

---

УДК 621.039.578:629.7

## **Современные расчетные технологии обоснования характеристик ядерных электродвигательных установок в проектных работах создания термоэмиссионных космических ядерных энергетических установок нового поколения**

**Полоус М. А., Алексеев П. А.<sup>\*</sup>, Ехлаков И. А.**

*Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского, ФЭИ,*

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

*<sup>\*</sup>e-mail: ya-pavel-alekseev@ya.ru*

### **Аннотация**

Настоящая работа является комплексной и представляет собой обзор трех современных расчетных технологий обоснования характеристик ЯЭДУ в проектных работах по созданию термоэмиссионных КЯЭУ нового поколения. Задача проведения численного расчета выходных электрических и тепловых характеристик многоэлементного термоэмиссионного ЭГК, задача нейтронно-физического расчета реактора и задача оптимизации радиационной защиты КЯЭУ решаются с применением современных расчетных методов, обеспечивая высокий уровень достоверности получаемых результатов.

**Ключевые слова:** термоэмиссионный преобразователь, электрогенерирующий канал, трехмерный численный расчет, оптимизация радиационной защиты, алгоритм искусственной пчелиной колонии, оптимизация ядерного реактора, генетический алгоритм.

Возникновение космической ядерной энергетики стало следствием необходимости обеспечения космических аппаратов (КА) мощным, компактным, надежным и устойчивым к внешним воздействиям источником энергии. Первой космической ядерной энергетической установкой (КЯЭУ), выведенной на орбиту в 1965 году стал американский SNAP-10A. Его электрическая мощность, обеспечиваемая термоэлектрическим преобразователем,

составляла от 500 до 650 Вт. Реактор успешно проработал 43 дня, после чего он был остановлен из-за отказа регулятора напряжения.

Первый советский спутник с ядерной энергетической установкой был запущен 3 октября 1970 г. Космический аппарат «УС-А» оснащенный радиолокатором и предназначенный для обнаружения надводных кораблей и авианосных соединений противника, использовал в качестве энергетической установки ЯЭУ «Бук» мощностью 3 кВт с термоэлектрическим преобразованием тепловой энергии. С 1970 по 1988 гг. были произведены 32 запуска ЯЭУ «Бук» при этом удалось увеличить срок активного существования изделий с 45 до 120 суток, и решить ряд других задач. Параллельно с работами по созданию ЯЭУ с термоэлектрическими генераторами проектировались ЯЭУ с термоэмиссионными преобразователями имеющими большой КПД, ресурс и улучшенные массогабаритные характеристики энергоустановки и космического аппарата в целом. В 1987–1988 гг проводились летные испытания двух образцов термоэмиссионной ЯЭУ «Тополь», с электрической мощностью 5 кВт. ЯЭУ проработали 142 и 342 суток, в обоих случаях окончание работы ЯЭУ было связано с плановым исчерпанием запасов цезия, используемого при работе термоэмиссионного реактора-преобразователя [1].

В результате этого был накоплен большой опыт конструирования, изготовления и испытаний подобных и перспективных электрогенерирующих систем прямого преобразования энергии в составе ЯЭУ различного назначения (для космических, морских и наземных задач).

Отечественная космонавтика сейчас претерпевает глубокую реформу. Реформирование этой отрасли предусматривает в первую очередь 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 - 2015 гг. запланировано выполнение более двух десятков проектов научного назначения. Среди них полномасштабные космические проекты, в рамках которых должны быть созданы специализированные космические аппараты, снабженные целевыми комплексами научной аппаратуры.

Появление нового комплекса космических задач, требующих для своей реализации десятков и сотен киловатт электрической мощности, ставит вопрос создания энергетических установок большей мощности. Разрабатываемые в настоящее время космические ядерные

энергетические установки (КЯЭУ) с термоэмиссионным преобразованием энергии способны перекрыть весь необходимый мощностной диапазон с приемлемыми эксплуатационными показателями [2]. НИОКР по созданию КЯЭУ нового поколения ведутся при значительном ужесточении требований по увеличению ресурса, величины выходной электрической мощности, ядерной и радиационной безопасности. И, хотя КЯЭУ с прямым преобразованием энергии уступают КЯЭУ с динамическим преобразованием по системному к.п.д. в области мегаваттных мощностей, по системному критерию удельной массы они сопоставимы. До настоящего времени только термоэлектрические и термоэмиссионные преобразователи тепловой энергии в электрическую были и остаются единственными, прошедшими не только все стадии НИОКР, но и получившими реальный опыт использования в составе КЯЭУ [3].

### **Постановка задачи**

Настоящая работа является комплексной и представляет собой обзор трех современных расчетных технологий обоснования характеристик ЯЭДУ в проектных работах по созданию термоэмиссионных КЯЭУ нового поколения. На первом этапе работы решается задача проведения численного расчета выходных электрических и тепловых характеристик многоэлементного термоэмиссионного ЭГК в трехмерной геометрии с использованием экспериментальных данных о вольтамперных характеристиках (ВАХ) термоэмиссионных преобразователей (ТЭП) в широком диапазоне изменения параметров рабочего процесса для обоснования проектных решений термоэмиссионных КЯЭУ нового поколения. Следующий этап работы состоит в решении задачи нейтронно-физического расчета реактора с целью обеспечения условий нормального протекания цепной ядерной реакции деления. В общем случае нейтронно-физический расчет реактора включает этапы установления картины распределения нейтронного потока по всему объему активной зоны, определения геометрических размеров и физико-технических параметров основных элементов как условия обеспечения стационарного состояния реактора, определения необходимого запаса реактивности с учетом выгорания топлива, температурных эффектов и др. На заключительном этапе работы решается задача оптимизации радиационной защиты КЯЭУ, которая заключается в минимизации массогабаритных характеристик блока радиационной защиты реактора при обеспечении им допустимых радиационных нагрузок на всех защищаемых объектах.

## **Современный программный комплекс для трехмерного численного расчета выходных характеристик многоэлементного ЭГК**

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

В настоящей работе решается задача проведения численного расчета выходных электрических и тепловых характеристик многоэлементного термоэмиссионного ЭГК в трехмерной геометрии с использованием экспериментальных данных о ВАХ ТЭП в широком диапазоне изменения параметров рабочего процесса для обоснования проектных решений термоэмиссионных ЯЭУ прямого преобразования энергии нового поколения. Следует отметить, что в настоящее время существует большое количество программных комплексов, предназначенных для проведения теплофизических, электромагнитных и термомеханических расчетов, хорошо зарекомендовавших себя при обосновании проектных решений ЯЭУ нового поколения и элементов их систем. Тем не менее, ни один из них не может быть напрямую использован для расчета электротеплофизических характеристик термоэмиссионной электрогенерирующей системы (ТЭС) из-за отсутствия блока, моделирующего процессы в межэлектродном зазоре (МЭЗ) и на электродах. В связи с необходимостью проведения расчетов ТЭС на современном уровне в работе была выполнена и описывается модификация стандартного численного решателя современного программного комплекса конечно-элементного анализа Comsol [6]. В результате - был получен новый численный решатель, позволяющий моделировать сопряженную термоэмиссионную задачу в трехмерной постановке с использованием экспериментальных ВАХ ТЭП. Настоящий

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

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

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

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

*Математическая модель физических процессов в ЭГК.* Основным функциональным элементом термоэмиссионного реактора-преобразователя является ЭГЭ. Наиболее широкое практическое применение получили ЭГЭ цилиндрической геометрии. Сборка последовательно соединенных ЭГЭ, заключенных в общий корпус (чехол), омываемый теплоносителем, получила название ЭГК. В свою очередь, каждый ЭГЭ состоит из собственно ТЭП и коммутационной перемычки, соединяющей его с соседним ТЭП. ТЭП состоит из двух тонких коаксиально расположенных цилиндрических электродов, разделенных МЭЗ, который в рабочем состоянии заполнен парами цезия при давлении несколько мм рт. ст. Внутренний электрод (эмиттер) поддерживается при температуре 1500-1900 К, источником тепла служит заключенный внутри него тепловыделяющий сердечник из ядерного топлива. Принципиальная схема цилиндрического ЭГЭ представлена на рисунке 1 [7].

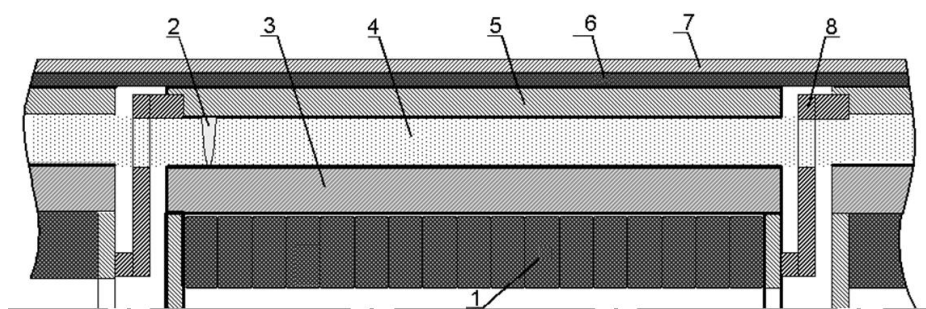


Рисунок 1. Конструктивная схема многоэлементного ЭГК: 1 – топливные таблетки; 2 – дистанционатор; 3 – эмиттер; 4 – МЭЗ; 5 – коллектор; 6 – изоляция (керамика); 7 – чехол; 8 – межэлектродная коммутационная перемычка

Пространственное распределение температуры в моделируемом устройстве описывается двумерным осесимметричным нестационарным уравнением энергии в цилиндрических координатах. Действие теплового излучения и электронного охлаждения на теплообмен учитывается введением в уравнение соответствующих источников-стоков тепла

[2]. Сложность структуры и разнородность материалов рассматриваемых устройств приводят к пространственной неравномерности распределения электрического потенциала, включая поверхность электродов. Распределение потенциала в неоднородной электропроводящей среде описывается уравнением Пуассона с пространственно зависимым коэффициентом электропроводности.

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

$$j = j(u, T_E, T_C, P_{CS}, d, \varphi_E, \varphi_C), \quad (1)$$

где  $u$  – величина межэлектродного напряжения,  $T_E$  – температура эмиттера,  $T_C$  – температура коллектора,  $P_{CS}$  – давление паров цезия в МЭЗ,  $d$  – величина МЭЗ,  $\varphi_E$  – работа выхода эмиттера,  $\varphi_C$  – работа выхода коллектора. При проведении расчетов электротеплофизических характеристик ЭГК важнейшими требованиями, предъявляемыми к методике задания локальной ВАХ, являются возможность встраивания их в расчетный алгоритм и быстродействие предлагаемых расчетов.

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

*Создание расчетной модели многоэлементного ЭГК в среде Comsol.* Рассматриваемое устройство имеет сложную структуру из разнородных и взаимосвязанных элементов. Расчетная модель ЭГК, разработанная с помощью средств геометрического моделирования в программной среде Comsol, представлена на рисунке 2. Настоящая модель многоэлементного ЭГК имеет двумерное осесимметричное приближение. На рисунке представлен один ЭГЭ и области его межэлектродной коммутации. Особенности конструкции многоэлементного термоэмиссионного ЭГК обуславливают значительную пространственную неравномерность тепловых потоков и температуры в элементах

устройства, что приводит к невозможности использования упрощенных одномерных моделей для расчета выходных электротеплофизических характеристик ЭГК без существенной потери точности. В настоящей работе конструкция многоэлементного термоэмиссионного ЭГК моделировалась многокомпонентной средой из более чем 10-ти компонентов, представляющих конструкционные материалы и области, отличающиеся как теплофизическими, так и электрическими свойствами.

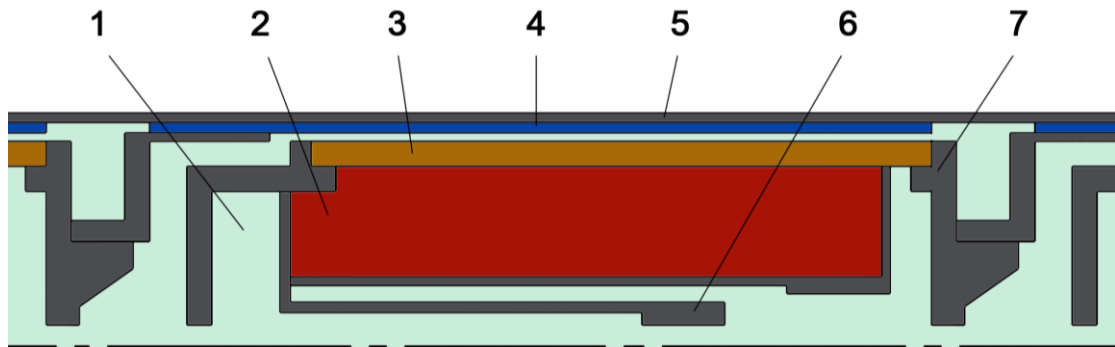


Рисунок 2. Фрагмент геометрической 2D-осесимметричной модели многоэлементного ЭГК, разработанной в программной среде COMSOL: 1 – цезиевая среда, 2 – ядерное топливо, 3 – эмиттер, 4 – коллектор, 5 – коллекторный пакет, 6 – газоотводящее устройство, 7 – межэлектродная коммутационная перемычка

После определения начальных и граничных условий (распределение тепловыделения в топливной композиции, начальное распределение потенциала, плотности тока с поверхности электродов) наступает очередь построения расчетной сетки и задания физических свойств конструкционных материалов и сред. Теплофизические и электромагнитные свойства конструкционных материалов и сред, необходимых для расчета, были взяты из [8]. Разбиение модели ЭГК на конечные элементы производилось программным кодом Comsol 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 настоящей работе была построена расчетная сетка ЭГК, состоящая из более чем 50000 расчетных ячеек, имеющих треугольную форму. Фрагмент созданной расчетной сетки представлен на рисунке 3.



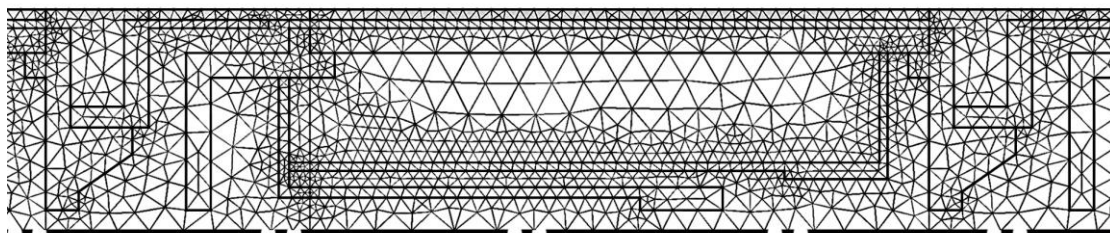


Рисунок 3. Фрагмент сгенерированной расчетной сетки геометрической модели многоэлементного ЭГК

*Общий алгоритм численного решения задачи в модифицированном программном комплексе Comsol.* Алгоритм решения полной системы конечно-разностных уравнений позволяет рассчитывать нестационарный процесс на каждом шаге по времени  $\Delta t$ . Стационарное решение задачи получается как установившиеся распределения в нестационарном процессе. Общий алгоритм решения задачи представляет собой последовательность действий:

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

Начиная со второго пункта итерационный процесс в модифицированном программном комплексе Comsol производится в автоматическом режиме.

*Расчет тепловых и электрических характеристик многоэлементного ЭГК.* Основным результатом расчетов электротеплофизических характеристик ЭГК с помощью модифицированного программного комплекса Comsol являются стационарные двумерные распределения температуры, потенциала и плотности генерируемого тока эмиттеров и коллекторов, а также других конструктивных элементов ЭГК. Программа также позволяет рассчитывать распределение тепловых потоков в любой рассматриваемой области задачи,

например, тепловой поток через МЭЗ. По найденным распределениям были рассчитаны ВАХ ЭГК, электрическая мощность и к.п.д. Как было отмечено выше, в настоящей работе для проведения расчета выходных характеристик ЭГК были использованы две выборки экспериментальных ВАХ ТЭП для различных материалов электродной пары. На рисунке 4 представлен пример расчета температурного поля многоэлементного ЭГК при тепловой мощности 5 кВт и давлении паров цезия 1.5 мм. рт. ст., полученные с помощью модифицированного программного комплекса Comsol.

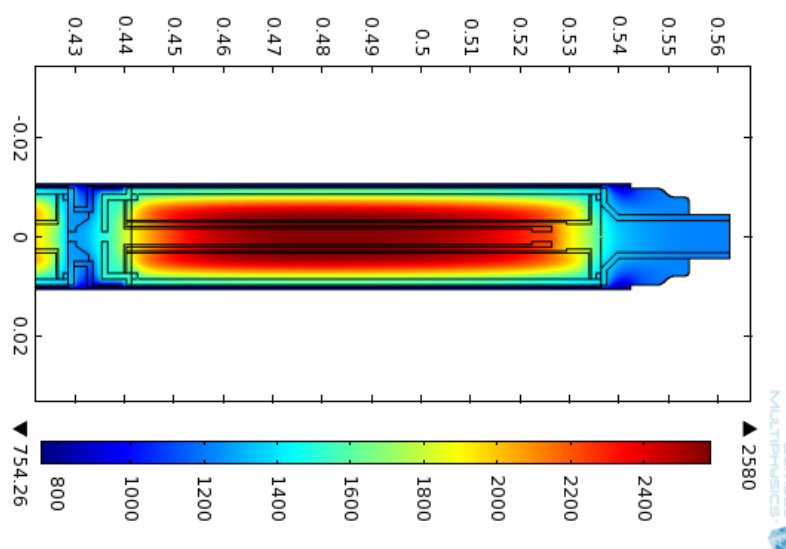


Рисунок 4. Распределение температурного поля многоэлементного ЭГК – коллекторная концевая секция при величине протекающего электрического тока 100 А (электродная пара Pt – ВХ2У)

Использование модифицированного программного комплекса Comsol с созданным авторами численным решателем, позволяющим моделировать термоэмиссионную задачу в трехмерной постановке с использованием экспериментальных ВАХ ТЭП, показало достаточную гибкость и эффективность данного подхода для выполнения массовых вариантных расчетов ЭГК и ТЭС со сложной геометрической структурой. Результаты расчетов подтвердили существенное влияние на выходные характеристики ЭГК пространственных эффектов, которые не могли быть учтены в полной мере в рамках одномерных моделей. Решающее значение для достижения высокой точности расчета имеет полнота учета реальной структуры и разнообразия физических свойств материалов моделируемых устройств, а также использование экспериментальных данных о локальных ВАХ, что позволяет учитывать в расчете влияние технологии изготовления и рабочих

условий электродной пары. На основе анализа полученных результатов расчета выходных характеристик ЭГК можно сделать вывод о хорошем качественном и количественном соответствии характеристик в сравнении с результатами, полученными с помощью одномерных математических моделей. Следует также отметить, в ходе работы были впервые получены расчетные данные об электростатике и сопряженном теплообмене в трехмерной геометрии внутри коммутационного пространства ЭГК.

### **Современная технология обоснования нейтронно-физических характеристик термоэмиссионного реактора-преобразователя**

Для расчета реакторов в последнее время широко применяются программные комплексы, в которых реактор представляется набором геометрических плоскостей с возможностью указания состава материалов и их концентраций. Возможность генерирования трехмерных гетерогенных активных зон с параметрами, изменяющимися на доли миллиметров, позволяет производить нейтронно-физические расчеты реакторов с достаточной точностью и небольшими временными затратами.

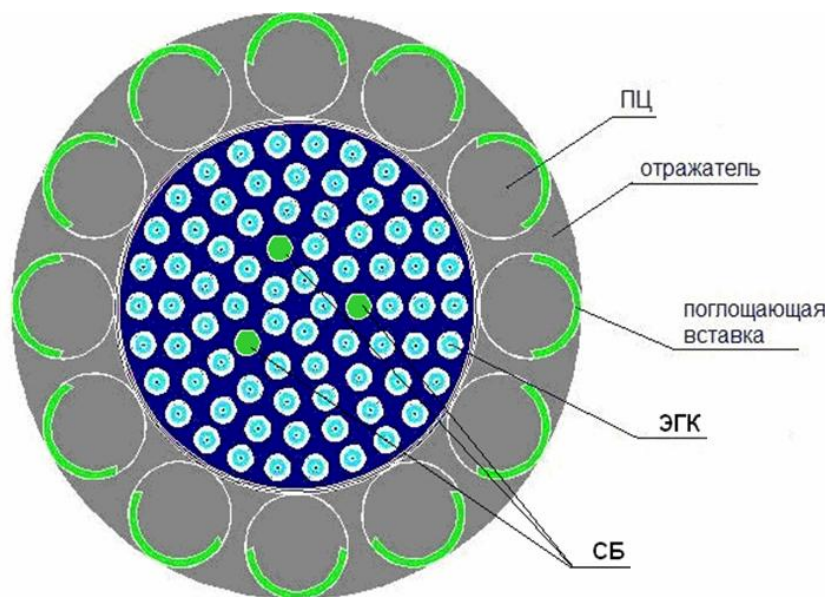


Рисунок 5. Расчетная модель усовершенствованного термоэмиссионного реактора-преобразователя космического назначения.

Обеспечение необходимых нейтронно-физических характеристик реактора является оптимизационной задачей, решение которой получают при проведении многовариантных расчетов. Расчетчик, следуя составленной программе, проводит множество расчетов до тех

пор, пока геометрия и состав активной зоне, не обеспечат необходимые значения оптимизируемых реакторных функционалов. При таком подходе качество получаемого решения зависит от опыта исследователя, кроме того, расчет множества вариантов реактора существенно сказывается на временных затратах. Повысить качество получаемого решения возможно за счет применения наряду с расчетной оптимизацией какого-либо алгоритма математической оптимизации.

Применение математического алгоритма оптимизации требует наличия явного вида оптимизируемой функции, значение которой в некоторой точке можно вычислить, либо наличия возможности вычисления ее значения. Например, значение оптимизируемой функции может быть рассчитано с помощью имитационного моделирования, т.е. с помощью проведения имитационного эксперимента с моделью сложной системы.

Оптимизация на основе имитационного моделирования заключается в совместном использовании имитационной модели (ИМ) сложной системы и алгоритма оптимизации. С помощью ИМ рассчитываются значения отклика системы для различных комбинаций значений ее параметров, которые предлагает алгоритм оптимизации. Поисковый алгоритм оптимизации, в свою очередь, используя значения отклика, пытается улучшить решение. Следует отметить, что одной из основных проблем оптимизации на основе имитационного моделирования является проблема длительности расчетов ИМ на языках имитационного моделирования. Наиболее применимым на практике способом решения данной проблемы является использование метамоделей. Метамоделю принято называть приближенную математическую модель, полученную в результате экспериментов с имитационной моделью с целью замещения последней при оптимизации [9].

Метамодель строится в виде полинома зависимости реакторного функционала от изменяемых параметров реактора (регрессионная метамодель). В данном случае удобно применять методику планирования эксперимента. В соответствии с планом эксперимента, применяя программный комплекс, проводятся расчетные опыты, в каждом из которых изменяются выбранные параметры реактора. Чем больше выбранных влияющих параметров, тем большее количество расчетных опытов необходимо провести. После проведения эксперимента и получения всех значений откликов системы (значение целевой функции) результаты обрабатываются с помощью метода наименьших квадратов. Для случая многофакторного линейного случая можно записать:

$$B=(X^T X)^{-1} X^T Y \quad (2)$$

где  $X$  - матрица планирования эксперимента;  $Y$  - вектор откликов системы;  $B$  - вектор весовых значений при каждом факторе.

Таким образом, получаем алгебраический полином вида:

$$Y = BX = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_nx_n \quad (3)$$

Этот полином является математической моделью исследуемой системы (реактора). Затем модель проверяется на адекватность изучаемой системе. Если же построенная модель (метамодель) неадекватна изучаемой системе - прогнозируемые значения и значения при точном расчете имеют значительные расхождения, то улучшение модели может проводиться за счет уменьшения области определения факторов эксперимента и/или включением в рассмотрение факторов, отвечающих за совместное влияние факторов на систему [10].

После построения модели исследуемой системы необходимо решить поставленную оптимизационную задачу. Для решения задач оптимизации существует множество успешно применяемых численных методов. Однако существенным недостатком этих методов является частая сходимость к локальному оптимуму, в котором алгоритм, как правило, застревает. В последнее время для решения реакторных оптимизационных задач применяется генетический алгоритм (ГА), который более устойчив к попаданию в локальные оптимумы и имеет ряд других преимуществ перед классическими численными методами. ГА был предложен в конце 1960-х годов Джоном Холландом – метод оптимизации, в основе которого лежат методы и модели механизма развития органического мира на земле [11].

На рисунке 6 представлена блок схема классического генетического алгоритма. Генерируем начальную популяцию из  $n$  особей. Выбираем пару хромосом-родителей с помощью одного из способов отбора. Проводим кроссинговер двух родителей, производя двух потомков. Проводим мутацию потомков. Повторяем шаги до тех пор пока не будет достигнут критерий окончания процесса [12].

В ГА принято использовать биологическую терминологию. Например, термин особь означает набор хромосом, т.е. альтернативный вариант решения задачи – совокупность значений оптимизируемых параметров реактора, хромосома – число, значение параметра реактора, популяция – совокупность особей, набор альтернативных решений задачи.

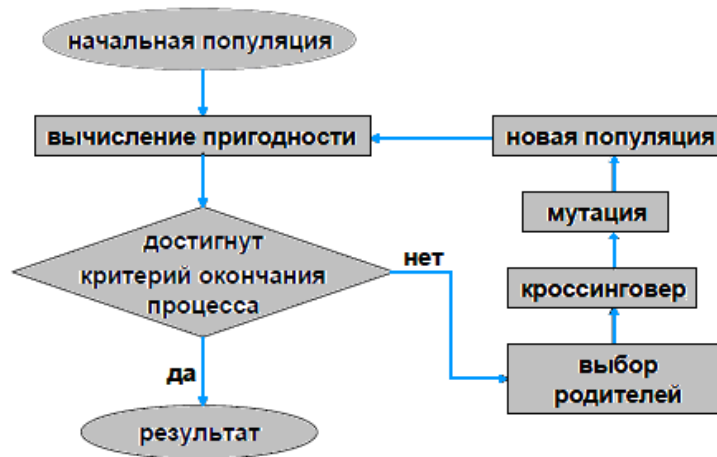


Рисунок 6. Блок-схема классического генетического алгоритма

Основными операторами генетических алгоритмов являются кроссингвер, мутация, выбор родителей и селекция (отбор хромосом в новую популяцию). Существуют основные формы операторов, чистое использование или модернизация которых ведет к получению генетического алгоритма пригодного для решения конкретной задачи.

Кроссингвер или рекомбинация применяется для получения новых особей-потомков (новых решений). Смысл рекомбинации заключается в том, что созданные потомки должны наследовать генную информацию от обоих родителей, т.е. должно сохраняться лучшее решение. Скрещивание может быть представлено следующей формулой:

$$\text{Потомок} = \text{Родитель 1} + \alpha \cdot (\text{Родитель 2} - \text{Родитель 1}), \quad (4)$$

где множитель  $\alpha$  - случайное малое число.



Рисунок 7. Дискретная рекомбинация

После процесса воспроизводства происходят мутации. Данный оператор необходим для «выбивания» популяции из локального экстремума и препятствует преждевременной сходимости. Это достигается за счет того, что изменяется случайно выбранная хромосома особи, т.е. значение параметра реактора в альтернативном решении случайно изменяется на малую величину. Хромосомы могут мутировать согласно следующему правилу:

$$\text{Новая переменная} = \text{старая переменная} \pm \alpha \quad (5)$$

где  $\alpha$  - случайное малое число, определяющее вероятность мутирования. Чем меньше  $\alpha$ , тем меньше шаг мутирования. Это связано с тем, что вероятность маленького шага мутации выше, чем вероятность большого шага. На рисунке 8 представлена схема мутирования при двоичном кодировании хромосом.

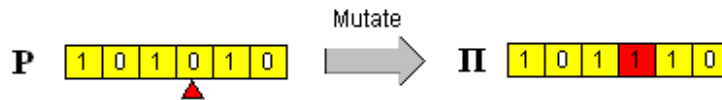


Рисунок 8. – Мутация (при двоичном кодировании хромосом)

Для создания новой популяции (новых решений) можно использовать различные методы отбора особей. Часто отбор носит элитарный характер, т.е. выбираются особи с наибольшей приспособленностью. В промежуточную популяцию входят особи из начальной популяции потомков, полученных при рекомбинации, и популяция особей, полученных при мутации. Хромосомы этих особей проверяются на удовлетворение поставленным условиям по изменяющимся параметрам, затем отбираются особи, у которых приспособленность выше или равна средней приспособленности в промежуточной популяции. Далее в новую начальную популяцию отбираются особи с наибольшей приспособленностью. Приспособленность рассчитывается по полученной метамоделю исследуемой системы. Процедура повторяется до тех пор, пока значения хромосом разных особей, отбираемых в новую популяцию, будут иметь несущественное различие, тогда они принимаются как решение и передаются в имитационную расчетную модель для точного расчета, по результатам которого выбирается окончательное решение.

Таким образом, задавая в качестве начальных точек, наборы случайных параметров реактора, при завершении работы алгоритма исследователь получает наборы параметров, удовлетворяющие всем накладываемым условиям. Из полученных решений может быть выбрано наиболее подходящее, например, с учетом параметров, которые невозможно было включить в метамоделю. Применение данной методики позволяет получить оптимальные нейтронно-физические характеристики реактора, которые обеспечат необходимый ресурс и необходимые рабочие характеристики.

## Современные технологии в оптимизации радиационной защиты КЯЭУ

Задача оптимизации радиационной защиты КЯЭУ состоит в минимизации массогабаритных характеристик блока радиационной защиты при обеспечении им допустимых радиационных нагрузок на всех защищаемых объектах.

Блок радиационной защиты имеет форму усеченного конуса, создавая за собой защищенную «тень». Поэтому такая защита получила название теневой. Как правило, она состоит из трех частей: легкого компонента (наиболее эффективно ослабляющего потоки нейтронов), тяжелого компонента (предназначенного в первую очередь для ослабления потока гамма-излучения) и теплового экрана. Каждый компонент может состоять из нескольких слоев, в том числе и разделенных между собой слоями других компонентов радиационной защиты (см. рисунок 9).

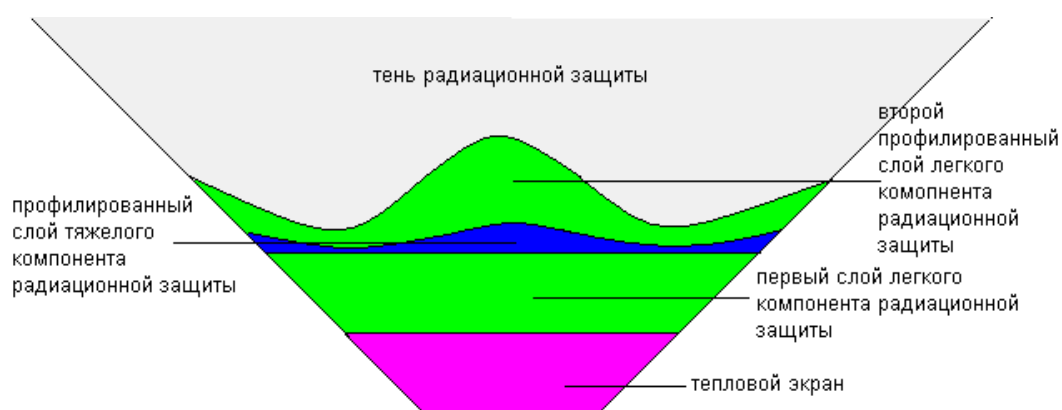


Рисунок 9. Схема блока радиационной защиты

Первым шагом в решении задачи радиационной защиты является выделение среди подсистем космического аппарата объектов, относящихся следующим классам:

- источники излучения (обычно это ядерный реактор и облученный теплоноситель);
- защищаемые объекты (система автоматического управления реакторной установкой, электронные блоки полезной нагрузки, обмотки приводов стержней управления и безопасности и т.д.);
- радиационно-стойкие подсистемы космического аппарата, которые при правильном расположении могут дополнительно ослаблять уровни радиации на защищаемых объектах, позволяя снижать массу блока радиационной защиты. Иногда по тому же принципу размещаются локальные радиационные экраны, смягчающие радиационную обстановку лишь в требуемой области и позволяющие снизить общую массу защитных конструкций;



- подсистемы, частично или полностью выступающие из тени радиационной защиты (например, панели холодильника-излучателя). Эти конструкции рассеивают реакторные фотоны и нейтроны, создавая дополнительный вклад в радиационную нагрузку на защищаемых элементах.

Далее задача оптимизации радиационной защиты разделяется на несколько задач, из которых можно выделить четыре основных:

- Задача нахождения оптимального положения защищаемых объектов. Увеличение расстояния от активной зоны ЯЭУ до защищаемых объектов является одним из видов пассивной защиты, поскольку дозы гамма-излучения и флюенсы нейтронов уменьшаются пропорционально квадрату радиуса от центра активной зоны. Это позволяет снизить требуемые толщины защитных слоев и в ряде случаев уменьшить угол тени, что в свою очередь снижает массу блока радиационной защиты. С другой стороны, это приводит к увеличению длины коммуникаций, и, как следствие, их массы.

- Задача нахождения оптимальных толщин защитных слоев, их количества и порядка следования.

- Задача нахождения оптимального профиля защитных слоев. Она основана на том, что вклад в общие дозы и флюенсы в точках размещения защищаемых объектов распределен по поверхности не профилированных защитных слоев неравномерно.

- Задача поиска оптимального угла тени. Увеличение угла тени приводит к увеличению массы радиационной защиты. Однако, при этом уменьшаются площади выступающих из тени защиты объектов и падает их вклад в радиационную нагрузку на защищаемые объекты, что позволяет уменьшить толщину защитных слоев и, соответственно, уменьшить массу блока радиационной защиты.

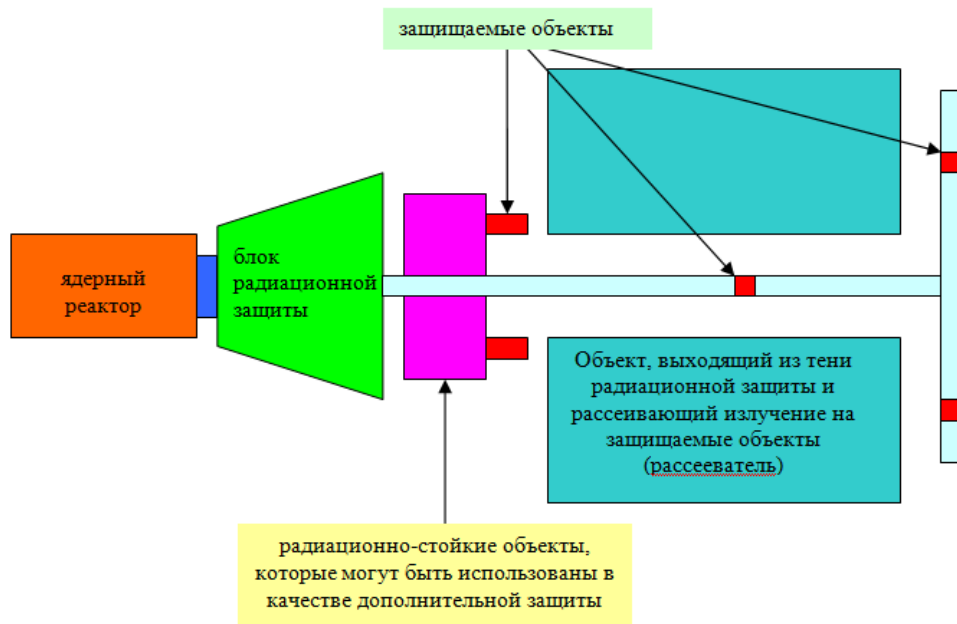


Рисунок 10. Классификация подсистем КА с точки зрения задач радиационной защиты

Хотя каждая из этих задач имеет свою специфику, все они сводятся к поиску минимума определенного функционала с условием, что найденное решение удовлетворяет наложенным условиям на дозы и флюенсы в точках расположения защищаемых объектов. Таким образом, решение выше перечисленных оптимизационных задач можно проиллюстрировать на примере одной из них.

В качестве такой задачи была выбрана задача определения оптимального профиля защитных слоев. Она решается с применением теории оптимального управления, разработанной и развитой Л.С. Понтрягиным для объектов, движение которых описывается системой уравнений

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \quad (6)$$

с граничными условиями

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{X}_0 \quad (7)$$

$$\mathbf{x}(T) = \mathbf{X},$$

где  $t_0, T$  – начальный и конечный моменты времени;  $u(t)$  – управление.

Рассматривается задача перевода системы из точки  $\mathbf{X}_0$  в точку  $\mathbf{X}$  так, чтобы функционал принимал минимальное значение [13]:

$$J = \int_{t_0}^T f_0(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt. \quad (8)$$

При этом вводится замена  $t \rightarrow S = \pi R^2$ , где  $R$  – радиус на поверхности не профилированного слоя радиационной защиты.

В состав функций  $f(x, u)$  входит распределение тока вклада разных компонентов реакторного излучения на поверхности защитного слоя, а роль управления  $u(t)$  играет его толщина [14].

Таким образом, на первом этапе требуется определить распределение токов вкладов (контрибутонов) по поверхности не профилированного слоя. Для этого поверхность разбивается на кольцевые слои равной толщины и считается отдельный вклад каждого из этих слоев в общие дозы гамма-излучения (в случае тяжелого компонента защиты) или флюенсы нейтронов (в случае легкого) в точках размещения защищаемых элементов. В связи с крайне высокой вычислительной стоимостью этих величин, количество таких слоев как правило бывает менее 10.

Далее необходимо построить зависимость тока контрибутонов от  $\pi R^2$ . Для этого, измеренные токи контрибутонов делятся на площади соответствующих кольцевых слоев, а полученное значение присваивается  $\pi R_{cp}^2$ , где  $R_{cp}$  – средний радиус кольцевого слоя. Затем полученные точки интерполируются [14].

Интерполяция тока контрибутонов от  $\pi R^2$  осложняется тем, что функционал имеет сложную форму, при этом доступно лишь небольшое узлов интерполяционной сетки, а расстояние между ними растет квадратично. Поэтому применение классических методов интерполяции, таких как канонические полиномы или интерполяция сплайн-функциями очень часто дает некорректные с точки зрения физики результаты.

Наиболее успешными в этой задаче оказывается применение алгоритма Флоатера-Хорманна и нейросетевая интерполяция. На всех протестированных наборах точек, представляющих собой реальные распределения токов контрибутонов для различных защитных слоев различных проектов блока радиационной защиты, хотя бы один из этих подходов дал физически корректный результат.

Алгоритм Флоатера-Хормана был предложен Майклом С. Флотером и Каем Хорманном в 2005 году. Он предполагает построение рациональной интерполирующей функции, не имеющей полюсов на действительной оси.

Пусть заданы точки  $x_1, \dots, x_n$  и даны значения функции в них  $f(x_i)$ . Тогда рациональный интерполянт Флоатера-Хорманна  $r(x)$  определяется следующей барицентрической формулой:

$$r(x) = \frac{\sum_{i=0}^N \frac{w_i}{x - x_i} f_i}{\sum_{i=0}^N \frac{w_i}{x - x_i}} \quad (9)$$

$$w_k = \sum_{\substack{i \in (0, n-d) \\ i \in [k-d, k]}} (-1)^i \prod_{j=i, j \neq k}^{i+d} \frac{1}{x_k - x_j} \quad (10)$$

Важными чертами алгоритма Флоатера-Хорманна являются высокая скорость работы, устойчивость, надежность, малая погрешность аппроксимации и степень интерполянта не более числа узлов интерполяционной сетки [15].

Искусственные нейронные сети представляют собой технологию, уходящую корнями во множество дисциплин: нейрофизиологию, математику, статистику, физику, компьютерные науки и технику. Они находят свое применение в таких разнородных областях, как моделирование и анализ временных рядов, распознавание образов, обработка сигналов и управление благодаря одному важному свойству – обучаться на основе данных при участии учителя и без его вмешательства [16].

В рассматриваемой задаче используется четырехслойный персептрон архитектуры 1–400:200–1, который проходит обучение в 2 этапа: методом сопряженных градиентов и методом обратного распространения ошибки с использованием всей интерполяционной сетки как обучающей выборки. Полученная в результате искусственная нейронная сеть почти всегда описывает искомый функционал корректно с физической точки зрения.

Нейронные сети нелинейны по своей природе и представляют собой исключительно мощный метод моделирования, позволяющий воспроизводить чрезвычайно сложные зависимости. Там, где линейная аппроксимация неудовлетворительна и линейные методы работают плохо, а таких задач достаточно много, основным инструментом становятся нейросетевые методы. Кроме того, нейронные сети справляются с «проклятием размерности», которые не позволяют моделировать линейные зависимости в случае большого числа переменных [17]. Это позволяет использовать искусственные нейросети не только как мощный инструмент интерполяции и аппроксимации данных, но и как самостоятельный метод оптимизации, который также находит свое применение в задачах оптимизации радиационной защиты (сети с обратными связями).

Далее следует непосредственно поиск минимума функционала (8).

В настоящее время ведутся работы по полной программной автоматизации процесса профилирования слоев радиационной защиты. Каждый метод оптимизации имеет большую или меньшую потребность в правильной политике. Например, методы, основанные на использовании производной очень чувствительны к выбору начальной точки, алгоритм имитации отжига зависит от выбора начальной температуры, количества итераций для каждой температуры и того, насколько уменьшается температура на каждом шаге процесса «охлаждения» и т.д. Неверный выбор политики очень часто приводит к остановке алгоритма в локальном оптимуме. В связи с этим, для программной автоматизации требовался метод, результат работы которого минимально зависел бы от разного рода политик. В качестве такого метода был выбран новейший алгоритм из класса интеллектуальных мультиагентных методов: алгоритм искусственной пчелиной колонии (ИПК). Другое его достоинство состоит в том, что в процессе оптимизации он требует лишь возможность вычислить значение исследуемого функционала в любой точке из области, в которой ищется глобальный экстремум, что хорошо согласуется с использованием искусственной нейронной сети для интерполяции тока контрибутонов.

Хотя алгоритм ИПК был предложен лишь в 2005 году, к настоящему времени он уже успел успешно пройти многочисленные испытания. К примеру, экспериментальные результаты его применения на N-мерных мультимодальных функциях показывают, что алгоритм имеет замечательную устойчивость, добиваясь успеха в 100% случаях, не застревая в локальных экстремумах, а также отметили очень высокие скорость работы и точность результата [18].

На сегодняшний день существует несколько различных модификаций алгоритма ИПК, оптимизированных для определенных классов задач. Но все они основаны на упрощенной модели поведения пчелиной колонии при поиске и добыче пыльцы/нектара. В алгоритме, выбранном для решения поставленной задачи, при первой итерации все пчелы летят в случайно выбранные точки в области пространства, в которой ищется глобальный минимум/максимум, со случайно сгенерированными скоростями. Каждая из них определяет значение исследуемого функционала в этой точке, при этом позиция пчелы запоминается ей, как персональная наилучшая позиция  $p_n$  (ПНП). Сравнивая посчитанные значения, определяется глобальная наилучшая позиция  $g_n$  (ГНП). На каждой новой итерации каждая пчела будет вычислять значение функционала в своей точке и корректировать, если требуется, ПНП и ГНП. Скорость пчелы на  $i+1$  итерации определяется по формуле:

$$v_n^{i+1} = \omega v_n^i + c_1 \text{rand}() (p_n - x_n) + c_2 \text{rand}() (g_n - x_n) \quad (11)$$

где  $v_n$  - это скорость частицы в  $n$ -том измерении в предыдущей итерации,  $x_n$  - это координата частицы в  $n$ -том измерении,  $\omega$  – инерционный вес, который отвечает, насколько пчела остается верной своему курсу, не подвергаясь влиянию ГНП и ПНП,  $c_1$  – «познавательный фактор», отвечающий за то, какое влияние оказывает на движение пчелы память о ПНП,  $c_2$  – «социальный фактор», отвечающий за то, какое влияние оказывает на движение пчелы знание ГНП. Увеличение  $c_1$  очень полезно при исследовании сильно осциллирующих функционалов, однако увеличивает время расчета. Увеличение  $c_2$  ускоряет исследование, но повышает вероятность остановки поиска в локальном минимуме.

При решении рассматриваемой задачи  $\omega$ ,  $c_1$  и  $c_2$  задавались случайным образом индивидуально для каждой пчелы в процессе создания роя. Таким образом, каждая пчела получала свой уникальный «характер», который сохранялся неизменным до завершения работы алгоритма. Пчелы, покинувшие заданную область поиска экстремума, перемещались в произвольную точку внутри области поиска с сохранением скорости, ПНП и ГНП, а значения, рассчитанные за пределами области поиска, не учитывались при корректировке ПНП и ГНП.

В результате применения алгоритма ИПК к задаче профилирования слоев радиационной защиты, был получен профиль легкого компонента защиты (см. рисунок 11). Распределение толщины слоя по радиусу отражает распределение, при этом наблюдалось дополнительное снижение массы и существенное ускорение процесса оптимизации по сравнению с применявшимися ранее методами. Исследование результатов, полученных с использованием большого числа наборов случайно сгенерированных поведенческих коэффициентов, показали, что все они находятся в превосходном согласии друг с другом, что позволяет сделать вывод о правомерности применения выбранной стратегии. При этом контрольный расчет радиационной обстановки в точках расположения защищаемых элементов показал, что она по-прежнему находится в пределах допустимых границ. Хорошая скорость и надежность алгоритма позволяют использовать его в программном комплексе автоматической оптимизации.

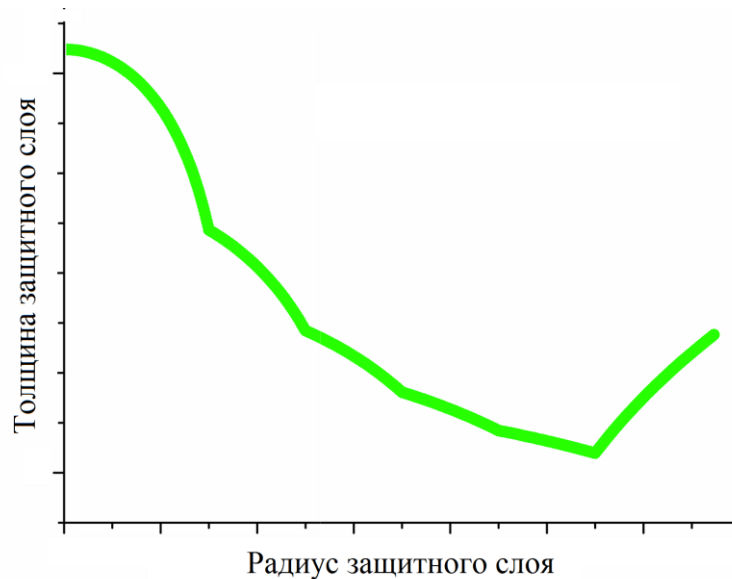


Рисунок 11. Оптимальный профиль легкого компонента защиты, найденный с использованием алгоритма искусственной пчелиной колонии.

## Заключение

В настоящей работе представлен обзор трех современных расчетных технологий обоснования характеристик ЯЭДУ в проектных работах по созданию термоэмиссионных КЯЭУ нового поколения.

На первом этапе работы был проведен численный расчет выходных электрических и тепловых характеристик многоэлементного термоэмиссионного ЭГК с помощью модифицированного программного комплекса конечно-элементного анализа Comsol для обоснования проектных решений термоэмиссионных КЯЭУ нового поколения. Использование модифицированного программного комплекса Comsol с созданным авторами численным решателем, позволяющим моделировать термоэмиссионную задачу в трехмерной постановке с использованием экспериментальных ВАХ ТЭП, показало достаточную гибкость и эффективность данного подхода для выполнения массовых вариантных расчетов ЭГК и ТЭС со сложной геометрической структурой. Результаты расчетов подтвердили существенное влияние на выходные характеристики ЭГК пространственных эффектов, которые не могли быть учтены в полной мере в рамках одномерных моделей. Следует также отметить, в ходе работы были впервые получены расчетные данные об электростатике и сопряженном теплообмене в трехмерной геометрии внутри коммутационного пространства ЭГК.

Следующий этап работы состоял в решении задачи нейтронно-физического расчета реактора с целью обеспечения условий нормального протекания цепной ядерной реакции деления. Была проведена оптимизация на основе имитационного моделирования, заключающаяся в совместном использовании метамоделей сложной системы и алгоритма оптимизации. С помощью метамоделей были рассчитаны значения отклика системы для различных комбинаций значений ее параметров, которые предлагает алгоритм оптимизации. В качестве алгоритма оптимизации используется генетический алгоритм, который устойчив к попаданию в локальные оптимумы и имеет ряд преимуществ по сравнению с классическими методами оптимизации.

Применение данной методики позволяет получить оптимальные нейтронно-физические характеристики реактора. Простая и с той же время эффективная методика обоснования нейтронно-физических характеристик ТРП позволяет интегрировать ее в код «сквозного» расчета КЯЭУ.

На заключительном этапе работы рассматривалась задача оптимизации радиационной защиты КЯЭУ, которая заключается в минимизации ее массогабаритных характеристик при обеспечении допустимых радиационных нагрузок на всех защищаемых объектах. Прежние подходы к ее решению на некоторых своих этапах регулярно требовали длительного и трудоемкого поиска алгоритмов, приемлемо обрабатывающих конкретный набор входных данных, или применения методик, в которых относительная стабильность работы компенсировалась сравнительно низким качеством получаемого результата. На примере нового подхода к решению одной из трех подзадач оптимизации радиационной защиты было показано, что применение современных расчетных алгоритмов позволяет унифицировать процесс оптимизации, повышает скорость и эффективность расчетов. В свою очередь, это позволяет добиться дополнительного снижения массы радиационной защиты при сохранении радиационных нагрузок на защищаемых элементах в допустимых пределах за меньшее время. Надежность работы применяемых методов позволила автоматизировать отдельные этапы процесса оптимизации радиационной защиты и поставить задачу о его полной программной автоматизации.

В настоящее время основные задачи расчета и оптимизации характеристик термоэмиссионного реактора-преобразователя (ТРП) в составе космической ЯЭДУ – расчет выходных характеристик ЭГК, расчет нейтронно-физических характеристик ТРП и оптимизация массогабаритных характеристик радиационной защиты – решаются отдельно. В то же время они не являются независимыми друг от друга. Так, например, исходные данные для электротеплофизического расчета ЭГК получают в результате нейтронно-физического



расчета активной зоны, в свою очередь, угол блока радиационной защиты связан с габаритами активной зоны, на которые влияют решения двух других задач. Поэтому совместное решение этих задач является актуальным и позволяет в будущем поставить задачу разработки методики оптимизации ТРП как целого, что отвечает самому современному тренду в ядерной энергетике и позволит выйти на новый уровень качества конечных результатов.

### **Библиографический список**

1. П.А. Карасев. ЯЭУ в космосе/ Атомная стратегия № 30. июнь, 2007. – с. 16-17.
2. П.В. Андреев, А.В. Гулевич, Г.А. Зарицкий, В.П. Легостаев, А.М. Никонов, М.К. Овчаренко, А.П. Пышко, В.В. Синявский, В.И. Ярыгин. Физико-технические возможности термоэмиссии для современных проектов создания КЯЭУ субмегаваттного класса // Материалы международной конференции «Ядерные и инновационные технологии для космоса» (NETS-2012), 19 - 23 марта 2012 г., Woodlands, штат Техас, США, секция 2 «Ядерная энергетика и двигатели», доклад №3014.
3. А.В. Романов. Теория комплексной оптимизации проектирования космических аппаратов с ядерными термоэмиссионными энергетическими установками // Под ред. Б.И. Полетаева, А.П. Ковалева. – СПб.: ООО «НПО «Профессионал», 2010. – с. 15-95.
4. Д. Г. Лазаренко. Математическая модель для расчёта теплоэлектрофизических характеристик цилиндрического электрогенерирующего канала // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – № 3. – с. 89-100.
5. М. А. Полоус. Усовершенствование методики расчета выходных характеристик многоэлементного термоэмиссионного электрогенерирующего канала реактора-преобразователя // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 1. – с. 164-172.
6. Официальный сайт производителя «Comsol Multiphysics». – URL: <http://www.comsol.com/>. Дата обращения: 03.01.2012.
7. Е.Г. Виноградов, В.И. Ярыгин. Методика расчета электротеплофизических характеристик термоэмиссионного электрогенерирующего канала // Учебное пособие по курсу «Перспективные методы получения и преобразования энергии». – Обнинск: ИАТЭ. – 2008. – с. 9-11.
8. 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. 73-80.

9. Афонин П. В. Оптимизация на основе имитационного моделирования с использованием генетического алгоритма и нейросетевых метамоделей// Научная сессия МИФИ-2007. Сборник научных трудов. Т.3. Интеллектуальные системы и технологии (Москва, 24 января 2007 г.). – М.: МИФИ, – 2007. – с.124–125.
10. Адлер Ю.П. Маркова Е.В. Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. НАУКА: М., – 1976. 278 с.
11. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. М.:ФИЗМАТЛИТ, – 2010. – с. 368.
12. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы: Учебно-методическое пособие/ под ред. Тарасевича Ю.Ю. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», – 2007. – с. 87.
13. Понтрягин Л.С., Болтянский И.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: "НАУКА", изд. 3-е, – 1976.
14. Пышко А.П., Плотников А.Ю. Расчет и оптимизация радиационной защиты перспективных космических ЯЭУ. Атомная энергия, т.97, вып. 1, – с. 46-54.
15. M. S. Floater and K. Hormann, Barycentric rational interpolation with no poles and high rates of approximation, Numer. Math. 107 (2007), – с. 315-331.
16. S. Haykin. Neural Networks: A Comprehensive Foundation (2nd Edition) Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1998, 842 p.
17. Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks: Методология и технологии современного анализа данных / Под редакцией В. П. Боровикова. – 2-е изд., перераб. и. доп. – М.: Горячая линия – Телеком, – 2008.
18. Pham D.T., Ghanbarzadeh A., Коç E., Otri S., Rahim S., and M.Zaidi "The Bees Algorithm – A Novel Tool for Complex Optimisation Problems", Proceedings of IPROMS 2006 Conference, pp.454-461