а также влияние технологии изготовления и особенности рабочих условий электродных пар моделируемых устройств.

2. Разработка методики математической обработки экспериментальных ВАХ ТЭП

2.1. Способы определения локальной ВАХ ТЭП

Как отмечалось ранее, основным замыкающим соотношением системы тепловых и электрических уравнений для ЭГЭ и ЭГК в целом является локальная ВАХ ТЭП – зависимость плотности электрического тока через МЭЗ от величины межэлектродного напряжения и ряда других параметров. В наиболее общем случае полагается, что плотность электрического тока через МЭЗ зависит от следующих параметров [65, 66]:

$$j = f(u, T_E, T_C, P_{Cs}, d, \Phi_E, \Phi_C). \quad (2.1)$$

В настоящий момент существует три подхода к определению локальных ВАХ ТЭП:

1) экспериментальное определение ВАХ ТЭП на стендах с электронагревом;
2) численный расчет процессов в плазме (в среде МЭЗ и на поверхности электродов);
3) полуэмпирический метод, являющийся комбинацией первых двух подходов.

Каждый из вышеперечисленных способов определения локальной ВАХ ТЭП обладает своими особенностями. Выбор используемой методики определяется спецификой решаемой задачи. Важно отметить, что при проведении расчетов электро-теплофизических характеристик ЭГЭ/ЭГК, одним из основных требований, предъявляемых к методике задания локальной ВАХ ТЭП, является необходимость внедрения методики в расчетный алгоритм, а также точность и быстродействие.

Эксперименты на стендах с электронагревом в основном направлены на исследование характеристик рабочего процесса ТЭП, а также на изучение динамики ресурсных характеристик ТЭП [65, 73]. При проведении экспериментальных исследований изменяемыми параметрами рабочего процесса являются величина межэлектродного напряжения, давление паров цезия в МЭЗ, температура электродов и иногда – величина МЭЗ [74]. На основании экспериментальных данных формируется так называемый банк данных (БД), как правило, состоящий из набо-

ра ВАХ ТЭП вида $j = j(u)$ при различных фиксированных значениях остальных параметров рабочего процесса [75, 76]. Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований ТЭП, могут быть использованы как для определения внутренних параметров рабочего процесса, так и в составе расчетных методик, предназначенных для сопровождения экспериментальных исследований и расчетного обоснования конструкции ЭГК и ТРП в целом, а также оптимизации их выходных электрических характеристик [40]. Полученный набор экспериментальных ВАХ ТЭП фактически представляет собой проекцию многомерной функции (2.1) на плоскость зависимости плотности электрического тока от межэлектродного напряжения. Такая многомерная функция не может быть напрямую и эффективно использована в составе расчетных методик ЭГК и требует математической обработки путем подбора соответствующих аппроксимирующих зависимостей.

Важно отметить, что из-за многообразия процессов, протекающих в МЭЗ и на электродах в рабочих условиях, их анализ и формализованное описание в виде ВАХ или эмиссионно-адсорбционных характеристик является трудной задачей. К примеру, в публикациях различных авторов могут встречаться значительные расхождения в определении локальной ВАХ ТЭП с одинаковыми электродными парами при одинаковых условиях рабочего процесса [77].

Другой способ определения вида локальной ВАХ ТЭП заключается в математическом расчете физических процессов, протекающих в плазме внутри МЭЗ и на электродах [78]. Разработанная В.Н. Сидельниковым (ГНЦ РФ-ФЭИ) численная методика TOR [65, 79, 80] является наиболее характерным представителем этого класса методик. Численный расчет основных физических явлений и эффектов на поверхности электродов и в плазме ТЭП позволило определять локальную ВАХ в широком диапазоне изменения входных параметров: по температуре эмиттера – от 1000 до 3000 К, температуре коллектора – от 500 до 2000 К, давлению паров цезия – от 0,2 до 20 мм рт. ст., величине МЭЗ – от 0,1 до 5 мм. Результаты численного построения локальных ВАХ ТЭП по методике TOR были верифицированы на экспериментальных данных, в частности, при проведении экспериментов с электродной парой $W_{моно}$-$W_{поли}$. Однако сложность использования и громоздкость

проводимых расчетов сдерживают практическое применение данной методики при проведении проектных работ [65].

Одной из главных особенностей любого метода численного построения локальной ВАХ ТЭП является принципиальная невозможность учета эффектов, связанных с реальной технологией изготовления ТЭП. Повышение достоверности расчета локальной ВАХ возможно только при усовершенствовании используемых математических моделей, что неминуемо повлечет дальнейшее увеличение временных затрат на расчет [66].

Характерным примером полуэмпирического метода расчета локальной ВАХ ТЭП, основанного на использовании зависимостей, выявленных в результате анализа экспериментальных данных, является методика, описанная в работе [81]. Методика показала хорошее согласие с экспериментальными данными и применялась в составе программных кодов для проведения численных расчетов характеристик ТРП и сопровождения петлевых реакторных испытаний ЭГК [40].

Кроме того, существует другая форма построения полуэмпирического метода расчета локальных ВАХ ТЭП, заключающаяся в использовании математической модели физических процессов в плазме МЭЗ и на электродах, уточненной в соответствии с экспериментальными данными. Разработанная В.Н. Сидельниковым и В.С. Мироновым (ГНЦ РФ-ФЭИ) методика SET реализует данный подход [65, 82]. Инженерная методика SET позволяет проводить численное задание локальной ВАХ ТЭП при том же наборе параметров, что и методика TOR. Точность расчетов по генерируемому ТЭП напряжению составляет 0,1 В [66].

Следует отметить, что результатом работы методик TOR и SET является расчетная зависимость $u = f(j, T_E, T_C, P_{CS}, d, \Phi_E, \Phi_C)$ – обратная по отношению к зависимости (2.1), что значительно усложняет использование этих методик в составе программ расчета характеристик ЭГК.

Таким образом, выбор методики задания локальных ВАХ ТЭП определяется целями поставленной расчетной задачи и ее особенностями. Наиболее оптимальным и перспективным подходом в обеспечении высокой точности расчета характеристик ЭГК является моделирование локальных ВАХ путем математической

обработки баз экспериментальных данных о ВАХ ТЭП, подбора соответствующих аппроксимирующих зависимостей и внедрение полученных результатов в расчетные коды.

2.2. Многопараметрическая аппроксимация экспериментальных ВАХ ТЭП в программной среде MATLAB

Как правило, при проведении эксперимента целью измерения является установление вида некоторой функциональной зависимости $y = f(x)$. Искомая функция может быть как функцией одной независимой переменной, так и функцией многих переменных – так называемый многофакторный эксперимент. Получаемый набор данных впоследствии используется для построения математической модели исследуемой зависимости [83-85].

Главное требование к математической модели – это удобство ее последующего использования. Основное достоинство аппроксимирующего математического выражения – это его компактность, достигаемая при удачном выборе составляющих его элементарных функций, обеспечивающих достаточную точность приближения. Подбор аппроксимирующей функции, обеспечивающей наибольшую точность аппроксимации экспериментальных данных с возможностью ее дальнейшего использования в расчетных кодах, в случае многофакторного эксперимента является весьма сложной задачей [66, 83-85].

Как отмечалось ранее, локальная ВАХ ТЭП является функцией семи переменных (2.1). Тем не менее, при проведении экспериментов на стендах с электронагревом изменяемыми являются всего пять параметров, а именно: величина межэлектродного напряжения, температуры эмиттера и коллектора, давление паров цезия в МЭЗ и величина МЭЗ. При проведении расчетов электро-теплофизических характеристик ЭГК постоянство давления паров цезия в МЭЗ и величины МЭЗ является достаточно корректным допущением. Следовательно, в расчетах можно использовать более простую, чем (2.1), зависимость

$$j = j(u, T_E, T_C). \qquad (2.2)$$

Однако, наряду с выражением (2.1), определение аналитического вида зависимости (2.2) в результате анализа экспериментальных данных также не является тривиальной задачей. Поиск математической модели, соответствующей выражению (2.2), находящейся в хорошем соответствии с экспериментальными данными и имеющей удобный формат для последующего встраивания в расчетную методику, является весьма актуальной задачей, решение которой позволит значительно повысить качество и достоверность численных расчетов тепловых и электрических процессов в ЭГК [66].

В качестве программного средства для обработки и интерпретации данных многофакторного эксперимента по определению локальной ВАХ ТЭП был выбран пакет MATLAB [86], обладающий развитыми средствами графической интерпретации данных. Программный комплекс MATLAB – пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений и одноимённый язык программирования, используемый в этом пакете. MATLAB используют более 1 000 000 инженерных и научных работников, он работает на большинстве современных операционных систем, включая Linux, Mac OS и Microsoft Windows.

Язык MATLAB является высокоуровневым интерпретируемым языком программирования, включающим основанные на матрицах структуры данных, широкий спектр функций, интегрированную среду разработки, объектно-ориентированные возможности и интерфейсы к программам, написанным на других языках программирования. Основной особенностью языка MATLAB являются его широкие возможности по работе с матрицами. MATLAB предоставляет пользователю большое количество (несколько сотен) функций для анализа данных, покрывающих практически все области математики, в частности [86]:

- матрицы и линейная алгебра – алгебра матриц, линейные уравнения, собственные значения и вектора, сингулярности, факторизация матриц и другие;
- многочлены и интерполяция – корни многочленов, операции над многочленами и их дифференцирование, интерполяция и экстраполяция кривых и другие;

- математическая статистика и анализ данных – статистические функции, статистическая регрессия, цифровая фильтрация, быстрое преобразование Фурье и другие;
- обработка данных – набор специальных функций, включая построение графиков, оптимизацию, поиск нулей, численное интегрирование (в квадратурах) и другие.

С целью дальнейшего встраивания методики аппроксимации экспериментальных ВАХ ТЭП, позволяющей проводить обработку и интерпретацию данных многофакторного эксперимента, в существующие или разрабатываемые расчетные коды для расчета характеристик ЭГК, описанная в настоящем разделе методика была реализована на языке программирования MATLAB.

В настоящей работе строится аппроксимация экспериментальных данных о ВАХ ТЭП на основе зависимости $j = j(u, T_E)$ при прочих фиксированных параметрах, что является достаточно корректным допущением при проведении расчетов электро-теплофизических характеристик ЭГК. Таким образом, с целью проведения математической обработки баз экспериментальных данных с использованием набора различных многомерных аппроксимирующих функций были отобраны два массива экспериментальных ВАХ ТЭП, состоящие из 13 локальных ВАХ дугового режима работы ТЭП с электродной парой $W_{моно}$-$W_{поли}$ [25, 65, 66, 87, 88] и 10 локальных ВАХ энергетического режима работы ТЭП с низкотемпературной электродной парой Pt-ВХ2У [25, 65, 66]. Выбор именно этих массивов данных о ВАХ ТЭП для последующей математической обработки обуславливается хорошей изученностью свойств процесса термоэмиссионного преобразования энергии с данными парами электродных материалов, удобным форматом представления экспериментальных данных, а также востребованностью этих электродных пар в проектных работах по созданию ЭГК для термоэмиссионных ЯЭУ и ЭУ второго и нового поколений [62, 63]. Отобранные ВАХ ТЭП были получены на стенде с электронагревом при величине межэлектродного зазора 0,4 мм и давлении паров цезия ~1.5 мм рт. ст – наиболее характерной величине для рабочего процесса ТРП. Температура эмиттера варьировалась в диапазоне 1400 – 2000 К, температу-

ра коллектора – от 750 до 1000 К, межэлектродное напряжение – до 1,4 В, а соответствующая им плотность тока в межэлектродном зазоре – до 35 А/см^2. Параметры рабочего процесса, соответствующие выбранным экспериментальным ВАХ ТЭП с электродными парами $W_{моно}$ -$W_{поли}$ и Pt-ВХ2У, приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Параметры рабочего процесса экспериментальных ВАХ ТЭП

№ ВАХ	T_E, К	T_C, К	T_{Cs}, К
Электродная пара $W_{моно}$ -$W_{поли}$			
1	1373	768	570,5
2	1419	776	570,6
3	1465	784	570,8
4	1533	782	570,8
5	1570	771	570,9
6	1627	835	571,1
7	1676	887	571,1
8	1718	917	571,1
9	1774	968	571,0
10	1825	962	571,0
11	1872	975	571,1
12	1939	974	571,1
13	1963	976	571,1
Электродная пара Pt-ВХ2У			
1	1373	767	571,1
2	1441	779	570,9
3	1517	792	571,0
4	1593	808	571,0
5	1634	813	570,9
6	1705	836	570,9
7	1759	877	570,9
8	1822	910	571,1
9	1863	937	570,9
10	1935	945	571,0

В качестве примера на рисунке 6 изображен фрагмент массива экспериментальных данных о ВАХ ТЭП с электродной парой Pt-ВХ2У, используемый с каче-

стве исходных данных для последующей математической обработки и определения вида аппроксимирующей зависимости.

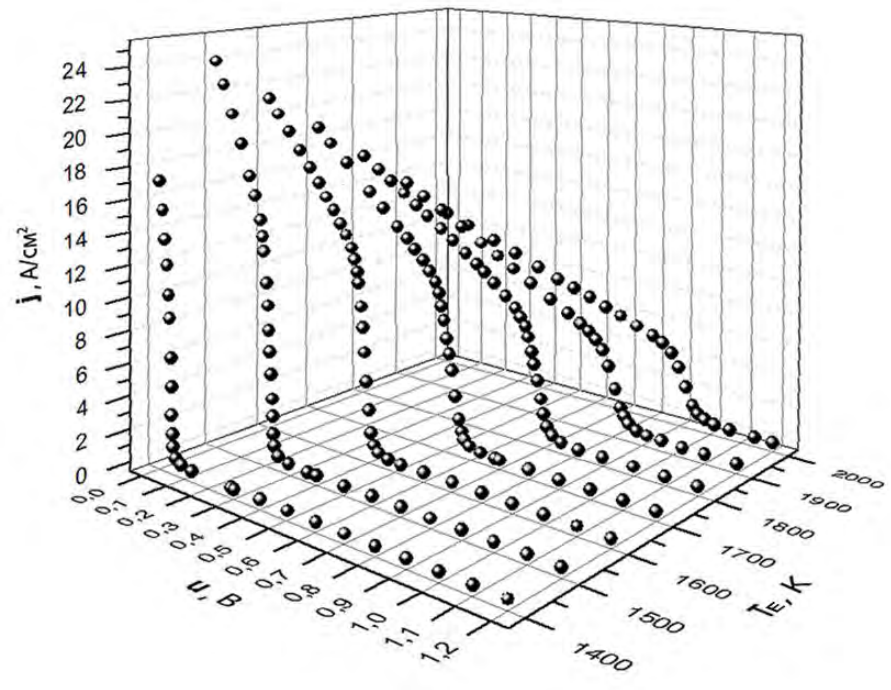


Рис. 6. Семейство экспериментальных ВАХ ТЭП с электродной парой Pt – ВХ2У для различных T_E при величине МЭЗ 0,4 мм, температуре коллектора 800 - 950 К и давлении паров цезия 1,5 мм. рт. ст.

В ходе работы было проанализировано несколько многомерных аппроксимирующих функций. Как отмечалось ранее, возможность аппроксимации экспериментальных ВАХ ТЭП с помощью отобранных функций исследовалась для двух массивов экспериментальных данных – выборка из 13 локальных ВАХ, соответствующих дуговому режиму работы ТЭП с электродной парой $W_{моно}$ -$W_{поли}$ и выборка из 10 локальных ВАХ энергетического режима работы ТЭП с низкотемпературной электродной парой Pt-ВХ2У. Расчет искомых коэффициентов аппроксимирующих функций выполнялся с помощью метода наименьших квадратов (МНК) [83-85]. Процесс определения коэффициентов по МНК сводится к определению минимума функции многих переменных, а именно, требуется определить коэффициенты $\{\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_n\}$ таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений экспериментальных значений относительно выбранной аппроксимирующей функции была минимальной [85]:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{m} \left[j_i - j(\vec{z}, \alpha_0, \alpha_1, ..., \alpha_n) \right]^2 \to \min \ , \qquad (2.3)$$

здесь для удобства принято следующее обозначение $j(u, T_E, \alpha_0, \alpha_1, ..., \alpha_n) = j(\vec{z}, \alpha_0, \alpha_1, ..., \alpha_n)$.

Обязательными условиями для поиска минимума функции является ее дифференцируемость и выполнение следующих неравенств

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha_0} = 0; \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha_1} = 0; \ ...; \ \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha_n} = 0 . \qquad (2.4)$$

Если характер зависимости (2.4) является линейным, то система уравнений (2.3) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha_0} &= \frac{\partial \left[\sum_{i=1}^{m} \left[j_i - j(\vec{z}, \alpha_0, \alpha_1, ..., \alpha_n) \right]^2 \right]}{\partial \alpha_0} = 2 \sum_{i=1}^{m} \left[j_i - j(\vec{z}, \alpha_0, \alpha_1, ..., \alpha_n) \right] \cdot 1 = 0 \\
\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha_1} &= \frac{\partial \left[\sum_{i=1}^{m} \left[j_i - j(\vec{z}, \alpha_0, \alpha_1, ..., \alpha_n) \right]^2 \right]}{\partial \alpha_1} = 2 \sum_{i=1}^{m} \left[j_i - j(\vec{z}, \alpha_0, \alpha_1, ..., \alpha_n) \right] \cdot z_{1i} = 0 \\
\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha_2} &= \frac{\partial \left[\sum_{i=1}^{m} \left[j_i - j(\vec{z}, \alpha_0, \alpha_1, ..., \alpha_n) \right]^2 \right]}{\partial \alpha_2} = 2 \sum_{i=1}^{m} \left[j_i - j(\vec{z}, \alpha_0, \alpha_1, ..., \alpha_n) \right] \cdot z_{2i} = 0 \\
&\cdots \\
\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha_n} &= \frac{\partial \left[\sum_{i=1}^{m} \left[j_i - j(\vec{z}, \alpha_0, \alpha_1, ..., \alpha_n) \right]^2 \right]}{\partial \alpha_n} = 2 \sum_{i=1}^{m} \left[j_i - j(\vec{z}, \alpha_0, \alpha_1, ..., \alpha_n) \right] \cdot z_{ni} = 0
\end{aligned} \qquad (2.5)$$

В результате ряда математических упрощений система (2.5) сводится к системе линейных алгебраических уравнений относительно искомых коэффициентов $\{\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n\}$, решение которой легко выполняется с использованием численных методов, реализованных в большинстве современных вычислительных пакетов, в том числе MATLAB.

Для определения погрешности выполняемой аппроксимации экспериментальных ВАХ ТЭП использовалась так называемая величина дисперсии адекватности [84, 85]:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{m} (y_i - \bar{y}(x_i))^2}{m - k - 1}, \tag{2.6}$$

где m – количество ВАХ в массиве экспериментальных данных, k – количество факторов выбранной аппроксимирующей функции. В соответствии с работой [85], средняя относительная погрешность определялась выражением

$$d = \frac{\sum_{i=1}^{m} \left| \frac{y_i - \bar{y}(x_i)}{\bar{y}(x_i)} \right|}{m}. \tag{2.7}$$

В настоящей работе были рассмотрены более 50 различного рода функций для проведения аппроксимации экспериментальных ВАХ ТЭП. Эти функции можно объединить в следующие группы:

1) полиномиальные,
2) логарифмические,
3) экспоненциальные,
4) рациональные,
5) смешанного типа.

Полный список многомерных аппроксимирующих функций, которые были использованы для обработки и интерпретации данных многофакторного эксперимента, представлен в **Приложении 1**. Ниже представлено несколько видов многомерных функций, которые были использованы для обработки экспериментальных ВАХ ТЭП и показали наилучшие результаты с точки зрения точности аппроксимации.

Полином третьей степени:

$$j(u, T_E) = \alpha_1 + \alpha_2 \mathrm{u} + \alpha_3 \mathrm{T_E} + \alpha_4 \mathrm{u}^2 + \alpha_5 \mathrm{T_E^2} + \alpha_6 \mathrm{u}^3 + \alpha_7 \mathrm{T_E^3} + \alpha_8 \mathrm{u T_E} + \\ + \alpha_9 \mathrm{u}^2 \mathrm{T_E} + \alpha_{10} \mathrm{u T_E^2}. \tag{2.8}$$

Упрощенный полином четвертой степени:

$$j(u, T_E) = \alpha_1 + \alpha_2 \mathrm{T_E} + \alpha_3 \mathrm{T_E}^2 + \alpha_4 \mathrm{T_E}^3 + \alpha_5 \mathrm{T_E^4} + \alpha_6 \mathrm{u} + \alpha_7 \mathrm{u}^2 + \alpha_8 \mathrm{u}^3 + \\ + \alpha_9 \mathrm{u}^4. \tag{2.9}$$

Полное логарифмическое преобразование 2ой степени:

$$j(u,T_E)=\alpha_1+\alpha_2 ln(\alpha_7 u+\alpha_8)+\alpha_3 ln(\alpha_9 T_E+\alpha_{10})+\alpha_4 ln(\alpha_7 u+\alpha_8)^2+$$
$$+\alpha_5 ln(\alpha_9 T_E+\alpha_{10})^2+\alpha_6 ln(\alpha_7 u+\alpha_8) ln(\alpha_9 T_E+\alpha_{10}) . \quad (2.10)$$

Гиперболический параболоид со смещением:

$$j(u,T_E)=\alpha_1(\alpha_3 T_E+\alpha_4)^3-\alpha_2(\alpha_3 T_E+\alpha_4)(\alpha_5 u+\alpha_6)^2+\alpha_7 . \quad (2.11)$$

Дробно-рациональная функция:

$$j(u,T_E)=\alpha_1+\alpha_2 u+\alpha_3\frac{1}{T_E}+\alpha_4 u^2+\alpha_5\frac{1}{T_E^2}+\alpha_6\frac{u}{T_E} . \quad (2.12)$$

Смешанный тип:

$$j(u,T_E)=\alpha_1+\alpha_2 u+\alpha_3\frac{1}{ln(T_E)}+\alpha_4 u^2+\alpha_5\frac{1}{ln(T_E)^2}+\alpha_6\frac{u}{ln(T_E)} . \quad (2.13)$$

Гиперболический параболоид без смещения:

$$j(u,T_E)=\alpha_1(\alpha_3 T_E+\alpha_4)^3-\alpha_2(\alpha_3 T_E+\alpha_4)(\alpha_5 u+\alpha_6)^2 . \quad (2.14)$$

Смешанный тип:

$$j(u,T_E)=\alpha_1+\alpha_2 u+\alpha_3 ln(T_E)+\alpha_4 u^2+\alpha_5 ln(T_E)^2+\alpha_6 u ln(T_E) . \quad (2.15)$$

Полный квадратичный полином:

$$j(u,T_E)=\alpha_1+\alpha_2 u+\alpha_3 T_E+\alpha_4 u^2+\alpha_5 T_E^2+\alpha_6 u T_E . \quad (2.16)$$

Дробно-рациональная функция:

$$j(u,T_E)=\frac{\alpha_1+\alpha_2 u+\alpha_3 T_E+\alpha_4 u T_E}{1+\alpha_5 u+\alpha_6 T_E+\alpha_7 u T_E} . \quad (2.17)$$

Представленные зависимости отличаются как выбранным алгебраическим типом, так и различным порядком аппроксимации по факторам. Как было отмечено ранее, определение значений коэффициентов аппроксимации α_i проводилось с помощью МНК, т.е. для каждой функции была сформирована своя система уравнений типа (2.5), решение которой относительно искомых коэффициентов было реализовано с использованием численных методов на языке программирования современного вычислительного пакета MATLAB [86].

В программной среде MATLAB был реализован алгоритм поиска набора аппроксимирующих функций оптимальных с точки зрения заданного критерия точности аппроксимации. Этот алгоритм позволяет из произвольно заданного списка

функций находить наиболее удачную с точки зрения величины погрешности аппроксимации и передавать информацию о типе найденной функции, а также полученные коэффициенты $\{\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n\}$ в программный код для расчета электро-теплофизических характеристик ЭГК. Разработанный алгоритм состоит из следующих этапов:

1) создание исходного массива экспериментальных данных о локальных ВАХ ТЭП в виде внешнего текстового файла в форме таблицы вида $\{j, u, T_E\}$;
2) задание во внешнем текстовом файле произвольного набора аппроксимирующих функций в формате $F(u, T_E, \alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n)$;
3) задание критерия точности аппроксимации экспериментальных данных с целью исключения из общего набора функций тех, которые не попадают под заданный критерий;
4) чтение входных файлов в программной среде MATLAB;
5) автоматическое выполнение преобразований над переменными и формирование систем линейных уравнений;
6) численное решение системы линейных алгебраических уравнений с помощью МНК;
7) расчет величин (2.6) и (2.7), характеризующих точность аппроксимации;
8) сортировка заданного массива многомерных аппроксимирующих функций по их точности аппроксимации, а также исключение функций, непопадающих под заданный в п. 3 критерий точности;
9) формирование выходного файла с данными об аппроксимации для последующего использования в расчетных кодах ЭГК.

2.3. Результаты аппроксимации экспериментальных данных о ВАХ ТЭП в программной среде MATLAB

Как отмечалось ранее, разработанный в программной среде MATLAB алгоритм поиска наиболее подходящих для описания экспериментальных ВАХ ТЭП аппроксимирующих функций позволяет в автоматическом режиме из заданного набора функций проводить отбор функций, удовлетворяющих заранее установлен-

ному критерию точности. Поэтому одним из основных этапов алгоритма является расчет погрешности аппроксимации для каждой из заданных функций.

В **Приложении 2** представлены результаты расчета величины дисперсии адекватности, средней абсолютной и относительной погрешностей при проведении аппроксимации экспериментальных данных о ВАХ ТЭП с помощью заданных функций (2.8)-(2.17). Средние по выборке величины погрешности аппроксимации экспериментальных ВАХ ТЭП с помощью функций (2.8)-(2.17) на примере электродной пары $W_{моно}$-$W_{поли}$ представлены в таблице 2.2. Заданным критерием точности, согласно которому проводился отбор функций, выступала величина средней относительной погрешности. Функции, для которых эта величина превышала 5%, исключались из дальнейшего рассмотрения и использования. В таблице 2.2. функции отсортированы в порядке возрастания погрешности аппроксимации.

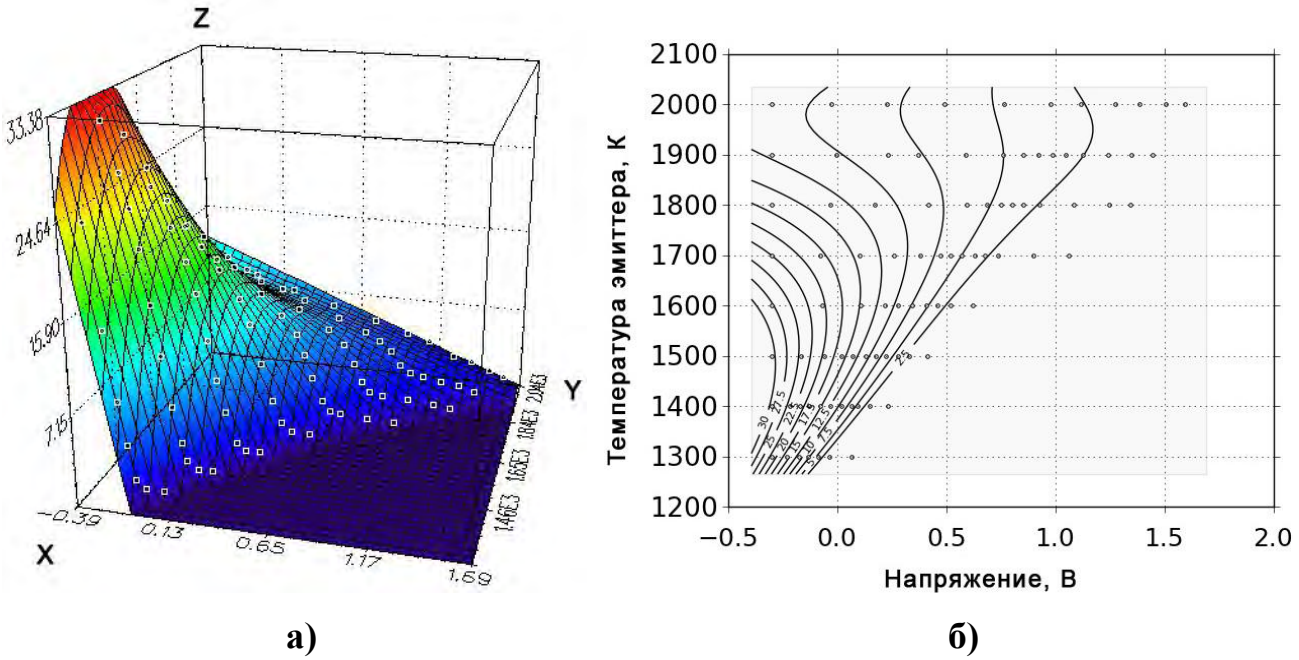
Таблица 2.2. Результаты расчета погрешности аппроксимации экспериментальных ВАХ, соответствующих дуговому режиму работы ТЭП с электродной парой $W_{моно}$-$W_{поли}$

№ п/п	Функция	Относительная погрешность, %		
		min	max	средняя
1	(2.8)	1,42	4,97	2,81
2	(2.9)	1,29	5,37	2,97
3	(2.10)	1,46	5,12	3,01
4	(2.11)	0,93	8,82	3,53
5	(2.12)	1,12	6,49	3,59
6	(2.13)	1,13	6,41	3,78
7	(2.14)	1,47	7,74	3,83
8	(2.15)	1,08	8,69	3,92
9	(2.16)	1,29	7,76	4,19
10	(2.17)	1,45	9,72	4,98

Анализ результатов расчета величин, характеризующих точность аппроксимации, позволяет сделать вывод о том, что результаты математической обработки заданных массивов экспериментальных ВАХ ТЭП с помощью функций (2.8)-(2.17) могут быть использованы в зависимости от выбранной многомерной функции как для оценочных, так и для инженерных расчетов характеристик ЭГК. Наименьшую погрешность при аппроксимации экспериментальных ВАХ ТЭП с электродной парой $W_{моно}$-$W_{поли}$, заданных в виде $j = j(u, T_E)$, демонстрируют полиномы третьей и четвертой степеней (средняя относительная погрешность не превышает 3%). Аналогичный вывод в ходе выполнения настоящей работы был сделан и для экспериментальных ВАХ ТЭП с электродной парой Pt-ВХ2У.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что для выборки экспериментальных ВАХ, соответствующих дуговому режиму работы ТЭП с электродной парой $W_{моно}$-$W_{поли}$, функция в виде многомерного кубического полинома (2.8) является достаточной для последующего использования в расчетах электро-теплофизических характеристик ЭГК, поскольку оцененная средняя относительная погрешность аппроксимации не превышает 3%. Тем не менее, не исключено, что при аппроксимации других массивов экспериментальных ВАХ ТЭП может потребоваться иной вид многомерной функции, например, обладающей более высокой степенью полинома или имеющей другой тип, нежели полиномиальный.

На рисунках 7-11 представлены результаты аппроксимации выборки экспериментальных ВАХ, соответствующих дуговому режиму работы ТЭП с электродной парой $W_{моно}$-$W_{поли}$, с использованием некоторых функций из списка (2.8)-(2.17). Здесь по осям X, Y, Z отложены температура эмиттера – К, межэлектродное напряжение – В и плотность электрического тока – А/см^2, соответственно.



а) **б)**

Рис. 7. Результат аппроксимации выборки экспериментальных ВАХ ТЭП с электродной парой $W_{моно}$-$W_{поли}$ с использованием функции (2.8): а) – поверхностный график зависимости плотности электрического тока от межэлектродного напряжения и температуры эмиттера; б) - контурный график зависимости температуры эмиттера от межэлектродного напряжения.

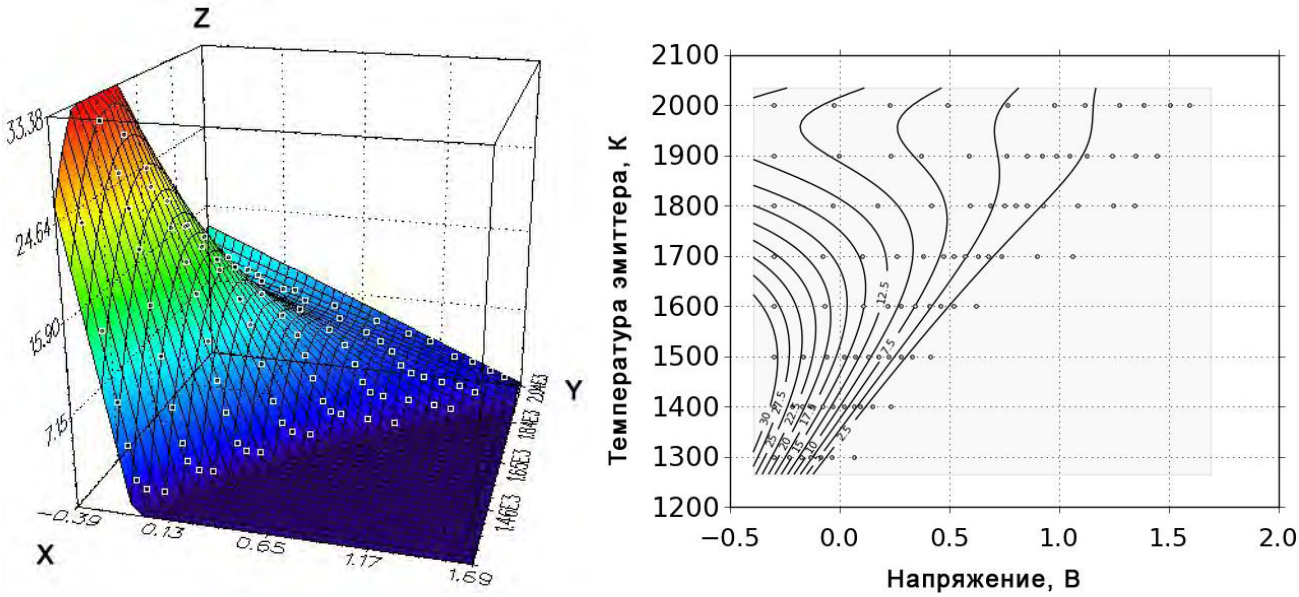


Рис. 8. Результат аппроксимации выборки экспериментальных ВАХ ТЭП с электродной парой $W_{моно}$-$W_{поли}$ с использованием функции (2.10): а) – поверхностный график зависимости плотности электрического тока от межэлектродного напряжения и температуры эмиттера; б) - контурный график зависимости температуры эмиттера от межэлектродного напряжения.

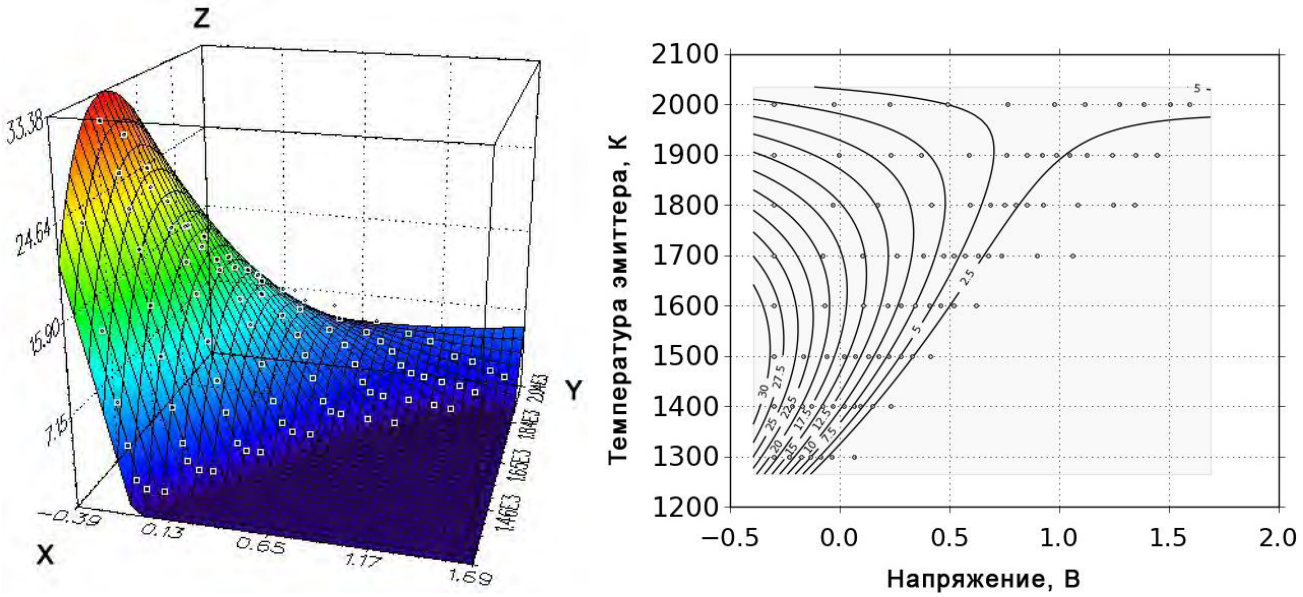


Рис. 9. Результат аппроксимации выборки экспериментальных ВАХ ТЭП с электродной парой $W_{моно}$-$W_{поли}$ с использованием функции (2.12): а) – поверхностный график зависимости плотности электрического тока от межэлектродного напряжения и температуры эмиттера; б) - контурный график зависимости температуры эмиттера от межэлектродного напряжения.

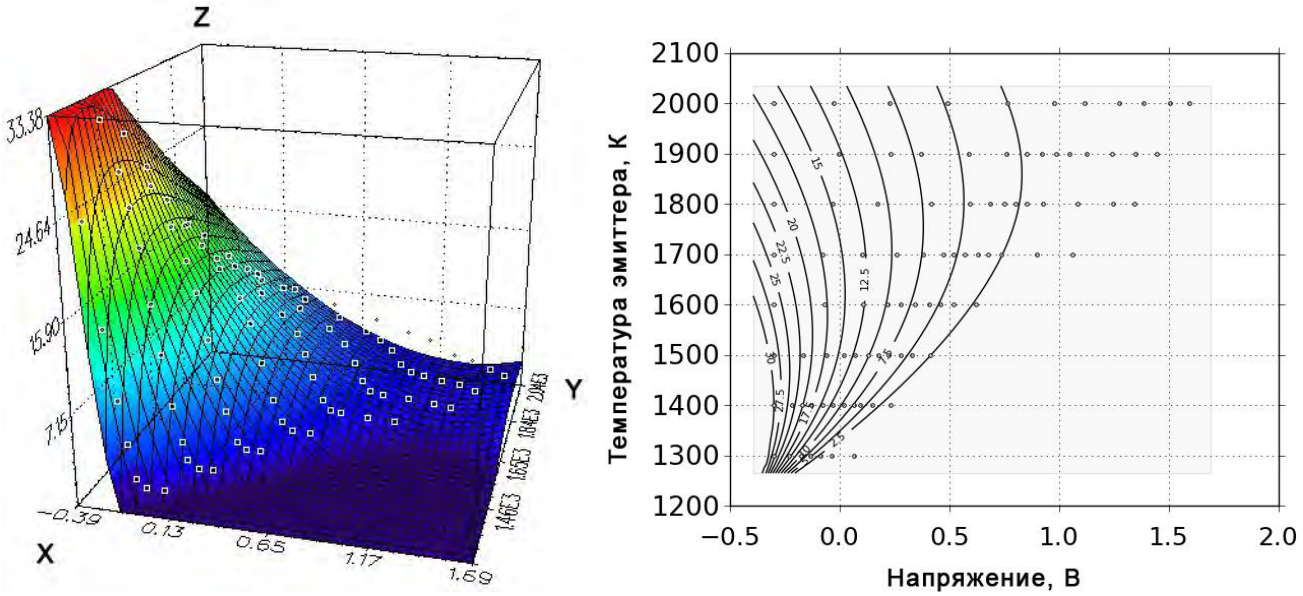


Рис. 10. Результат аппроксимации выборки экспериментальных ВАХ ТЭП с электродной парой $W_{моно}$-$W_{поли}$ с использованием функции (2.14): а) – поверхностный график зависимости плотности электрического тока от межэлектродного напряжения и температуры эмиттера; б) - контурный график зависимости температуры эмиттера от межэлектродного напряжения.

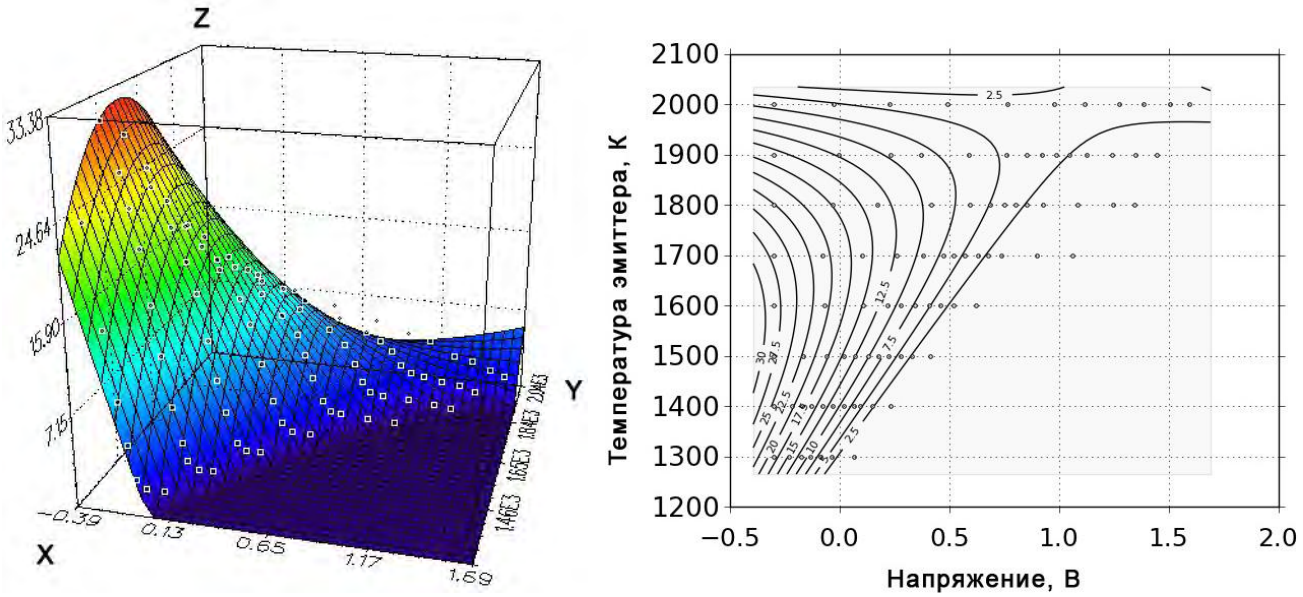


Рис. 11. Результат аппроксимации выборки экспериментальных ВАХ ТЭП с электродной парой $W_{моно}$-$W_{поли}$ с использованием функции (2.16): а) – поверхностный график зависимости плотности электрического тока от межэлектродного напряжения и температуры эмиттера; б) - контурный график зависимости температуры эмиттера от межэлектродного напряжения.

Дальнейшей проверкой работоспособности и эффективности предложенной методики аппроксимации экспериментальных данных стала математическая обработка выборки из 10 локальных ВАХ энергетического режима работы ТЭП с низкотемпературной электродной парой Pt-ВХ2У [25, 65, 66] с использованием набора функций, представленных в **Приложении 1**. ВАХ получены на стенде с электронагревом при величине межэлектродного зазора 0,4 мм и давлении паров цезия 2 мм рт. ст. Температура эмиттера изменялась в интервале от 1350 до 1950 К, температура коллектора – от 750 до 900 К, межэлектродное напряжение – до 1,1 В, а соответствующая ему плотность электрического тока – до 25 А/см^2. Параметры рабочего процесса, соответствующие выбранным экспериментальным ВАХ ТЭП с электродной парой Pt-ВХ2У, приведены в табл. 2.1. Результаты аппроксимации экспериментальных данных о локальных ВАХ ТЭП с электродной парой Pt-ВХ2У представлены в **Приложении 3**.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2

Разработана методика математической обработки экспериментальных данных о ВАХ ТЭП, основанная на аппроксимации многомерными функциями содержимо-

го банков экспериментальных данных, позволяющая применять обработанные данные в существующих или разрабатываемых программных кодах для расчета электро-теплофизических характеристик ЭГК. Реализованная в программной среде MATLAB методика позволяет в полуавтоматическом режиме из произвольно заданного набора функций проводить отбор функций, удовлетворяющих заранее установленному критерию точности, и передавать информацию о параметрах и типе найденных функций в расчетный код ЭГК.

Для тестирования разработанного алгоритма были отобраны два массива экспериментальных ВАХ ТЭП, состоящие из 13 локальных ВАХ дугового режима работы ТЭП с электродной парой $W_{моно}$-$W_{поли}$ и 10 локальных ВАХ энергетического режима работы ТЭП с низкотемпературной электродной парой Pt-ВХ2У, используемые на современном этапе проектирования ТРП для термоэмиссионных ЯЭУ различного назначения.

Для каждого из обработанных массивов экспериментальных ВАХ можно сделать вывод о том, что функции в виде многомерного полинома типа (2.8) или (2.9) являются достаточными для последующего использования в расчетах характеристик ТЭП/ЭГЭ/ЭГК, поскольку оцененная средняя относительная погрешность аппроксимации не превышает 3%. Тем не менее, зависимости (2.10)-(2.17) также могут быть использованы, например, для оценочных расчетов (средняя относительная погрешность аппроксимации больше 3%, но не превышает установленного критерия точности - 5%)

3. Расчет тепловых и электрических характеристик лабораторного ТЭП в программной среде COMSOL-ЭГК

Расчет электро-теплофизических характеристик лабораторного ТЭП с цилиндрической геометрией электродов был первым необходимым этапом верификации разработанного кода COMSOL-ЭГК.

3.1. Общая характеристика программного кода конечно-элементного анализа COMSOL-ЭГК

В настоящее время методы расчетно-проектного обоснования технических решений изменились коренным образом, благодаря развитию информационных технологий и методов численного анализа. Численные методы сделали возможным решение самых сложных задач для самых сложных физических моделей. Широкое распространение получили интерактивные программы графического представления информации, основанные на решении краевых задач математической физики с помощью метода конечных элементов. Применение современных программных кодов позволяет более детально и при этом более компактно описывать геометрические и физические свойства объектов, а также протекающие физические процессы по сравнению с ранее используемыми методами. К числу таких кодов можно отнести современный программный комплекс COMSOL [46, 47], на базе которого был разработан программный код COMSOL-ЭГК, реализующий методику расчета электро-теплофизических характеристик ЭГК, а в перспективе и всего ТРП с использованием трехмерных математических моделей и дискретных экспериментальных данных о ВАХ ТЭП. Разработанный код предназначен для обоснования проектных решений перспективных термоэмиссионных ЯЭУ, а также наземных ЭУ с ядерным или неядерным нагревом эмиттеров ТЭП/ЭГК.

Следует отметить, что в настоящее время существует большое количество программных кодов (к наиболее передовым можно отнести коды ANSYS, COMSOL, SolidWorks, ABAQUS, LS-DYNA и др.), предназначенных для проведения теплофизических, электромагнитных, термомеханических,

гидродинамических и других видов расчетов, хорошо зарекомендовавших себя в том числе при обосновании проектных решений ЯЭУ различного типа и элементов их систем. Тем не менее, ни один из них не может быть напрямую использован для расчета характеристик термоэмиссионных ТЭП/ЭГК из-за отсутствия программных модулей, предназначенных для численного расчета процессов термоэмиссии. В ходе работы было выявлено, что современный программный код конечно-элементного анализа COMSOL обладает редактируемой модульной архитектурой, что предусматривает возможность расширения функциональности математической модели путем добавления новых или модификация имеющихся программных модулей. Это свойство программного кода позволило внедрить в оригинальный код программный блок, отвечающий за расчет процессов термоэлектронной эмиссии на конструктивных элементах ТЭП/ЭГК с использованием дискретных или представленных в аналитическом виде ВАХ ТЭП. Таким образом был разработан новый программный код COMSOL-ЭГК, реализующий новый подход к решению задачи трехмерного численного расчета электро-теплофизических характеристик термоэмиссионных ЭГК и ТРП в целом.

Как было отмечено ранее, программный код COMSOL, как и его модифицированный аналог COMSOL-ЭГК, обладает открытой редактируемой архитектурой программного кода и имеет модульную структуру. На рисунке 12 в схематичном виде изображена модульная структура программного кода [47]. На рисунке также отмечены модули, которые в ходе настоящей работы были модифицированы и использованы для численного расчета характеристик ТЭП и ЭГК.

Разработанный код COMSOL-ЭГК позволяет решать мультифизические задачи методом конечных элементов, которые описываются комбинацией различных уравнений в частных производных и благодаря этому производится комплексный анализ физической модели. Главными особенностями программного кода COMSOL-ЭГК являются

- возможность создания собственных мультфизических задач с помощью комбинаций различных уравнений в частных производных,
- эффективное взаимодействие программных модулей – добавление новых и модификация имеющихся программных модулей,
- наличие инструментов автоматизированного проектирования для моделирования в одномерном, двухмерном и трехмерном пространстве,
- интеграция с другими системами автоматизированного проектирования - AutoCAD, SolidWorks и системами математического анализа - MatLab.

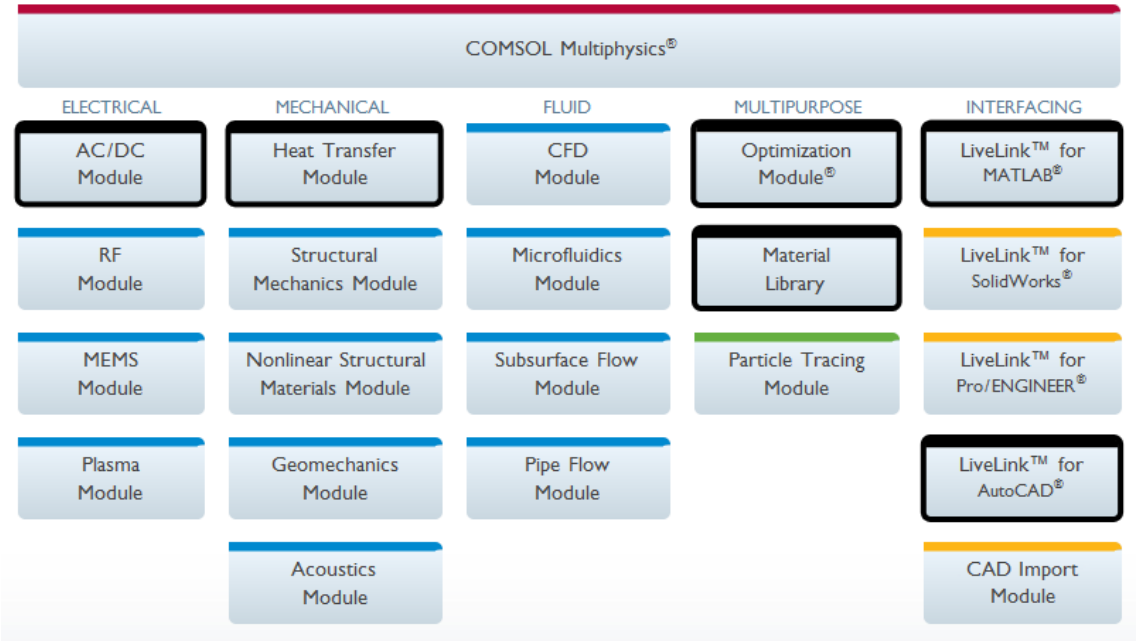


Рис. 12. Модульная структура программного кода COMSOL-ЭГК [47].

В связи с тем, что разработанный программный код обладает редактируемой модульной архитектурой, это открывает возможность расширения функциональности математической модели путем добавления новых физических разделов – нейтронной физики, термомеханики, теплогидравлики и др., что позволит в перспективе провести сквозной расчет ТРП средствами одного программного кода.

Таким образом, COMSOL-ЭГК предоставляет пользователям полный спектр инструментов для расчета физических характеристик ТЭП/ЭГК, а в перспективе и всего ТРП: 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. Как было отмечено ранее, программный код COMSOL-ЭГК может взаимодействовать с программным кодом MATLAB, что позволяет использовать напрямую из программной среды MATLAB данные, получаемые в результате алгоритма аппроксимации экспериментальных ВАХ ТЭП, подробно описанного во второй главе диссертации.

3.2. Конструктивная форма лабораторного ТЭП

В настоящей работе проводится численный расчет характеристик экспериментального лабораторного ТЭП в составе электрофизического стенда УСП-4 лаборатории исследования фундаментальных и прикладных проблем прямого преобразования различных видов энергии.

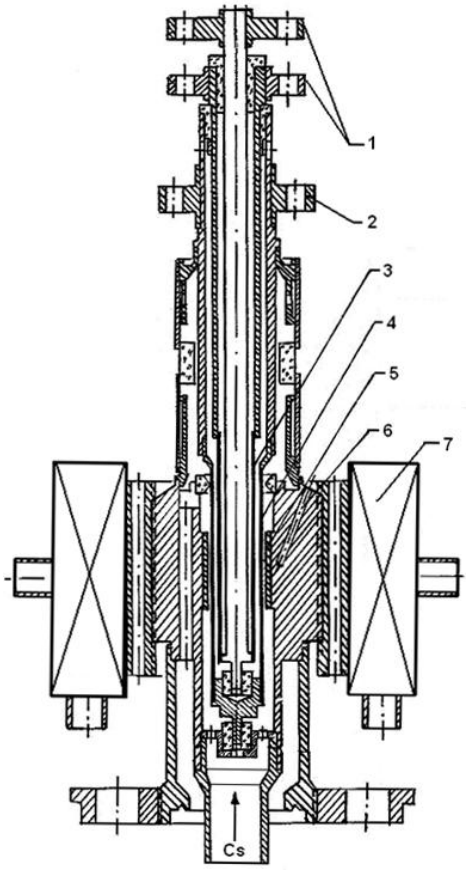


Рис. 13. Принципиальная схема лабораторного ТЭП цилиндрической геометрии [66, 73]: 1 – токовыводы нагревателя; 2 – токовывод эмиттера; 3 – нагреватель; 4 – эмиттер; 5 – коллектор; 6 – термопара коллектора; 7 – теплообменник системы охлаждения коллектора.

Лабораторный ТЭП цилиндрической геометрии обладает сложной структурой, состоящей из разнородных и взаимосвязанных конструктивных элементов. Схема лабораторного ТЭП изображена на рис. 13.

Существенная пространственная неравномерность температуры и тепловых потоков в элементах ТЭП, обусловленная конструктивными особенностями такого устройства, создает условия, при которых использование одномерных математических моделей для расчета электро-теплофизических характеристик ТЭП не представляется возможным без значительной потери точности получаемых результатов.

Каждый промежуточный этап проведения эксперимента, начиная от планирования эксперимента и разработки экспериментального устройства до обработки полученных экспериментальных данных, требует проведения высокоточных вариантных расчетов характеристик экспериментального ТЭП.

Такие расчеты проводятся с целью [66, 73]

– обоснования разрабатываемой конструкции ТЭП как прототипа ЭГЭ;

– определения режимов работы лабораторного ТЭП (планирование эксперимента);

– определения допустимого диапазона параметров рабочего процесса (в частности, мощности нагревателя, температуры и расхода охлаждающей среды) и выбор оптимальных характеристик, которые могут быть использованы в различных проектных решениях для термоэмиссионных ЯЭУ второго и нового поколений;

– определения тепловых и электрических характеристик лабораторного ТЭП, которые не могут быть непосредственно измерены при проведении эксперимента.

3.3. Основные этапы моделирования задачи в среде COMSOL-ЭГК

Как отмечалось ранее, решение любой задачи в программной среде COMSOL-ЭГК 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 исполь-

зованием разнообразных численных решателей. В результате внедрения в оригинальный код программного блока, отвечающего за математическое моделирование процессов термоэлектронной эмиссии на конструктивных элементах ТЭП/ЭГК, была осуществлена возможность численного расчета тепловой и сопряженной с ней электрической задач для термоэмиссионных устройств в трехмерной постановке с использованием экспериментальных данных о ВАХ ТЭП. Основные этапы моделирования задачи расчета электро-теплофизических характеристик ТЭП/ЭГК проводились в следующей последовательности:

- выбор размерности математической модели (1D, 2D или 3D), определение физического раздела (сопряженный стационарный анализ температурных и электрических полей);
- определение рабочей области и построение геометрической модели ТЭП/ЭГК либо средствами программной среды COMSOL-ЭГК, либо путем импорта из других системам автоматизированного проектирования (AutoCAD, SolidWorks и др.);
- задание дискретных экспериментальных данных о ВАХ ТЭП, либо импорт данных, полученных в результате работы алгоритма аппроксимации в программной среде MATLAB, описанного в главе 2;
- указание теплофизических и электромагнитных свойств конструкционных материалов и начальных условий;
- задание граничных условий (объемные источники тепла, тепловые потоки через моделируемые поверхности ТЭП/ЭГК, источники электрического тока, заземление и др.);
- генерация конечно-элементной расчетной сетки модели;
- определение параметров решающего устройства и запуск расчета;
- постобработка полученных результатов.

Разработанный программный код COMSOL-ЭГК был использован для численного расчета тепловых и электрических процессов в лабораторном экспериментальном ТЭП. Моделируемое устройство имеет цилиндрическую геометрию электродов (прототип ЭГЭ) и предназначен для ресурсных испытаний, проводимых в

обоснование выходных характеристик эффективных пар электродных материалов [73, 88].

3.4. Разработка трехмерной численной модели лабораторного ТЭП

Важно отметить, что характер распределения температурного поля и поля напряжения по конструктивным элементам моделируемого устройства определяется не только конструкцией электродов, но и конструкцией всех окружающих электроды элементов, а также условиями нагрева эмиттера и охлаждения коллектора. Это приводит к необходимости включения в расчетную модель практически всех конструктивных элементов лабораторного ТЭП.

Расчетная модель лабораторного ТЭП, разработанная в трехмерной геометрии с помощью средств геометрического моделирования программных сред COMSOL-ЭГК, SolidWorks и AutoCad, представлена на рис. 14. Разработанная геометрическая модель была импортирована в программный код COMSOL-ЭГК, модернизирована под нужды программы и использована для последующего численного расчета тепловых и электрических процессов в лабораторном ТЭП. На рисунке 14-а представлен фрагмент трехмерной модели ТЭП – его рабочая область и нагреватель.

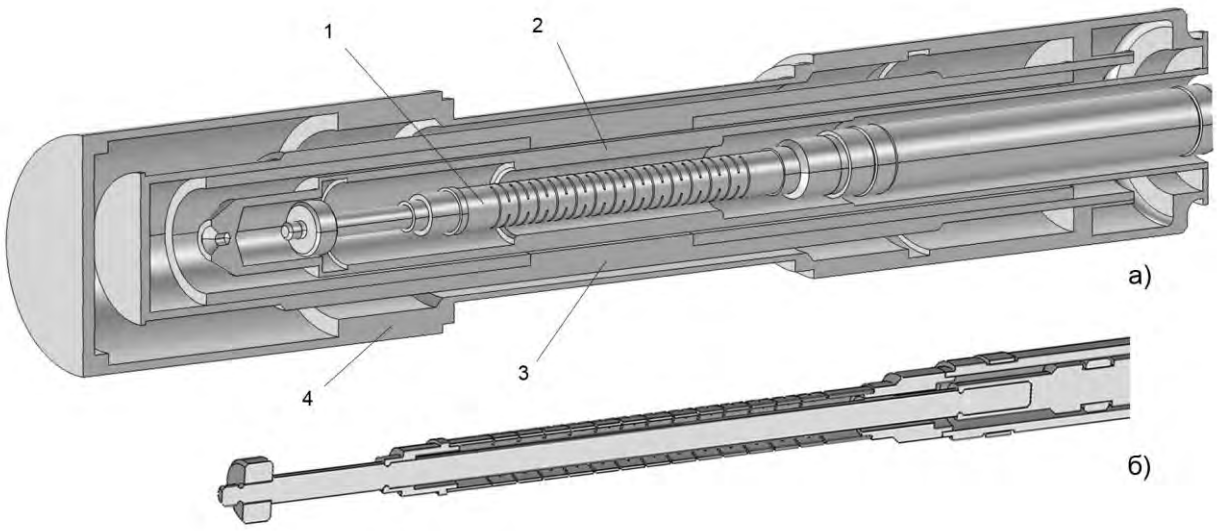


Рис. 14. Трехмерная расчетная модель лабораторного ТЭП
а) – фрагмент модели лабораторного ТЭП (рабочая область): 1 – нагреватель, 2 – эмиттер, 3 – коллектор, 4 – корпус; б) – фрагмент модели нагревателя (продольное сечение).

Осесимметричная часть модели ТЭП (рис. 14-а) показана в осевом сечении, а нагреватель, не обладающий осевой симметрией в рабочей области, представлен полностью в трехмерном виде. На рисунке 14-б изображено продольное сечение нагревателя. Аналогичная расчетная модель была создана для прибора типа 0100.

Конструкция лабораторного ТЭП моделировалась многокомпонентной средой, представляющей конструкционные материалы и области, отличающиеся как теплофизическими, так и электрическими свойствами. Важно отметить, что программный код COMSOL-ЭГК обладает встроенной библиотекой свойств материалов, часть из которых была использована в расчетном обосновании электротеплофизических характеристик лабораторного ТЭП. В библиотеке представлены химические элементы, минералы, сплавы металлов, окислы, стали, термоизоляторы, полупроводники, оптические материалы и т.д. Для каждого из них содержится 24 ключевых свойства, в том числе тепловые, электромагнитные и механические. Эти свойства представлены как функции параметров температуры и ряда других. Из встроенной библиотеки программного кода были использованы электротеплофизические свойства для сплава NbZr, монокристаллического W и Mo, а также оксида алюминия Al_2O_3. Свойства остальных конструкционных материалов и сред, необходимых для расчета тепловых и электрических характеристик лабораторного ТЭП, были взяты из работы [89]. Материальный состав моделируемого устройства схематично представлен на рис. 15.

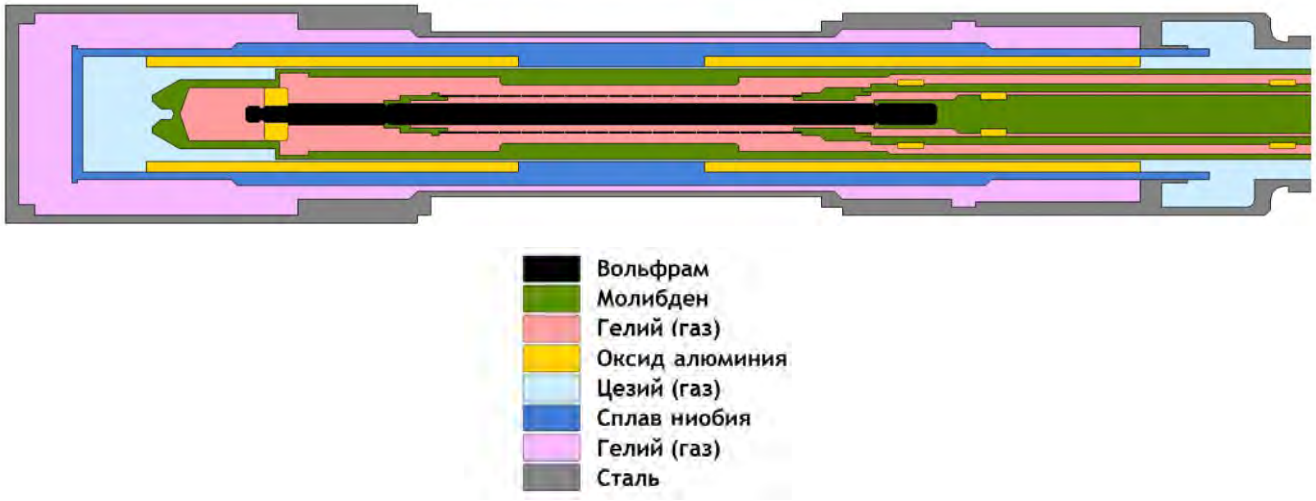


Рис. 15. Материальный состав расчетной модели лабораторного ТЭП

3.5. Математическая модель лабораторного ТЭП в среде COMSOL-ЭГК

3.5.1. Система математических уравнений

Математическая модель базируется на численном решении уравнений электростатики и сопряженного теплообмена. Замыкающим соотношением системы уравнений выступают экспериментальные локальные ВАХ ТЭП, прошедшие математическую обработку согласно разработанной методике аппроксимации, описанной в главе 2.

Пространственное распределение температуры в моделируемом устройстве описывается трехмерным стационарным уравнением переноса тепла. Тепловыделение в материале конструкционных элементов, обусловленное 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. Классическое нестационарное уравнение теплопереноса имеет вид [90, 91]

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad , \tag{3.1}$$

где T – температура среды; ρ – плотность среды; C_P – теплоёмкость среды; k – коэффициент теплопроводности среды; Q – объемный источник тепловыделения, моделирующий генерацию и перенос тепла в радиационных и электрических процессах.

Джоулево тепловыделение, обусловленное прохождением электрического тока в конструкционных материалах, определяется плотностью электрического тока и электропроводностью конструкционных материалов [90, 91]:

$$Q_{joul} = \frac{\vec{j}^2}{\sigma}, \tag{3.2}$$

где $\vec{j}$ – вектор плотности электрического тока, σ – электропроводность конструкционного материала.

Пространственное распределение электрического потенциала в неоднородной электропроводящей среде описывается классическим уравнением Пуассона [90, 91], включающим пространственно зависимый коэффициент электропроводности:

$$\Delta\varphi = F, \tag{3.3}$$

где φ – электрический потенциал; F – объемный источник/сток электрического заряда.

Связь плотности электрического тока с электрическим потенциалом определяется соотношением [90, 91]

$$\vec{j} = -\sigma \cdot \nabla\varphi. \tag{3.4}$$

Как отмечалось ранее, для замыкания системы уравнений используются локальные ВАХ ТЭП на основе экспериментальных ВАХ ТЭП с эффективными электродными парами $W_{моно}$-$W_{поли}$ и Pt-ВХ2У. Для расширения возможностей программного кода COMSOL-ЭГК исходный программный блок для применения в расчетах дискретных экспериментальных ВАХ ТЭП в настоящей работе был заменен на блок, реализующий описанную в главе 2 методику, основанную аппроксимации экспериментальных данных многомерными функциями. Как отмечалось в главе 2, алгоритм расчета неизвестных коэффициентов аппроксимирующих функций и выбора из общего массива функций, удовлетворяющих заданному критерию точности, был реализован с помощью программного кода MATLAB. Разработанная методика организовывает непосредственную связь между алгоритмом аппроксимации в программном коде MATLAB и программным блоком кода COMSOL-ЭГК, отвечающем за используемые в расчетах данные о локальных ВАХ ТЭП.

Поток энергии с поверхности эмиттера за счет электронов эмиссии рассчитывается по зависимости [66, 92, 93]:

$$q_s^{emitt} = j(u + V_b). \tag{3.5}$$

Генерируемые электронами эмиссии тепловые потоки распределяются вдоль электродов в соответствии с распределением плотности электрического тока и температуры электродов. Электронное охлаждение для модели лабораторного ТЭП учитывается только на цилиндрической поверхности эмиттера. К описанной

системе уравнений также добавляются различного рода граничные условия, описанные в следующем разделе.

3.5.2. Начальные и граничные условия

В настоящей работе процесс трехмерного численного расчета электротеплофизических характеристик лабораторного ТЭП разбит на два основных этапа:

– расчет ВАХ электрического нагревателя лабораторного ТЭП и сравнение расчетных данных с экспериментальными для двух режимов его работы (в вакууме и гелиевой среде);

– расчет характеристик лабораторного ТЭП при фиксированной мощности электрического нагревателя ~700 Вт (электрический ток нагревателя 120 А, напряжение ~5,9 В) для двух видов материалов электродной пары – $W_{моно}$-$W_{поли}$ и Pt-ВХ2У.

Таким образом, на первом этапе проводится верификация модели джоулева нагрева – выделение тепла в элементах конструкции электронагревателя при протекании по нему электрического тока, которое в свою очередь обуславливает нагрев эмиттера и других конструкционных элементов ТЭП. На втором этапе электрический ток нагревателя фиксируется на величине 120 А (что соответствует мощности нагревателя ~700 Вт), затем проводится численный расчет тепловых и электрических характеристик ТЭП для различных величин электрического тока ТЭП (с целью определения ВАХ ТЭП).

Расчет характеристик лабораторного ТЭП проводится при следующих граничных условиях:

– температура стенок внешней вакуумной камеры принята равной 300 К (необходимо для расчета переноса тепла в радиационных процессах);

– конструкционные элементы ТЭП взаимодействуют со стенками вакуумной камеры только посредством лучистого теплообмена;

– для электронагревателя варьируемым параметром выбран электрический ток нагревателя на одном из его токовыводов, на другом токовыводе задано граничное условие типа «заземление» (электрическое напряжение равно нулю);

– аналогично и для всего ТЭП – варьируемым параметром также выбран электрический ток ТЭП на одном из токовыводов, а на другом – «заземление»;

– На цилиндрической поверхности эмиттера задается поток энергии за счет электронов эмиссии (для уравнения теплопереноса) и локальная ВАХ ТЭП (для уравнения электростатики);

– на внешней границе металлического корпуса ТЭП, которая соответствует области контакта с водным теплоносителем, охлаждающего коллектор, задается граничное условие первого рода – постоянная температура, равная 300 К.

3.5.3. Упрощения и допущения

– Все соединения являются идеальными как для теплопереноса, так и для электростатики (отсутствуют термо- и электросопротивления соединений).

– Граничное условие в области контакта теплоносителя с корпусом ТЭП упрощено до граничного условия первого рода по температуре.

– В модели ТЭП не учтены процессы термического расширения материалов конструкции – все габаритные размеры конструкционных элементов моделируемого ЭГК приняты для «холодного» состояния.

– Задание термоэлектронной эмиссии осуществляется только на цилиндрической поверхности эмиттера (на других конструкционных элементах этот эффект не учтен).

– Плотность электрического тока с поверхности эмиттера зависит только от температуры эмиттера и межэлектродного напряжения (при прочих фиксированных параметрах – температуры коллектора, давления цезия, величины МЭЗ).

– Давление цезия имеет равномерное распределение по всей длине ТЭП (не учтены пространственные эффекты, связанные с перепадом давления цезия).

3.6. Создание конечно-элементной сетки расчетной модели ТЭП

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 МЭЗ. По этой причине в этих областях сетка генерировалась более плотной.

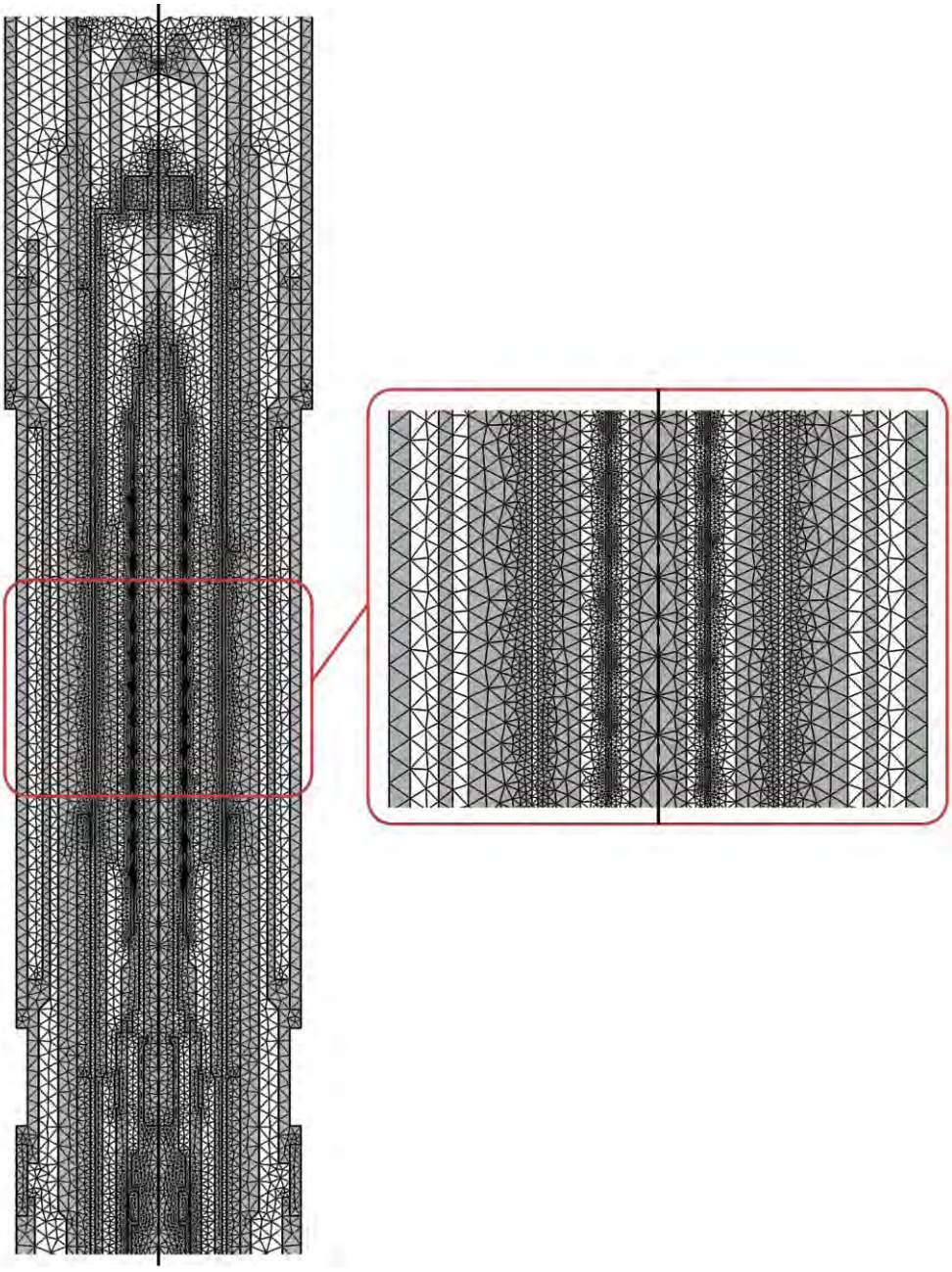


Рис. 16. Фрагмент сгенерированной расчетной сетки геометрической модели лабораторного ТЭП (продольное сечение)

Разбиение модели лабораторного ТЭП на конечные элементы производилось программой COMSOL-ЭГК в полуавтоматическом режиме с выбором типа разбиения (квадратная или треугольная форма расчетных ячеек), а также минимального и максимального размера ячеек, который варьировался для различных сред расчетной сетки. В ходе работы была построена расчетная сетка ТЭП, состоящая из более чем 200000 расчетных ячеек, имеющих тетраэдральную форму. Фрагмент созданной расчетной сетки представлен на рис. 16 (поперечное сечение модели ТЭП).

3.7. Результаты трехмерного расчета тепловых и электрических характеристик лабораторного ТЭП

Разработанный программный код COMSOL-ЭГК был использован для расчета тепловых и электрических процессов в лабораторном ТЭП с цилиндрической геометрией электродов (рис. 14), предназначенном для ресурсных испытаний, проводимых в обоснование электрофизических характеристик эффективных пар электродных материалов [73, 74].

С целью верификации и оценки точности результатов расчета, получаемых с помощью программного кода COMSOL-ЭГК, процесс трехмерного расчетного обоснования характеристик лабораторного ТЭП в настоящей работе был разделен на два этапа. Первый этап заключался в проведении расчета ВАХ электрического нагревателя в составе лабораторного ТЭП для двух режимов его работы (в вакууме и гелиевой среде), а также сравнении расчетных данных с экспериментальными. На данном этапе проводилась верификация модели джоулева нагрева (выделение тепла в элементах конструкции электронагревателя при протекании по нему электрического тока). Исходным параметром такого расчета являлась величина входного электрического тока нагревателя, которая в процессе расчета варьировалась в диапазоне от 0 до 120 А. В результате расчета оценивалось электрическое напряжение на одном из токовыводов нагревателя, таким образом вычислялась зависимость электрического тока от напряжения – ВАХ нагревателя.

На втором этапе входной электрический ток нагревателя был зафиксирован на величине 120 А, что соответствует мощности нагревателя ~700 Вт при величине напряжения ~5,9 В. Затем производился численный расчет электро-теплофизических характеристик лабораторного ТЭП для различных величин электрического тока ТЭП в том числе с целью определения ВАХ ТЭП.

Таким образом, в ходе настоящей работы была выполнена серия расчетов электро-теплофизических характеристик лабораторного ТЭП с генерацией тока при мощности нагревателя ~700 Вт для двух видов материалов электродной пары – $W_{моно}$-$W_{поли}$ и Pt-ВХ2У. Давление паров цезия в обоих вариантах принималось равным 2 мм рт. ст., что соответствует ожидаемой величине для ЭГЭ.

Базовыми результатами расчета характеристик лабораторного ТЭП с помощью программного кода COMSOL-ЭГК являются стационарные распределения температуры и электрического напряжения по конструкционным элементам моделируемого устройства. Затем по полученным распределениям рассчитываются выходные энергетические характеристики устройства – ВАХ ТЭП, а также зависимости электрической мощности и к.п.д. лабораторного ТЭП от входного электрического тока.

На рисунке 17 представлено сравнение расчетных ВАХ нагревателя в двух режимах его работы с экспериментальными данными, полученными в лаборатории исследования фундаментальных и прикладных проблем прямого преобразования различных видов энергии. На рисунке 18 изображены полученные в результате расчета распределения температуры по длине перфорированной вольфрамовой трубки – основного конструктивного элемента нагревателя – для различных величин протекающего по нагревателю электрического тока. На рисунке 19 изображены двумерные распределения напряжения и температуры по конструктивным элементам нагревателя в составе модели лабораторного ТЭП при величине протекающего по нагревателю электрического тока 120 А. На рисунке 20 представлен фрагмент распределения температурного поля по конструктивным элементам лабораторного ТЭП (продольное сечение). На рисунке 21 изображены распределе-

ния температуры по длине эмиттера при различных величинах входного электрического тока ТЭП для различных материалов электродных пар.

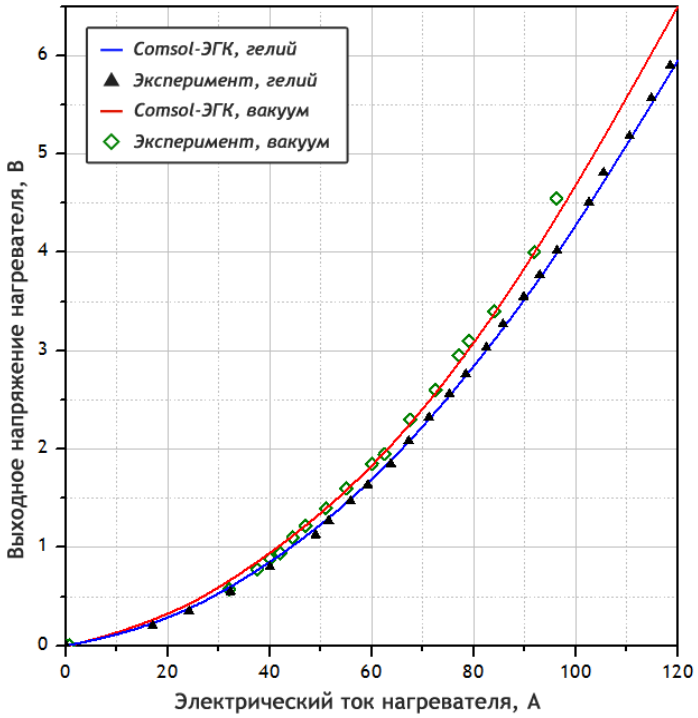


Рис. 17. ВАХ нагревателя лабораторного ТЭП в двух режимах его работы. Сравнение расчетных данных с экспериментальными

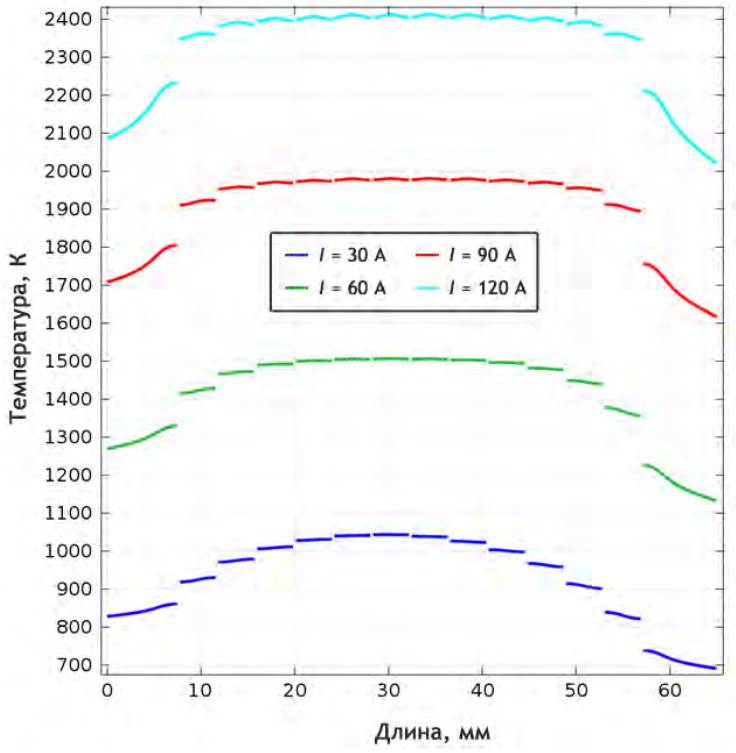


Рис. 18. Распределение температуры вольфрамовой трубки нагревателя для различных величин протекающего по нему электрического тока

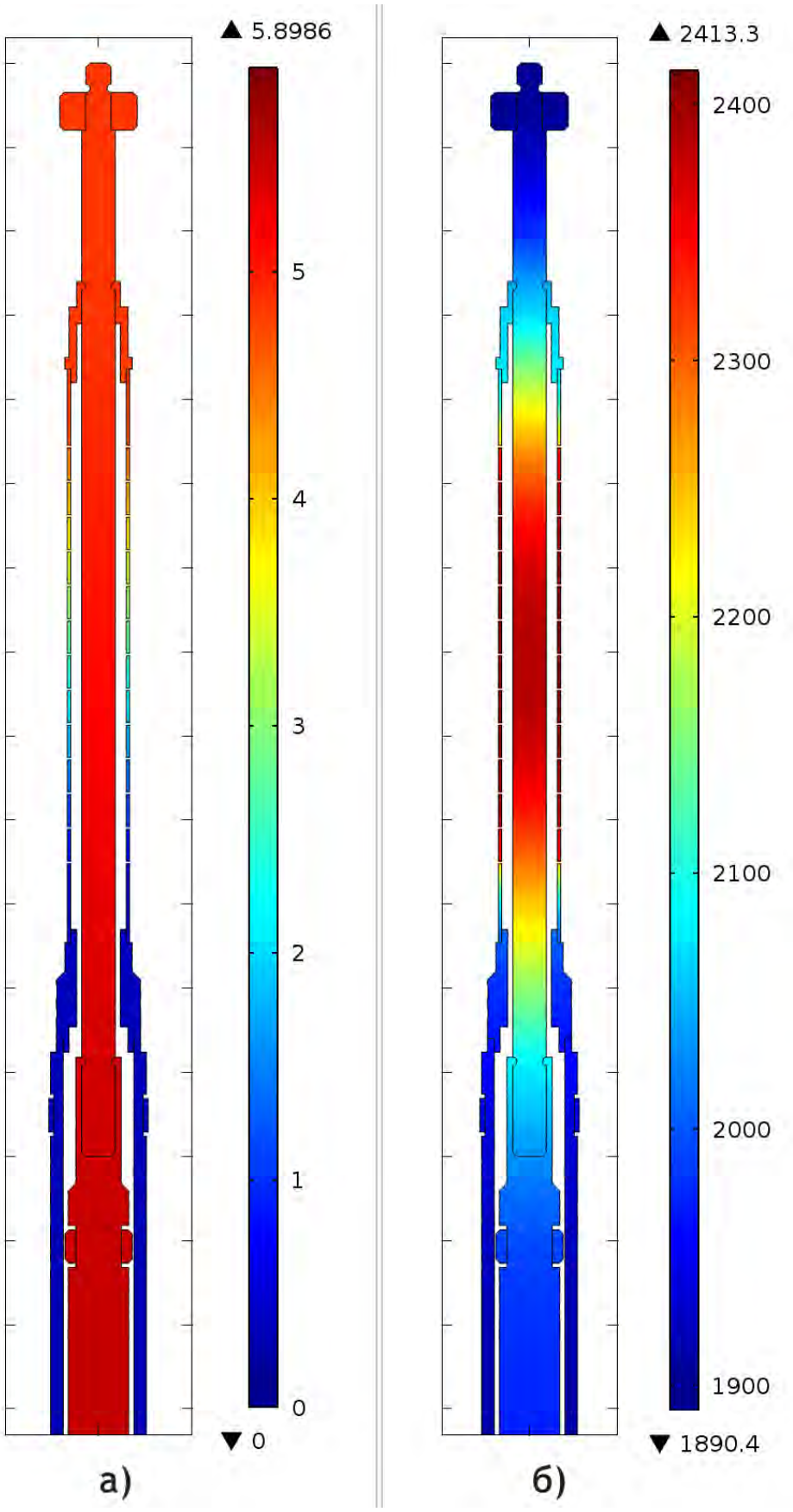


Рис. 19. Двумерные распределения напряжения и температуры по конструктивным нагревателя лабораторного ТЭП при электрическом токе нагревателя 120 А: а) – поле напряжения; б) – поле температур

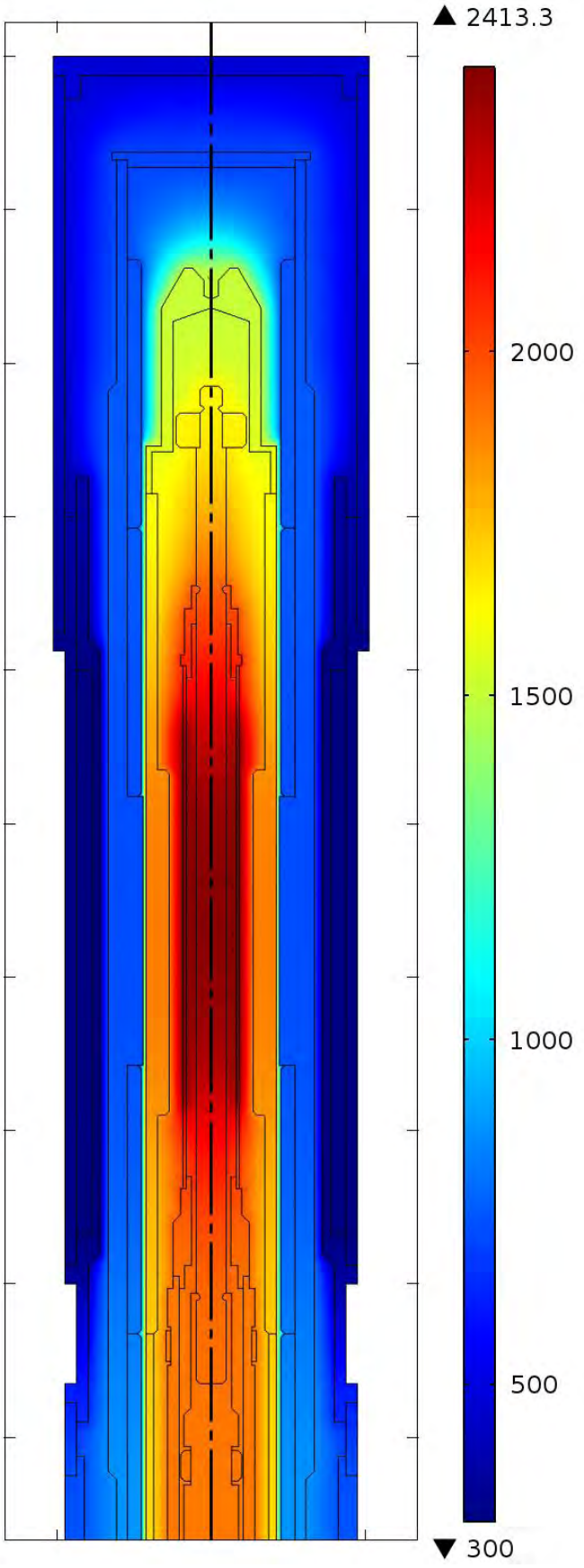


Рис. 20. Двумерное распределение температуры по конструктивным элементам лабораторного ТЭП для электродной пары $W_{моно}$-$W_{поли}$ и величины электрического тока ТЭП 60 А

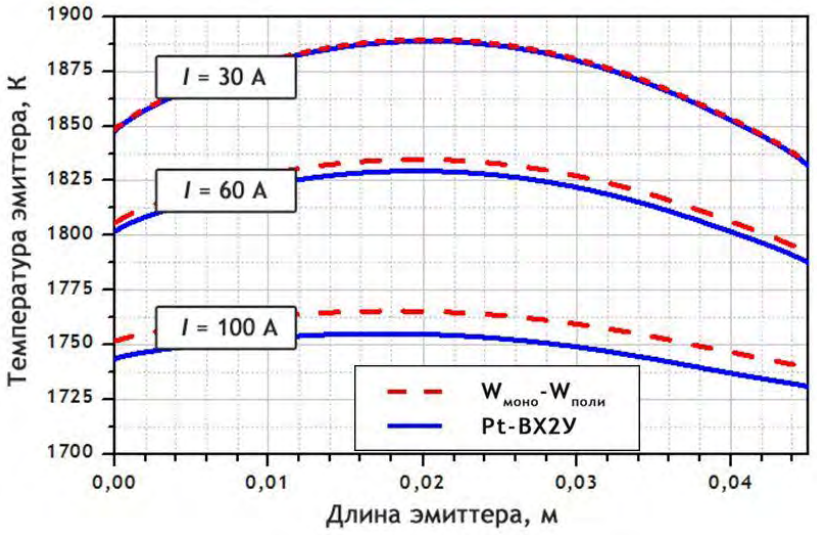


Рис. 21. Распределение температуры по длине эмиттера при различных величинах входного электрического тока ТЭП для двух видов материалов электродных пар

На основе полученных распределений температуры и напряжения по конструкционным элементам лабораторного ТЭП были рассчитаны ВАХ ТЭП и зависимость генерируемой электрической мощности ТЭП от входного электрического тока, которые представлены на рисунках 22 и 23, соответственно. Расчеты проведены для двух видов материалов электродных пар.

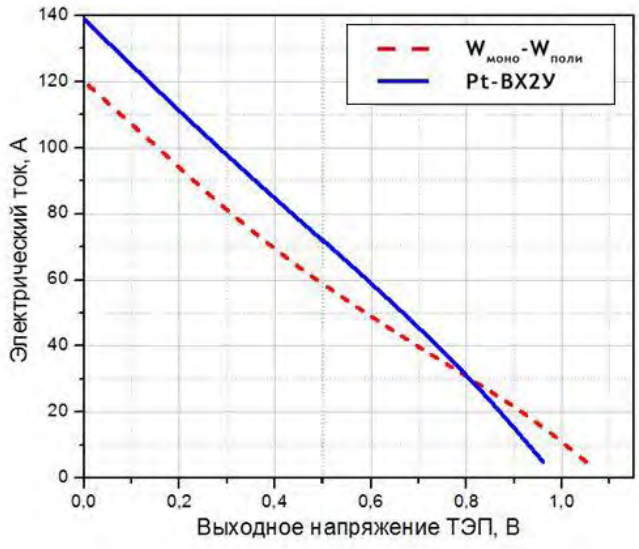


Рис. 22. Зависимость электрического тока от выходного напряжения лабораторного ТЭП для различных материалов электродных пар

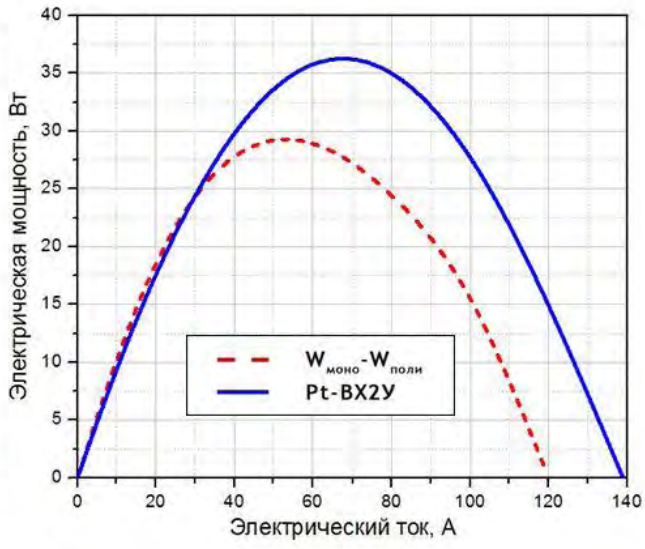


Рис. 23. Зависимость генерируемой ТЭП электрической мощности от электрического тока для различных материалов электродных пар

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3

Разработанный программный код COMSOL-ЭГК был использован для трехмерного расчета тепловых и электрических характеристик лабораторного ТЭП с цилиндрической геометрией электродов, предназначенном для ресурсных испытаний, проводимых в обоснование выходных электрических характеристик ЭГЭ с различными эффективными электродными парами материалов.

Один из этапов моделирования лабораторного ТЭП был посвящен верификации и оценки точности результатов численного расчета эффекта джоулева нагрева, возникающего при протекании электрического тока по нагревателю ТЭП. На основании сравнительного анализа расчетных и экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что средняя относительная погрешность результатов расчета ВАХ нагревателя не превышает 1%, что свидетельствует о высоком качестве получаемых с помощью программного кода COMSOL-ЭГК результатов расчета.

На втором этапе была выполнена серия трехмерных расчетов тепловых и электрических характеристик стационарного режима работы экспериментального лабораторного ТЭП при фиксированной мощности нагревателя ~700 Вт для двух электродных пар материалов – $W_{моно}$-$W_{поли}$ и Pt-ВХ2У. В результате расчетов получены пространственные распределения электрического напряжения и температуры по конструктивным элементам лабораторного ТЭП для различных величин электрического тока ТЭП. На основании полученных результатов были рассчитаны ВАХ ТЭП и зависимость генерируемой электрической мощности ТЭП от электрического тока.

Применение разработанного программного кода COMSOL-ЭГК для расчета характеристик ТЭП позволяет определять и обосновывать исходные данные для разработки эффективной программы-методики проведения экспериментов на ТЭП с ядерным и неядерным нагревом. Важно отметить, что одной из перспективных задач обоснования конструкции ТЭП является расчетное исследование пространственного влияния работ выхода эмиттера и коллектора (их эмиссионной неоднородности) на характеристики лабораторного ТЭП.

4. Расчет электро-теплофизических характеристик унифицированного ЭГК в составе петлевого канала исследовательского реактора ИВВ-2М

На втором этапе верификации программного кода COMSOL-ЭГК в качестве примера его использования на реальной конструкции унифицированного ЭГК был проведен расчет в трехмерной геометрии тепловых и электрических характеристик унифицированного ЭГК в ПК по результатам испытаний в реакторе ИВВ-2М. Полученные ниже результаты подтверждают эффективность использования разработанной в диссертации методики расчета электро-теплофизических характеристик ЭГК на обязательном этапе обоснования при реакторных испытаниях термоэмиссионных ЯЭУ второго и нового поколений.

4.1. Современное состояние работ по термоэмиссионным КЯЭУ

Среди возможных типов КЯЭУ в проектных разработках в России наибольшее развитие получили термоэмиссионные ЯЭУ с ЭГК, встроенными в активную зону реактора-преобразователя. Прототипом разрабатываемых в настоящее время термоэмиссионных ЯЭУ второго и нового поколений является КЯЭУ «Топаз» разработки НПО «Красная Звезда» (в настоящее время АО «Красная Звезда»), научный руководитель и главный конструктор-технолог ЭГК и ТРП – ФЭИ (в настоящее время АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»). К настоящему времени в АО «Красная Звезда» с кооперацией предприятий Росатома и Роскосмоса разработан параметрический ряд термоэмиссионных ЯЭУ второго поколения для использования в составе КА различного функционального назначения. Основные характеристики некоторых ЯЭУ представлены в табл. 4.1 [1].

Таблица 4.1. Характеристики термоэмиссионных ЯЭУ второго поколения

Характеристика	ЯЭУ-25	ЯЭУ-50	ЯЭУ-100	ЯЭУ-400
Тип ТРП	На промежуточных нейтронах		На быстрых нейтронах	
Теплоноситель	Na-K	Na-K	Na-K	Li

Полезная электрическая мощность, кВт: форсированный режим номинальный режим	 80 30	 105 40	 150 70	 400 60
Максимальная температура теплоносителя, К	873	873	973	1173
Загрузка по U^{235}, кг	38,5	51	250	280
Масса ЯЭУ, кг	3000	4200	5600	7250
Удельная масса ЯЭУ (в расчете на форсированную мощность), кг/кВт$_{эл}$	37,5	40	37,3	18

По каждой из представленных в таблице характеристик ЯЭУ выполнен комплекс проектных работ, причем для ЯЭУ-25 уровень проработки соответствует стадии эскизного проекта, по остальным ЯЭУ – стадии технического задания.

Основными отличительными особенностями термоэмиссионных ЯЭУ второго и нового поколений являются [1]:

– диапазон электрической мощности от десятков до сотен киловатт с возможностью двух- и трехкратного форсирования;

– ресурс работы 7 лет и более;

– многоэлементные унифицированные ЭГК;

– ТРП на промежуточных или быстрых нейтронах;

– цезиевая система на основе регенерации цезия с многократным использованием его запаса при эффективном удалении из ЭГК газообразных продуктов деления;

– выходное напряжение на клеммах ТРП не менее 125 В;

– разделенные на группы органы регулирования, управляемые независимыми приводами, обеспечивающими управление мощностью и гашение ТРП;

– высокий уровень ядерной и радиационной безопасности на всех этапах жизненного цикла ЯЭУ, благодаря использованию в составе РП стержней безопасности, а также систем специальных средств и мер;

– раскладывающийся ХИ на тепловых трубах.

Достоверность технических параметров ЯЭУ второго и нового поколений базируется на опыте создания и эксплуатации термоэлектрических и термоэмиссионных ЯЭУ первого поколения, а также на результатах последнего двадцатилетнего периода целенаправленных расчетно-теоретических и экспериментальных исследований, следующего за программами создания ЯЭУ «Бук» и «Топаз». Тем не менее, существенное увеличение мощности и ресурса рассматриваемых ЯЭУ по сравнению с их аналогами, которое достигается как за счет увеличения размерности отдельных узлов и систем (ТРП, системы теплоотвода, радиационной защиты и др.), так и благодаря реализации качественно новых проектных решений (модернизация конструктивных форм ЭГК, включение в состав ТРП стержней безопасности, создание новой долгоресурсной цезиевой системы и др.), требует детального проектного, экспериментального и расчетного обоснования характеристик рассматриваемых термоэмиссионных ЯЭУ, обеспечивающих условия их успешного функционирования в составе КА различного функционального назначения. Решение новой и более сложной задачи проведения НИОКР в обоснование проектных решений при разработке и испытаниях ЯЭУ второго и нового поколений не может быть реализовано без привлечения современных технологий моделирования физических процессов с использованием трехмерных математических моделей с целью получения достоверных данных о характеристиках ЭГК и ТРП в целом.

Таким образом, в настоящей работе решается задача расчетно-экспериментального обоснования тепловых и электрических характеристик унифицированного ЭГК в составе ПК исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М. Реактор ИВВ-2М является установкой широкого спектра задач, предназначенного в том числе для экспериментального исследования и испытания по отработке унифицированных ЭГК, в том числе в условиях двухрежимной работы [94, 95]. В работе проводится сравнение экспериментально полученных на реакторе ИВВ-2М характеристик ЭГК с расчетными характеристиками, полученными с помощью разработанного кода COMSOL-ЭГК с использованием замыкающих соотношений по энерговыделению топливных сердечников унифицированного ЭГК, по-

лученному в результате нейтронно-физического расчета активной зоны ИВВ-2М, экспериментальных данных о ВАХ ТЭП, полученных на электрофизическом стенде, и экспериментальных данных о температуре чехловой трубы рабочего участка ПК реактора ИВВ-2М [96].

4.2. Исходные данные для верификации кода COMSOL-ЭГК по результатам испытаний унифицированного ЭГК в составе петлевого канала реактора ИВВ-2М

4.2.1. Исследовательский ядерный реактор ИВВ-2М

Исследовательский ядерный реактор ИВВ-2М является легководным реактором бассейнового типа. Бассейн реактора расположен в бетонном массиве, покрытом изнутри герметичной оболочкой из нержавеющей стали [94, 95]. В нижней части бассейна реактора располагается опорная плита из алюминиевого сплава, в которой имеется 186 установочных отверстий, расположенных по треугольной схеме с шагом 64 мм. Активная зона формируется установкой в опорную плиту шестигранных тепловыделяющих сборок (от 36 до 42 штук), шестигранных бериллиевых блоков отражателя, экспериментальных и облучательных устройств. Топливные сборки, установленные в опорной плите, образую шесть секций. В центре каждой из секций оставляется полость, предназначенная для установки экспериментальных и облучательных устройств внешним диаметром до 60 мм.

Блочная структура активной зоны и отражателя, однотипность и взаимозаменяемость их элементов обеспечивают гибкость конструктивных решений и физических параметров при проведении научных экспериментов и осуществлении производственной деятельности. Одновременно в активной зоне и отражателе реактора облучается до 55 экспериментальных облучательных устройств.

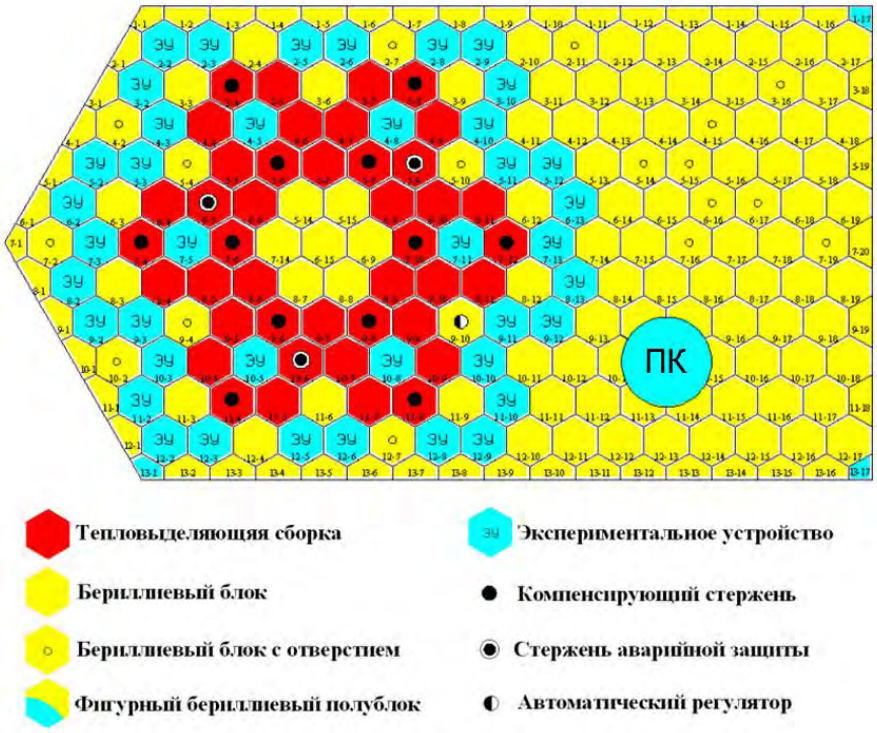


Рис. 24. Картограмма активной зоны исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М [95]

4.2.2. Петлевой канал в составе реактора ИВВ-2М

Испытательная петля или ПК представляет собой отдельный канал в реакторе, снабженный автономным контуром охлаждения с собственными насосами, теплообменниками, подогревателями, аппаратурой для контроля и очистки теплоносителя. В каждой петле осуществляют контроль температуры теплоносителя на входе и выходе, расхода теплоносителя, давления, мощности энерговыделения твэлов, их герметичности, состояния теплоносителя, иногда измеряют температуру твэлов. Контроль тепловыделения в твэлах, в частности в термоэмиссионных твэлах, имеет первостепенное значение при петлевых испытаниях, в особенности для определения таких основополагающих параметров, как КПД, а также для правильной и безопасной организации испытаний. На рисунке 25 представлено поперечное сечение расчётной модели ПК реактора ИВВ-2М, используемой при расчете нейтронно-физических характеристик ПК в программной среде MCNP [97].

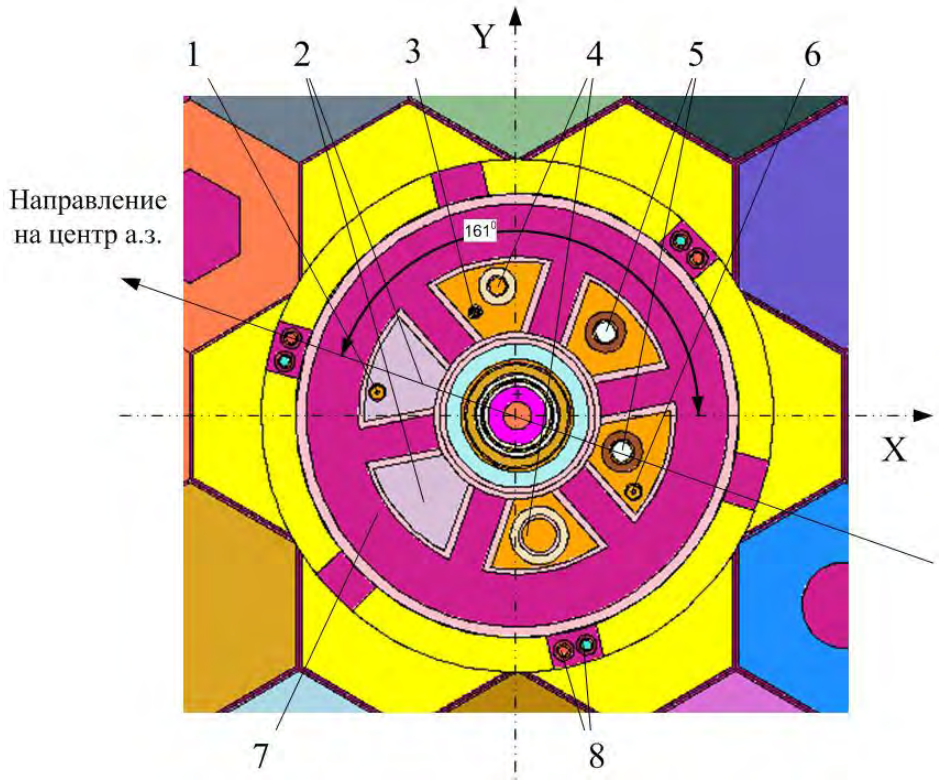


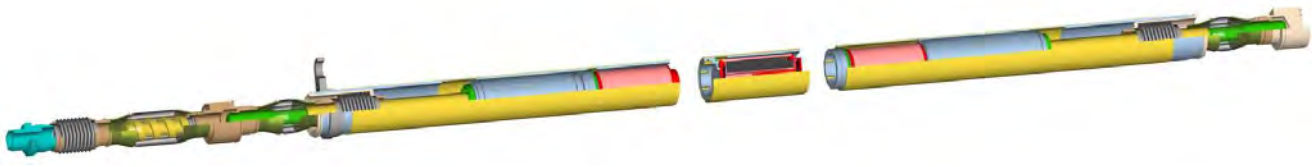
Рис. 25. Поперечное сечение расчётной модели ПК реактора ИВВ-2М: 1 – ДПЗ-1, 2 – труба фарфоровая одноканальная (гомогенно), 3 – проволока в трубе, 4 – цезий с нагревателем, 5 – никелевый стержень в фарфоровой трубе, 6 – ДПЗ-2, 7 – вода, 8 – камеры деления

Трубы фарфоровые одноканальные (сноска 2 на рисунке 25) в двух «ушах» замешаны гомогенно. Трубы с цезием (сноска 4 на рисунке 25) окружены нагревателем, который гомогенизирован. ДПЗ ориентированы вдоль линии, нацеленной на центр а.з. реактора ИВВ-2М. Главным элементом ПК в составе реактора ИВВ-2М является унифицированный ЭГК.

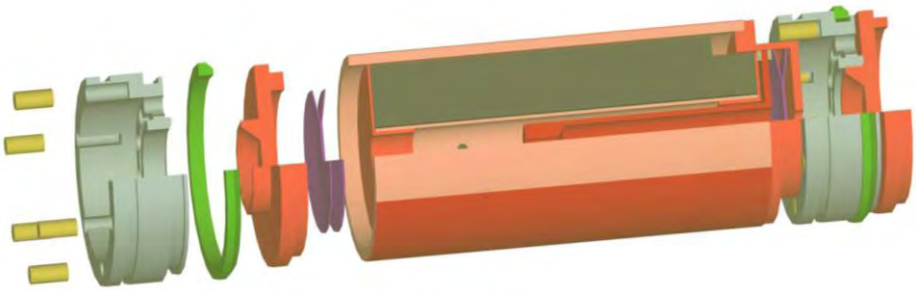
4.2.3. Унифицированный ЭГК в составе петлевого канала

Конструкция унифицированного девятиэлементного ЭГК в составе ПК реактора ИВВ-2М представлена на рис. 26. Конструкция унифицированного ЭГК является базовой для ряда термоэмиссионных ЯЭУ второго поколения и демонстрирует отсутствие отказов по герметичности и электропрочности, стабильность геометрических параметров и выходных электро-теплофизических характеристик в течение длительного ресурса [14]. В ходе экспериментальных исследований и испытаний по отработке унифицированного ЭГК была обоснована возможность создания термоэмиссионного ЭГК повышенной мощности с ресурсом до 7 лет.

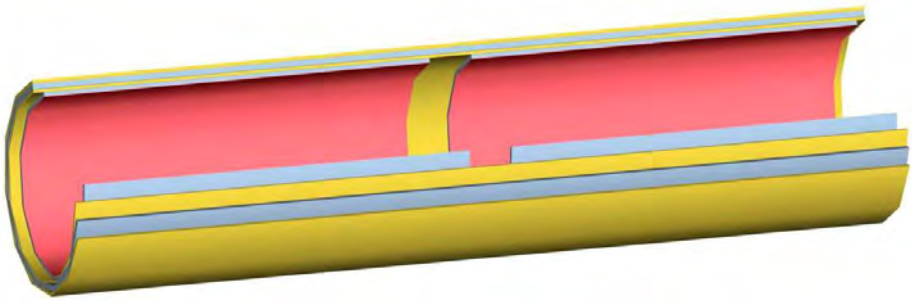
Геометрические характеристики моделируемого ЭГК в составе ПК исследовательского реактора ИВВ-2М соответствуют реальным размерам унифицированного ЭГК с его внутренними ЭГЭ [14, 98].



(а)



(б)



(в)

Рис. 26. Конструктивная схема многоэлементного унифицированного ЭГК в составе ПК реактора ИВВ-2М: а - фрагмент ЭГК с концевыми элементами; б - эмиттерная сборка; в - фрагмент коллекторной сборки

Современный уровень развития вычислительной техники и численных методов позволяет применять детальные схемы реальных конструкций с максимально полным учётом влияющих на работоспособность факторов в процессе их трехмерного математического моделирования. Таким образом, представленная на рисунке 3 конструктивная схема унифицированного ЭГК легла в основу создания трехмерной расчетной модели в программном коде COMSOL-ЭГК.

4.2.4. Распределение энерговыделения в топливных сердечниках унифицированного ЭГК

Распределение энерговыделения в топливных сердечниках унифицированного ЭГК выступает в качестве исходных данных для последующего расчета тепловых и электрических характеристик ЭГК. Для получения распределения энерговыделения ядерного топлива унифицированного ЭГК необходимо провести нейтронно-физический расчет а.з. реактора и непосредственно ПК с входящим в его состав ЭГК. Нейтронно-физический расчет а.з. исследовательского реактора ИВВ-2М проводился сотрудниками лаборатории Исследования фундаментальных и прикладных проблем прямого преобразования различных видов энергии (ГНЦ РФ-ФЭИ) в программной среде MCNP [97]. Технология последующего расчета тепловой мощности ЭГК в ПК ИВВ-2М была также разработана в ГНЦ РФ-ФЭИ и заключается в том числе в использовании предварительно рассчитанных составов облученного топлива, индивидуальном учете отравления бериллиевых блоков и использовании в коде MCNP опции расчета по частям с помощью поверхностных источников. Таким образом, в результате нейтронно-физического расчета по коду MCNP получено трехмерное распределение энерговыделения в топливных сердечниках ЭГК, учитывающее в том числе азимутальные неравномерности энерговыделения, обусловленные положением ЭГК в а.з. реактора ИВВ-2М. Полученные данные были использованы в программном коде COMSOL-ЭГК для теплоэлектрического расчета.

Полученные данные были обработаны аналогично работам [99, 100] с использованием выражения

$$q_v(x,r,\theta) = q_{v0}\left[a_1 + a_2(1 + a_3\cos\theta)\cdot\exp\left(-\frac{R_E - r}{\lambda_n}\right)\right]\cdot\cos\left[\frac{\pi(x-C)}{H_{эфф}}\right], \qquad (4.1)$$

где R_E - радиус эмиттера ЭГК; r – текущий радиус; q_{v0} – нормирующий коэффициент; a_1 и a_2 – коэффициенты, учитывающие вклад деления на быстрых и тепловых (блок-эффект) нейтронах; λ_n – параметр, характеризующий длину пробега тепловых нейтронов в материале сердечника; a_3 – коэффициент, характеризующий азимутальную неравномерность тепловыделения.

Полученные данные распределений объемной плотности тепловыделения по длине, радиусу и азимуту топливных сердечников ЭГК затем были использованы в качестве исходных данных в расчетном коде COMSOL-ЭГК для численного моделирования электро-теплофизических характеристик ЭГК. В качестве примера учтенной в расчетном коде COMSOL-ЭГК азимутальной неоднородности энерговыделения топлива его распределение показано на рис. 27. Аналогично учитывалось в расчетах неравномерность распределения по высоте и радиусу топлива ЭГК.

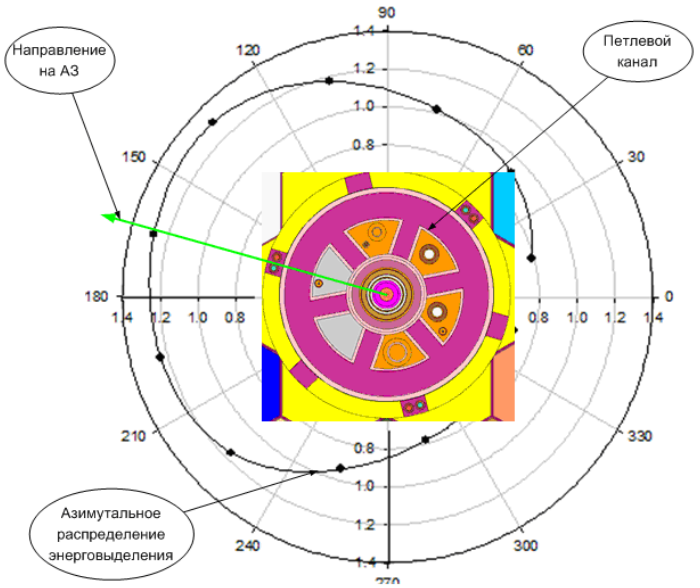


Рис. 27. Азимутальное распределение энерговыделения в медианной плоскости центрального ЭГЭ

4.2.5. Выборка исходных экспериментальных данных о ВАХ ТЭП для расчетного анализа в коде COMSOL-ЭГК

В качестве исходных данных для проведения расчета характеристик ЭГК было отобрано семейство локальных ВАХ, соответствующих дуговому режиму работы ТЭП с электродными парами на основе вольфрама [25, 65, 66, 87, 88]. Анализ этих баз данных показал практическое совпадение их электрофизических характеристик. Поэтому в расчетах использовалась вся совокупность данных о ВАХ ТЭП, а электродную пару далее будем называть $W_{моно}$-$W_{поли}$. Выбор этих массивов экспериментальных ВАХ был обусловлен, во-первых, хорошей изученностью свойств термоэмиссионного процесса преобразования энергии с данными парами элек-

тродных материалов и удобным форматом представления данных, во-вторых, данные базы локальных ВАХ ТЭП были использованы специалистами НИИ НПО «Луч» для расчета характеристик унифицированного ЭГК в составе ПК реактора ИВВ-2М с использованием одномерных методик. Поэтому использование идентичной выборки ВАХ позволило заложить одинаковые исходные данные как для одномерного, так и трехмерного расчета характеристик унифицированного ЭГК.

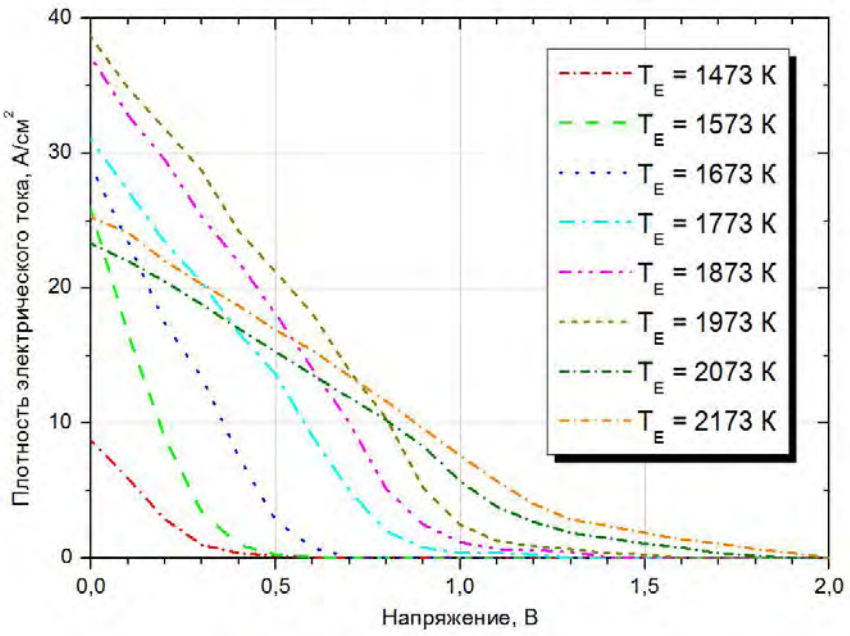


Рис. 28. Семейство экспериментальных ВАХ ТЭП

Локальные ВАХ ТЭП получены на стенде с электронагревом при величине межэлектродного зазора 0,4 мм и давлении пара цезия 1,5 мм рт. ст. Температура эмиттера изменялась в интервале от 1400 до 2200 К. Для температур эмиттера в интервале от 1400 до 1900 К температура коллектора равна 873 К, для интервала температур от 1900 до 2200 К – 773 К. Межэлектродное напряжение лежит в диапазоне от 0 до 2,0 В, а соответствующая им плотность электрического тока в МЭЗ – от 0 до 40 А/см^2. На рисунке 30 изображено семейство локальных ВАХ ТЭП, которые были использованы при расчете характеристик унифицированного ЭГК ПК реактора ИВВ-2М кодом COMSOL-ЭГК.

4.3. Численный расчет тепловых и электрических характеристик унифицированного ЭГК в составе петлевого канала реактора ИВВ-2М с использованием программной среды COMSOL-ЭГК

4.3.1. Трехмерная расчетная модель унифицированного ЭГК

Разработана трехмерная расчетная модель, используемая для расчета электротеплофизических характеристик унифицированного ЭГК в составе ПК реактора ИВВ-2М средствами программной среды COMSOL-ЭГК, которая представлена на рис. 29 и 30. Отличительной особенностью программного кода COMSOL-ЭГК является возможность интеграции с различными приложениями систем автоматизированного проектирования. Для разработки трехмерной геометрической модели унифицированного ЭГК была использована программная среда SolidWorks, затем модель ЭГК была импортирована в код COMSOL-ЭГК, доработана и применена в расчете его тепловых и электрических характеристик. Расчетная модель ЭГК включает все элементы конструкции, представленные на конструктивной схеме (рис. 26), за исключением тарельчатых пружин (сноска 17 на рис. 26) и фиксаторов (сноска 20 на рис. 26). Геометрические характеристики расчетной модели унифицированного ЭГК ПК реактора ИВВ-2М соответствуют его прототипу (согласно работе [14, 98]). Элементы конструкции ЭГК представлены различными конструкционными материалами, отличающимися как теплофизическими, так и электрическими свойствами.

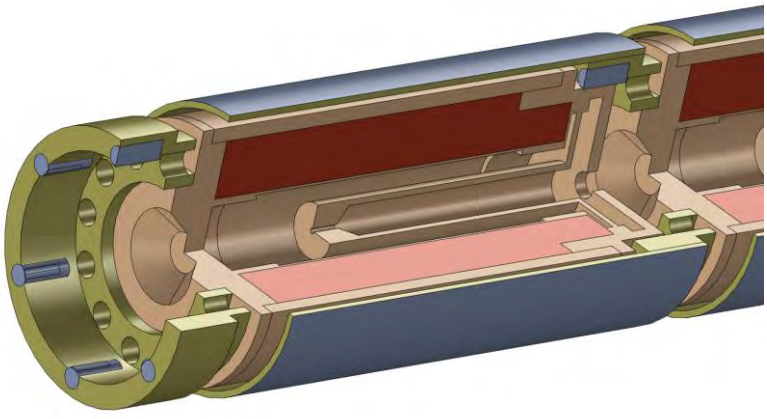


Рис. 29. Фрагмент расчетной модели унифицированного ЭГК (270° сектор центрального ЭГЭ)

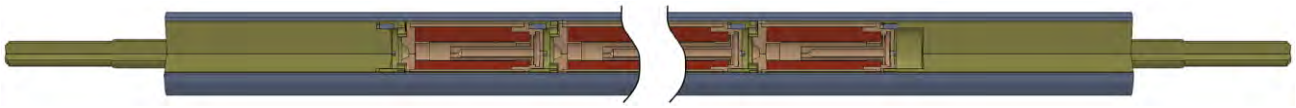


Рис. 30. Фрагмент расчетной модели унифицированного ЭГК (концевые элементы)

4.3.2. Материальный состав конструктивных элементов унифицированного ЭГК

Как отмечалось ранее, программный код COMSOL-ЭГК обладает встроенной библиотекой свойств материалов, часть из которых была использована при расчете характеристик унифицированного ЭГК ПК реактора ИВВ-2М. Из встроенной библиотеки программного кода были использованы свойства для сплава NbZr, монокристаллического W, оксидов Sc_2O_3 и Al_2O_3. Свойства остальных конструкционных материалов и сред, необходимых для расчета, были взяты из [89]. Материальный состав ЭГЭ в составе унифицированного ЭГК схематично представлен на рис. 31.

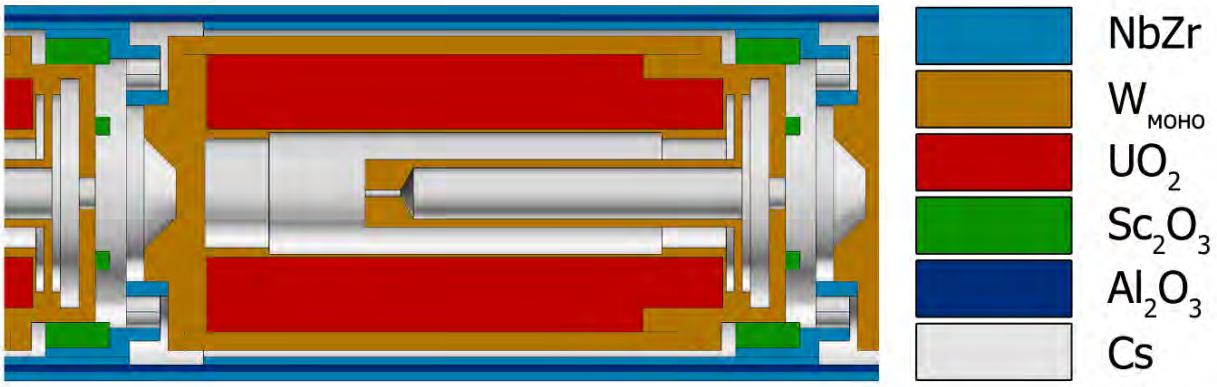


Рис. 31. Материальный состав конструктивных элементов ЭГЭ/ЭГК

4.3.3. Конечно-элементная расчетная сетка унифицированного ЭГК

Разбиение модели унифицированного ЭГК на конечные элементы производилось программой COMSOL-ЭГК в полуавтоматическом режиме с выбором типа разбиения, а также минимального и максимального размера ячеек, который варьировался для различных сред расчетной сетки, и некоторых других параметров, отвечающих за плотность разбиения. В работе была построена расчетная сетка

унифицированного ЭГК, состоящая из ~310000 расчетных ячеек, имеющих тетраэдральную форму. Фрагмент созданной расчетной сетки представлен на рис. 32.

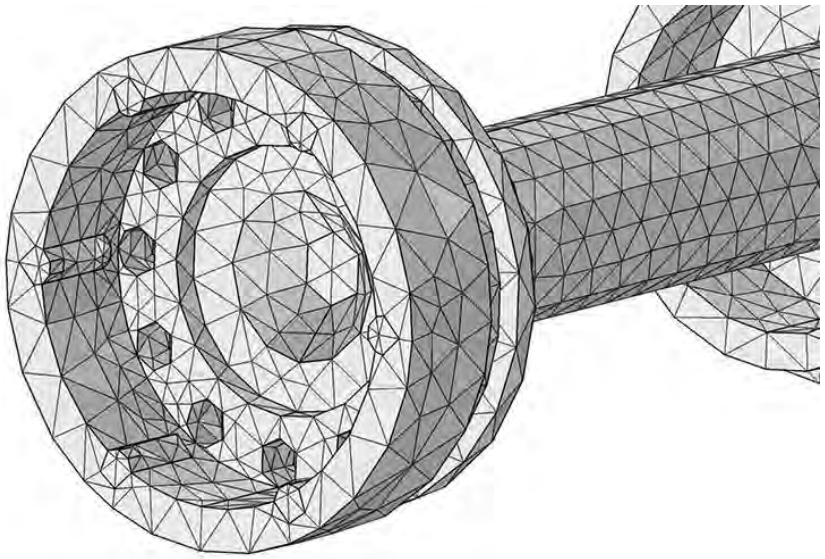


Рис. 32. Фрагмент трехмерной расчетной сетки унифицированного ЭГК (область коммутационной перемычки)

Построение расчетной сетки даже в полуавтоматическом режиме отнюдь не является тривиальной задачей. Связано это в первую очередь с тем, что качество генерируемой сетки влияет как на точность получаемых результатов расчета, так и на время, затрачиваемое на вычисления. Исходя из того, что вычислительные мощности на момент выполнения работы были ограничены (персональный компьютер с четырехядерным процессором Intel Core i7-3930K 3,80 ГГц и оперативной памятью Tactical Tracer DDR3-1600 объемом 32 Гб), необходимо было искать оптимальное разбиение расчетной модели с точки зрения качества разбиения, скорости расчета и потребляемых ресурсов вычислительной системы.

Из рисунка 32 видно существенное искажение геометрии конструктивных элементов в результате грубого разбиения модели унифицированного ЭГК, что, конечно, не может не влиять на точность получаемых результатов. Тем не менее, текущее качество и плотность разбиения расчетной сетки ЭГК является предельно допустимым из-за отсутствия достаточных вычислительных мощностей компьютерной системы, необходимых для более детального разбиения расчетной сетки. В качестве примера на рисунке 33 представлен результат значительно более плот-

ного разбиения модели ЭГК на конечные элементы. Такое разбиение включает свыше миллиона расчетных ячеек и описанная выше вычислительная система не способна обработать и применить в расчете представленную расчетную модель.

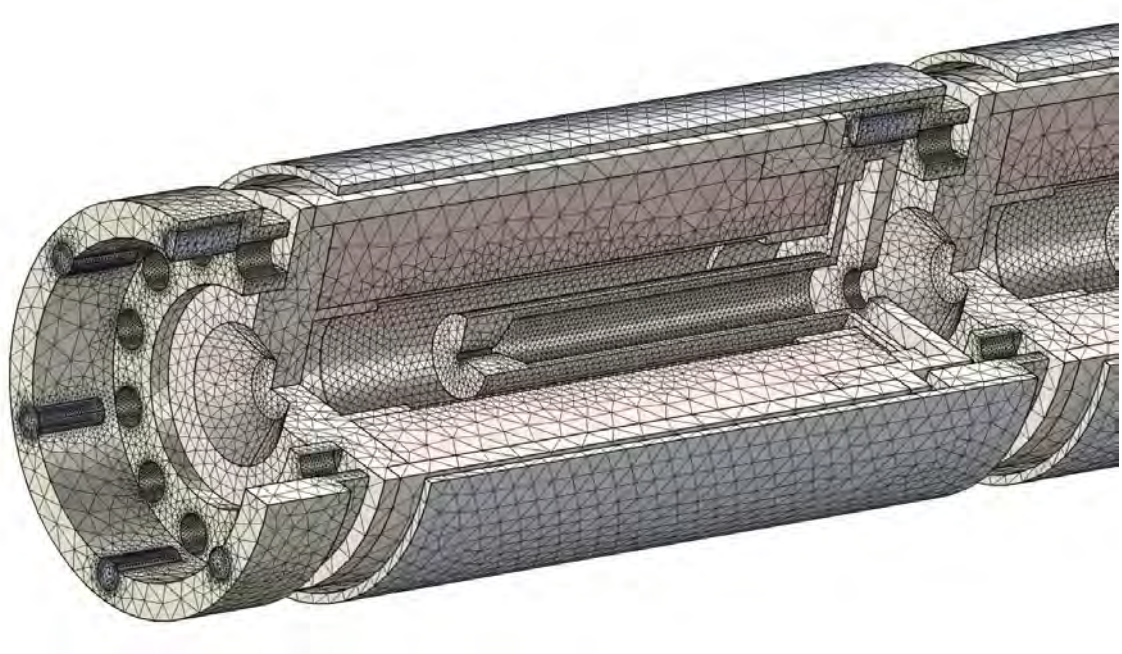


Рис. 33. Фрагмент трехмерной расчетной сетки унифицированного ЭГК

4.3.4. Начальные и граничные условия

В качестве начальных условий для итерационного процесса расчета характеристик унифицированного ЭГК были выбраны следующие величины:

– начальная температура конструкционных элементов ЭГК принята равной 1400 К,

– температура окружения для расчета переноса тепла излучением между конструктивными элементами ЭГК принята равной средней температуре коллектора, равной ~850 К,

– начальное напряжение электрического поля конструкционных элементов ЭГК принято равным 0,2 В,

– электрический ток ЭГК варьировался от 60 А до 160 А с шагом 20 А.

Граничные условия математической модели унифицированного ЭГК в составе ПК реактора ИВВ-2М, задаваемые в программном коде COMSOL-ЭГК, схематично представлены на рис. 34.

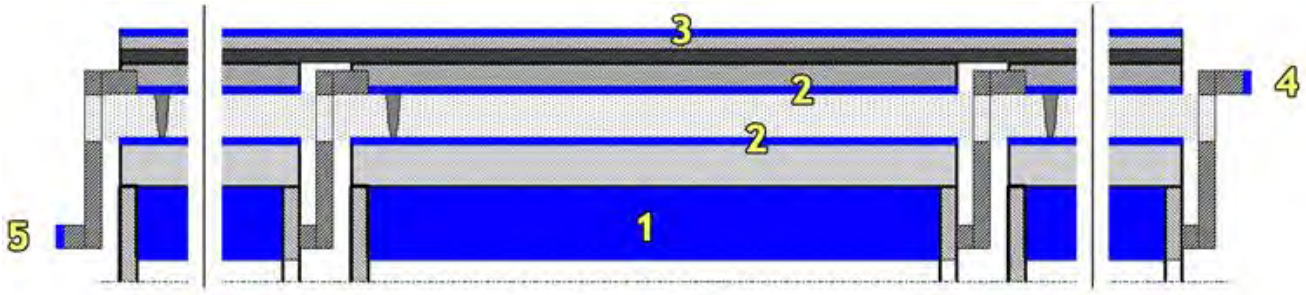


Рис. 34. Схема задания граничных условий для унифицированного ЭГК в программном коде COMSOL-ЭГК

В области 1 расчетной модели унифицированного ЭГК задается объемное энерговыделение топлива из оксида урана, получаемое в результате нейтронно-физического расчета а.з. реактора ИВВ-2М, которое имеет аксиальную, радиальную и азимутальную составляющие.

На цилиндрических поверхностях эмиттеров и коллекторов (сноска 2 на рис. 34) задается поток энергии за счет электронов эмиссии (для уравнения теплопереноса) и локальная ВАХ ТЭП (для уравнения электростатики).

На одном из токовыводов задается заземление (V = 0 В), на другом – исходный электрический ток ЭГК (сноски 4 и 5 на рис. 34).

На внешней границе чехла рабочего участка ПК (сноска 3 на рис. 34) задается замыкающее соотношение в виде граничного условия первого рода – температура чехла, которая была получена экспериментально и соответствует показаниям термодатчиков на чехловой трубе рабочего участка ПК. Расположение термодатчиков по высоте ЭГК и их показания, а также принцип задания граничного условия на чехле ЭГК описан ниже.

4.3.5. Задание энерговыделения ядерного топлива унифицированного ЭГК в программной среде COMSOL-ЭГК

В результате нейтронно-физического расчета а.з. реактора ИВВ-2М было получено трехмерное распределение энерговыделения топлива из оксида урана, которое имеет аксиальную ($Z= \{Z_1, Z_2, \dots Z_n\}$), радиальную ($R= \{R_1, R_2, \dots R_m\}$) и азимутальную составляющие ($Phi= \{Phi_1, Phi_2, \dots Phi_k\}$). Данные по энерговыделению по

высоте топливных сердечников были получены с шагом до 2 мм, по радиусу – в контрольных точках, по угловой координате – с шагом 30 градусов.

Результаты нейтронно-физического расчета в виде табличных данных были переданы в программный код COMSOL-ЭГК, обработаны программными средствами (линейная интерполяция и экстраполяция) и применены в расчете электротеплофизических характеристик ЭГК. В результате обработки программным кодом COMSOL-ЭГК входного файла с энерговыделением было получены трехмерное изображение распределения энерговыделения по всем топливным элементам унифицированного ЭГК, которое представлено на рис. 35. В результате интегрирования заданного энерговыделения по объему топливных сердечников получена суммарная тепловая мощность ЭГК.

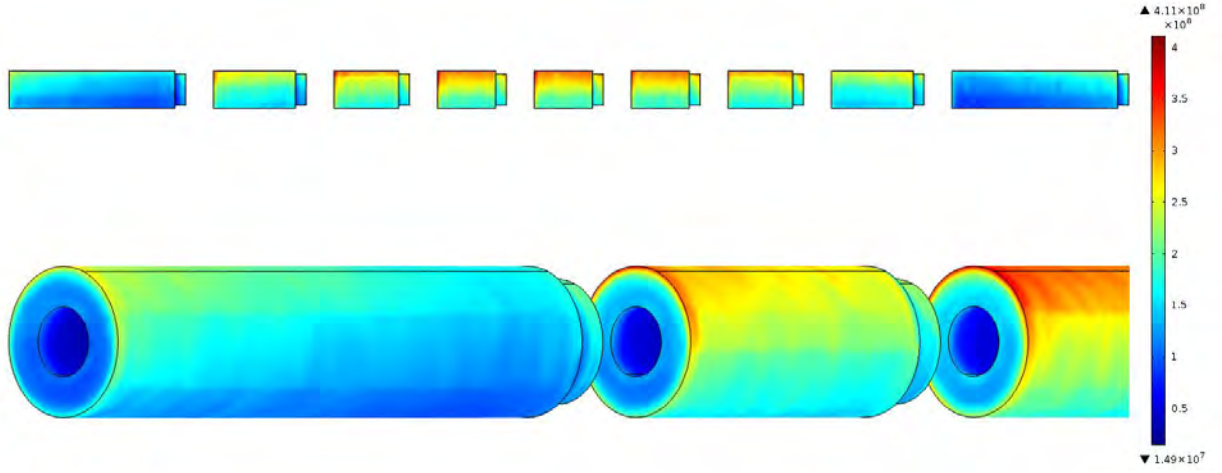


Рис. 35. Трехмерное распределение энерговыделения топлива ЭГК в ПК реактора, заданное в программной среде COMSOL-ЭГК

4.3.6. Задание внешнего граничного условия на чехле рабочего участка петлевого канала

Как отмечалось ранее, в расчетную модель унифицированного ЭГК была включена чехловая труба рабочего участка ПК реактора ИВВ-2М. На эксперименте напротив каждого ЭГЭ в чехловой трубе размещаются термодатчики, показания которых легли в основу заданного на чехле граничного условия [95, 96].

В программном коде COMSOL-ЭГК на внешней границе чехла ЭГК задается замыкающее соотношение для общего уравнения теплопереноса – поток тепла, уносимого течением теплоносителя. В общем виде поток тепла на чехловой трубе

ЭГК зависит от распределения температуры теплоносителя по длине ЭГК и коэффициента теплопередачи от чехла ЭГК к теплоносителю [90, 91, 99]:

$$q_{т.н.} = h \cdot (T_{т.н.} - T), \quad (4.2)$$

где h – коэффициент теплопередачи, $T_{т.н.}$ – распределение температуры теплоносителя по длине ЭГК.

В самом простом виде $T_{т.н.}$ зависит от температуры теплоносителя на входе и выходе ЭГК. Коэффициент теплопередачи определяется как свойствами теплоносителя, так и свойствами материала чехла.

В перспективе планируется модернизация численной модели ЭГК в области задания переноса тепла от чехла ЭГК к теплоносителю. Упрощенная модель определения потока тепла (4.2) будет заменена расчетом теплопереноса и сопряженной с ним гидродинамики.

4.3.7. Упрощения и допущения

– Низкое качество расчетной конечно-элементной сетки ЭГК (увеличение числа расчетных ячеек требует более совершенных и производительных вычислительных систем).

– По причине, описанной в п.1, трехмерная модель унифицированного ЭГК имеет упрощенный коллекторный пакет – исключены два внешних слоя.

– Все соединения (метал/метал; метал/керамика) являются идеальными как для теплопереноса, так и для электростатики (отсутствуют термо- и электросопротивления соединений).

– Технологический зазор с гелием (0,05 мм) между «сухой» изоляцией ЭГК и чехловой трубой рабочего участка ПК реактора ИВВ-2М не учитывается в модели и замещен путем увеличения толщины слоя «сухой» изоляции на величину зазора.

– В модели ЭГК не учтены процессы распухания и термического расширения материалов конструкции – все габаритные размеры конструкционных элементов моделируемого ЭГК приняты для «холодного» состояния.

– Задание термоэлектронной эмиссии осуществляется только на цилиндрической поверхности эмиттеров (на других конструкционных элементах этот эффект не учтен).

– Плотность электрического тока с поверхности эмиттера зависит только от температуры эмиттера и межэлектродного напряжения (при прочих фиксированных параметрах – температуры коллектора, давления цезия, величины МЭЗ).

– Давление цезия имеет равномерное распределение по всей длине ЭГК (не учтены пространственные эффекты, связанные с перепадом давления цезия).

4.3.8. Результаты численного расчета электро-теплофизических характеристик унифицированного ЭГК

Разработанный программный код COMSOL-ЭГК, использующий в качестве исходных данных экспериментальные ВАХ ТЭП, расчетное трехмерное энерговыделение топлива, внешнее граничное условие по температуре на основе экспериментальных данных и другие необходимые для моделирования задачи данные, был применен для трехмерного расчета тепловых и электрических процессов в многоэлементном унифицированном ЭГК ПК в составе исследовательского реактора ИВВ-2М с целью подтверждения его электро-теплофизических характеристик. Расчет проводился для рабочей величины входной тепловой мощности унифицированного ЭГК.

Основные результаты расчета электро-теплофизических характеристик ЭГК с помощью программного кода COMSOL-ЭГК – стационарные трехмерные (r, φ, z) распределения температуры и электрического напряжения в конструкционных элементах ЭГК. По найденным распределениям были рассчитаны выходные электрические характеристики ЭГК, в том числе ВАХ и электрическая мощность. На рисунках 36 – 42 приводятся характерные примеры полученных расчетных характеристик унифицированного ЭГК с помощью программного кода COMSOL-ЭГК.

На рисунках 36 – 42 представлены результаты расчета характеристик ЭГК при различных величинах входного электрического тока. На рисунке 37 представлено температурное поле фрагмента коммутационной перемычки и дистанционаторов

центрального ЭГЭ при входном электрическом токе ЭГК 160 А. На рисунках 36 – 38 и 40 изображено температурное поле в различных геометрических сечениях и областях многоэлементного ЭГК. На рисунке 39 изображено распределение межэлектродного напряжения по длине ЭГК для различных величин входного электрического тока. Рисунок 41 демонстрирует распределение температуры эмиттеров по длине ЭГК для различных величин входного электрического тока.

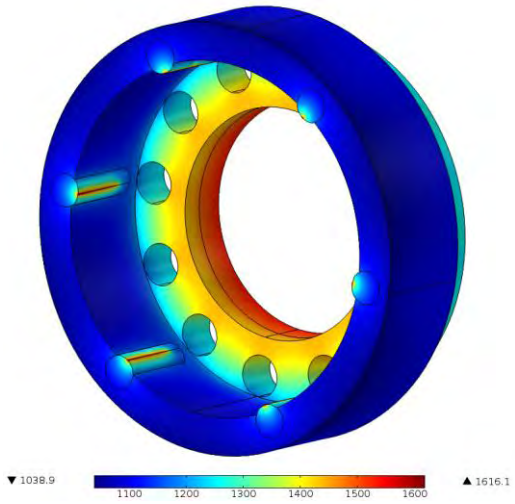


Рис. 36. Тепловое поле фрагмента коммутационной перемычки и дистанционаторов при электрическом токе 160 А (для центрального ЭГЭ)

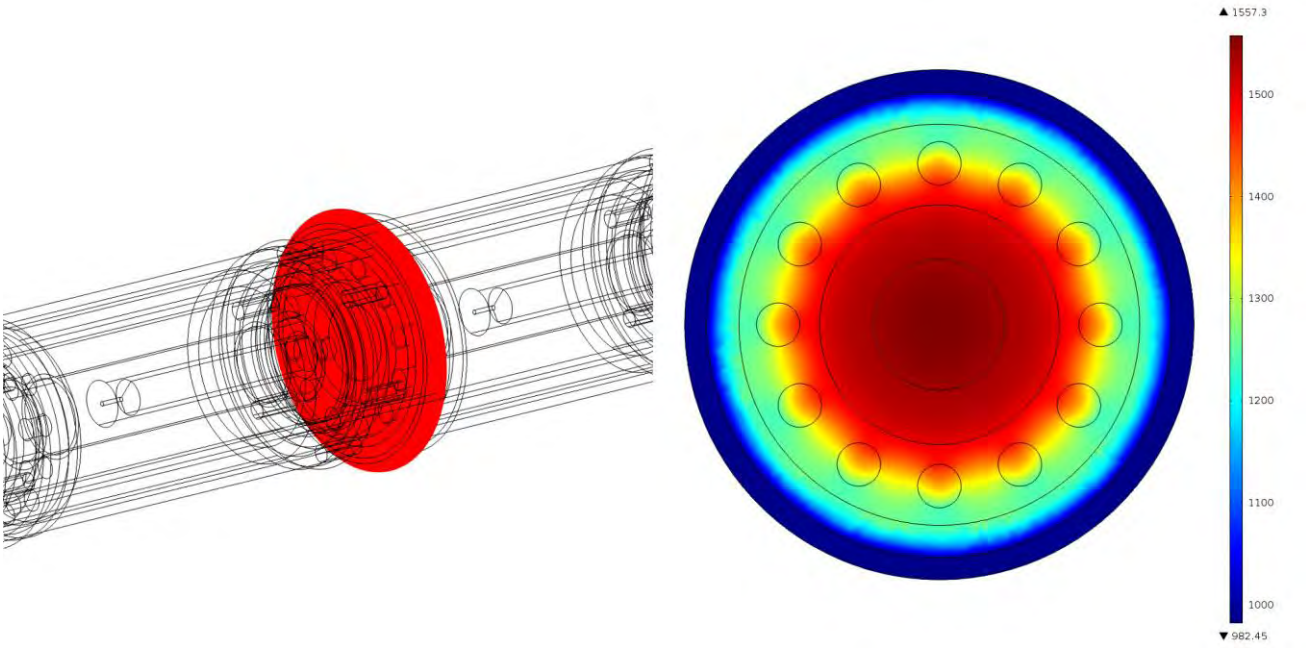


Рис. 37. Температурное поле (поперечное сечение коммутационной перемычки в области отверстий для перетечки цезия, I = 160 А)

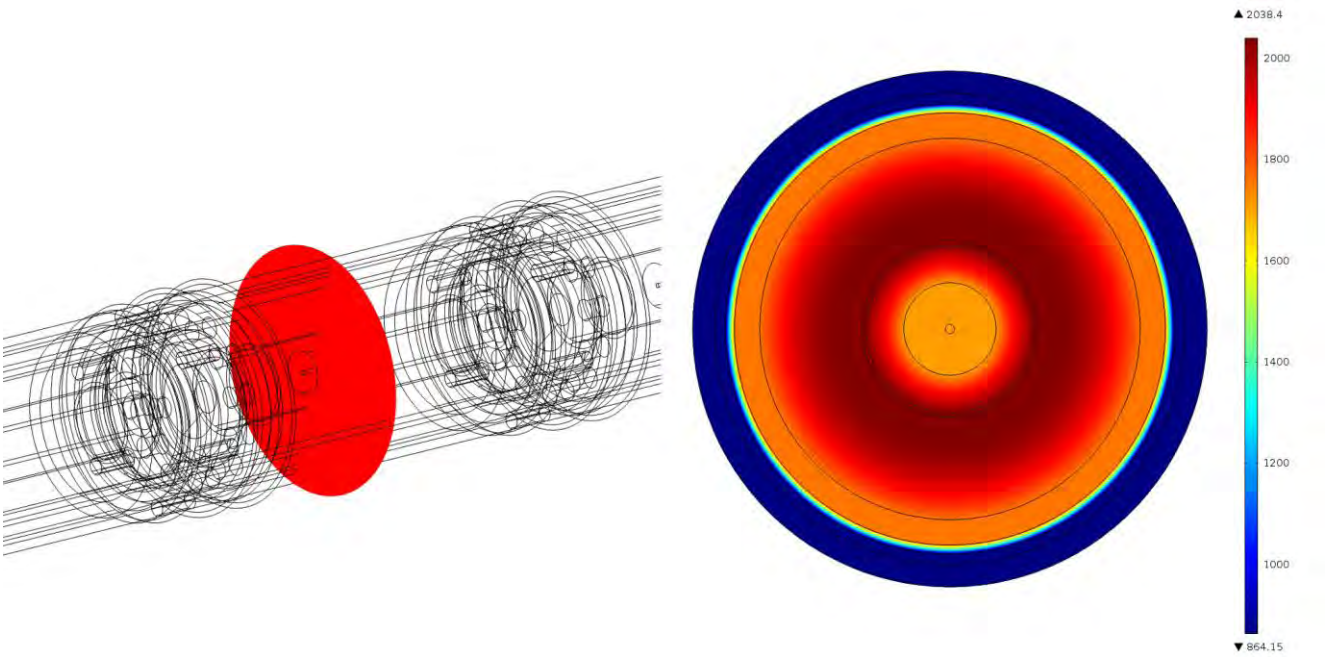


Рис. 38. Температурное поле (поперечное сечение ЭГЭ в центральной области, I = 160 А)

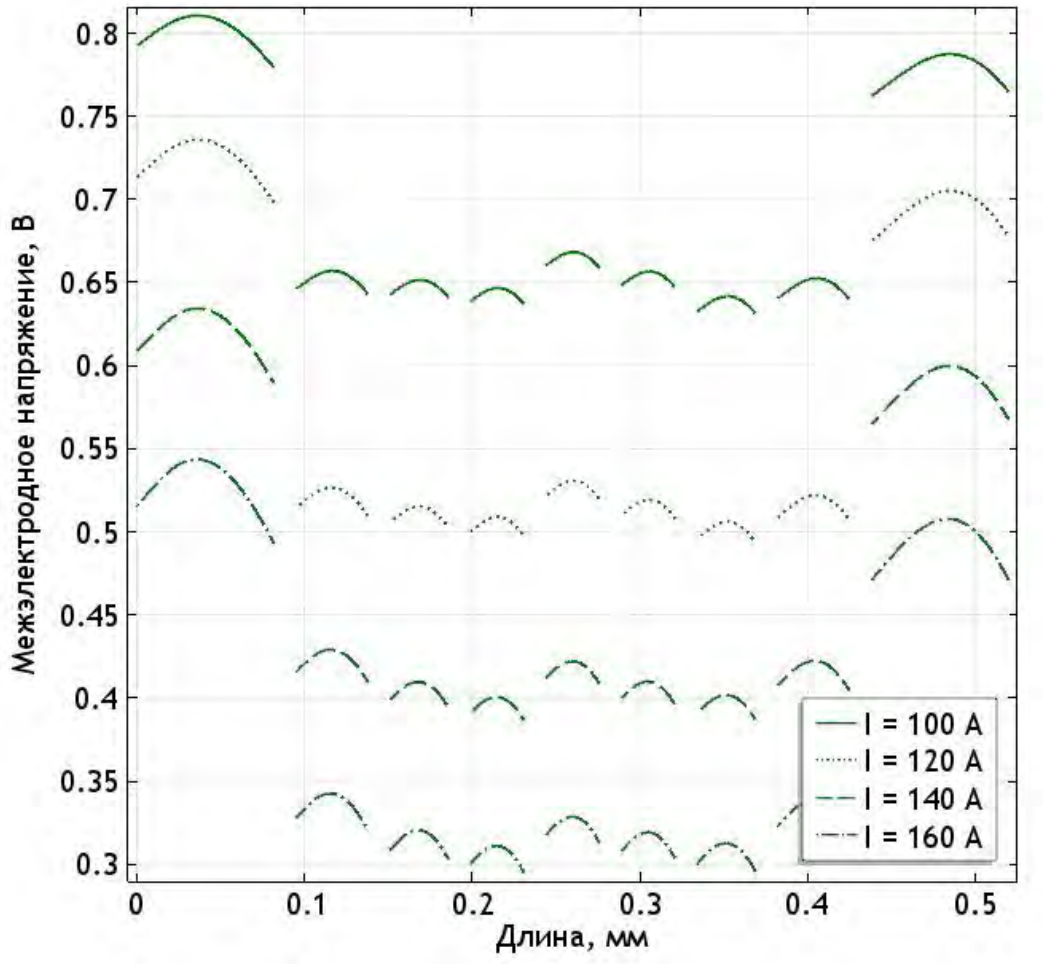


Рис. 39. Распределение межэлектродного напряжения по длине ЭГК для различных величин электрического тока

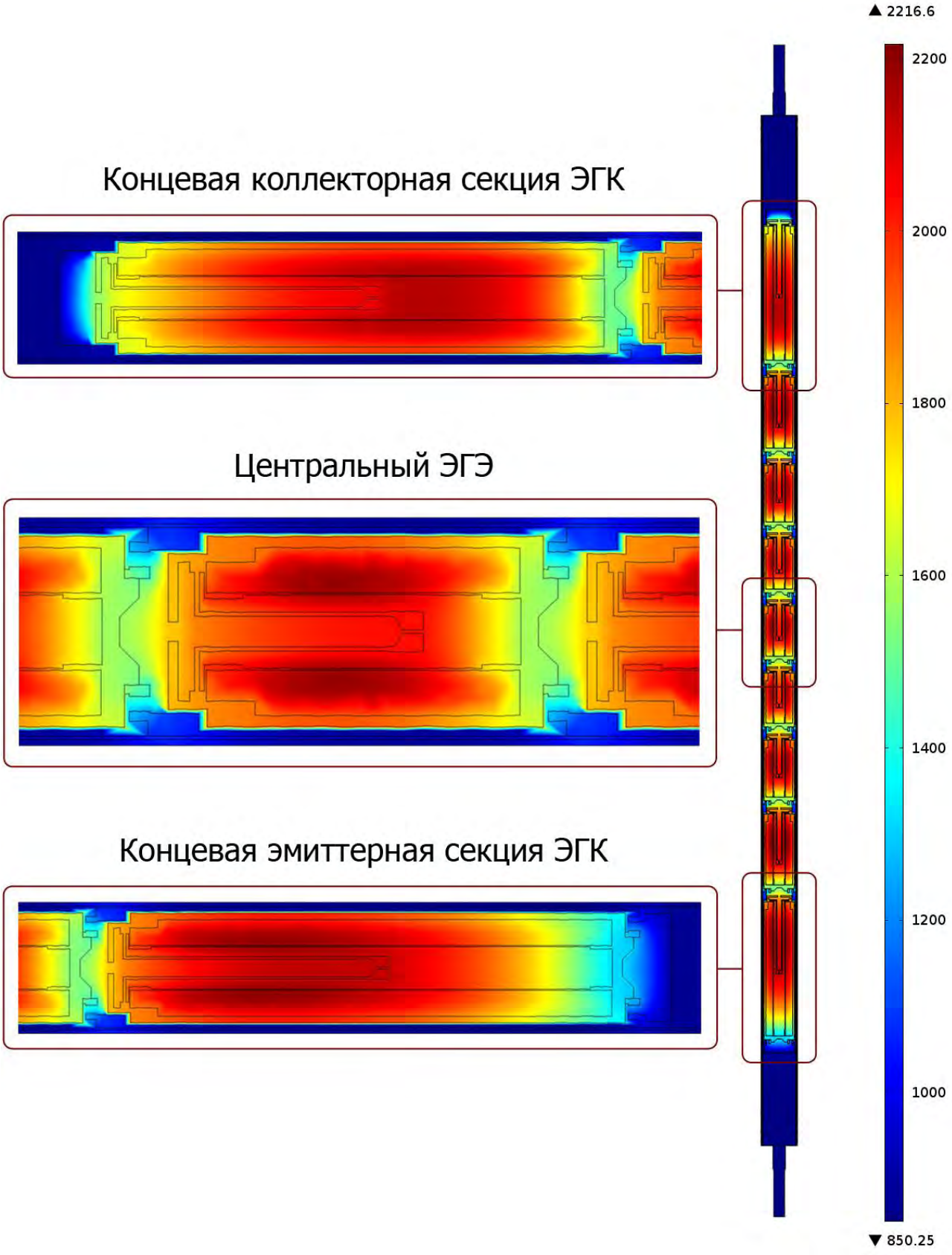


Рис. 40. Тепловое поле многоэлементного ЭГК центральной зоны, I = 100 А

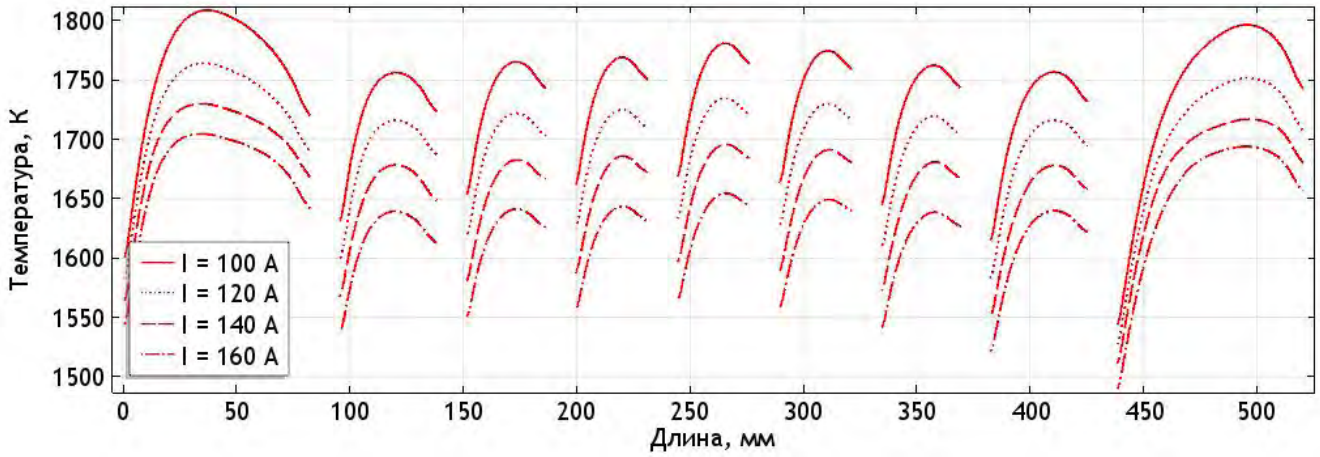


Рис. 41. Распределение температуры эмиттеров по длине ЭГК для различных величин электрического тока

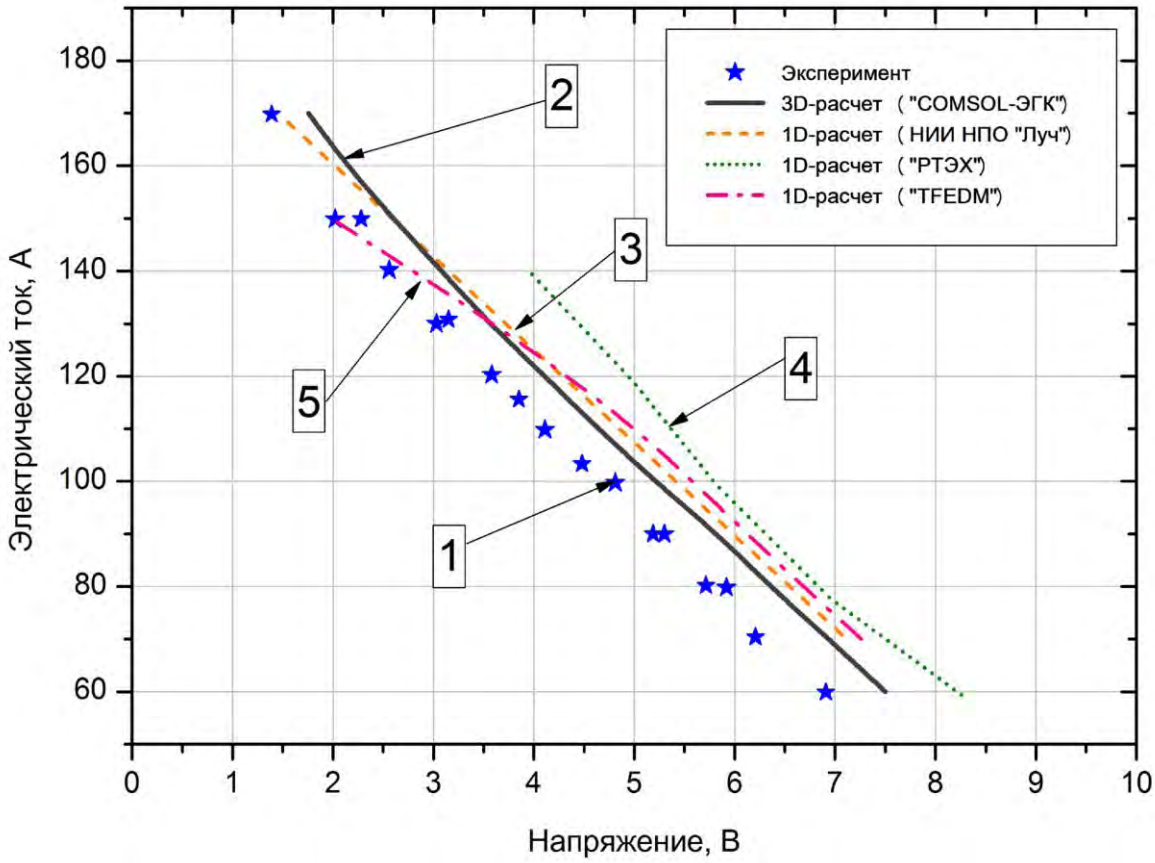


Рис. 42. Сравнение расчетных ВАХ ЭГК с экспериментальными данными из протокола совместных испытаний ПК исследовательского реактора ИВВ-2М:

1 – экспериментальная ВАХ ЭГК в составе ПК реактора ИВВ-2М, 2 – расчетная ВАХ ЭГК (трехмерный расчет кодом COMSOL-ЭГК), 3 – расчетная ВАХ ЭГК (одномерный расчет по методике НИИ НПО «Луч»), 4 – расчетная ВАХ ЭГК (одномерный расчет кодом РТЭХ), 5 – расчетная ВАХ ЭГК (одномерный расчет кодом TFEDM)

Из рисунка 42 видно, что расчетные ВАХ ЭГК, взятые из протокола совместных испытаний ПК реактора ИВВ-2М, смещены относительно экспериментальных в сторону больших напряжений. Такой характер демонстрирует как ВАХ, полученная в результате трехмерного расчета кодом COMSOL-ЭГК, так и ВАХ, полученные в результате одномерного расчета другими программными кодами (методика расчета ЭГК, разработанная в НИИ НПО «Луч», а также две методики РТЭХ и TFEDM, разработанные в ГНЦ РФ-ФЭИ). Отклонение расчетных данных от экспериментальных может быть связано с погрешностью определения тепловой мощности в АО «ИРМ» (±15% согласно протокола испытаний ЭГК).

Использование программного кода COMSOL-ЭГК для расчетов электротеплофизических характеристик унифицированного ЭГК в трехмерной постановке показало эффективность и гибкость разработанной методики, а также высокое качество получаемых результатов. Полученные результаты расчетов подтверждают значительное влияние на выходные электрические характеристики и эффективность унифицированного ЭГК пространственных эффектов, которые невозможно учесть с достаточной точностью с применением одномерных математических моделей. Таким образом, детальный учет геометрической структуры и всего разнообразия физических свойств материалов моделируемых устройств, а также использование расчетного энерговыделения в топливе, экспериментальных данных о локальных ВАХ ТЭП и внешней температуре чехла ЭГК имеет решающее значение для достижения требуемой точности при расчете электротеплофизических характеристик ЭГК.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4

Выполнен цикл расчетов стационарного режима работы унифицированного ЭГК в составе ПК в исследовательском реакторе ИВВ-2М с помощью разработанного программного кода COMSOL-ЭГК.

Расчеты выполнены на трехмерной модели ЭГК с использованием замыкающих соотношений по энерговыделению топлива, полученному в результате нейтронно-физического расчета а.з. реактора ИВВ-2М, экспериментальных данных о

ВАХ ТЭП, полученных на электрофизическом стенде, а также данных по температуре термодатчиков чехловой трубы рабочего участка ПК реактора ИВВ-2М, полученных в результате проведенных экспериментов. В ходе работы проведено сравнение результатов, полученных расчетным путем с использованием программного кода COMSOL-ЭГК, с экспериментальными данными, полученными в реакторе ИВВ-2М.

В ходе работы получены стационарные трехмерные распределения температуры в конструктивных элементах ЭГК, потенциалов и плотности генерируемого тока эмиттеров и коллекторов. По найденным распределениям рассчитаны выходные электрические характеристики ЭГК: ВАХ ЭГК и зависимость электрической мощности ЭГК от электрического тока. Проводилось сравнение расчетной ВАХ ЭГК по коду COMSOL-ЭГК с экспериментально полученными статическими ВАХ ЭГК в составе ПК реактора ИВВ-2М. Помимо этого, результаты трехмерного расчета по коду COMSOL-ЭГК сравнивались с одномерными расчетами, проведенными в НИИ НПО «Луч» и ГНЦ РФ-ФЭИ. Получено хорошее качественное и количественное соответствие между расчетными и экспериментальными данными. Некоторое расхождение экспериментальных и расчетных данных связано с погрешностью определения тепловой мощности в АО «ИРМ» (±15% согласно протокола совместных испытаний ПК реактора ИВВ-2М).

Приведенный в диссертации пример применения разработанного программного кода COMSOL-ЭГК не ограничивает его использование только для обоснования характеристик унифицированного ЭГК. Он может быть использован и для других типов ЭГК (различный материальный состав, геометрическая структура, форма энерговыделения и др.) как с ядерным, так и неядерным нагревом.

Рассчитанные тепловые и электрические характеристики ЭГК открывают путь к полноценному исследованию термомеханических напряжённо-деформированных состояний конструкционных элементов и сред ЭГК в трехмерной постановке, что является одной из приоритетных задач при обосновании ресурсных показателей работы ТРП и термоэмиссионных ЯЭУ в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных в работе исследований сформулированы следующие основные результаты и выводы диссертации.

1. В результате модификации современного программного кода конечно-элементного анализа COMSOL разработан новый программный код COMSOL-ЭГК для расчетной оптимизации электро-теплофизических характеристик ТЭП/ЭГЭ/ЭГК/ТРП с использованием трехмерной математической модели и баз экспериментальных данных о ВАХ ТЭП. Таким образом, решена задача трехмерного расчета характеристик ЭГК, что позволяет проводить целый ряд расчетов в обоснование проектных решений ЭГК/ТРП второго и нового поколений с учетом реальной геометрической структуры их конструктивных элементов, разнообразия физических свойств материалов моделируемых устройств, а также использования экспериментальных данных о локальных ВАХ ТЭП и энерговыделении топливных сердечников ЭГЭ, что значительно повышает достоверность получаемых результатов и дает возможность учитывать в расчете влияние технологии изготовления и рабочих условий электродной пары материалов.

2. Путем сопряжения современных программных кодов COMSOL и MATLAB разработана новая методика математической обработки и последующего использования в расчетах дискретных экспериментальных данных о ВАХ ТЭП, основанная на аппроксимации многомерными функциями содержимого банков экспериментальных данных. Разработанная методика автоматизирует процесс поиска оптимальных с точки зрения величины погрешности аппроксимирующих функций для экспериментальных ВАХ ТЭП и, таким образом, оптимизирует задачу расчета электро-теплофизических характеристик ЭГК при использовании обработанных экспериментальных данных о ВАХ ТЭП.

3. Выполнен цикл расчетов в трехмерной геометрии тепловых и электрических характеристик стационарного режима работы экспериментального лабораторного ТЭП и многоэлементного унифицированного ЭГК в составе ПК исследовательского реактора ИВВ-2М. В настоящей работе в качестве исходных данных были использованы две экспериментальные базы с различными материалами

электродной пары – $W_{моно}$-$W_{поли}$ и Pt-ВХ2У. В результате расчетов получены поля температуры и электрического напряжения в конструктивных элементах ТЭП/ЭГК для различных величин тепловой мощности и электрического тока. На основании полученных результатов вычислены зависимости напряжения от электрического тока ТЭП/ЭГК. Проведено сравнение полученных результатов расчета с экспериментальными данными, в результате чего сделан вывод об эффективности разработанной методики и высоком качестве получаемых результатов.

4. Расчет тепловых и электрических характеристик унифицированного ЭГК с помощью разработанного программного кода COMSOL-ЭГК открывает путь к полноценному исследованию термомеханических напряжённо-деформированных состояний конструкционных элементов и сред ЭГК в трехмерной постановке, что является одной из приоритетных задач при обосновании ресурсных показателей работы ТРП.

5. При дальнейшем развитии программного кода COMSOL-ЭГК, выходящим за рамки настоящей работы, может быть усложнена расчетная математическая модель ЭГК путем присоединения других ЭГК из соседних рядов активной зоны ТРП, добавления модуля для расчета теплогидравлических и нейтронно-физических процессов в ЭГК и ТРП в целом. Таким образом, разработанный программный код COMSOL-ЭГК позволит в перспективе провести сквозной расчет всего ТРП средствами одного программного кода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. Ярыгин В.И., Пышко А.П. О месте термоэмиссии в прикладных и фундаментальных исследованиях и разработках // В трудах «Итоги научно-технической деятельности института ядерных реакторов и теплофизики за 2013 год». Научно-технический сборник. – Обнинск, 2014.

3. Землянов А.Б., Косов Г.Л., Траубе В.А. Система морской космической разведки и целеуказания (история создания). – СПб, 2002. – 216 с.

4. 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.

5. Синявский В.В. Научно-технический задел по ядерному электроракетному межорбитальному буксиру «Геркулес» // Космическая техника и технологии. – 2013. – № 3. – с. 25-45.

6. Легостаев В.П., Лопота В.А., Синявский В.В. Перспективы и эффективность применения космических ядерно-энергетических установок электроракетных двигательных установок // Космическая техника и технологии. – 2013. – № 1. – с. 4-15.

7. «Атомная станция малой мощности АСММ 10/100 кВтэл в северном исполнении на основе термоэмиссионной ЯЭУ» совместный доклад АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» и ФГУП «НИИ НПО «Луч» на круглом столе «Современное оборудование и технологии для энергообеспечения объектов МО РФ» международного форума «Армия-2015», 19 июня 2015 г., 28 с.

8. Роскосмос. Федеральная космическая программа России. – URL: http://www.federalspace.ru/main.php?id=24. Дата обращения: 03.10.2014.

9. Послание Президента РФ Федеральному собранию от 12 декабря 2013 г. – URL: http://www.kremlin.ru/news/19825. Дата обращения: 03.02.2015.

10. Кузнецов В.А., Грязнов Г.М., Артюхов Г.Я. и др. Разработка и создание термоэмиссионной ядерно-энергетической установки «Топаз» // Атомная энергия, т.36, вып. 6, 1974, с. 450 – 457.

11. Грязнов Г.М., Пупко В.Я. «Топаз-1». Советская космическая ядерно-ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА // ПРИрода, вып.10, 1991, с. 29 – 36.

12. Богуш И.П., Грязнов Г.М., Жаботинский Е.Е. и др. Космическая термоэмиссионная ЯЭУ по программе «Топаз». Принципы конструкции и режимы работы // Атомная энергия, т.70, вып. 4, 1991, с. 162 – 170.

13. Грязнов Г.М. К 30-летию пуска первого в мире термоэмиссионного ядерного реактора «Топаз» // Атомная энергия, т. 89, вып. 1, 1991, с. 6.

14. 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.

15. Ярыгин В.И. Термоэлектричество и термоэмиссия в космических ядерных энергетических установках прямого преобразования. Современное состояние и перспективы // Сборник докладов Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе – 2005», Москва-Подольск, 2005, т.1, с.27 – 45.

16. Коротеев А.С. Анализ перспективных космических задач и место ядерных энергодвигательных установок в их решении // Сборник докладов Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе – 2005», Москва-Подольск, 2005, т.1, с. 1 – 7.

17. Васильковский В.С., Андреев П.В., Зарицкий Г.А. и др. Проблемы космической энергетики и роль ядерных энергетических установок в их решении // Сборник докладов Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе – 2005», Москва-Подольск, 2005, т.1, с. 20– 21.

18. Синявский В.В., Юдицкий В.Д. Структура геостационарного информационного космического аппарата с системой электропитания на базе двухрежимной ядерно-энергетической установки // Сборник докладов Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе – 2005», Москва-Подольск, 2005, т.1, с. 121 – 130.

19. Евдокимов Р.А., Синявский В.В. Сравнительный анализ термоэмиссионной и газотурбинной схем преобразования тепловой энергии в электрическую в космических ЯЭУ транспортно-энергетических модулей // Сборник докладов Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе – 2005», Москва-Подольск, 2005, т.1, с. 159 – 168.

20. Овчаренко М.К., Альмамбетов А.К., Виноградов Е.Г. и др. Концепция космической ЯЭУ на основе ЭГК с внешним расположением топлива // Сборник докладов Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе – 2005», Москва-Подольск, 2005, т.2, с. 240 – 246.

21. Гонтарь А.С., Еремин С.А., Лапочкин Н.В. и др. Усовершенствованный одноэлементный электрогенерирующий канал для термоэмиссионной ЯЭУ повышенной мощности // Сборник докладов Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе – 2005», Москва-Подольск, 2005, т.2, с. 279 – 283.

22. Лазаренко Г.Э., Ярыгин В.И., Пышко А.П. и др. Автономная ядерная энергетическая установка электро- и теплоснабжения прямого преобразования тепловой энергии в электричество // Сборник докладов Международной научно-практической конференции «Малая энергетика – 2006», Москва, 2006, с. 68 – 70.

23. Yarygin V.I., Lazarenko G.E., Mironov V.S. et al. Concept of Direct Energy Conversion Nuclear Cogeneration Plant // Proceedings of ICAPP „08 Ana-heim, CA USA, June 8-12, 2008, paper 8193.

24. 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 г., США.

25. Ярыгин В.И. Электродные материалы термоэмиссионных преобразователей энергетических установок различного назначения // Автореферат диссертации доктора технических наук: 05.14.03 и 01.04.01: защищена 25.12.1999: утв. 14.07.2000, Обнинск, 1999.

26. Ярыгин Д.В., Миронов В.С., Соловьев Н.П. и др. Термоэмиссионный преобразователь с высокими выходными электрическими характеристиками на основе металл-кислородной структуры на коллекторе // Атомная энергия, т.89, вып.1, 2000, с. 39 – 48.

27. Зродников А.В. Прямое преобразование энергии // Сборник трудов 4-й научно-практической конференции Минатома России «Использование достижений фундаментальных исследований в ядерных технологиях», Москва, 2003, с. 105 – 122.

28. Ярыгин В.И., Сидельников В.Н., Касиков И. И. и др. Экспериментальное изучение возможности образования конденсата возбужденных состояний вещества (ридберговской материи) // Письма в ЖЭТФ, т. 77, вып. 6, 2003, с. 330 – 334.

29. Миронов В.С., Агафонов В.Р., Терехов С.В. и др. Эффективный низкотемпературный ТЭП нового поколения // Сборник докладов Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе – 2005», Москва-Подольск, 2005, т.2, с. 294 – 298.

30. Овчаренко М.К., Забудько А.Н., Ионкин В.И. и др. Концепция долгоресурсной ЯЭУ “Эльбрус-400/200” с эффективными низкотемпературными термоэмиссионными преобразователями, вынесенными из активной зоны // Сборник докла-

дов Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе – 2005», Москва-Подольск, 2005, т.1, с. 144 – 149.

31. Лазаренко Г.Э., Ярыгин В.И., Овчаренко М.К. и др. Термоэмиссионный электрогенерирующий модуль активной зоны ядерного реактора с прямым преобразованием энергии // Патент РФ № 2347291, зарегистрирован 20.02.2009, заявка № 2007127696 от 19.07.2007

32. Лазаренко Д. Г. Математическая модель для расчёта теплоэлектрофизических характеристик цилиндрического электрогенерирующего канала // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – № 3. – с. 89-100.

33. Полоус М. А. Усовершенствование методики расчета выходных характеристик многоэлементного термоэмиссионного электрогенерирующего канала реактора-преобразователя // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 1. – с. 164-172.

34. Пупко В.Я., Юрьев Ю.С. и др. Некоторые проблемы разработки термоэмиссионного реактора – преобразователя // Препринт ФЭИ-27, Обнинск, 1965, 20 с.

35. 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.

36. Дмитриев В.М., Ружников В.А. Оптимизация геометрического профилирования в термоэмиссионных электрогенерирующих каналах // Препринт ФЭИ-704, Обнинск, 1976.

37. Ружников В.А. Численный метод совместного решения тепловой и электрической задач для термоэмиссионного электрогенерирующего канала // Препринт ФЭИ-774, Обнинск, 1977.

38. Ружников В.А. Методы расчета тепловых и электрических характеристик систем прямого преобразования энергии. Ч.1. Термоэмиссионный электрогенерирующий канал ЭГК // Учебное пособие, Обнинск: ФЭИ, 2001, 25 с.

39. Шиманский А.А. Эффективный алгоритм расчета ВАХ и температурных полей термоэмиссионного ЭГК на основе одномерной математической модели // Сборник тезисов докладов конференции «Ядерная энергетика в космосе», Обнинск, 1990, с. 316.

40. Синявский В.В. Методы определения характеристик термоэмиссионных твэлов // Москва: Энергоатомиздат, 1990, 184 с.

41. Бабушкин Ю.В., Зимин В.П., Синявский В.В. Моделирующая система KOPTES для исследования тепловых и электрических процессов в термоэмиссионных системах преобразования энергии // Ракетно-космическая техника, серия XII, вып. 1-2, 1998, с. 60 – 78.

42. Синявский В.В., Савинов А.П., Алимов В.И. и др. Имитационная модель взаимосвязанных нейтронно-физических, тепловых и электрических процессов для исследования статических, динамических и ресурсных характеристик термоэмиссионного реактора-преобразователя на быстрых нейтронах // Ракетно-космическая техника, серия XII, вып. 2-3, 1996, с. 49 – 63.

43. Бабушкин Ю.В., Мендельбаум М.А., Савинов А.П. и др. Алгоритм расчета характеристик термоэмиссионных электрогенерирующих сборок // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, №2, 1981, с. 115 – 122.

44. Виноградов Е.Г., Ярыгин В.И. Методика расчета электротеплофизических характеристик термоэмиссионного электрогенерирующего канала // Учебное пособие, Обнинск: ИАТЭ, 2008, 40 с.

45. Давыдов А.А., Гонтарь А.С., Сотников В.Н. и др. Комплексное компьютерное моделирование выходных параметров и ресурсного поведения многоэлементного ЭГК на основе диоксида урана // Вопросы атомной науки и техники. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2014, вып. 1, с. 18-25.

46. Официальный сайт-обозреватель CAD, CAE и CAM тематик. Обзор программных продуктов реализующих CAD, CAE-технологии. – URL: http://www.procae.ru/articles/15/13.html?showall=1. Дата обращения: 15.12.2011.

47. Официальный сайт производителя «Comsol Multiphysics». – URL: http://www.comsol.com/. Дата обращения: 03.01.2012.

48. Романов А.В. «Ростки шестого уклада» // Общероссийская еженедельная газета ВПК «Оборонка». №43, 19-25 ноября 2014 г.

49. 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.

50. 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.

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

52. 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», вып. 68, 03 сентября 2013.

53. Моргулис Н.Д., Марчук П.М. Физические явления при работе катода дугового разряда в парах цезия // Украинский физический журнал, т.1, вып.1, 1956, с. 59 – 64.

54. Моргулис Н.Д. Термоэлектронный (плазменный) преобразователь энергии // Москва: Госатомиздат, 1961, 84 с.

55. Кей Д., Уэлш Д. Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую // Москва: Госатомиздат, 1961, 208 с.

56. Пятницкий А.П., Сергеев Д.Н., Невежин О.А. Вольтамперные характеристики термоэмиссионных преобразователей // Москва: Атомиздат, 1967, 151 с.

57. Стаханов И.П., Степанов А.С., Пащенко В.П. и др. Плазменное термоэмиссионное преобразование энергии // Москва: Атомиздат, 1968, 302 с.

58. Физические основы термоэмиссионного преобразования энергии // Под ред. Стаханова И.П., Москва: Атомиздат, 1973, 375 с.

59. Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма // Под ред. Мойжеса Б.Я., Пикуса Г.Е., Москва: Наука, 1973, 480 с.

60. Ушаков Б.А, Никитин В.Д., Емельянов И.Я. Основы термоэмиссионного преобразования энергии // Москва: Атомиздат, 1974, 288 с.

61. Синявский В.В., Бержатый В.И., Маевский В.А. и др. Проектирование и испытание термоэмиссионных твэлов // Москва: Атомиздат, 1981, 96 с.

62. Ионкин В.И., Ярыгин В.И. Роль ядерной энергетики в космических исследованиях. Опыт и достижения СССР/России. Современное состояние и перспективы развития // Учебное пособие, Обнинск: ИАТЭ, 2007, 80 с.

63. Ярыгин В.И., Ружников В.А., Синявский В.В. Космические ядерные энергетические установки: прошлое, настоящее, будущее. Учебное пособие по курсу «Перспективные методы получения и преобразования энергии». – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2012, 112 с.

64. Никитин В.П., Пономарев-Степной Н.Н., Николаев Ю.В. и др. Космическая ЯЭУ «Енисей» // Атомная энергия, т. 88, вып.6, 2000, с.122 – 136.

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

66. Лазаренко Д.Г. Теплоэлектрофизические характеристики термоэмиссионных электрогенерирующих систем для ядерных энергетических установок нового поколения // Автореферат диссертации к. ф.-м. н. - Обнинск: 2009, 25 с.

67. Виноградов Е.Г., Линник В.А., Лазаренко Д.Г. и др. Методика расчета вольтамперных характеристик термоэмиссионных ЭГК сложной геометрии // Атомная энергия, т. 106, вып.5, 2009, с. 257 – 262.

68. Алексеев А.А. Расчет ЭГК с учетом продольной теплопроводности // Сборник докладов Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе – 2005», Москва-Подольск, 2005, т.3, с. 531 – 532.

69. Бабушкин Ю.В., Зимин В.П. Методы расчета вольтамперных характеристик термоэмиссионных электрогенерирующих сборок // Известия Томского политехнического университета, 2006, т. 309, №2, с. 135 – 139.

70. Бабушкин Ю.В., Зимин В.П., Хомяков Е.А. Поддержка унаследованного программного обеспечения для моделирования термоэмиссионных ядерных энергетических установок // Сборник докладов Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе – 2005», Москва-Подольск, 2005, т.2, с. 303 – 307.

71. Бабушкин Ю.В., Зимин В.П. Математическое обеспечение для моделирования термоэмиссионных систем // Известия Томского политехнического университета, 2006, т. 309, №1, с. 51 – 55.

72. Бабушкин Ю.В., Зимин В.П., Хомяков Е.А. Программное обеспечение и результаты моделирования термоэмиссионных систем // Известия Томского политехнического университета, 2006, т. 309, №3, с. 53 – 57.

73. Ярыгин В.И. Физические основы термоэмиссионного преобразования энергии. Часть 2 // Учебное пособие, Обнинск: ИАТЭ, 2006, 64 с.

74. Андрияшин А.В., Мелета Е.А., Миронов В.С. и др. Базовый комплекс аппаратных, методических и программных средств для проведения экспериментальных исследований лабораторных ТЭП // Избранные труды ФЭИ, 1996, с. 69 – 76.

75. Виноградов Е.Г., Миронов В.С., Смольникова Г.И. и др. Банк данных вольтамперных характеристик термоэмиссионного преобразователя // Атомная энергия, т. 89, вып.1, 2000, с. 71 – 74.

76. Виноградов Е.Г., Миронов В.С., Петровский В. Г., Ярыгин В.И. и др. Компьютерный банк данных ВАХ ЭГК // Атомная энергия, т. 91, вып.4, 2001.

77. Кайбышев В.З. Идентификация факторов, определяющих эффективность термоэмиссионного преобразователя энергии // Сборник докладов Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе – 2005», Москва-Подольск, 2005, т.2, с. 320 – 331.

78. Арефьев К.М., Палеев И.И. Основы термоэлектронного и магнитогидродинамического преобразования энергии // Москва: Атомиздат, 1970, 215 с.

79. Сидельников В.Н. О роли эмиссии электронов с коллектора термоэмиссионного преобразователя // ЖТФ, № 3, 1983, с. 385 – 390.

80. Сидельников В.Н. Универсальная одномерная модель TOR термоэмиссионного преобразователя // Сборник трудов 29 Международной конференции по инженерным проблемам преобразования энергии, США, Монтерей, 1994, т.2, с. 1078 – 1081.

81. Коноплев А.А., Юдицкий В.Д., Пушина Л.И. Эмпирический метод расчета вольтамперных характеристик разрядного режима ТЭП // ЖТФ, т. XLV, вып.2, 1975, с. 314 – 319.

82. Миронов В.С., Сидельников В.Н. Предельные выходные характеристики ТЭП // Тезисы докладов конференции «Ядерная энергетика в космосе», Обнинск, 1990, ч.1, с.90 – 92.

83. Сергеев А.Г., Латышев М.В., Терегеря В.В. Метрология, стандартизация, сертификация // Москва: Логос, 2005, 560 с.

84. Земельман М.А. Метрологические основы технических измерений // Москва: Изд-во стандартов, 1991, 215 с.

85. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений // Ленинград: Энергоатомиздат. Ленинградское отделениение, 1991, 304 с.

86. Официальный сайт производителя «MathWorks. Matlab». – URL: http://www.mathworks.com/. Дата обращения: 24.10.2014.

87. Андросов В.Н., Модин В.А. Атлас локальных ВАХ. Систематизация результатов измерений вольт-амперных характеристик электродной пары: эмиттер, W[110]; коллектор, $W_{поли}$, в диапазоне температур T_E = 1200 – 1900 С; T_C = 400 – 700 С. Подольск, 2004.

88. Ярыгин В.И. Электродные материалы для энергонапряженных электрогенерирующих каналов термоэмиссионного реактора-преобразователя // Ракетно-космическая техника, серия XII, вып. 1-2, 1998, с. 105-115.

89. Справочник по свойствам для перспективных реакторных технологий. Том 1. Свойства жидкометаллических теплоносителей. Том 2. Свойства газовых сред // Под общей редакцией доктора технических наук, профессора В.М. Поплавского. – М.: ИздАт. – 2011. – с. 73.

90. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости // Москва: издательство МЭИ, 2003, 312 с.

91. Левич В.Г., Вдовин Ю.А., Мямлин В.А. Курс теоретической физики. Том 2 // Москва: Физматгиз, 1962, 820 с.

92. Шолохов А.А., Засорин И.П., Минашин В.Е. и др. Определение температуры в твэлах ядерного реактора // Москва: Атомиздат, 1978, 232 с.

93. 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.

94. Синявский В.В. Методы и средства экспериментальных исследований и реакторных испытаний термоэмиссионных электрогененрирующих сборок. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 375 с.

95. Исследовательский ядерный реактор ИВВ-2М. Краткое описание и основные характеристики – URL: http://irm-atom.ru/Doc/Reactor.pdf. Дата обращения: 03.05.2015.

96. Сафонов В.А., Чеботков В.А., Ивонин, В.И. Стендовая база ИВВ-2М для проведения испытаний термоэмиссионных многоэлементных электрогенерирующих каналов // Сборник трудов Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе - 2005», Москва-Подольск, март 2005. Том 2, с. 375-380.

97. Briesmeister, Ed., «A General Monte Carlo N - Particle Transport code», Los Alamos National Laboratory report, LA-12625-M, Version 4B (1997).

98. Ярыгин В.И., Пышко А.П. О месте термоэмиссии в прикладных и фундаментальных исследованиях и разработках // Научно-технический сборник «Итоги научно-технической деятельности института ядерных реакторов и теплофизики за 2013 год». Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2014. - с. 111-119.

99. Тепловыделение в ядерном реакторе // Под редакцией Пономарева-Степного Н.Н. Энергоатомиздат, 1985. – 160 с.

100. Давыдов А.А., Еремин С.А., Королев В.У., Синявский В.В. и др. Сравнительный анализ методов определения тепловой мощности термоэмиссионных электрогенерирующих каналов при петлевых реакторных испытаниях // Сборник трудов «Ракетно-космическая техника». Серия XII. Выпуск 1-2, 1998, – с. 162.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Список многомерных аппроксимирующих функций, использованных для обработки и интерпретации данных многофакторного эксперимента:

Полиномиальные функции

- $z = a + b*x + c*y + d*x^2 + f*y^2 + g*x^3 + h*y^3 + i*xy + j*x^2y + k*xy^2$
- $z = a + b*x + c*y + d*x^2 + f*y^2 + g*x^3 + h*y^3$
- $z = a + b*x + c*y + d*x^2 + f*y^2 + g*xy$
- $z = a + b*x + c*y + d*x^2 + f*y^2$
- $z = a + b*x + c*y$

Экспоненциальные функции

- $z = a + b*\exp(x) + c*\exp(y) + d*\exp(x)^2 + f*\exp(y)^2 + g*\exp(x)^3 + h*\exp(y)^3 + i*\exp(x)*\exp(y) + j*\exp(x)^2*\exp(y) + k*\exp(x)*\exp(y)^2$
- $z = a + b*\exp(m*x+n) + c*\exp(o*y+p) + d*\exp(m*x+n)^2 + f*\exp(o*y+p)^2 + g*\exp(m*x+n)^3 + h*\exp(o*y+p)^3 + i*\exp(m*x+n)*\exp(o*y+p) + j*\exp(m*x+n)^2*\exp(o*y+p) + k*\exp(m*x+n)*\exp(o*y+p)^2$
- $z = a + b*\exp(x) + c*\exp(y) + d*\exp(x)^2 + f*\exp(y)^2 + g*\exp(x)*\exp(y)$
- $z = a + b*\exp(h*x+i) + c*\exp(j*y+k) + d*\exp(h*x+i)^2 + e*\exp(j*y+k)^2 + f*\exp(h*x+i)*\exp(j*y+k)$
- $z = a + b*\exp(x) + c*\exp(y)$
- $z = a + b*\exp(d*x+f) + c*\exp(g*y+h)$
- $z = a + b*\exp(x) + c*\exp(y) + d*\exp(x)^2 + e*\exp(y)^2 + f*\exp(x)^3 + g*\exp(y)^3$
- $z = a + b*\exp(i*x+j) + c*\exp(k*y+m) + d*\exp(i*x+j)^2 + f*\exp(k*y+m)^2 + g*\exp(i*x+j)^3 + h*\exp(k*y+m)^3$
- $z = a + b*\exp(x) + c*\exp(y) + d*\exp(x)^2 + f*\exp(y)^2$
- $z = a + b*\exp(g*x+h) + c*\exp(i*y+j) + d*\exp(g*x+h)^2 + f*\exp(i*y+j)^2$

Логарифмические функции

- $z = a + b*\ln(x) + c*\ln(y) + d*\ln(x)^2 + f*\ln(y)^2 + g*\ln(x)^3 + h*\ln(y)^3 + i*\ln(x)*\ln(y) + j*\ln(x)^2*\ln(y) + k*\ln(x)*\ln(y)^2$
- $z = a + b*\ln(h*x+i) + c*\ln(j*y+k) + d*\ln(h*x+i)^2 + f*\ln(j*y+k)^2 + g*\ln(h*x+i)*\ln(j*y+k)$
- $z = a + b*\ln(m*x+n) + c*\ln(o*y+p) + d*\ln(m*x+n)^2 + f*\ln(o*y+p)^2 + g*\ln(m*x+n)^3 + h*\ln(o*y+p)^3 + i*\ln(m*x+n)*\ln(o*y+p) + j*\ln(m*x+n)^2*\ln(o*y+p) + k*\ln(m*x+n)*\ln(o*y+p)^2$

- $z = a + b*\ln(x) + c*\ln(y) + d*\ln(x)^2 + f*\ln(y)^2 + g*\ln(x)*\ln(y)$
- $z = a + b*\ln(h*x+i) + c*\ln(j*y+k) + d*\ln(h*x+i)^2 + f*\ln(j*y+k)^2 + g*\ln(h*x+i)*\ln(j*y+k)$
- $z = a + b*\ln(x) + c*\ln(y)$
- $z = a + b*\ln(d*x+f) + c*\ln(g*y+h)$
- $z = a + b*\ln(x) + c*\ln(y) + d*\ln(x)^2 + f*\ln(y)^2 + g*\ln(x)^3 + h*\ln(y)^3$
- $z = a + b*\ln(i*x+j) + c*\ln(k*y+m) + d*\ln(i*x+j)^2 + f*\ln(k*y+m)^2 + g*\ln(i*x+j)^3 + h*\ln(k*y+m)^3$
- $z = a + b*\ln(x) + c*\ln(y) + d*\ln(x)^2 + f*\ln(y)^2$
- $z = a + b*\ln(g*x+h) + c*\ln(i*y+j) + d*\ln(g*x+h)^2 + f*\ln(i*y+j)^2$

Рациональные функции

- $z = (a + b*x + c*y)/(1 + d*x + f*y)$
- $z = (a + b*\ln(x) + c*\ln(y))/(1 + d*x + f*y)$
- $z = (a + b*\exp(x) + c*\ln(y))/(1 + d*x + f*y)$
- $z = (a + b*\ln(x) + c*\exp(y))/(1 + d*x + f*y)$
- $z = (a + b*\exp(x) + c*\exp(y))/(1 + d*x + f*y)$
- $z = (a + b*x + c*y)/(1 + d*\ln(x) + f*\ln(y))$
- $z = (a + b*x + c*y)/(1 + d*\exp(x) + f*\ln(y))$
- $z = (a + b*x + c*y)/(1 + d*\ln(x) + f*\exp(y))$
- $z = (a + b*x + c*y)/(1 + d*\exp(x) + f*\exp(y))$
- $z = (a + b*\ln(x) + c*\ln(y))/(1 + d*\ln(x) + f*\ln(y))$
- $z = (a + b*\exp(x) + c*\ln(y))/(1 + d*\exp(x) + f*\ln(y))$
- $z = (a + b*\ln(x) + c*\exp(y))/(1 + d*\ln(x) + f*\exp(y))$
- $z = (a + b*\exp(x) + c*\exp(y))/(1 + d*\exp(x) + f*\exp(y))$
- $z = (a + b*x + c*y + d*xy)/(1 + f*x + g*y + h*xy)$
- $z = (a + b*\ln(x) + c*\ln(y) + d*\ln(x)\ln(y))/(1 + f*x + g*y + h*xy) + \text{Offset}$
- $z = (a + b*\exp(x) + c*\ln(y) + d*\exp(x)\ln(y))/(1 + f*x + g*y + h*xy)$
- $z = (a + b*\ln(x) + c*\exp(y) + d*\ln(x)\exp(y))/(1 + f*x + g*y + h*xy)$
- $z = a*(c*y + d)^3 – b*(c*y + d)(e*x + f)^2 + \text{Offset}$

Функции смешанного типа

- $z = a * x^b * y^c$
- $z = a * (d*x + f)^b * (g*y + h)^c$

- $z = 4a^2 / (1 + 4a^2 * (x^2 + y^2))^2$
- $z = -1.0 * a * (x^2 + y^2)^3 / (b + (x^2 + y^2)^2)^4$
- $z = -1.0 * a * y^2 / (x^2 + a * (y^2 + y^4))^2$
- $z = -1.0 * a * x^2 / (y^2 + a * (x^2 + x^4))^2$
- $z = a*x^4 + b*x^2y – c*y^2$
- $z = a*y^4 + b*y^2x – c*y^2$
- $z = a*x^3 – b*xy^2$
- $z = a*y^3 – b*y*x^2$
- $z = a*(c*x + d)^3 – b*(c*x + d)(f*y + g)^2$
- $z = a*(c*y + d)^3 – b*(c*y + d)(e*x + f)^2$
- $z = a * (x^2 + y^2)$
- $z = a * ((b*x + c)^2 + (d*y + f)^2)$
- $z = a + b*x + c/y + d*x^2 + f/y^2 + g*x/y$
- $z = a + b*x + c/\ln(y) + d*x^2 + f/\ln(y)^2 + g*x/\ln(y)$
- $z = (a + b*\exp(x) + c*\ln(y))/(1 + d*x + f*y) + \text{Offset}$
- $z = a + b*x + c*\ln(y) + d*x^2 + f*\ln(y)^2 + g*x*\ln(y)$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица П.2.1. Характеристики точности аппроксимации экспериментальных ВАХ, соответствующих дуговому режиму работы ТЭП с электродной парой $W_{моно}$-$W_{поли}$

№ п/п	Функция	Величина дисперсии адекватности	Среднее абсолютное отклонение	Средняя относительная погрешность
1	(2.9)	0.0820	0.2591	0.0497
2	(2.10)	0.2376	0.3133	0.0537
3	(2.11)	0.4889	0.6462	0.0512
4	(2.12)	0.5527	0.6982	0.0882
5	(2.13)	0.6217	0.7349	0.0649
6	(2.14)	0.9375	1.0663	0.0641
7	(2.15)	1.5368	1.2780	0.0774
8	(2.16)	1.8113	1.3784	0.0869
9	(2.17)	2.0051	1.2883	0.0776
10	(2.18)	2.1338	1.3588	0.0972

Таблица П.2.2. Характеристики точности аппроксимации экспериментальных ВАХ, соответствующих дуговому режиму работы ТЭП с электродной парой Pt-ВХ2У

№ п/п	Функция	Величина дисперсии адекватности	Среднее абсолютное отклонение	Средняя относительная погрешность
1	(2.9)	0.0918	0.2273	0.0465
2	(2.10)	0.2474	0.2815	0.0505
3	(2.11)	0.4987	0.6144	0.0480
4	(2.12)	0.5625	0.6664	0.0850
5	(2.13)	0.6315	0.7031	0.0617
6	(2.14)	0.9473	1.0345	0.0609
7	(2.15)	1.5466	1.2462	0.0742
8	(2.16)	1.8211	1.3466	0.0837
9	(2.17)	2.0149	1.2565	0.0744
10	(2.18)	2.1436	1.3270	0.0940

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

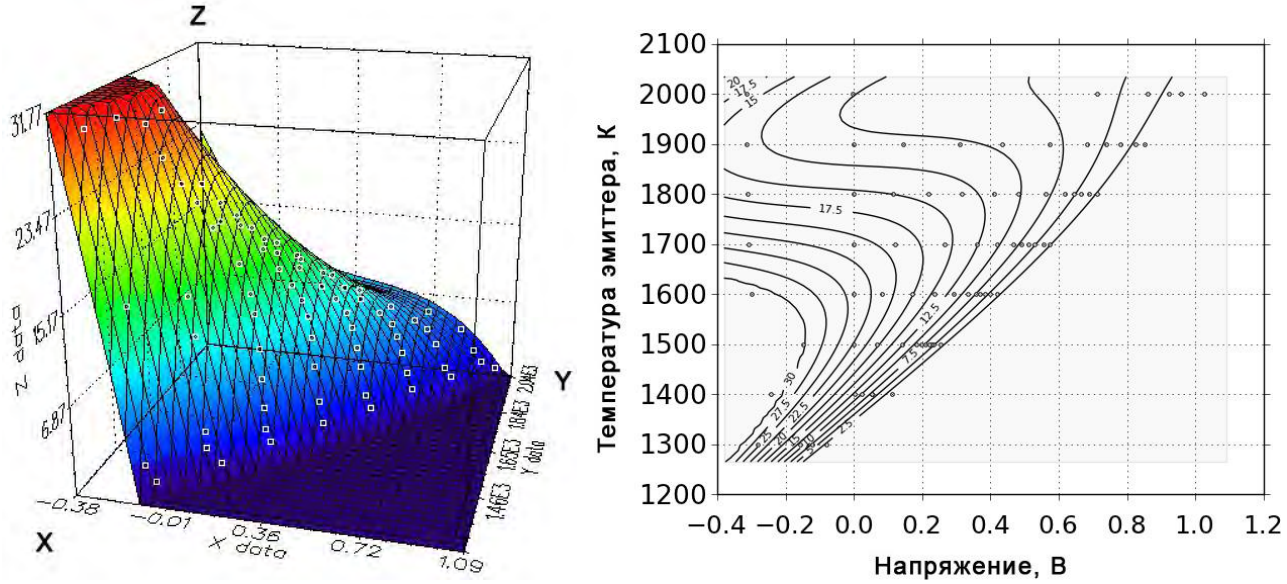


Рис. 43. Результат аппроксимации выборки экспериментальных ВАХ ТЭП с электродной парой Pt-ВХ2У с использованием функции (2.9)

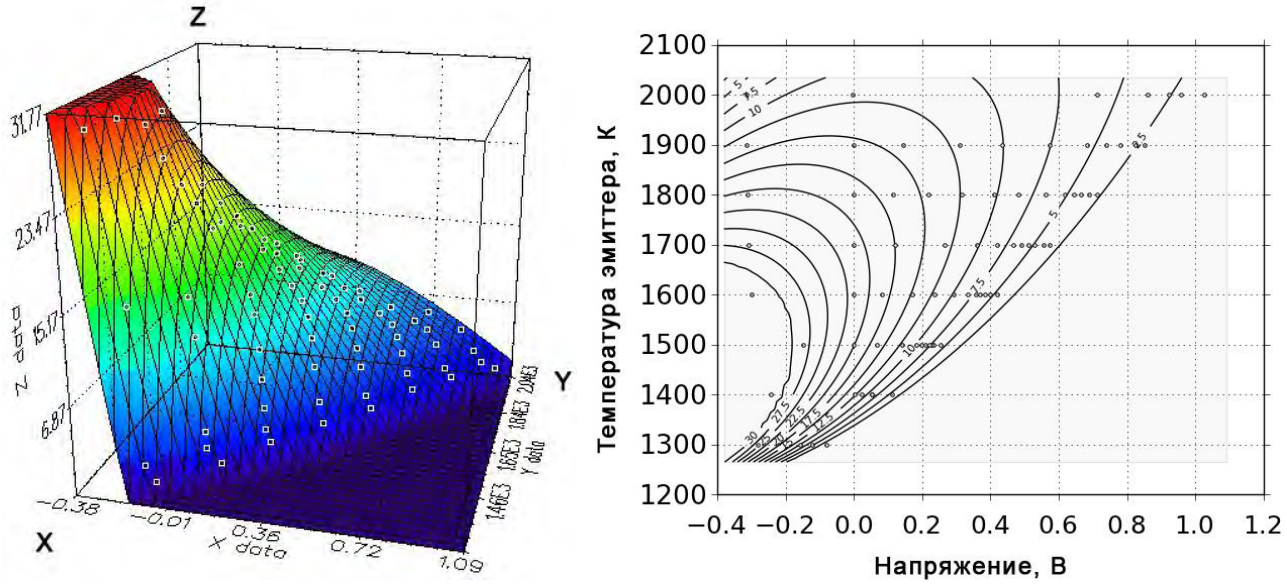


Рис. 44. Результат аппроксимации выборки экспериментальных ВАХ ТЭП с электродной парой Pt-ВХ2У с использованием функции (2.11)

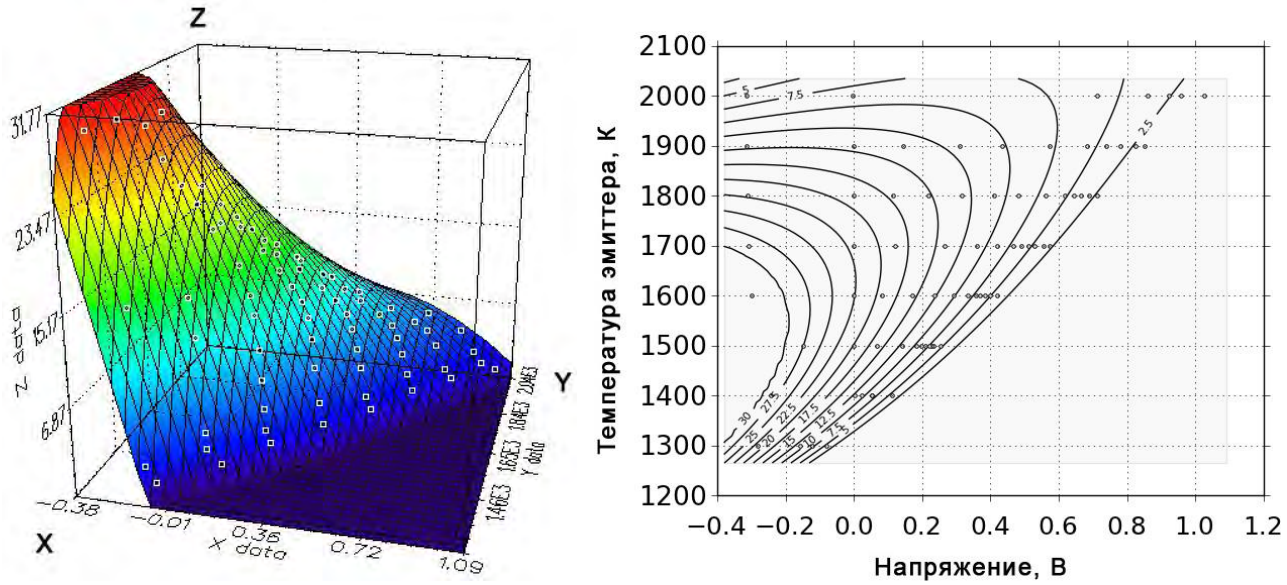


Рис. 45 Результат аппроксимации выборки экспериментальных ВАХ ТЭП с электродной парой Pt-ВХ2У с использованием функции (2.13)

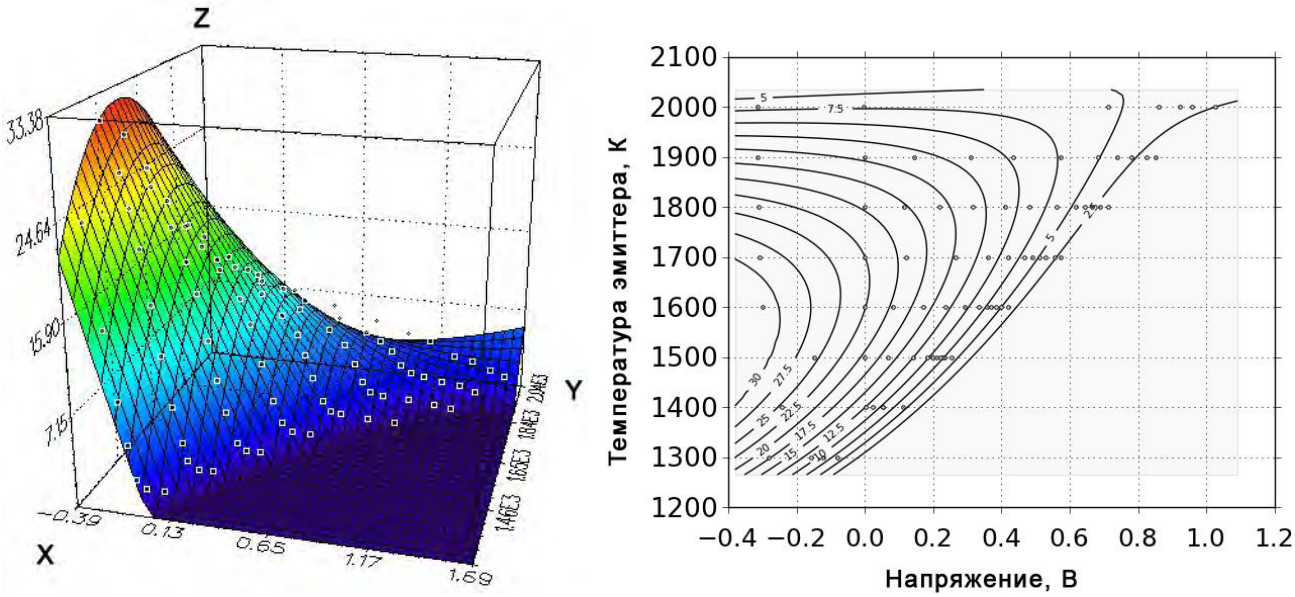


Рис. 46. Результат аппроксимации выборки экспериментальных ВАХ ТЭП с электродной парой Pt-ВХ2У с использованием функции (2.15)