

ТОПЛИВНЫЕ ЦИКЛЫ С ГЛУБОКИМ ВЫГОРАНИЕМ: АНАЛИЗ КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕАКТИВНОСТИ

**Э.Ф. Крючков*, М.Ю. Терновых*, Г.В. Тихомиров*, Ли Цзиньхун*,
А.Н. Шмелев*, М. Саито****

** Московский инженерно-физический институт (государственный университет), г. Москва*

*** Токийский институт технологии, г. Токио*



Топливные циклы легководных реакторов с глубоким выгоранием (более 100 ГВт·сут/т), как правило, содержат большое количество делящихся материалов. Это приводит к формированию спектра нейтронов более жесткого, чем в традиционных легководных реакторах. Изменение спектра и существенное количество нетрадиционных для реализуемых топливных циклов изотопов, например, ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{231}Pa , ^{232}U , приводит в таких топливных композициях к значительным изменениям коэффициентов реактивности по сравнению с урановым топливом. В работе рассмотрены топливные циклы с глубоким выгоранием на основе Th–Pa–U и U–Np–Pu топливных композиций. Проведены расчеты коэффициента размножения и пустотного коэффициента реактивности для различных глубин выгорания и различных параметров решетки. Предлагаются алгоритм анализа роли изотопа в значении этих коэффициентов и различные способы повышения уровня безопасности топливных циклов с глубоким выгоранием.

ВВЕДЕНИЕ

При разработке топливных циклов с глубоким выгоранием часто рассматриваются композиции с нетрадиционными изотопами ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{231}Pa , ^{232}U и высокой концентрацией делящихся изотопов [1–3]. Расчеты параметров топливного цикла обычно проводятся для решеток традиционных легководных реакторов, например, ВВЭР в работе [1] и PWR в работе [2]. Выбор традиционных решеток оправдан из соображений технологии, но может оказаться не оптимальным с других точек зрения.

В настоящей работе рассмотрены топливные циклы с возможностью достижения глубокого выгорания на основе Th–Pa–U и U–Np–Pu топливных композиций. Проведены расчеты коэффициента размножения бесконечной решетки твэлов при различных соотношениях топливо-замедлитель и различных глубинах выгорания. В расчетах использовались комплексы программ SCALE [4] и MCNP [5].

Для рассматриваемых топливных композиций зависимость коэффициента размножения от количества замедлителя существенно отличается от традиционного уранового топлива с обогащением менее 5% по изотопу ^{235}U . При фиксированных пара-

метрах решетки твэлов возможно появление положительных значений пустотного коэффициента реактивности. Здесь и далее под пустотным коэффициентом реактивности понимается величина $\Delta k = k(\rho) - k(\rho_0)$, где ρ – пониженная плотность теплоносителя, а ρ_0 – плотность теплоносителя в рабочем состоянии. Следует отметить, что наличие большого количества резонансных поглотителей в топливной композиции приводит к отрицательному значению доплеровского коэффициента реактивности во всем диапазоне рабочих температур топлива и кампании реактора. Поэтому безопасность рассматриваемых систем определяется, в первую очередь, пустотным коэффициентом реактивности. Наличие положительных коэффициентов реактивности недопустимо с точки зрения безопасной эксплуатации реактора, поэтому был проведен анализ возможных причин появления положительного пустотного коэффициента реактивности и предложены пути для борьбы с этим эффектом.

ПУТИ ДОСТИЖЕНИЯ ГЛУБОКОГО ВЫГОРАНИЯ

Вопросу увеличения глубины выгорания ядерного топлива легководных реакторов всегда уделялось много внимания. Последние 20 лет средняя глубина выгорания ядерного топлива в реакторах типа PWR постоянно растет, а максимальная глубина выгорания уже достигла значений 70–80 ГВт-сут/т. Увеличение глубины выгорания сегодня достигается за счет увеличения начального обогащения топлива, при этом для компенсации начального запаса реактивности часто используется Gd в качестве выгорающего поглотителя. Увеличение начального обогащения традиционного U–Pu топлива в легководных реакторах приводит к уменьшению коэффициента конверсии, что негативно сказывается на общей эффективности топливного цикла. Наличие в топливе выгорающих поглотителей, например, Gd, связывает большой начальный запас положительной реактивности. Однако после выгорания такого поглотителя, которое происходит довольно быстро, избыточная реактивность должна быть связана традиционными методами: поглощающими стержнями и добавлением бора в теплоноситель.

Сформулируем нейтронно-физические условия, выполнение которых необходимо для достижения глубины выгорания топлива более 150 ГВт-сут/т, которое в данной работе называется «глубоким» выгоранием:

- значимая доля реакций деления должна проходить на изотопах, появляющихся в топливе из сырьевых нуклидов; для характеристики данного процесса можно использовать отношение доли делений на данных изотопах за всю кампанию к общему числу делений;
- большая глубина выгорания не должна приводить к значительному превышению коэффициента размножения ячейки над 1 в любой момент времени.
- коэффициенты реактивности реактора (пустотный, плотностной, температурный и т.д.) всегда должны отвечать условиям безопасной эксплуатации реактора, т.е. быть отрицательными.

Принципиальным, на наш взгляд, является условие, обеспечивающее активное использование сырьевого нуклида в процессе выгорания топлива. Идеальным топливным циклом с точки зрения достижения максимальной глубины выгорания может считаться бридинговый режим выгорания, при котором коэффициент размножения реактора не изменяется с течением времени. Другими словами, положительная реактивность, связанная с появлением новых делящихся ядер, за любой интервал времени компенсирует отрицательную реактивность, связанную с исчезновением делящихся ядер и накоплением продуктов деления. Сформулированные условия можно записать в виде формул (1) и (2), записанных относительно одnogрупповых констант и концентраций тяжелых нуклидов.

$$\frac{(v_f \cdot \sigma_f)^1 \cdot \rho^1}{\sigma_c^2 \cdot \rho^2 + \sigma_{cf}^1 \cdot \rho^1} \geq 1, \quad (1)$$

$$\frac{(v_f \sigma_f)^1 \cdot \left(\rho^1 - \left(\frac{\Delta \rho^1}{\Delta t} \right) \cdot \Delta t \right) + (v_f \sigma_f)^3 \cdot \left(\frac{\Delta \rho^3}{\Delta t} \right) \cdot \Delta t}{\sigma_c^2 \left(\rho^2 - \left(\frac{\Delta \rho^2}{\Delta t} \right) \cdot \Delta t \right) + \sigma_{cf}^1 \cdot \left(\rho^1 - \left(\frac{\Delta \rho^1}{\Delta t} \right) \cdot \Delta t \right) + \sigma_{cf}^3 \cdot \left(\frac{\Delta \rho^3}{\Delta t} \right) \cdot \Delta t + \tilde{\sigma}_c^{fp} \cdot \left(\frac{\Delta \rho^{fp}}{\Delta t} \right) \cdot \Delta t} \geq 1, \quad (2)$$

где индексы обозначают: 1 – начальный делящийся изотоп; 2 – сырьевой нуклид; 3 – нарабатываемый делящийся нуклид, fp – эффективный осколок деления.

Предлагаемые формулы можно использовать при подборе топливных композиций со свойствами глубокого выгорания, при этом необходимо применять итерационный процесс, т.к. одноклассовые константы зависят от спектра нейтронов, который, в свою очередь, определяется топливной композицией.

В последние годы было предложено ряд топливных циклов легководных реакторов, в которых добавление в традиционное топливо некоторых «экзотических» нуклидов, приводило к выполнению условий достижения глубокого выгорания. При этом добавляемый тяжелый нуклид одновременно выполняет роли выгорающего поглотителя и сырьевого нуклида. Выгорая параллельно делящемуся нуклиду, он обеспечивает приток новых делящихся ядер и удерживает коэффициент размножения реактора на одном уровне. Высокие концентрации тяжелых ядер с большими сечениями поглощения значительно уменьшают в предложенных циклах отрицательную роль накопления продуктов деления.

Как показали исследования, режим глубокого выгорания в условиях легководного реактора можно осуществить, если, например, использовать топливо, в составе которого содержится Pa-231 или Np-237. При этом будут реализовываться цепочки изотопных превращений, которые обладают несколькими замечательными свойствами. Прежде всего, заметим, что нуклиды Pa-231 и Np-237 являются поглотителями нейтронов практически во всем реакторном диапазоне энергий нейтронов, в этих цепочках они будут играть роль не только своеобразного «сырьевого элемента», но и проявляются как «выгорающие» поглотители. Например, в [1] было показано, что топливные композиции с добавлением Pa-231 могут характеризоваться стабилизированными размножающими свойствами до очень глубоких выгораний (30% НМ и даже более) в условиях легководного реактора.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА РАЗМНОЖЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕАКТИВНОСТИ

Для анализа конкретных топливных циклов легководного реактора необходим выбор ряда параметров:

- состав топливной композиции;
- конструкция твэла (диаметр топлива, толщина оболочки);
- параметры решетки твэлов (тип решетки, шаг решетки).

Опираясь на перечисленные выше идеи, для анализа были выбраны следующие топливные композиции: $(^{232}\text{Th} (69\%) + ^{231}\text{Pa} (15\%) + ^{233}\text{U} (16\%))\text{O}_2$ и $(^{238}\text{U} (70\%) + ^{237}\text{Np} (10\%) + ^{239}\text{Pu} (20\%))\text{O}_2$. Была рассмотрена треугольная решетка твэлов с внутренним диаметром 0,772 см и внешним диаметром 0,9164 см. Шаг решетки равен 1,275 см. Данные параметры соответствуют параметрам российского реактора ВВЭР-1000 [6].

Для обеспечения возможности достижения глубокого выгорания при рассмотре-

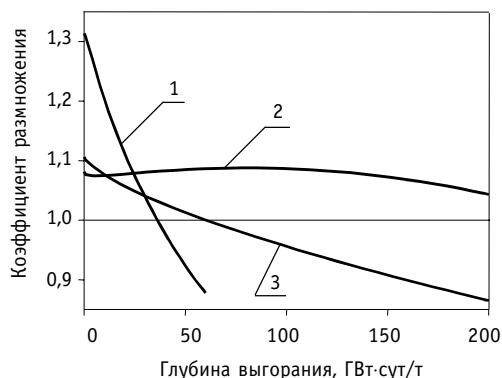


Рис. 1. Зависимость коэффициента размножения топливной ячейки от глубины выгорания:
 1 – UO_2 (4,4% ^{235}U);
 2 – $(^{232}\text{Th} (69\%) + ^{231}\text{Pa} (15\%) + ^{233}\text{U} (16\%))\text{O}_2$;
 3 – $(^{238}\text{U} (70\%) + ^{237}\text{Np} (10\%) + ^{239}\text{Pu} (20\%))\text{O}_2$

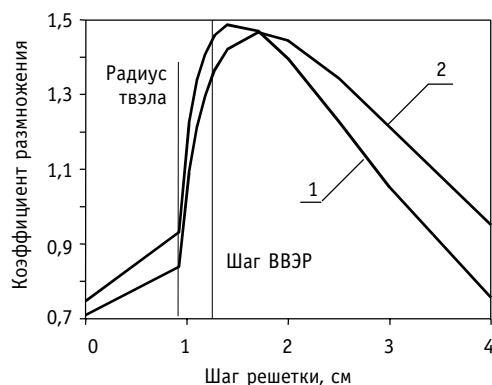


Рис. 2. Зависимость коэффициента размножения ячейки с топливом UO_2 (4,4% ^{235}U) от шага решетки:
 1 – холодное состояние; 2 – горячее состояние

нии исследуемых типов топлива, в качестве материала оболочки была выбрана нержавеющая сталь. Расчеты проводились по комплексу программ SCALE (модуль SAS2H), специально предназначенному для анализа топливных циклов легководных реакторов [4]. Зависимости коэффициента размножения бесконечной системы топливных стержней от глубины выгорания приведены на рис. 1.

Коэффициент размножения ячейки с топливом, содержащим изотопы протактиния и нептуния, как видно из рис. 1, имеет более пологую форму, чем коэффициент размножения традиционной ячейки, что позволяет достичь глубоких выгораний (150 ГВт-сут/т и более). Однако в связи с тем, что предлагаемые топливные композиции содержат большие количества изотопов с большим сечением поглощения нейтронов в тепловой области, возникает вопрос о выборе шага топливной решетки и оценки коэффициентов реактивности (прежде всего пустотного) в данной системе.

Зависимость коэффициента размножения топливных ячеек от шага треугольной решетки представлена на рис. 2–4. График внутри области твэл соответствует обезвоживанию максимально плотной решетки, а точка при шаге, равном нулю, – полному осушению решетки максимальной плотности.

Для традиционной топливной композиции (как видно из рис. 2)

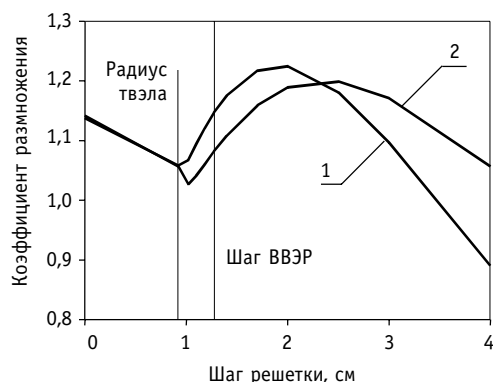


Рис. 3. Зависимость коэффициента размножения ячейки с топливом $(^{232}\text{Th} (69\%) + ^{231}\text{Pa} (15\%) + ^{233}\text{U} (16\%))\text{O}_2$ от шага решетки: 1 – холодное состояние; 2 – горячее состояние

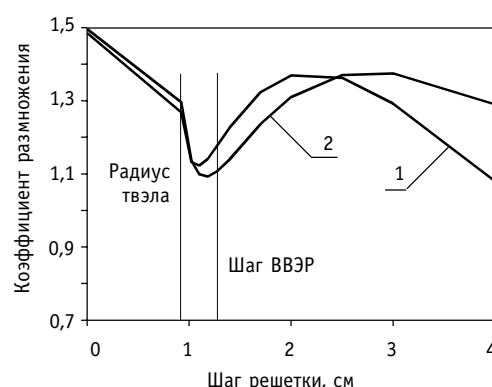


Рис. 4. Зависимость коэффициента размножения ячейки с топливом $(^{238}\text{U} (70\%) + ^{237}\text{Np} (10\%) + ^{239}\text{Pu} (20\%))\text{O}_2$ от шага решетки: 1 – холодное состояние; 2 – горячее состояние

- шаг решетки ВВЭР отвечает условию отрицательности пустотного коэффициента реактивности и находится практически в области оптимума по начальному запасу реактивности;
- увеличение уран-водного отношения приводит к снижению начального запаса реактивности, а уменьшение может привести к появлению положительного пустотного коэффициента реактивности;
- обезвоживание самой тесной возможной решетки приводит к отрицательному пустотному коэффициенту реактивности.

Значения коэффициента размножения для шага ВВЭР были рассчитаны как по программе MCNP, так и по программе SCALE. Совпадение расчетных значений коэффициента размножения, полученных по разным программам, между собой и со значениями, приведенными в работе [6], демонстрирует, на взгляд авторов, адекватность используемых моделей.

Анализ рис. 3 и 4 и сравнение их с рис. 2 приводит к следующим выводам:

- шаг решетки ВВЭР не является оптимальным для данных топливных композиций, поскольку уменьшение уран-водного отношения в широком диапазоне приводит к возрастанию запаса начальной реактивности при сохранении отрицательного пустотного коэффициента реактивности;
- незначительное увеличение уран-водного отношения приводит к возникновению положительного пустотного коэффициента реактивности;
- обезвоживание самой тесной возможной решетки приводит к положительному пустотному коэффициенту реактивности.

Далее проводится анализ вклада различных изотопов в пустотный коэффициент реактивности и рассматриваются возможные пути для обеспечения безопасной работы реакторов с большим количеством тяжелых изотопов, имеющих большие сечения захвата и деления.

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ВКЛАДА ИЗОТОПА В ПУСТОТНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Для расчета коэффициентов часто используют прямые расчеты двух состояний ячейки – рабочего и возмущенного. При внесении возмущения в систему изменяется спектр нейтронов, следовательно, и скорости нейтронно-физических процессов на изотопах топлива. Суммарный эффект всех изменений в коэффициенте размножения системы определяет коэффициент чувствительности. Аналогичный подход был использован в данной работе.

Для анализа роли изотопа в значении пустотного коэффициента реактивности можно использовать следующую простую формулу:

$$\Delta K_i = \frac{v \Sigma_f \Phi + v \Sigma_f^i \Delta \Phi}{\Sigma_a \Phi + \Sigma_a^i \Delta \Phi} - \frac{v \Sigma_f \Phi}{\Sigma_a \Phi},$$

где $\Sigma^i \Delta \Phi = \rho_i \int \sigma^i(E) (\Phi_2(E) - \Phi(E)) dE$ – изменение скоростей реакций, связанное с i -ым изотопом, $\Phi_2(E)$ – возмущенный спектр нейтронов.

На основе приведенной формулы в рамках комплекса SCALE был разработан численный алгоритм. Некоторые результаты расчетов приведены в табл. 1, 2.

Как видно из представленных результатов различные изотопы вносят различный вклад в изменение коэффициента размножения при изменении плотности теплоносителя. Сравнение этих вкладов позволяет предсказывать изменение коэффициента чувствительности при выгорании топлива. Наиболее «опасными» для пустотного коэффициента реактивности являются сырьевые изотопы с большим тепловым сечением радиационного захвата. Для исследуемых видов топлива это изотопы ^{237}Np и ^{231}Pa .

Таблица 1

**Изменения коэффициента
размножения при 5-процентном
уменьшении плотности воды
в ячейке реактора ВВЭР UO₂
(4,4% ²³⁵U)**

Изотоп	ΔK_i
Все изотопы	-0,015
²³⁸ U	0,004
²³⁵ U	-0,019

Таблица 2

**Изменения коэффициента
размножения при 5-процентном
уменьшении плотности воды в
ячейке реактора ВВЭР (²³²Th (69%)+
²³¹Pa (15%)+ ²³³U(16%))O₂**

Изотоп	ΔK_i
Все изотопы	-0,005
²³² Th	0,002
²³¹ Pa	0,013
²³³ U	-0,020

Таблица 3

**Изменения коэффициента
размножения при 5-процентном
уменьшении плотности воды
в ячейке реактора ВВЭР (²³⁸U (70%)
+ ²³⁷Np (10%) + ²³⁹Pu (20%))O₂**

Изотоп	ΔK_i
Все изотопы	0,006
²³⁸ U	0,004
²³⁷ Np	0,014
²³⁹ Pu	-0,013
²⁴⁰ Pu	0,001

В процессе выгорания топлива концентрация этих изотопов будет уменьшаться и, следовательно, будет уменьшаться их негативное влияние на пустотный коэффициент реактивности. В то же время, накопление в процессе выгорания осколков деления и других тяжелых изотопов может приводить к противоположному эффекту. Для определения итоговых изменений значений пустотного коэффициента реактивности в процессе выгорания топлива были проведены расчеты этих коэффициентов для различных глубин выгорания. Результаты этих расчетов представлены на рис. 5 и 6, где приведены зависимости изменения коэффициента размножения (в относительных единицах) – $\Delta k(\rho) = k(\rho - \delta\rho) - k(\rho)$ при трех значениях выгорания топлива в зависимости от плотности теплоносителя (в относительных единицах). Здесь $\delta\rho$ – изменение плотности теплоносителя около величины ρ , которое при расчетах было принято равным $0.1\rho_0$, где ρ_0 – плотность теплоносителя в рабочем состоянии.

Из рис. 5 и 6 видно, что пустотный коэффициент реактивности с выгоранием топлива изменяется незначительно. Свежее топливо, для большинства диапазонов изменения плотности, имеет наихудшее значение пустотных коэффициентов реактивности. Поэтому подходы, предложенные далее для подавления положительного пус-

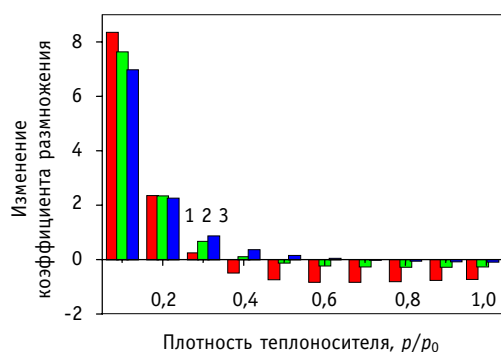


Рис. 5. Зависимость изменения коэффициента размножения топлива (^{232}Th (69%) + ^{231}Pa (15%) + ^{233}U (16%)) O_2 при изменении плотности теплоносителя: 1 – свежее топливо; 2 – 50 ГВт-сут/т; 3 – 100 ГВт-сут/т

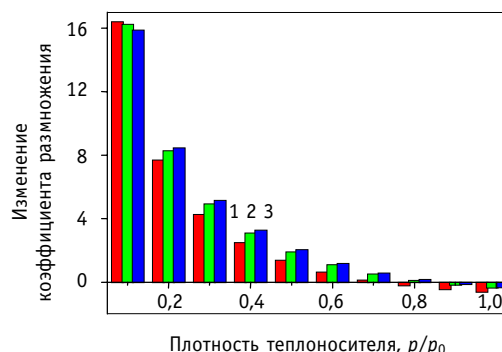


Рис. 6. Зависимость изменения коэффициента размножения топлива (^{238}U (70%) + ^{237}Np (10%) + ^{239}Pu (20%)) O_2 при изменении плотности теплоносителя: 1 – свежее топливо; 2 – 50 ГВт-сут/т; 3 – 100 ГВт-сут/т

тотного коэффициента для свежего топлива, будут тем более работоспособны для выгоревшего топлива.

НЕКОТОРЫЕ СПОСОБЫ ПОДАВЛЕНИЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО ПУСТОТНОГО КОЭФФИЦИЕНТА РЕАКТИВНОСТИ

Для подавления положительного пустотного коэффициента реактивности в данной работе были рассмотрены два пути. Первый путь – уменьшение высоты активной зоны для увеличения торцевой утечки при уменьшении плотности теплоносителя. Второй путь – добавление в решетку топливных стержней дополнительного замедлителя, который остается в системе при любых значениях плотности теплоносителя. Введение в ТВС различных неоднородностей – современная тенденция улучшения использования топлива и достижения необходимых коэффициентов реактивности. Например, в проектируемых ТВС реактора ВВЭР планируется использовать твэлы с гадолинием [7].

Все расчеты в данной работе проводились по программе MCNP для модели, изображенной на рис. 7. Расчетная модель представляет собой треугольную призму конечной высоты, содержащую 4 твэла с теплоносителем между ними. На боковых гранях призмы задавались условия симметрии, а на торцах условия границы с вакуумом или условия симметрии. Размеры твэлов и составы материалов соответствовали ранее рассмотренным ячеечным моделям. Центры твэлов располагались в узлах треугольной решетки, поэтому при расстоянии между центрами твэлов, равным шагу реактора ВВЭР, данная модель полностью соответствует ячейке, если твэлы одинаковые.

Результаты расчетов зависимости коэффициента размножения для данной модели с различными видами топлива от плотности теплоносителя приведены на рис. 8 и 9. Расчеты были проведены для высот активной зоны H , равных 3 м и 1 м, и шагов решетки твэлов d , равных 1,275 см и 2 см. Обозначения кривых на рис. 8–9 суммиро-

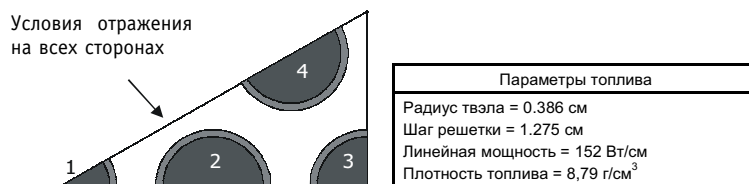


Рис. 7. Расчетная модель для 3D расчетов

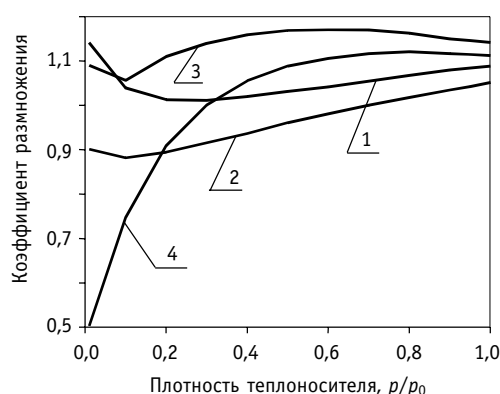


Рис. 8. Зависимость коэффициента размножения ячейки с топливом (^{232}Th (69%) + ^{231}Pa (15%) + ^{233}U (16%)) O_2 от плотности теплоносителя для разных высот АЗ и шага решетки

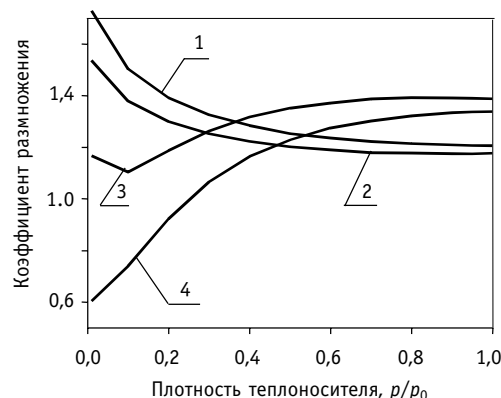


Рис. 9. Зависимость коэффициента размножения ячейки с топливом (^{238}U (70%) + ^{237}Np (10%) + ^{239}Pu (20%)) O_2 от плотности теплоносителя для разных высот АЗ и шага решетки

Таблица 4

Обозначение кривых на рис. 8 и 9

Линия	Высота АЗ, м	Шаг, см
1	3	1,275
2	1	1,275
3	3	2
4	1	2

ваны в табл. 4. Высота 3 м соответствует высоте реактора ВВЭР, а высота 1 м выбрана как предельный случай. Шаг 1,275 см соответствует шагу реактора ВВЭР, а шаг 2 см выбран в результате анализа зависимости коэффициентов размножения от шага решетки, изображенных на рис. 3–4. Целью данных расчетов было выявление тенденций изменения пустотного коэффициента реактивности при изменении высоты и шага решетки, а не оптимизация параметров решетки для каждого топливного цикла.

Результаты расчетов коэффициента размножения модифицированной модели, в которой твэл 2 был заменен на графитовый стержень с радиусом R_C приведены на рис. 10 и 11. Рассматривалось два радиуса графитового стержня R_C – 0,386 см и 0,55 см. Данная модификация ТВС проводилась для высоты активной зоны, равной 3 м. Шаг топливной решетки, как и в предыдущих расчетах, рассматривался равным 1,275 см и 2 см. Обозначения кривых на этих рисунках суммированы в табл. 5.

Из рис. 8–11 видно, что для обоих рассматриваемых топливных циклов значения пустотного коэффициента реактивности можно сделать отрицательным для любых диапазонов изменения плотности теплоносителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе показано, что

1) нетрадиционные топливные композиции, обеспечивающие глубокое выгорание в легководном реакторе, могут иметь положительные коэффициенты реактивности, что недопустимо с точки зрения безопасности;

2) шаг решетки традиционных легководных реакторов не является оптимальным для таких топливных композиций и может быть увеличен, что приводит как к повышению начального запаса реактивности, так и обеспечивает отрицательный пустотный коэффициент реактивности в достаточно широком диапазоне уменьшения плотности теплоносителя;

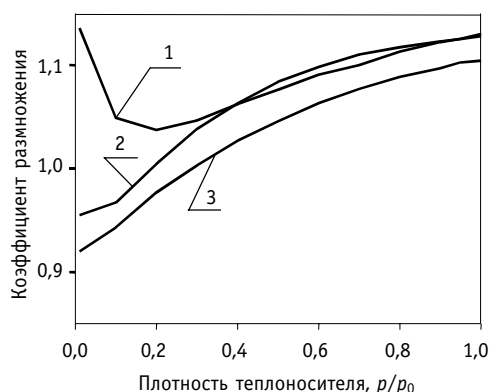


Рис. 10. Зависимость коэффициента размножения ячейки с топливом (^{232}Th (69%) + ^{231}Pa (15%) + ^{233}U (16%)) O_2 от плотности теплоносителя при наличии графитового стержня

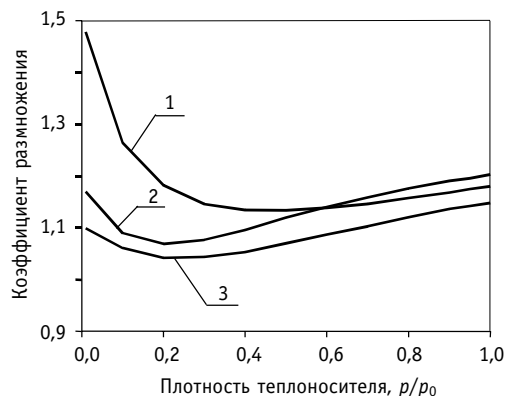


Рис. 11. Зависимость коэффициента размножения ячейки с топливом (^{238}U (70%) + ^{237}Np (10%) + ^{239}Pu (20%)) O_2 от плотности теплоносителя при наличии графитового стержня

Таблица 5

Обозначение кривых на рис. 10 и 11

Линия	Высота АЗ, м	RC, см
1	3	—
2	3	0,386
3	3	0,55

3) выгорание топлива не сильно сказывается на зависимости пустотного коэффициента реактивности от плотности теплоносителя, поэтому меры подавления положительного коэффициента реактивности для свежего топлива, должны быть эффективны и для выгоревших композиций;

4) для обеспечения отрицательных значений пустотного коэффициента реактивности во всей области изменения плотности теплоносителя можно использовать как уменьшение высоты активной зоны, так и введение в решетку дополнительных замедлителей.

Литература

1. Kulikov G., Shmelev A., Apse V., Kryuchkov E., Tikhomirov G., Ternovykh M. Physical characteristics of the light water reactor core fuelled with (Th+Pa+U)-ceramics (high fuel burn-up via DUPIC processes application), Proceeding of the PHYSOR 2002, Seoul, Korea, October 7-10, 2002, 3B-01.
2. Aizawa O. Analysis of innovative U233-Np-Th core as a Np-burner, Proceeding of the PHYSOR 2002, Seoul, Korea, October 7-10, 2002, 7E-21.
3. Nikitin et al. An approach to long-life PWR core with advanced U-Np-Pu fuel. Annals of Nuclear Energy, 26/11, 1999.
4. SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, NUGER/CR-0200, Rev. 4 (ORNL/NUGER/CSD-2/R4), Vols I,II, and III (draft November 1993). Available from Radiation Shielding Information Center as CCC-545.
5. Judith A. Briesmeister, Ed. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B. Los Alamos National Laboratory report LA-12625-M, Version 4B (March 1997).
6. Ellis R.J. Analyses of Weapons-Grade MOX VVER-1000 Neutronics Benchmarks: Pin-Cell Calculations with SCALE/SAS2H, ORNL/TM-2000/4.
7. A VVER-1000 LEU and MOX assembly computational benchmark, NEA/NSC/DOC(2002)10.

Поступила в редакцию 14.04.2004

УДК 621.039.586

The Code ANPEX Abstract / M.V. Kascheev, I.A. Kuznetsov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 5 pages.

Short information is given on the calculation of FBR's power excursion by prompt neutrons. The code is characterized by vast application possibilities and can account for various initial reactor states.

УДК 621.039.524

Research of Emergency Situations with Small Leaks of the First Circuit of Reactor VVER-1000 / A.N. Shkarovskii, V.I. Aksenov, N.P. Serdun; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 6 pages, 4 illustrations. – References, 5 titles.

Calculating research of accidents with small leaks in the first circuit of reactor WWER-1000 during reactor's work in rated power and in situation of «hot shutdown» is developed. It is shown that in all investigate modes of operation emergency protection and safety systems provide reactor cooldown and subcritical condition, reactor is transferred in safe shutdown condition.

УДК 621.039.56

Fuel Cycles with High Fuel Burn-Up: Analysis of Reactivity Coefficients / E.F. Kryuchkov, A.N. Shmelev, M.Yu. Ternovyykh, G.V. Tikhomirov, Li Jinhong, M. Saito; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 9 pages, 5 tables, 11 illustrations. – References, 7 titles.

Fuel cycles of light-water reactors (LWR) with high fuel burn-up (above 100 MWd/kg), as a rule, involve large amounts of fissionable materials. It leads to forming the neutron spectrum harder than that in traditional LWR. Change of neutron spectrum and significant amount of non-traditional isotopes (for example, ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{231}Pa , ^{232}U) in such fuel compositions can alter substantially reactivity coefficients as compared with traditional uranium-based fuel. The present work addresses the fuel cycles with high fuel burn-up which are based on Th-Pa-U and U-Np-Pu fuel compositions. Numerical analyses are carried out to determine effective neutron multiplication factor and void reactivity coefficient for different values of fuel burn-up and different lattice parameters. The algorithm is proposed for analysis of isotopes contribution to these coefficients. Various ways are considered to upgrade safety of nuclear fuel cycles with high fuel burn-up.

УДК 621.039.534: 533.6.011.3

Integral Jet Computation Model of Thermalhydraulic Parameters of a Coolant Flow in Bundles of a Vessel Type Reactors' Core / E.F. Avdeev, I.A. Chusov, A.A. Karpenko; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 11 pages, 9 illustrations. – References, 8 titles.

The model of a coolant flow in bundles of a water energy reactor. The model represents a flow in the reactor as a system of coaxial quasi-free turbulent jets is considered. To solve this problem the generalized conversion of Prandtl-Mises was used. This paper presents the possibility of getting a confident analytic solution. Moreover, some results of numerical computations of velocity and temperature fields throughout height of the reactor core allowing for blocking some bundles are given.

УДК 621.039.534: 533.6.011.3

Turbulent Exchange Coefficient Determination at Velocity and Temperature Fields Computation of Coolant in Reactor BREST-OD-300 Model Assembly / E.F. Avdeev, I.A. Chusov, A.A. Karpenko; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 10 pages, 11 illustrations. – References, 8 titles.

The paper describes a new method of velocity and temperature fields computation of a coolant in the bundles of a vessel type reactor. The method is used for computation of velocity and temperature fields of a coolant in the BREST-OD-300 model assembly. This paper treats the coefficient of turbulent exchange obtained on the base of jet model. The coefficients proposed were founded by comparing experimental data with the results of computation in converted coordinates. Some results of numeri-