

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОЙ СХЕМЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЭГК В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ТЕРМОЭМИССИОННОГО РЕАКТОРА-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

П.А. Алексеев

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



Решается задача поиска оптимальной схемы расположения электрогенерирующих каналов (ЭГК) в активной зоне усовершенствованного термоэмиссионного реактора-преобразователя типа ТОПАЗ с точки зрения выравнивания энерговыделения по радиусу активной зоны. На схеме приведены радиусы колец расположения ЭГК в активной зоне реактора и количество ЭГК на каждом таком кольце.

На основании методики генетического алгоритма (ГА) находятся изменяющиеся параметры, соответствующие накладываемым условиям. Приводится решение, являющееся компромиссом между удовлетворением несколькими целевыми функциями и накладываемым ограничениям.

Ключевые слова: термоэмиссионный реактор-преобразователь, оптимизация, генетический алгоритм.

Key words: thermionic conversion reactor, optimization, genetic algorithm.

ВВЕДЕНИЕ

В 1970 г. впервые в мировой практике в Советском Союзе были успешно проведены энергетические испытания термоэмиссионного реактора-преобразователя ТОПАЗ-1. Совмещение твэла ядерного реактора с термоэмиссионным преобразователем в одном электрогенерирующем канале (ЭГК) позволило создать реактор-преобразователь, представляющий собой компактный и сравнительно легкий источник электроэнергии.

Стабильная работа ЭГК и реактора в целом, т.е. обеспечение космического аппарата электроэнергией, в значительной степени зависит от условий работы электрогенерирующих каналов, в особенности от их энергонапряженности. Значительное различие в энерговыделении центральных и периферийных ЭГК усложняет их коммутацию для получения на выходе необходимого напряжения и влияет на скорость деградации характеристик ЭГК, что негативно отражается на способности реактора-преобразователя обеспечивать необходимое напряжение на клеммах. Выравнивание энерговыделения по радиусу реактора должно разрешить эти проблемы. Теоретические и экспериментальные нейтронно-физические исследования, проводимые с 1956 г. на специальных физических стендах, позволили оптимизи-

ровать распределения энерговыделения в ТРП ТОПАЗ изменением шага расстановки ЭГК, тем самым выровнять радиальное поле энерговыделения [1–3].

В настоящее время в ГНЦ РФ-ФЭИ разрабатывается усовершенствованный термозмиссионный реактор-преобразователь типа ТОПАЗ с широким диапазоном электрической мощности. Для этих работ требуются быстрые и надежные способы оценки нейтронно-физических характеристик ТРП, основывающиеся на компьютерном моделировании реактора, и расчетных кодов оптимизации параметров реактора для обеспечения необходимых характеристик.

Для того чтобы сократить временные затраты на поисковые расчеты в таком достаточно большом поисковом пространстве (12 изменяющихся параметров, 6 целевых функций), вместо применения расчетной модели реактора, построенной для программного комплекса MCNP, для точного расчета эффективного коэффициента размножения нейтронов (k_{eff}) и коэффициента неравномерности энерговыделения ($K_{r\phi}$) использовалась, полученная на ее основе метамодель, которая позволяет делать прогноз относительно значений k_{eff} и $K_{r\phi}$ при выбранных радиусах колец расположения ЭГК (R_i) и количестве на каждом кольце ЭГК (N_i), радиусе активной зоны (R_{A3}) и радиусе стержня безопасности (R_{CB}). Такая модель строится по результатам расчетных опытов, проводимых по заранее составленному плану эксперимента. Результаты эксперимента обрабатываются методом наименьших квадратов, в итоге находится весовой коэффициент для каждого изменяющегося параметра в алгебраическом полиноме, описывающем зависимость между функцией отклика системы и входными параметрами.

Поиск оптимальных параметров проводился с использованием генетического алгоритма (ГА). ГА – метод оптимизации, основанный на принципах эволюции живых организмов, в настоящее время широко используется для решения задач оптимизации, связанных с расчетами реакторов [4]. При применении ГА принято использовать биологическую терминологию. Так, например, термин особь означает набор хромосом, т.е. альтернативный вариант решения задачи – совокупность значений оптимизируемых параметров реактора ($N_i, R_i, R_{A3}, R_{CB}, i=1, \dots, 5$), хромосома – число, значение параметра реактора, популяция – совокупность особей, набор альтернативных решений задачи.

Задача оптимизации, решаемая ГА, состояла в следующем: необходимо найти такие изменяющиеся параметры, которые удовлетворяли бы накладываемым условиям как на выходные параметры оптимизируемой системы, так и на входные изменяющиеся параметры. Такая постановка задачи приводит к необходимости решать многокритериальную задачу, т.е. задачу с несколькими целевыми функциями, а именно, приемлемое распределение энерговыделения, максимально возможный запас реактивности холодного реактора.

Вычисления значений целевых функции ($k_{eff}, K_{r\phi}$) проводились по соответствующим метамоделям, построенным на основе имитационной расчетной модели реактора. Рассчитанные, согласно методике ГА, изменяющиеся параметры проверялись на удовлетворения накладываемым условиям. Далее, отобранные таким образом параметры и соответствующие им предсказанные по метамодели значения целевой функции отбирались по критерию приспособленности, т.е. чем выше (или ниже – в зависимости от постановки задачи) значение целевой функции, тем выше приспособленность особи. Пороговым значением приспособленности особи являлось среднее значение целевой функции в промежуточной популяции, в новую популяцию отбирались особи со значением приспособленности, равным или большим, чем средняя приспособленность в популяции. Таким образом составлялась новая популяция, и процесс повторялся снова. Если же значения со-

ответствующих параметров между отобранными особями различались несущественно, то они поставлялись в имитационную расчетную модель для более точного расчета. Окончательным критерием отбора параметров являлось значение коэффициента неравномерности энерговыделения периферийного кольца ЭГК.

В результате, изменяя накладываемые условия, рассчитывали оптимальные в этих условия изменяющиеся параметры. Отобранные, обеспечивающие выполнение накладываемых ограничений при заданных условиях, параметры являются результатами данной работы.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ РЕАКТОРА

Модель термоэмиссионного реактора-преобразователя на промежуточных нейтронах построена как модель усовершенствованного термоэмиссионного реактора-преобразователя типа ТОПАЗ [5].

Реактор имеет компактную активную зону, окруженную отражателем. Активная зона набирается из ЭГК и стержней безопасности, расположенных в отверстиях дисков замедлителя из гидрида циркония, образуя систему из n concentric поясов. В качестве теплоносителя используется натрий-калиевая эвтектика. На рисунке 1 представлено поперечное сечение реактора.

Функции регулирования тепловой мощности, компенсации реактивности и аварийной защиты выполняют расположенные в боковом отражателе поворотные цилиндры

(ПЦ) из бериллия с секторными накладками из карбида бора и стержни безопасности. Стержни безопасности располагаются вблизи центра активной зоны для более эффективной компенсации неравномерности энерговыделения. Материалом стержней безопасности также выбран карбид бора.

Расчетная модель ЭГК включает в себя 5-слойный коллекторный пакет (стальной чехол, «сухая» и «мокрая» электроизоляции, охранный электрод и коллекторы) и электрогенерирующие элементы (ЭГЭ), отделенные друг от друга коммутационным пространством. Каждый ЭГЭ представляет собой эмиттерный узел, содержащий эмиттер с топливным сердечником кольцевой формы и трубку для отвода газообразных продуктов деления. В торцах ЭГК расположены отражатели из оксида бериллия. Зазор между чехлом коллекторного пакета и обсадной трубой отведен под тракт теплоносителя [6]. В качестве топливной композиции выбирается диоксид урана.

Моделирование и расчеты проводились с использованием программного комплекса MCNP5 [7] и библиотеки оцененных ядерных данных ENDF/B-6 [8] с учетом термализации нейтронов.

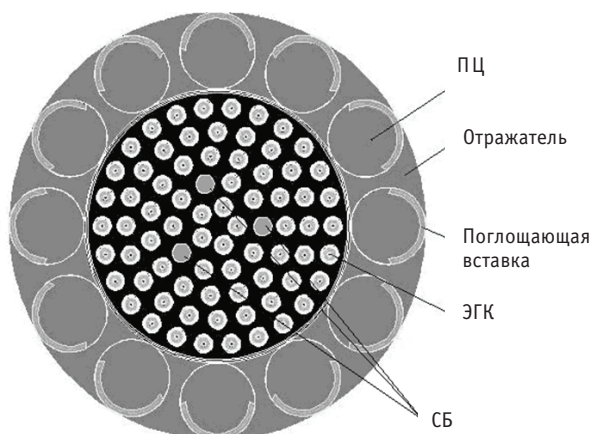


Рис. 1. Расчетная модель реактора (поперечное сечение)

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ

Планирование эксперимента

Первоначально выбираются целевые функции, влияющие параметры и их области определения. Далее, определяется подходящий план эксперимента. Полученные при проведении эксперимента данные обрабатываются методом наименьших квадратов.

Выбор целевой функции и влияющих параметров определяется поставленной задачей. В нашем случае мы имеем шесть реакторных функционалов, для которых должны быть построены зависимости, а влияющими параметрами являются радиусы колец расположения ЭГК, количество ЭГК на кольцах и внешний радиус стержня безопасности, радиус активной зоны реактора. Области определения влияющих параметров обычно определяются по известным априорным данным, но при этом должна гарантироваться возможность проведения эксперимента (получение значения целевой функции).

Чем больше влияющих параметров, тем большее количество расчетных опытов необходимо провести. Число опытов, необходимое для реализации всех возможных сочетаний уровней факторов, $N=2^k$ (k – число факторов, 2 – число уровней). Для того чтобы сократить число опытов, можно воспользоваться полурепликами от полного факторного эксперимента. Так полный факторный эксперимент для 12-ти факторов состоит из 4096-ти опытов, 1/256-реплика от него составляет 16 опытов. Матрицу планирования для 12-ти факторов с 1/256-репликой от 2^{12} можно найти в работе [9].

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

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

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

Таким образом, получаем алгебраический полином вида

$$Y = BX = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_n x_n, \quad (2)$$

который является математической моделью исследуемой системы. Далее 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 уменьшением области определения факторов эксперимента и(или) включением в рассмотрение факторов, отвечающих за их совместное влияние на систему. В последнем случае количество опытов увеличивается из-за увеличения числа факторов.

Генетический алгоритм

Генетические алгоритмы – это адаптивные методы поиска, которые в последнее время используются для решения задач оптимизации. В них используются как аналог механизма генетического наследования, так и аналог естественного отбора.

Принцип работы генетического алгоритма заключен в следующей схеме:

- 1) генерируется начальная популяция из n особей;
- 2) выбирается пара хромосом-родителей с помощью одного из способов отбора;
- 3) проводится кроссинговер двух родителей, производящих двух потомков;
- 4) проводится мутация потомков;

5) повторяются шаги 2–4, пока не будет сгенерировано новое поколение популяции, содержащее n хромосом.

6) повторяются шаги 1–5, пока не будет достигнут критерий окончания процесса [10].

Под хромосомой понимается число, в нашей задаче – это значение изменяющегося параметра. Индивидуум (генетический код, особь) – набор хромосом (вариант решения задачи). Популяция – совокупность индивидуумов. Пригодность (приспособленность) – критерий соответствия значения целевой функции альтернативного решения целям решаемой задачи.

Основными операторами генетических алгоритмов являются кроссинговер, 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.

Кроссинговер или рекомбинация применяется для получения новых особей-потомков. Смысл рекомбинации заключается в том, что созданные потомки должны наследовать генную информацию от обоих родителей. В данной работе скрещивание применялось к хромосомам с вещественными генами по следующей формуле:

$$\text{Потомок} = \text{Родитель 1} + \alpha \cdot (\text{Родитель 2} - \text{Родитель 1}), \quad (3)$$

где множитель α – случайное малое число.

После процесса воспроизводства происходят мутации. Данный оператор необходим для «выбивания» популяции из локального экстремума и препятствия преждевременной сходимости. Для мутации особей нужно определить величину шага мутации – число, на которое изменится значение гена при мутировании. Гены могут мутировать согласно следующему правилу:

$$\text{Новая переменная} = \text{Старая переменная} \pm \delta, \quad (4)$$

где δ – случайная малая величина в интервале $[0, 1]$, отвечающая за изменения гена при мутировании [10].

Для создания новой популяции можно использовать различные методы отбора особей. В данной работе отбор носил элитарный характер, т.е. выбирались особи с наибольшей приспособленностью. В промежуточную популяцию входили особи из начальной популяции, популяции потомков, полученных при рекомбинации, и популяции особей, полученных при мутации. Хромосомы этих особей проверялись на удовлетворение поставленным условиям по изменяющимся параметрам, затем отбирались особи, у которых приспособленность была выше или равна средней приспособленности в промежуточной популяции, и затем в новую начальную популяцию отбирались особи с наибольшей приспособленностью. Приспособленность рассчитывалась по полученной модели исследуемой системы. Далее процедура повторялась снова, пока значения хромосом разных особей, отбираемых в новую популяцию, не становились различными незначительно, тогда они принимались как решение и передавались в имитационную расчетную модель для точного расчета, по результатам которого выбиралось окончательное решение.

РЕШЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ

Первый шаг решения поставленной задачи – это построение зависимостей между целевыми функциями и влияющими параметрами. Поскольку количество отобранных влияющих параметров равно 12-ти, т.е. пять радиусов колец расположения ЭГК, пять значений количества ЭГК на кольце, радиус стержней безопас-

ности и радиус активной зоны реактора, то минимальное количество опытов, которые следует провести, составляет 16. В каждом опыте рассчитываются шесть целевых функций, т.е. значение среднего энерговыделения на каждом из пяти колец расположения ЭГК и эффективный коэффициент размножения нейтронов для холодного состояния реактора (запас реактивности).

Области определения влияющих параметров выбирались из тех соображений, что количество ЭГК на кольце и радиус кольца должны быть такими, чтобы при построении расчетной модели границы ЭГК не пересекались и не выходили за пределы активной зоны, т.е. чтобы возможно было провести опыт.

Далее известные входные параметры и полученные отклики системы (каждый отдельно) обрабатывались методом наименьших квадратов для многофакторного линейного случая.

Построив таким образом модель исследуемой системы, мы получили целевые функции для постановки задачи оптимизации. Кроме построения целевых функций также необходимо правильно оценить условия выполнения поиска решений, т.е. наложить ограничения.

Для получения минимальной электрической мощности реактора 25 кВт при напряжении на клеммах реактора 125 В необходимо иметь эмиссионную поверхность не менее 1.5 м² [11]. Площадь эмиссионной поверхности определяется структурой и количеством ЭГК; т.к. в данной работе сама структура ЭГК не меняется, то можно выбрать наименьшее количество ЭГК, обеспечивающее минимально необходимую эмиссионную поверхность N_{\min} . С другой стороны, уменьшение количества ЭГК в активной зоне реактора приводит к падению его мощности так же, как излишнее увеличение количества ЭГК приводит к уменьшению доли замедлителя в АЗ, что в свою очередь скажется на значении k_{eff} . Поэтому при расчете на общее количество ЭГК ($N_{all} = N_1 + \dots + N_n$, где n – количество колец расположения ЭГК) накладывались условия $N_{\min} \leq N_{all} \leq N_{\max}$. Верхнее ограничение соответствует количеству ЭГК исходной модели, нижнее – минимальному количеству. Кроме этого для удовлетворения требования по прочности материала замедлителя толщина его стенки между соседними ЭГК и соответственно расстояния между радиусами колец расположения ЭГК должны быть не менее определенных значений l_{\min} и $L1_{\min}$ (где $L1_{\min} = 2 \cdot R_{ЭГК} + l_{\min}$). Так как вблизи центра активной зоны располагаются стержни безопасности, имеющие радиус $R_{сб}$, то расстояние между радиусами колец расположения ЭГК вблизи центра активной зоны должно быть не менее $L2_{\min}$ ($L2_{\min} = R_{сб} + R_{ЭГК} + l_{\min}$).

Таким образом, можно поставить задачу оптимизации в ее начальном представлении:

$$\begin{array}{ll} q_2 - q_1 \rightarrow \min & R_{i+1} - R_i \geq L2_{\min} \\ \dots & R_{j+1} - R_j \geq L1_{\min} \\ q_{n-1} - q_n \rightarrow \min & N_{\min} \leq N_{all} \leq N_{\max} \\ q5 \rightarrow \max & \\ k_{eff} \rightarrow \max & \end{array}$$

где $i = 1, \dots, k$ – номера колец расположения ЭГК, соседствующих со стержнями безопасности; $j = k, \dots, n$ – номера колец расположения ЭГК, не примыкающих к стержням безопасности; $q_2 - q_1 \rightarrow \min \dots q_{n-1} - q_n \rightarrow \min$ означает, что значения среднего энерговыделения соседних колец должны быть как можно более близкими, т.е. энерговыделение по радиусу активной зоны должно быть равномерное. Одновременное требование максимально возможного значения для среднего энер-

говыведения периферийного кольца $q_5 \rightarrow \max$; $k_{eff} \rightarrow \max$ означает, что значение эффективного коэффициента размножения нейтронов холодного реактора должно быть максимальным.

Такая постановка задачи приводит к необходимости решать многокритериальную задачу оптимизации. Один из способов решения таких задач – это перевод всех (кроме одной целевой) функций в накладываемые ограничения [12]. Поскольку первые четыре целевых функции являются функциями одного вида, то было решено оставить их как целевые функции, остальные были переведены в ограничения, т.е. $K_{r\phi n} \geq K_{r\phi n(\min)}$; $k_{eff} \geq k_{eff(\min)}$. Переход от значений q к значению $K_{r\phi}$ осуществляется согласно формуле (5). Таким образом, мы устанавливаем минимальные значения запаса реактивности холодного реактора и значение среднего коэффициента неравномерности энерговыделения периферийного кольца, которые необходимо достичь в процессе поиска решения. При этом было сделано послабление накладываемых ограничений для того, чтобы расширить поисковое пространство на первоначальных итерациях поиска решения. Методика генетического алгоритма позволяет без особых затруднений решать подобные задачи. Также стоит отметить, что значения изменяющихся параметров N (количество ЭГК) после операций кроссинговера и мутации должны являться целыми числами. Значения изменяющихся параметров R могут оставаться как целыми, так и дробными числами. Такие одновременные изменения затруднительны при использовании классических методов оптимизации, но при реализации методики ГА такая ситуация легко преодолевается.

$$K_{r\phi} = \frac{q_i}{S}, \text{ при } S = \frac{\sum_{i=1}^5 (q_i \cdot N_i)}{\sum_{i=1}^5 N_i}; \quad (5)$$

где q_i – среднее по кольцу энерговыделение; N_i – количество ЭГК на i -ом кольце.

Таким образом, постановка задачи следующая:

$$\begin{aligned} q_2 - q_1 &\rightarrow \min & R_{i+1} - R_i &\geq L2_{\min} - \delta \\ \dots & & R_{j+1} - R_j &\geq L1_{\min} - \delta \\ q_{n-1} - q_n &\rightarrow \min & N_{\min} &\leq N_{all} \leq N_{\max} \\ K_{r\phi n} &\geq K_{r\phi n(\min)} \\ k_{eff} &\geq k_{eff(\min)} \end{aligned}$$

где δ – малое число, на которое производится послабление накладываемых ограничений.

На рисунке 2 представлена схема решения задачи с применением ГА. Поколения первого уровня – поколения, набранные из случайно выбранных решений (стартовые точки). Поколения второго уровня – поколения, набранные из решений, полученных при исследовании поколений первого уровня, соответственно поколения третьего уровня – это поколения, набранные из решений, полученных при исследовании поколений второго уровня. Подобные итерации могут не ограничиваться тремя уровнями, условием окончания этих итераций может быть получение нескольких близких по значениям решений.

Далее эти решения передаются в расчетную модель для более точного расчета исследуемых функций. По результатам расчетов отбирается одно или несколько решений, наиболее удовлетворяющих поставленной задаче. На этом этапе некоторые из изменяемых параметров могут быть постулированы, т.е. приняты как

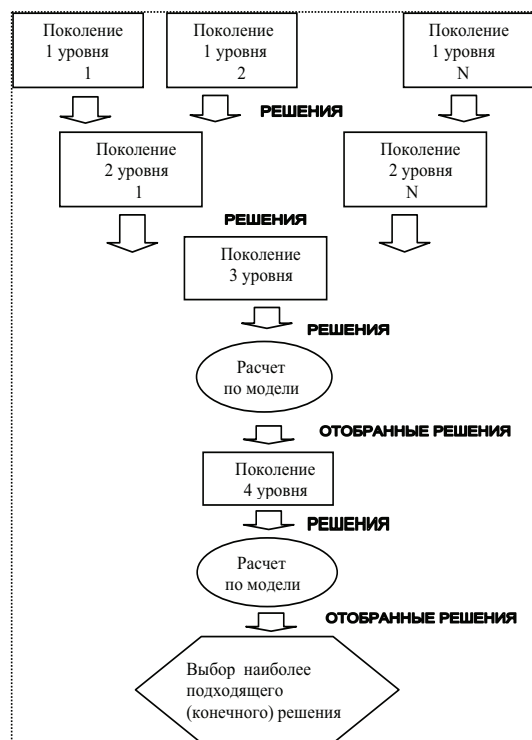


Рис. 2. Схема решения

соответствующие конечному решению (в данном случае количество ЭГК на радиусах), и поиск продолжается по остальным параметрам.

Поклонения четвертого уровня – поколения, набранные из решений с постулированными и переменными параметрами. Результаты их исследований передаются в расчетную модель. По результатам расчета выбирается наиболее подходящее (конечное) решение, при необходимости проводятся дополнительные расчеты с изменением одного или двух параметров для более полной картины исследования.

На рисунке 3 представлены результаты заключительных расчетов, распределение энерговыделения по радиусу активной зоны в значениях $K_{гф}$ для различных вариантов решения. Р6 (● решение 6) соответствует значениям коэффициентов неравномерности по радиусу активной зоны для исходного варианта.

Р3 (▲), Р4 (×), Р5 (✱) представляют решения, отобранные после расчета по модели. Р1 (◆) и Р2 (■) – решения, полученные при исследовании четвертого поколения с постулированными значениями количества ЭГК на кольцах. Р7 (горизонтальная линия) соответствует значению $K_{гфн} (min)$.

На рисунке 4 представлены значения k_{eff} для решений, отбираемых после расчета по модели. Исходный вариант (Р6, ●), конечное решение (○), горизонтальной линией обозначено значение $k_{eff(min)}$.

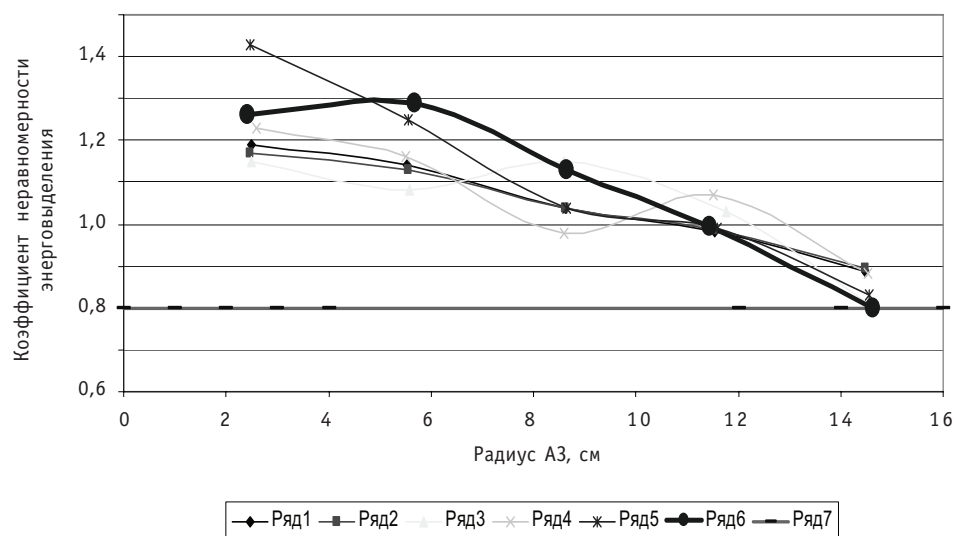
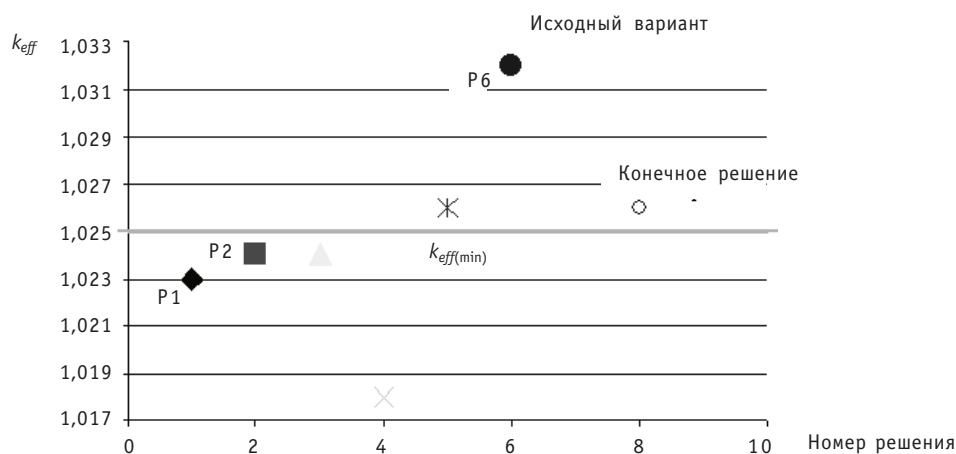


Рис. 3. Распределение энерговыделения по радиусу активной зоны

Рис. 4. Значения k_{eff} различных решений

Из рисунков 3 и 4 видно, что хотя решения P1 и P2 (решения с постулированными значениями количества ЭГК) не удовлетворяют требованию по минимальному значению запаса реактивности, они имеют наибольшие значения коэффициента неравномерности энерговыделения периферийного кольца расположения ЭГК. Поэтому эти решения были отобраны для дальнейшего исследования, т.е. расчет с изменением одного или двух параметров (радиус периферийного кольца расположения ЭГК и радиус стержня безопасности). Среди решений, полученных при дальнейшем исследовании, было отобрано компромиссное решение, наиболее удовлетворяющее поставленной задаче. Компромиссное решение соответствует повышению коэффициента неравномерности энерговыделения периферийных ЭГК на 12%, снижению коэффициента неравномерности энерговыделения центральных ЭГК на 11 %, уменьшению количества ЭГК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена задача поиска оптимальной схемы расположения электрогенерирующих каналов в активной зоне усовершенствованного термоэмиссионного реактора-преобразователя типа ТОПАЗ с точки зрения выравнивания энерговыделения по радиусу активной зоны. По расчетной модели, построенной в программном комплексе MCNP, были получены значения средних энерговыделений по каждому из колец расположения ЭГК (q) и коэффициент размножения нейтронов в исходном состоянии реактора (k_{eff}). На основании метода наименьших квадратов построены зависимости исследуемых реакторных функционалов (q , k_{eff}) от изменяющихся параметров, радиусов колец расположения ЭГК, количества ЭГК, радиуса стержня безопасности, радиуса активной зоны реактора. С использованием методики ГА находились значения изменяющихся параметров, обеспечивающих выполнение поставленных условий и накладываемых ограничений.

Полученное решение удовлетворяет требованиям, предъявляемым при постановке задачи. Эффективный коэффициент размножения нейтронов полученного решения на 0,58% меньше k_{eff} исходного варианта, на 11% снижен коэффициент неравномерности энерговыделения центральных ЭГК, коэффициент неравномерности энерговыделения периферийных ЭГК повышен на 12%. По сравнению с исходным вариантом на 1,6% увеличен радиус активной зоны и на 2,7% увеличен радиус стержня безопасности. Таким образом, изменение значений выбранных параметров на малые величины позволяет добиться улучшения необходимых характеристик реактора-преобразователя.

Полученные улучшения характеристик реактора и изменения выбранных влияющих параметров подтверждают необходимость применения математических методов оптимизации к решению подобных задач.

Литература

1. Кузнецов В.А., Грязнов Г.М., Артюхов Г.Я., Бологов П.М., Дмитриев В.М. и др. Разработка и создание термоэмиссионной ядерно-энергетической установки «Топаз»//Атомная энергия. – 1974. – Т. 36. – Вып. 6.
2. Забудько А.Н., Линник В.А., Раскач Ф.П. Сравнение и анализ характеристик термоэмиссионных реакторов-преобразователей различного типа для космических ЯЭУ. – Обнинск: ФЭИ, 2004.
3. Пупко В.Я. История работ по летательным аппаратам на ядерной энергии для космических и авиационных установок в ГНЦ РФ-ФЭИ/Личные воспоминания. – Обнинск: ФЭИ, 2000.
4. Turinsky P.J., Keller P.M., Abdel-Khalik H.S. Evolution of nuclear fuel management and reactor operation aid tools//Nuclear Engineering and Technology. – 2005. - V. 37. – № 1.
5. Кузнецов В.А. Ядерные реакторы космических энергетических установок. – М.: Атомиздат, 1977.
6. Кротов А.Д., Сонько А.В. Расчет нейтронно-физических характеристик реактора и радиационной защиты в составе ЯЭУ космического назначения с использованием программного комплекса MCNP//Атомная энергия. – 2009. – Т. 106. – Вып. 2.
7. MCNP – General Monte Carlo N-Particle Transport code. LA-12625-M, Vers. 4B, 1997.
8. ENDF/B-VI Data for MCNP TM. LA-12891-M, 1994.
9. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976 – 278 с.
10. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы: Учебно-методическое пособие/Под ред. Ю.Ю. Тарасевича. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – 87 с.
11. Жаботинский Е.Е., Андреев П.В., Галкин А.Я. Реакторы в космосе. Будущее космических ядерных энергетических установок//Международная жизнь, специальный выпуск, 1994.
12. Konak A., Coit D.W., Smith A.E. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial: Reliability Engineering & System Safety 91 (2006).

Поступила в редакцию 25.03.2011

УДК 621.039.51

The Technique of Calculation of Neutron Group Constants for Materials – Mixtures of Isotopes in the ABBN-System \ A.A. Peregodov, V.N. Kosheev, G.N. Manturov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 2 tables, 5 illustrations. – References, 9 titles.

The work presents a technique for calculation of neutron group constants for materials – mixtures of isotopes by using the code CONSYST, which is one of the main part of the ABBN constants system, and using neutron group constants for stable isotopes as input data. The calculated neutron group constants are compared with results of similar calculations using NJOY and CALENDF codes. This technique is tested through the criticality calculations of a series of benchmark models of fast critical assemblies from the ICSBEP Handbook.

УДК 621.039.578:629.7

The Search an Optimal Locations Scheme for Thermionic Fuel Elements in the Core of Space Thermionic Conversion Reactor \ P.A. Alekseev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 10 pages, 4 illustrations. – References, 12 titles.

In this paper, the problem of the search of an optimal locations scheme for thermionic fuel elements (TFE) in the core of advanced thermionic conversion reactor of TOPAZ type, which minimize fission power peaking in the radial direction of the core, is solved. The location scheme includes the radiuses of TFE location rings and the number of TFE in each ring.

By means of genetic algorithm (GA) method, the decision variables, which may satisfy the delivery constraints, are searched. The decision, obtained by GA, is researched and then, trade-off solution is chosen among them.

УДК 621.039.58

Representation of the Declarative Knowledge Acquired from NPP Emergency Procedures \ A.N. Anokhin, N.V. Pleshakova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 14 pages, 1 table, 7 illustrations. – References, 14 titles.

The paper concerns of the problem of knowledge representation for computerized procedure systems dedicated to support NPP main control room operators. The methodology for representation of the declarative knowledge about process equipment and technological mediums is proposed on the basis of semantic network theory. The process equipment has been hierarchically structured from the point of view of functional approach to control process. Possible operational states and modes of equipment have been studied. The intensional semantic networks which define knowledge base structure have been developed based on the finding from this analysis. The knowledge about particular equipment and technological mediums are represented as the extensional networks and the patterns which specify diagnostic symptoms.

УДК 519.23/.24/.25

Statistical Analysis of Failure Data of Nuclear Power Plant Equipment in Non-Homogeneous Failure Flow \ A.V. Antonov, K.A. Belova, V.A. Chepurko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 13 pages, 6 tables, 7 illustrations. – References, 20 titles.

The technique of reliability coefficients assessment for nuclear power plant equipment is described. This technique allow to take into account possible non-homogeneity of failure flow. Specificity of incoming statistical failure data is pointed. The hypothesis test of incoming data nature is proposed. Application of normalizing flow function model for calculating of required reliability coefficients is described. Practical example of analysis of failure data for some elements of Bilibino nuclear power plant control and protection system is given.