

2. Теплов П.С., Чибиняев А.В. Модернизация программного комплекса CONSUL на базе спектральной программы WIMS-D5: Препринт ИАЭ-6383/5, 2005.

УДК 621.039.51; 519.6

АНАЛИЗ ОСТАНОВА РЕАКТОРА

Гольдин В.А., Пестрякова Л.А. (ин-т мат. моделирования РАН),
Троцкий Ю.В. (МГУ им. М.В. Ломоносова)

В активной зоне быстрого уран-плутониевого реактора одновременно с выгоранием ^{239}Pu происходит его наработка из ^{239}Np , который образуется из ^{238}U . Мы показали возможность специального выбора параметров реактора, обеспечивающих $\text{KB} \sim 1$. При этом взаимная компенсация выгорания и образования ^{239}Pu обеспечивает длительную работу при минимальном управлении без запаса реактивности и смены топлива [1]. Ведущую роль здесь играет накопление ^{239}Np . Его концентрация при установлении саморегулируемого режима пропорциональна объемной мощности [2]:

$$^{239}_{93}\text{N}(1/\text{см}^3) = 10^{16} \frac{^{239}_{94}\sigma_f + ^{239}_{94}\sigma_{n,2n} + ^{239}_{94}\sigma_{n\gamma}}{^{239}_{94}\sigma_f} q(\text{Вт}/\text{см}^3).$$

Однако наличие заметной концентрации ^{239}Np в активной зоне вызывает осложнения при останове реактора. В обычном реакторе достаточно вводом поглотителя, например, B_4C перевести реактор в подкритическое состояние. В быстром реакторе с $\text{KB} \sim 1$ этого недостаточно, так как ^{239}Np , накопленный в активной зоне, превращается в плутоний с периодом полураспада $T \sim 2,35$ сут, и реактивность увеличивается. При недостаточном количестве поглотителя это может привести к восстановлению критического состояния.

Ранее была оценена роль ^{233}Pa при останове ториевого реактора, но не рассматривались нелинейные и нестационарные эффекты [3]. Они возникают за счет увеличения концентрации ^{233}U , что приводит к росту реактивности и приближению ее значения к нулю (после останова реактивность отрицательна).

В настоящей работе стадия останова реактора исследована в рамках математической модели активной зоны, разработанной авторами [1, 2, 4]. Модель описывает нейтронно-ядерные процессы без учета температурных эффектов в рамках нестационарной одномерной цилиндрической модели с поправками на потери нейтронного потока через верхний и нижний торцы реактора. Утечки потока нейтронов определяются из совместного решения стационарных двумерных уравнений переноса и квазидиффузии с учетом отражающих зон и натриевой полости [2, 4]. При этом, как показали аналитические исследования, плотность нейтронного потока в одномерном расчете совпадает с интегральной средней по высоте двумерного расчета.

В отличие от реакторов с $\text{KB} \ll 1$, в которых выгорание плутония компенсируется, в основном, выводом поглотителя и только частично образованием плутония из непутия, в рассматриваемом режиме реальная концентрация плутония близка к равновесной. В этом случае выгорание плутония компенсируется его образованием в результате распада непутия.

Рассмотрен реактор с оксидным уран-плутониевым топливом и свинцово-висмутовым теплоносителем [1].

Численное исследование останова реактора. Проведены расчеты активной зоны реактора [1], работающего в саморегулируемом режиме с $W = 151 \text{ Вт}/\text{см}^3$ при введении в нее различного количества обогащенного B_4C в момент времени $t = 484$ сут. Предварительно с помощью стационарной модели была оценена концентрация вводимого карбида бора, необходимая для компенсации положительной реактивности $\rho = 2 \cdot 10^{-3}$, которая появляется при превращении всего накопленного непутия в плутоний. При $\Delta^{10}\text{B} = (0,1, 0,14, 0,17, 0,2)10^{22} \text{ см}^{-3}$ $\rho = 7,4 \cdot 10^{-4}, 3,15 \cdot 10^{-4}, 1,86 \cdot 10^{-5}, -2,62 \cdot 10^{-4}$ соответственно. Надежность такой оценки подтверждена расчетами с помощью нестационарной модели.

На рис. 1 показана динамика реактивности и энерговыделения при введении в центральную часть активной зоны карбида бора с увеличением концентрации ^{10}B на $0,1 \cdot 10^{22}$ (вариант 1), $0,15 \cdot 10^{22}$ (вариант 2) и $0,2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ (вариант 3). Видно, что увеличение концентрации ^{10}B на $0,15 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ и более обеспечивает сохранение отрицательной реактивности и, следовательно, отсутствие роста нейтронного потока. Количество поглотителя, которое необходимо ввести для полного останова реактора, меньше, чем при оценке с использованием стационарной модели, так как в динамическом расчете

нептуний превращается в плутоний постепенно. В случае увеличения концентрации $^{10}\text{В}$ на $0,1 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ реактивность вначале резко снижается до $-1,17 \cdot 10^{-3}$, цепная реакция гаснет, что влечет за собой уменьшение нейтронного потока и энерговыделения почти до нуля. Затем за счет β -распада накопленного ^{239}Np увеличивается концентрация ^{239}Pu , и реактивность начинает расти.

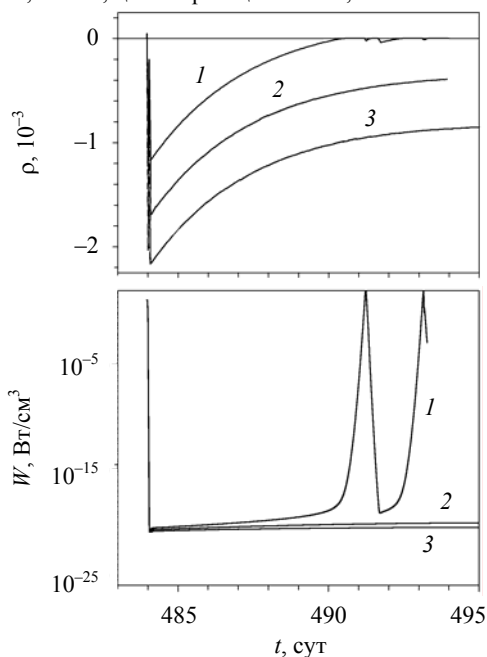
В активной зоне имеются фоновые нейтроны, образующиеся за счет спонтанного деления, столкновений быстрых ионов с тяжелыми ядрами и др. При приближении реактивности к нулю в решении уравнения, описывающего распространение нейтронов, появляется особенность. В соответствии с альтернативой Фредгольма при $\rho = 0$ решения задачи с источником в стационарном случае нет. Однако нестационарное решение есть. В реакторе возникнет сильно нестационарный режим с очень быстрым ростом реактивности, потока нейтронов и энерговыделения, что приводит к восстановлению цепной реакции в момент времени 490,5 сут. Максимальное объемное энерговыделение, в 5,4 раза превышающее рабочее (151 Вт/см^3), достигается при $t = 491,2$ сут. Одновременно усиливается выгорание плутония, сопровождающееся снижением реактивности, а также нейтронного потока и мощности до фоновых значений ($t = 491,7$ сут). В дальнейшем процесс может повториться.

На рис. 2 показано изменение концентрации плутония и нептуния с момента останова до момента восстановления цепной реакции (кривые 1), с момента восстановления цепной реакции до момента достижения максимальной мощности (кривые 2) и с момента достижения максимальной мощности до момента минимального энерговыделения (кривые 3). До появления положительной реактивности концентрация ^{239}Pu растет в результате распада ^{239}Np . За время пика энерговыделения незначительно выгорает ^{239}Pu и образуется небольшое количество ^{239}Np . Видно, что в случае ввода недостаточного количества поглотителя при останове реактора реактивность достигает нулевого значения, далее незначительные изменения в концентрации нептуния и плутония приводят к большим изменениям мощности.

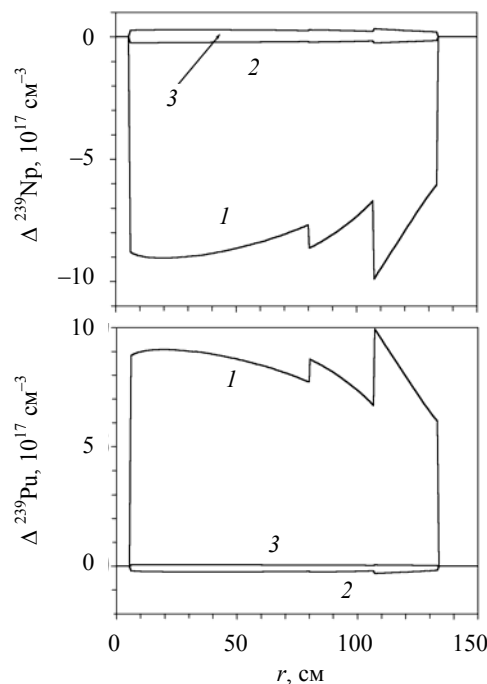
Следует отметить, что описываемая методика учитывает только некоторые нестационарные процессы, происходящие в реакторе, поэтому приводимые результаты расчетов для нестационарного режима имеют качественный характер.

В процессе дальнейших исследований хорошие результаты показал следующий алгоритм автоматической регуляции шага по времени [5]:

$$\Delta t_{i+1} = \Delta t_i k;$$



Р и с. 1. Реактивность (а) и мощность (б) при одномоментном введении карбида бора



Р и с. 2. Изменение концентрации нептуния (а) и плутония (б) в твэлах за различные промежутки времени для варианта 1: 1 — $N(490) - N(484)$; 2 — $N(491,2) - N(490)$; 3 — $N(491,7) - N(491,2)$ ($N(t)$ — концентрация соответствующего вещества в указанный момент времени)

$$k = \begin{cases} 0,9, & \tilde{k} < 0,9; \\ \tilde{k}, & \tilde{k} \in [0,9, 1,1]; \\ 1,1, & \tilde{k} > 1,1, \end{cases}$$

$$\text{где } \tilde{k} = \left(1 + 0,1 \frac{\Delta\lambda_n - |\Delta\lambda_i|}{\Delta\lambda_n} \right); \quad \Delta\lambda_n = 10^{-4}.$$

Смысл алгоритма состоит в том, чтобы на каждом шаге значение $|\Delta\lambda_i|$ было близко к $\Delta\lambda_n$. В регулярном режиме $\Delta\lambda_i$ на каждом шаге меняет знак, при пуске реактора смены знака не происходит. При переходе от одного режима к другому сложностей не наблюдалось. В начальный момент времени $\Delta t_i = \Delta t_{\min}$, в дальнейшем $\Delta t_i \in [\Delta t_{\min}, \Delta t_{\max}]$. Если $\Delta t_i > \Delta t_{\max}$, то полагается $\Delta t_i = \Delta t_{\max}$, если $\Delta t_i < \Delta t_{\min}$, то счет нужно останавливать и выяснять, почему это произошло. В наших расчетах $\Delta t_{\min} = 10^{-4}$, $\Delta t_{\max} = 0,04$ сут.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 00-01-00205.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдин В.Я., Пестрякова Г.А., Трощев Ю.В. Управление быстрым реактором с оксидным уран-плутониевым топливом в саморегулируемом режиме без запаса реактивности. — Атомная энергия, 2004, т. 97, вып. 1, с. 3—9.
2. Гольдин В.Я., Пестрякова Г.А., Трощев Ю.В., Аристова Е.Н. Саморегулируемый нейтронно-ядерный режим в реакторе с жестким спектром и карбидным топливом. — Мат. моделирование, 2002, т. 14, № 1, с. 27—40.
3. Герасимов А.С., Зарицкая Т.С., Киселев Г.В., Рудик А.П. Влияние протактиния-233 на ядерную безопасность уран-233—торий-232 реакторного цикла. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1994, вып. 3, с. 44—50.
4. Гольдин В.Я., Пестрякова Г.А., Трощев Ю.В., Аристова Е.Н. Быстрый реактор на оксидном уран-плутониевом топливе в саморегулируемом режиме. — Атомная энергия, 2003, т. 94, вып. 3, с. 184—190.
5. Гольдин В.Я., Трощев Ю.В. Управление мощностью быстрого реактора в саморегулируемом режиме и его пуск. — Атомная энергия, 2005, т. 98, вып. 1, с. 18—24.

Поступило в Редакцию 23.12.05

УДК 621.039.59

НЕВОДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РЕГЕНЕРАЦИИ НИТРИДНОГО ТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

*Устинов О.А., Суханов Л.П., Горбунов В.Ф., Rogozкин Б.Д., Черников М.А.,
Погорелко О.Н. (ВНИИНМ им. А.А. Бочвара), Солодов А.А. (ИБРАЭ)*

В настоящее время сформировалось устойчивое мнение, что регенерация отработавшего нитридного топлива быстрых реакторов должна быть безводной (пирохимической или пирометаллургической). В качестве одной из таких технологий рассматривается электрохимическое рафинирование облученного нитридного топлива в хлоридных расплавах с получением очищенного сплава урана и плутония [1]. Недостатками этого процесса являются сложное для радиохимического производства электрохимическое оборудование, получение регенерированного топлива в виде полупродукта (металлический сплав урана и плутония), требующего дальнейших операций по превращению в нитрид-