

УДК 621.039.524

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОТРАВЛЕНИЯ САМАРИЕМ ТЕПЛООВОГО РЕАКТОРА В МАНЕВРЕННЫХ РЕЖИМАХ

И.Б. Валуев, В.Н. Глушак, А.В. Кузьмин

Томский политехнический университет

E-mail: kuzminav@tpu.ru

В рамках точечного приближения дано обоснование нового алгоритма экспресс-расчета отравления теплового реактора самарием в маневренных режимах. Уточняется поведение "старого" прометия и его вклад в кинетику отравления. Приводятся графики и алгоритмы для проведения приближенных оперативных расчетов динамики отравления. Дано сопоставление с известным методом расчета подобных задач. В качестве примеров выбраны режимы выхода на мощность свежего условного теплового реактора с последующим подъемом (и снижением) мощности после установления равновесной концентрации по прометию.

Введение

На недостаточную полноту информации о влиянии отравления теплового реактора самарием ^{149}Sm в маневренных режимах указывалось в [1], где впервые была предложена номограмма расчета отравления при останове реактора с любого уровня мощности.

Для решения практических задач по эксплуатации ядерных реакторов в [2] представлена процедура экспресс-оценки, которая включает: использование графиков установления равновесного отравления, применение графических алгоритмов для оценки поведения прометия ^{149}Pm (отравление самарием в прометиевом провале) и радиационного выжигания "старого" самария при последующем изменении мощности. Правомерность применения этого набора графических алгоритмов не показана, и по нашим оценкам он не позволяет получить достаточную точность расчетов в отдельных режимах.

В качестве материала для экспресс-оценки могут служить графические решения для отдельных режимов и полученные на их основе аппроксимации основных характеристик процесса. Так, в работе [3] при рассмотрении режимов выхода свежего реактора на заданную мощность и маневренных режимов с мощности на мощность после достижения равновесного отравления самарием получены новые зависимости для времени установления равновесного отравления, параметров максимума отклонения и времени выхода на равновесное значение. Для определения отравления самарием в режимах установления равновесного отравления свежего реактора и останова предложена новая номограмма [4]. В отличие от номограммы [1] она позволяет определить полную потерю реактивности на этом временном отрезке работы реактора. Точность номограммы можно повысить, разбив её по времени на несколько интервалов.

Таким образом, поиск универсального графического алгоритма, применимого для любого нестационарного процесса, простого в исполнении и понятного с точки зрения физики, является актуальным. Целью данного сообщения является ознакомление с новой методикой экспресс-оценки динамики концентрации ядер ^{149}Sm в маневренных режимах.

Обоснование графоаналитического алгоритма

Принципиальная возможность приведения общего решения для маневренных режимов к графическому алгоритму показана в работе [5]. Трудоемкость его исполнения потребовала дальнейшего анализа и существенной доработки алгоритма, что и легло в основу новой методики [6].

Изменение концентрации самария $N_{\text{Sm}}(t)$ для точечной модели реактора в общем случае при произвольных начальных условиях и пренебрежении радиационным выжиганием прометия имеет вид [3]:

$$N_{\text{Sm}}(t) = N_{\text{Sm},0}(1 - \exp(-\sigma_{\text{Sm}}\Phi_2 t)) - \frac{\lambda_{\text{Pm}}\Delta N_{\text{Pm}}}{\lambda_{\text{Pm}} - \sigma_{\text{Sm}}\Phi_2}(\exp(-\lambda_{\text{Pm}}t) - \exp(-\sigma_{\text{Sm}}\Phi_2 t)) + N_{\text{Sm}}(0)\exp(-\sigma_{\text{Sm}}\Phi_2 t), \quad (1)$$

где λ_{Pm} — постоянная распада прометия, с^{-1} ; σ_{Sm} — эффективное микроскопическое сечение поглощения нейтронов самарием, см^2 ; Φ_2 — плотность потока нейтронов, соответствующая новой мощности N_2 , на которую осуществлен переход реактора, нейтрон/ $(\text{см}^2\cdot\text{с})$; t — время, с ; $N_{\text{Sm},0}$, $N_{\text{Sm}}(0)$ — концентрации самария: равновесная и в начале перехода на новую мощность, ядер/ см^3 .

Здесь $\Delta N_{\text{Pm}} = N_{\text{Pm}}(0) - N_{\text{Pm},0}(\Phi_2)$ представляет собой разность между начальным значением концентрации прометия $N_{\text{Pm}}(0)$ и его равновесной концентрацией $N_{\text{Pm},0}(\Phi_2)$ на новой мощности $N_2 \sim \Phi_2$.

Заметим, что в случае режима выхода на мощность свежего реактора ($N_{\text{Sm}}(0) = N_{\text{Pm}}(0) = 0$) из (1) следует известное уравнение установления равновесной концентрации ядер самария:

$$N_{\text{Sm}}(t) = N_{\text{Sm},0}(1 - \exp(-\sigma_{\text{Sm}}\Phi_2 t)) + \frac{\lambda_{\text{Pm}}N_{\text{Pm},0}(\Phi_2)}{\lambda_{\text{Pm}} - \sigma_{\text{Sm}}\Phi_2}(\exp(-\lambda_{\text{Pm}}t) - \exp(-\sigma_{\text{Sm}}\Phi_2 t)). \quad (2)$$

Пусть в какой-то момент времени осуществляется переход реактора на новую мощность $N_2 \sim \Phi_2$. Обозначим начальные значения концентраций: $N_{\text{Sm}}(0) = N_{\text{Sm}}^*$, $N_{\text{Pm}}(0) = N_{\text{Pm}}^*$. Тогда ур. (1) для этого переходного режима примет вид:

$$N_{Sm}(t) = N_{Sm,0}(1 - \exp(-\sigma_{Sm} \Phi_2 t)) + \frac{\lambda_{Pm} N_{Pm,0}(\Phi_2)}{\lambda_{Pm} - \sigma_{Sm} \Phi_2} (\exp(-\lambda_{Pm} t) - \exp(-\sigma_{Sm} \Phi_2 t)) - \frac{\lambda_{Pm} N_{Pm}^*}{\lambda_{Pm} - \sigma_{Sm} \Phi_2} (\exp(-\lambda_{Pm} t) - \exp(-\sigma_{Sm} \Phi_2 t)) + N_{Sm}^* \exp(-\sigma_{Sm} \Phi_2 t), \quad (3)$$

в котором можно выделить физически понятные слагаемые. Очевидно, что первые два слагаемых определяют накопление "свежего" самария на новом уровне мощности (2), последнее – выжигание "старого" самария, накопившегося в активной зоне на момент перехода на новую мощность. Третье слагаемое ранее в графических алгоритмах не учитывалось – распад "старого" прометия, имеющегося в наличии на момент перехода на другую мощность, и последующее выжигание образующегося из него Sm.

Представим ур. (3) в виде графического алгоритма, выраженного через потерю реактивности за счет отравления самарием:

$$\rho_{Sm}(t) = \rho_{Sm,0}(1 - 2^{-t/T_{Sm}^*}) + \frac{\rho_{Pm,0}(\Phi_2)}{1 - T_{Pm}/T_{Sm}^*} (2^{-t/T_{Pm}} - 2^{-t/T_{Sm}^*}) - \frac{\rho_{Pm}(0)}{1 - T_{Pm}/T_{Sm}^*} (2^{-t/T_{Pm}} - 2^{-t/T_{Sm}^*}) + \rho_{Sm}(0) 2^{-t/T_{Sm}^*}, \quad (4)$$

где $T_{Sm}^* = T_{Sm}^*(\Phi_2) = \ln 2 / (\sigma_{Sm} \Phi_2)$, $T_{Pm} = \ln 2 / \lambda_{Pm}$ – эффективный период полувыгорания самария и период полураспада прометия. При этом физический смысл слагаемых не меняется.

Отметим особенности реализации графического алгоритма (4). Равновесное отравление самарием не зависит от мощности реактора и равно

$$\rho_{Sm,0} = -\theta \gamma_{Pm} \sigma_f^5 / \sigma_a^5,$$

где γ_{Pm} – удельный выход прометия; σ_f^5 , σ_a^5 – микроскопические сечения деления и поглощения ^{235}U , θ – коэффициент использования тепловых нейтронов. Установление равновесного отравления для конкретного теплового реактора обычно дается в штатных документах блочного щита управления в виде таблиц или графиков, как например, для условного теплового реактора (УТР) (рис. 1). Следовательно, по ним можно оценить первые два слагаемых ур. (4).

Для расчета других слагаемых ур. (4) необходимо знать эффективный период полувыгорания самария T_{Sm}^* , который для удобства расчетов следует выразить в виде зависимости от мощности реактора. Например, для УТР (его характеристики известны [2]) он будет определяться выражением

$$T_{Sm}^* = 400 / N_2 \quad (5)$$

и графиком на рис. 2.

Тогда третье слагаемое в (4), отвечающее за распад "старого" прометия, можно преобразовать к виду:

$$\Delta_{Pm}(t) = -\rho_{Sm,0} \frac{2,228 N^*}{400 - 2,228 N_2} (2^{-t/2,228} - 2^{-t \cdot N_2 / 400}), \quad (6)$$

где N^* – означает квазиравновесную мощность, которая соответствует фактической концентрации прометия на момент перехода. График зависимости (6), представленный на рис. 2, соответствует переходу с квазиравновесной мощности $N^* = 100\%$, поэтому при переходе с другим начальным содержанием прометия следует ввести корректирующий множитель $N^*/100$.

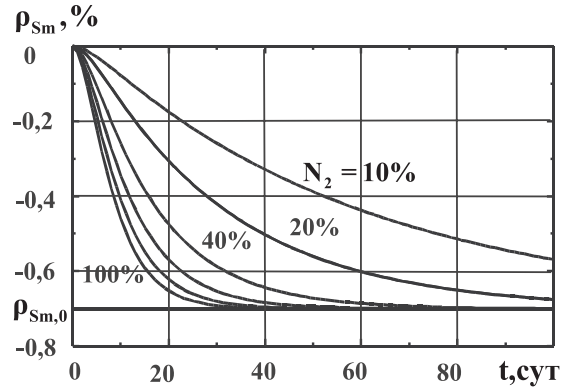


Рис. 1. Установление равновесного отравления самарием при работе УТР на различных уровнях мощности

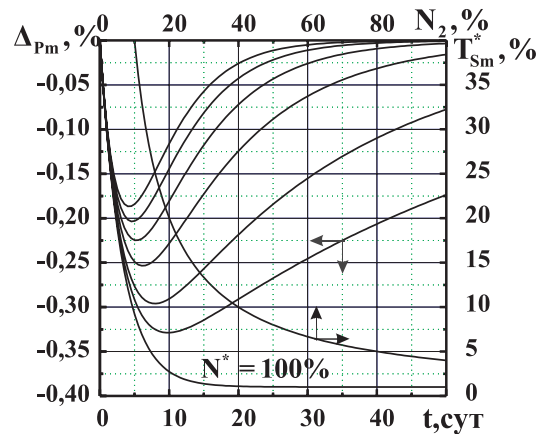


Рис. 2. Графики выжигания "старого" прометия и периода полувыгорания самария

Таким образом, можно выделить основные шаги нового графоаналитического алгоритма, которые включают:

- построение совмещенных графиков изменения мощности реактора и изменения концентрации прометия по известному графическому алгоритму;
- определение кривой потери реактивности за счет накопления "свежего" самария на новой мощности N_2 либо по графику установления равновесного отравления Sm (рис. 1), либо по таблицам расчетных данных;
- построение кривой высвобождения реактивности за счет выжигания "старого" самария с периодом полувыгорания Sm;
- построение в единицах реактивности кривой выжигания "старого" прометия по специально подготовленному для данного реактора графику (рис. 2);
- получение окончательного результата путем суммирования кривых.

Особенности применения алгоритма

Апробация предлагаемого алгоритма расчета отравления самарием проведена в работе [7]. В качестве примеров были выбраны режимы: выхода на мощность свежего УТР с последующим подъемом (и снижением) мощности после установления равновесной концентрации по прометию. Заметим, что характеристики УТР приведены в [2] и поправлены нами [3] по глубине прометиевого провала при останове с номинального уровня мощности на значение $\rho_{pm}(100\%) = -0,39\%$.

В качестве первого примера выбрана задача из работы [2], которая состоит в следующем:

1. УТР в течение 15 сут работал на номинальной мощности, после чего мощность снизили до 40 %. Определить изменение реактивности вследствие отравления самарием.

На графике изменения режимов (рис. 3), используя графический алгоритм – 5 шагов с периодом $T_{pm} \approx 2,2$ сут, построим кривую изменения концентрации P_m . Поскольку УТР работал на номинальной мощности без перерыва 15 сут, в нем установилась равновесная концентрация P_m . Величину потери реактивности через 15 сут работы на N_{nom} определим по графику, рис. 1. Видно, что концентрация самария не достигла равновесного значения и на момент снижения мощности обуславливает отравление $\rho_{sm}(15 \text{ сут}) = -0,59\%$ (кривая 1).

Переход на пониженную мощность изменяет динамику поведения Sm . Та часть, которая была в наличии на момент перехода ("старый" самарий), будет выжигаться с новым эффективным периодом T_{sm}^* , который можно найти по графику на рис. 2 или ур. (5). По графическому алгоритму (5 шагов по $T_{sm}^* = 10$ сут) построим кривую выжигания "старого" самария (кривая 2). Образование нового самария на новом уровне мощности найдем по графику (рис. 1), для удобства снимая с него значения через те же промежутки времени (кривая 3).

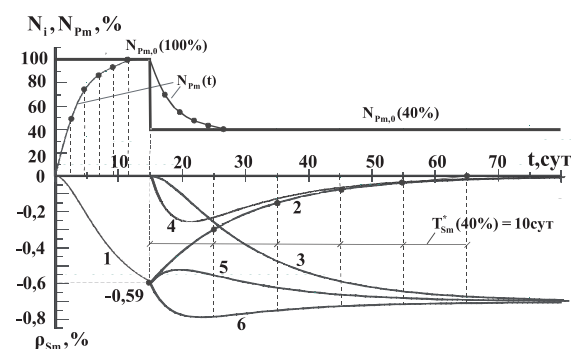


Рис. 3. Алгоритм расчета задачи 1

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саркисов А.А., Пучков В.Н. Физика переходных процессов в ядерных реакторах. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 232 с.
2. Владимиров В.И. Практические задачи по эксплуатации ядерных реакторов. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1986. – 304 с.

Ранее учитывались только эти два вклада в отравление самарием (результатом является кривая 5) и не принимались во внимание распад "старого" прометия, и последующее выжигание образующегося из него Sm . По графику рис. 2 найдем этот вклад (кривая 4). Итоговый результат (кривая 6) получим суммированием кривых 2–4 или 4 и 5.

Графики на рис. 4 иллюстрируют процедуру решения следующей задачи:

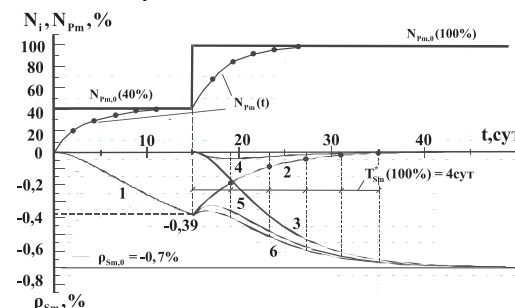


Рис. 4. Алгоритм расчета задачи 2

2. УТР в течение 15 сут работал на мощности 40 %, после чего мощность подняли до 100 %. Определить изменение реактивности вследствие отравления самарием.

Эта задача рассматривает режим с постепенным повышением мощности реактора со свежей топливной загрузкой. При построении использованы те же алгоритмы, что и в первом примере. Отличительной особенностью при построении кривой выжигания "старого" P_m является поправка на корректирующий множитель, равный 0,4.

Результаты решений обеих задач показывают, что вклад в отравление за счет выжигания "старого" P_m наиболее значителен в режиме с понижением мощности.

Заключение

Отметим основные результаты работы:

- дана физическая интерпретация шагов, составляющих графоаналитический алгоритм экспресс-расчета отравления теплового реактора самарием в маневренных режимах;
- выделены шаги реализации алгоритма, основной особенностью которого является использование скорректированной графической зависимости выжигания "старого" P_m ;
- проведена апробация метода, которая показала его физичность, простоту и удобство в исполнении;
- новый алгоритм позволяет уточнить процедуру расчета динамики отравления самарием по сравнению с ранее применяемым алгоритмом.

3. Валуев И.Б., Горлов Р.П., Кузьмин А.В. Изменение отравления условного теплового реактора самарием на переменных режимах // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 2. – С. 67–71.
4. Кузьмин А.В. Применение номограмм для расчета отравления теплового реактора самарием // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 1. – С. 78–81.

5. Глушак В.Н., Кузьмин А.В. Определение констант в уравнении отравления теплового реактора самарием с произвольными начальными условиями // Современные техника и технологии: Труды X Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – Т. 1. – С. 15–16.
6. Глушак В.Н., Валуев И.Б., Кузьмин А.В. Графоаналитический расчет отравления самарием теплового реактора на переменных режимах (теоретические основы метода) // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Матер. 10 Всеросс. научно-техн. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – С. 237–240.
7. Валуев И.Б., Глушак В.Н., Кузьмин А.В. Графоаналитический расчет отравления самарием теплового реактора на переменных режимах (примеры применения метода) // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Матер. 10 Всеросс. научно-техн. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – С. 237–240.

УДК 621.039.51;541.126

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В РЕЖИМЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГОРЕНИЯ, В ТЕХНИКЕ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ

В.И. Бойко, Д.Г. Демянюк, О.Ю. Долматов, Д.С. Исаченко, И.В. Шаманин

Томский политехнический университет
E-mail: demyanuk@phtd.tpu.ru

Экспериментально исследованы защитные свойства материалов на основе боридов вольфрама, карбида бора и их послойных комбинаций при воздействии на них потоков быстрых нейтронов и γ -квантов. Указаны основные звенья технологического процесса получения многослойных защитных материалов; определены сочетания последовательности расположения и толщин слоев, выполненных из различных материалов, которые обеспечивают преимущества многослойной защиты по массогабаритным показателям.

Состояние проблемы

К основным требованиям, предъявляемым к материалам радиационной защиты, относятся оптимальные массогабаритные показатели и способность ослаблять воздействие сочетанных потоков ионизирующих излучений. Например, поток нейтронов и сопутствующий поток γ -квантов. Ослабление негативных эффектов, вызванных стационарными и импульсными, рассеянными и коллимированными потоками радиации обеспечивается за счет уменьшения интегральных потоков за защитой или за счет смещения максимума спектра излучения. Кроме того, материал защиты в ряде случаев должен быть устойчивым к значительным термоударным нагрузкам, возникающим в его объеме при термализации частиц поля излучения.

Опыт экспериментальных и расчетных исследований [1–5] показал возможность получения методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) материалов, для которых необходимо сочетание ядерно-физических, электрофизических и реологических свойств (в том числе структуры поверхности) достигается при подготовке и проведении процесса синтеза.

Таким образом, была сформулирована задача – провести расчетное и экспериментальное исследование свойств СВС-материалов, в том числе – многослойных, обеспечивающих защиту от потоков ионизирующих излучений. Наиболее представленными в ядерной технике являются потоки быстрых нейтронов и γ -квантов, а к основным защитным материалам в этих случаях можно отнести борсодержа-

щие и такие, в составе которых большое содержание элементов с высоким зарядом ядер атомов.

СВС-материалы в защите от потоков быстрых нейтронов

Экспериментальное изучение защитных от потоков нейтронов свойств керамических борсодержащих материалов, полученных методом СВС, проводилось на установке, схема которой приведена на рис. 1.

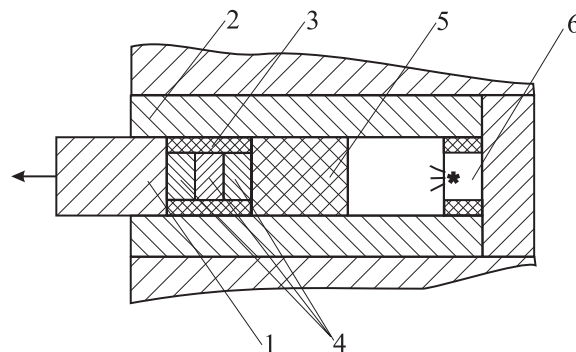


Рис. 1. Радиометрический канал графитовой призмы: 1) торцевой детектор быстрых нейтронов; 2) блок графитовой призмы; 3) наборная графитовая втулка; 4) наборный защитный экран из образцов керамического материала; 5) сменный защитный экран из графита; 6) Pu-Be источник быстрых нейтронов

Графитовая призма была набрана из 18 стандартных блоков графита размером 200×200×600 мм, имеющих сквозные отверстия диаметром 65 мм. В отверстиях всех блоков за исключением того, в котором размещались источник, защита и детектор,