

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ДЛЯ ВОДО-ВОДЯНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА ВВЭР-1000 С ЗАГРУЗКОЙ ТОРИЙУРАНПЛУТОНИЕВЫХ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

И.В. Шаманин*, А.А. Ухов*, Г.-И. Рюттен, К. Хаас**, В. Шерер****

**Томский политехнический университет, г. Томск*

***Институт исследований безопасности и реакторных технологий (ISR-2, Forschungszentrum Juelich, Germany)*



Анализируются общие параметры водо-водяного реактора при использовании топлива ($m\%Th^{232}$, $n\%U^{235}$, $k\%Pu^{239}$) O_2 . Во всех рассмотренных вариациях предполагалось, что конструкция активной зоны и тепловыделяющих сборок стандартная для ВВЭР-1000. Рассматривались кампании, образованные 3, 4 и 5 циклами выгорания.

Целью данного исследования являлось определение возможности реактора ВВЭР-1000, как потенциальной ядерной энергетической установки для утилизации плутония оружейной кондиции в топливе на основе тория.

ВВЕДЕНИЕ

Важной проблемой для атомной промышленности в настоящее время является поиск путей использования оружейного плутония в ядерных энергетических установках. Решение проблемы требует ответа на ряд принципиальных вопросов, одним из которых является определение возможностей использования плутонийсодержащего топлива в типичных установках. Такая возможность может быть реализована в легководном ториевом реакторе ВВЭР-Т, концепция и физическая схема которого детально изложены в [1]. В соответствии с ней, в случае гомогенных ТВС, требуется изменение конструкции блока прижимных труб и расположения технологических каналов СУЗ. Данный вариант предполагается для реакторов нового поколения и при внедрении переработки топлива. Концепция гетерогенной ТВС изначально предполагает изменение материального состава и конструкции.

Несомненный интерес вызывает вариант, не требующий значительных изменений конструкции АЗ, СУЗ и ТВС при замене типичного UO_2 -топлива на плутонийсодержащее топливо. Для такого варианта необходимо определение оптимального сочетания схемы загрузки топлива, схемы движения топлива в течение кампании

и состава свежего топлива, обеспечивающего максимальное выгорание ^{239}Pu , минимизацию возможности извлечения из отработавшего топлива делящихся нуклидов в количествах, пригодных для изготовления ядерного оружия.

Принципиальные мотивы, преимущества и аргументы в пользу постепенного перехода ядерной энергетики к уранториевому топливному циклу приведены в [2]. Вовлечение в него плутония увеличивает преимущества.

Принимая во внимание данные факты, актуальной можно считать задачу изучения параметров топливного цикла для реактора неизменной конструкции с загрузкой оксидного плутонийсодержащего топлива на базе тория с добавкой высокообогащенного урана, которая может быть обусловлена необходимостью увеличения доли запаздывающих нейтронов, которая относительно невелика для ^{239}Pu и ^{233}U .

ПРОФИЛИРОВАНИЕ АКТИВНОЙ ЗОНЫ И РАССТАНОВКА ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК

Активная зона условно разделяется на 2 области: периферийная (42 ТВС типа 1) и центральная (109 ТВС). В центральной области размещаются 54 ТВС типа 2 с минимальным содержанием делящихся нуклидов и 54 ТВС типа 3 со средним значением содержания делящихся нуклидов. Центральная ТВС относится к типу 1, который характеризуется максимальным содержанием делящихся нуклидов (периферийная область). Таким образом организуется первая стартовая загрузка.

В аксиальном направлении часть расчетной области, занятая активной зоной, дробится на 5 равных участков. Дополнительный участок сверху и снизу соответствует отражателю с конструктивными элементами, находящимися в его объеме. В радиальном направлении активная зона дробится на кольцевые секторы, количество которых определяется выбранной схемой загрузки и движения топлива. Дополнительный периферийный сектор также соответствует отражателю. В расчетах моделируются случаи, соответствующие режиму движения топлива от периферии к центру при одновременном перемешивании в радиальном направлении. Расчеты произведены на базе пакета прикладных программ V.S.O.P (97) [3]. Предварительная процедура гомогенизации предполагает учет всех конструктивных элементов ТВС и активной зоны, а также наличия H_3BO_3 в первом контуре, определяющих материальный состав во всех элементах расчетной области.

На рис. 1 приведены схемы условного разделения активной зоны в радиальном направлении, соответствующие рассмотренным в расчетах вариантам загрузки, движения и выгрузки топлива. Варианты А и В соответствуют кампании, образованной тремя циклами выгорания (загрузка-перегрузка-перегрузка-выгрузка), вариант С – кампании из четырех циклов, вариант D – из пяти циклов. Тип топлива в каждом кольцевом секторе определяется значениями «гомогенизированных» концентраций нуклидов ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu в стартовой загрузке. Концентрации определяются соотношением

$$C_i^n = \sum_{j=1}^3 P_{ji} \cdot c_j^n, \quad (1)$$

где c_j^n – гомогенная концентрация нуклида «n» в ТВС типа «j», P_{ji} – доля ТВС типа «j» в кольцевом секторе «i». В случаях А и В активная зона в радиальном направлении разделяется на 9 секторов, в случаях С и D – на 12 и 15 секторов соответственно. Тип спектра в элементах расчетного поля определяется в ходе предварительных тестовых расчетов: 1 – жесткий спектр, 5 – мягкий спектр. В табл. 1 и 2 приведены

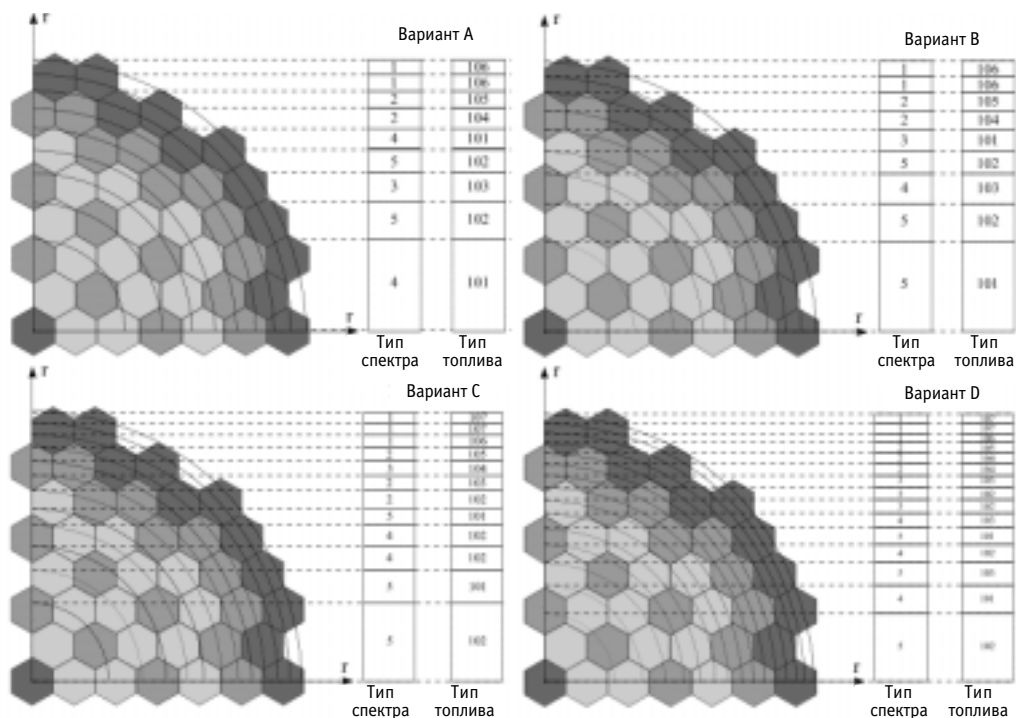


Рис. 1. Дробление активной зоны в радиальном направлении на кольцевые секторы: ■ - ТВС типа 1; ■ - ТВС типа 2; ■ - ТВС типа 3 (1/4 активной зоны)

параметры, характеризующие материальный состав активной зоны после стартовой загрузки в начале кампании.

Состав топлива в различных типах ТВС

Таблица 1

	²³² Th	²³⁵ U	²³⁸ U	²³⁹ Pu
Вариант А				
Тип 1	92.00%	3.855%	0.290%	3.855%
Тип 2	94.55%	2.986%	0.225%	2.239%
Тип 3	97.00%	2.264%	0.170%	0.556%
Варианты В, С, D				
Тип 1	90.0%	<0.1%		9.9%
Тип 2	92.0%	<0.1%		7.9%
Тип 3	94.0%	<0.1%		5.9%

СХЕМЫ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ ТОПЛИВА

На рис. 2 приведены схемы передвижения топлива, соответствующие выше рассмотренным вариантам. В вариантах А и В в ходе каждой перегрузки 51 ТВС выгружаются, 51 ТВС (свежее топливо – тип 1) загружаются и 50 ТВС перемещаются. В случае С – 38 ТВС выгружаются, 38 ТВС загружаются и 75 перемещаются. В случае D – 30 ТВС, 30 ТВС и 91 ТВС соответственно.

На рис. 3 приведено поперечное сечение активной зоны с указанием карты перемещения ТВС, соответствующей варианту D. Все перестановки (шаги 1-6), ко-

Таблица 2

Доля ТВС различных типов в кольцевых секторах

<i>Вариант А</i>							
Тип ТВС	1	2	3	Тип ТВС	1	2	3
Сектор 1	5.8%	35.2%	59.0%	Сектор 5	—	42.0%	58.0%
Сектор 2	—	20.0%	80.0%	Сектор 6	—	100%	—
Сектор 3	—	50.0%	50.0%	Сектор 7	34.0%	66.0%	—
Сектор 4	—	20.0%	80.0%	Сектор 8,9	100%	—	—
<i>Вариант В</i>							
Тип ТВС	1	2	3	Тип ТВС	1	2	3
Сектор 1	5.8%	35.2%	59.0%	Сектор 5	—	42.0%	58.0%
Сектор 2	—	20.0%	80.0%	Сектор 6	—	100%	—
Сектор 3	—	50.0%	50.0%	Сектор 7	34.0%	66.0%	—
Сектор 4	—	20.0%	80.0%	Сектор 8,9	100%	—	—
<i>Вариант С</i>							
Тип ТВС	1	2	3	Тип ТВС	1	2	3
Сектор 1	7.874%	30.709%	61.417%	Сектор 7	—	71.429%	28.517%
Сектор 2	—	23.809%	76.191%	Сектор 8	14.286%	85.714%	—
Сектор 3	—	38.095%	61.905%	Сектор 9	57.143%	42.857%	—
Сектор 4	—	42.857%	57.143%	Сектор 10	80.952%	19.048%	—
Сектор 5	—	16.667%	83.333%	Сектор 11	100%	—	—
Сектор 6	—	40.476%	59.524%	Сектор 12	100%	—	—
<i>Вариант D</i>							
Тип ТВС	1	2	3	Тип ТВС	1	2	3
Сектор 1	7.874%	30.709%	61.417%	Сектор 7	—	71.429%	28.517%
Сектор 2	—	23.809%	76.191%	Сектор 8	14.286%	85.714%	—
Сектор 3	—	38.095%	61.905%	Сектор 9	57.143%	42.857%	—
Сектор 4	—	42.857%	57.143%	Сектор 10	80.952%	19.048%	—
Сектор 5	—	16.667%	83.333%	Сектор 11	100%	—	—
Сектор 6	—	40.476%	59.524%	Сектор 12	100%	—	—

торые указаны на рисунке, производятся после каждого цикла выгорания. На первом шаге 30 ТВС выгружаются из центральной области. Затем в освобожденные каналы перемещаются ТВС из других радиальных секторов (шаг 2). Шаги 3, 4, 5 соответствуют следующим перестановкам групп ТВС. В результате после пятого шага 30 периферийных каналов освобождаются, а на шестом шаге в них загружаются ТВС со свежим топливом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты, представленные далее, получены для тепловой мощности реактора 2600 МВт при средней температуре резонансных поглотителей 750°C и средней температуре основных рассеивающих нуклидов (^1H , ^{16}O) 310°C. Эффективная доля запаздывающих нейтронов определяется соотношением:

$$\beta_{\text{эф}} = \sum_{i=1}^6 \sum_j \beta_{ij} \Delta f_i, \quad (2)$$

где β_{ij} – доля запаздывающих нейтронов группы «i», которые образуются после деления нуклида «j»; Δf_{ij} – доля делений, образованная нуклидом «j».

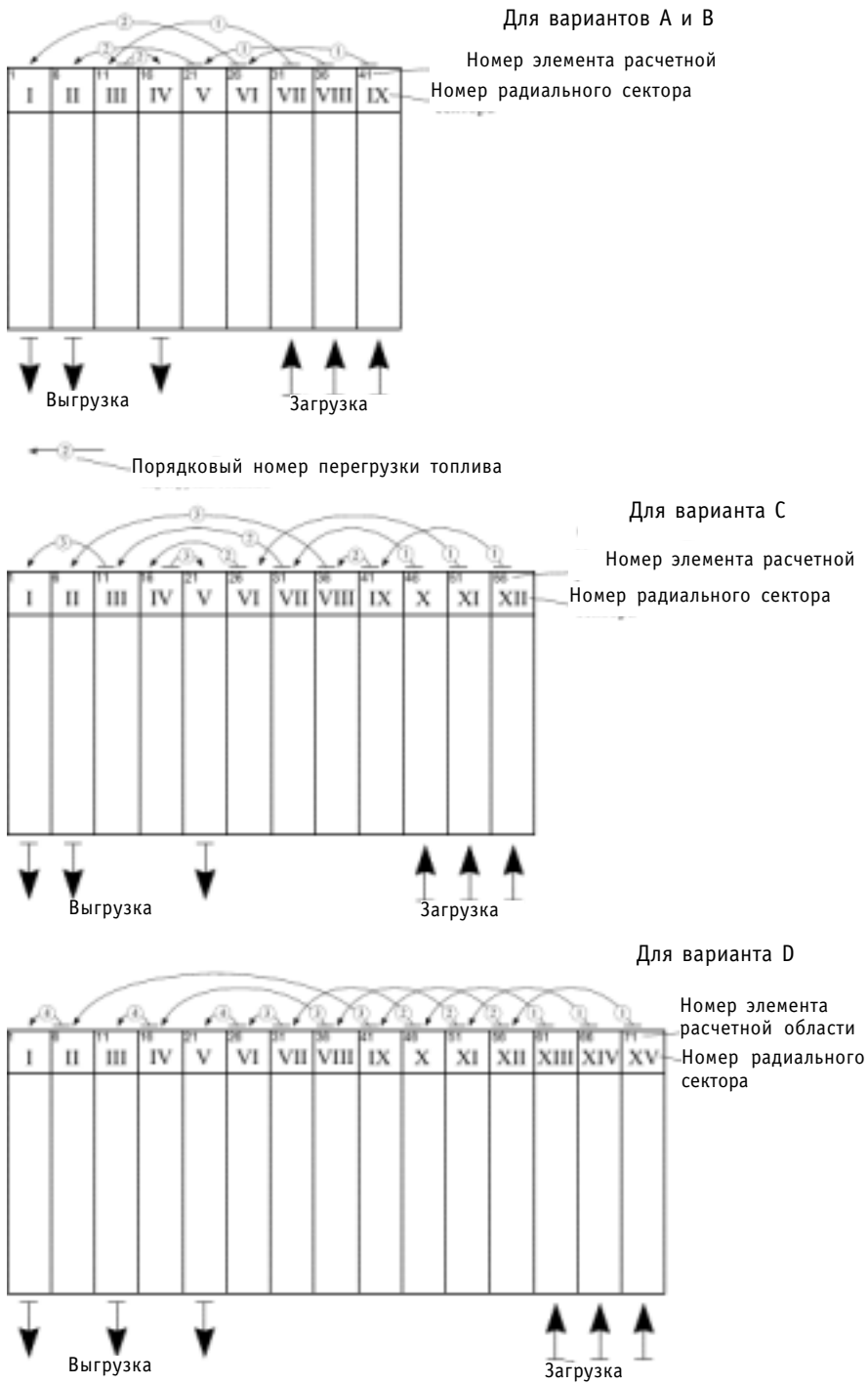


Рис. 2. Схемы движения топлива от периферии к центру при одновременном перемешивании

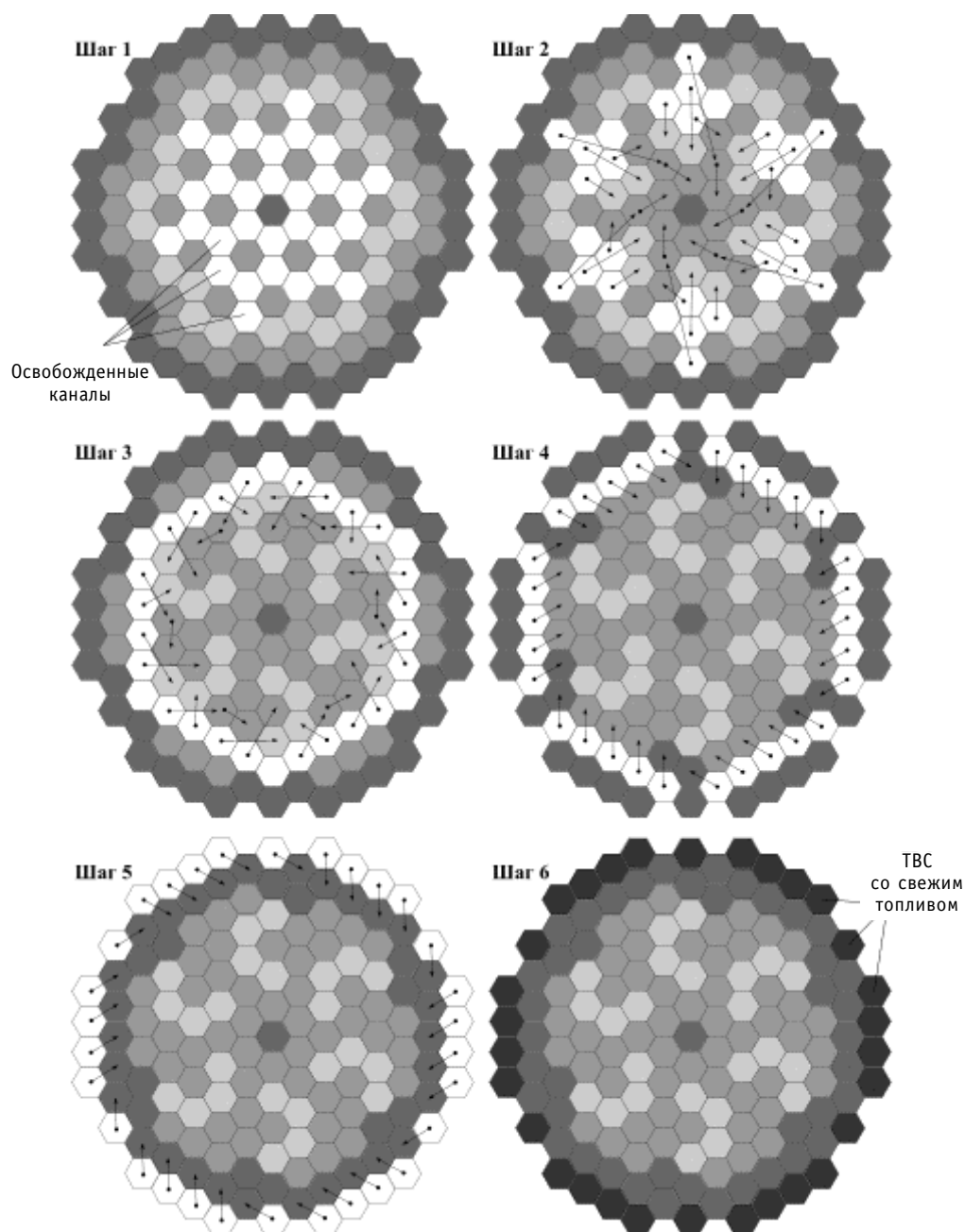


Рис. 3 Карта перемещения ТВС

ВАРИАНТ А

Таблица 3

Общие характеристики циклов выгорания

Параметр	Порядковый номер цикла выгорания		
	1	2	3
$K_{эф}$ в начале цикла	1,246	1,162	1,160
$\beta_{эф}$ в начале цикла, %	0,438	0,392	0,389
$\beta_{эф}$ в конце цикла, %	0,369	0,351	0,345
Длительность, сут	504	462	524
Выгорание, МВт.сут/т	18830	17494	19956
Коэффициент воспроизводства	0,512	0,495	0,488

Таблица 4

Массы нуклидов в активной зоне, тонн

Цикл		^{232}Th	^{233}U	^{235}U	^{239}Pu	^{241}Pu
1	Начало	81,1	0	2,56	1,82	0
	Конец	80,0	0,37	1,71	1,02	0,19
2	Начало	79,2	0,25	2,41	2,06	0,15
	Конец	78,3	0,43	1,78	1,36	0,27
3	Начало	78,0	0,28	2,55	2,38	0,21
	Конец	77,0	0,45	1,56	1,56	0,34

ВАРИАНТ В

Таблица 5

Общие характеристики циклов выгорания

Параметр	Порядковый номер цикла выгорания		
	1	2	3
$K_{эф}$ в начале цикла	1,384	1,218	1,218
$\beta_{эф}$ в начале цикла, %	0,21	0,21	0,22
$\beta_{эф}$ в конце цикла, %	0,22	0,22	0,22
Длительность, сут	1158	660	705
Выгорание, МВт.сут/т	44195	25373	27245
Коэффициент воспроизводства	0,494	0,497	0,5

Таблица 6

Массы нуклидов в активной зоне, тонн

Цикл		^{232}Th	^{233}U	^{239}Pu	^{241}Pu
1	Начало	78,9	0	6,87	0
	Конец	76,8	1,20	2,27	0,45
2	Начало	76,6	0,79	4,75	0,31
	Конец	75,5	1,30	2,41	0,51
3	Начало	75,7	0,83	5,00	0,35
	Конец	74,6	1,36	2,52	0,56

ВАРИАНТ С

Таблица 7

Общие характеристики циклов выгорания

Параметр	Порядковый номер цикла выгорания			
	1	2	3	4
$k_{эф}$ в начале цикла	1,389	1,154	1,165	1,163
$\beta_{эф}$ в начале цикла, %	0,21	0,22	0,22	0,22
$\beta_{эф}$ в конце цикла, %	0,23	0,23	0,23	0,23
Длительность, сут	1304	463	570	600
Выгорание, МВт.сут/т	48653	17940	22113	23332
Коэффициент воспроизводства	0,51	0,51	0,51	0,52

Таблица 8

Массы нуклидов

Цикл		^{232}Th	^{233}U	^{239}Pu	^{241}Pu
1	Начало	78,80	0	6,95	0
	Конец	76,43	1,29	2,05	0,47
2	Начало	76,41	0,96	4,00	0,36
	Конец	75,61	1,29	2,46	0,47
3	Начало	76,82	0,93	4,44	0,35
	Конец	74,86	1,35	2,51	0,50
4	Начало	75,35	0,95	4,57	0,38
	Конец	74,34	1,36	2,56	0,54

В данном варианте в начале 1 цикла выгорания ТВС типа 1, помещенная в периферийной области, содержит 510,9 кг ^{232}Th и 58,7 кг ^{239}Pu . После первого цикла содержание ^{232}Th в этих ТВС уменьшается до 503,7 кг, а содержание ^{239}Pu – до 34 кг. Выгорание ^{239}Pu составляет около 42%. Содержание ^{233}U и ^{241}Pu достигает значений 4,8 и 2,1 кг соответственно.

Общее выгорание ^{239}Pu в ТВС типа 1 после четырех циклов выгорания достигает 70÷75%. Содержание ^{241}Pu увеличивается в течение первых трех циклов, достигая значения 3,4 кг, а затем уменьшается до 2,8 кг к концу четвертого цикла. Таким образом, имеет смысл увеличить количество циклов с целью достижения больших выгораний ^{239}Pu и ^{241}Pu .

ВАРИАНТ D

Таблица 9

Общие характеристики циклов выгорания

Параметр	Порядковый номер цикла выгорания				
	1	2	3	4	5
$k_{эф}$ в начале цикла	1,392	1,223	1,143	1,136	1,138
$\beta_{эф}$ в начале цикла, %	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22
$\beta_{эф}$ в конце цикла, %	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22
Длительность, сут	1288	373	464	449	462
Выгорание, МВт.сут/т	47994	14463	18005	17515	18082
Коэффициент воспроизводства	0,51	0,51	0,50	0,50	0,50

Таблица 10

Массы нуклидов в активной зоне, тонн

Цикл		²³² Th	²³³ U	²³⁹ Pu	²⁴¹ Pu
1	Начало	79,01	0	6,86	0
	Конец	76,72	1,26	2,01	0,46
2	Начало	76,69	1,00	3,57	0,37
	Конец	76,06	1,25	2,34	0,46
3	Начало	76,08	0,98	3,95	0,37
	Конец	75,32	1,32	2,36	0,50
4	Начало	75,43	1,03	4,02	0,41
	Конец	74,69	1,35	2,49	0,53
5	Начало	75,17	1,03	4,08	0,42
	Конец	74,41	1,35	2,51	0,55

В данном варианте в течение 1 цикла выгорания свежее топливо размещается в 15, 14 и 13 радиальных секторах. Затем топливо из 14 сектора перемещается в 11 (2 цикл), затем в 8 (3 цикл), затем в 4 (4 цикл) и 3 сектор (5 цикл выгорания). Указанный путь соответствует карте перемещения ТВС, представленной на рис. 3.

В результате концентрации основных нуклидов в данных ТВС изменяются в течение кампании, как показано на рис. 4а. Концентрации ²³³U, ²³⁵U и ²⁴¹Pu вначале равны нулю, поэтому для графического представления их значения были приняты равными единице после 1 цикла выгорания.

После первого цикла, часть ТВС, которые в начале содержали минимальное количество ²³⁹Pu и были размещены в центральной области, выгружаются. Для них выгорание ²³⁹Pu достигает значения 82,9%.

Масса ²³⁹Pu в каждой ТВС уменьшается от 40,15 до 6,87 кг. Массы ²⁴⁰Pu, ²⁴²Pu, ²⁴¹Am и ²⁴³Am в данных ТВС в конце 1 цикла выгорания достигают значений 4,93, 0,74, 0,17 и 0,17 кг соответственно. Такие ТВС могут быть использованы на 3 цикле выгорания для замещения ТВС типа 3, которые не выгружались после 1 цикла и использовались в течении 2 цикла.

На рис. 4.б,в,г показаны изменения масс ²³²Th и делящихся нуклидов в ТВС, которые первоначально были размещены в периферийной области. В данном случае длительность кампании составляет около 8,3 года и состоит из 5 циклов выгорания. Выгорание ²³⁹Pu в топливе, которое в начале кампании размещалось в 14 кольцевом секторе, достигает значения 89,4%. Масса ²⁴¹Pu в таких ТВС к концу кампании не превышает значения 4 кг. ²⁴⁰Pu – 6,6 кг; ²⁴²Pu – 1,3 кг; ²⁴¹Am – 0,6 кг; ²⁴³Am – 0,4 кг; ²⁴²Cm – 0,05 кг; ²⁴⁴Cm – 0,18 кг и ²³³Pa – 24 кг.

5 цикл выгорания первой кампании является равновесным. В следующих кампаниях все топливо, загружаемое в активную зону, будет эксплуатироваться в течение 5 циклов. Его нуклидный состав в конце кампании будет таким, как показано выше.

В течение 1 кампании используется топливо, стартовый состав которого изначально различен (ТВС типа 1, типа 2 и 3). Значительная часть выгружаемых ТВС стоит в активной зоне менее 5 циклов. Массы ²³⁹Pu, ²³³U и трансплутониевых нуклидов в расчете на одну ТВС для них приведены в табл. 11.

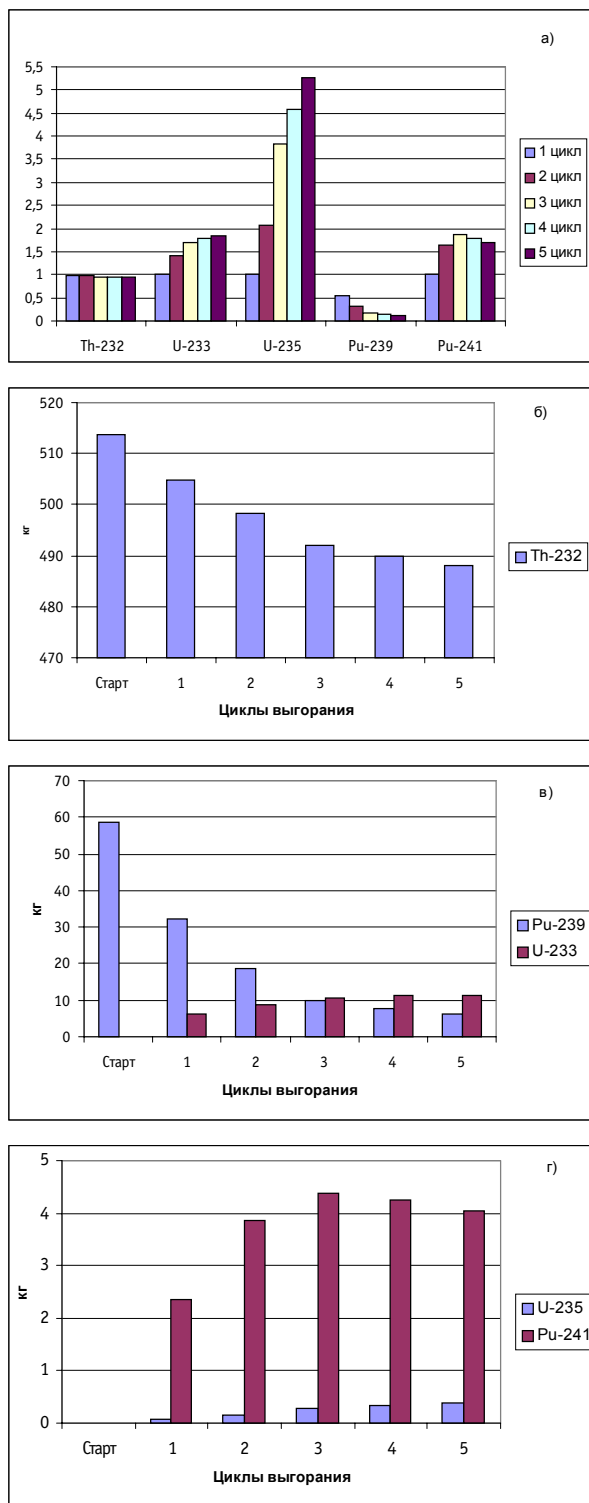


Рис 4. а) отношения концентраций после циклов выгорания к стартовому значению; б,в,г) массы основных нуклидов на одну ТВС

ВЫВОДЫ

Анализ результатов моделирования параметров топливного цикла для реактора ВВЭР-1000 с загрузкой торий-уран-плутониевых оксидных топливных композиций позволяет сформулировать следующие выводы.

1. Проблема вовлечения оружейного плутония в ядерный топливный цикл может быть успешно решена путем его включения в состав топливных композиций на базе тория. Физические особенности реакторов типа ВВЭР в совокупности с сильным доплер-эффектом, обусловленным резонансным поглотителем торием, обеспечивают требуемые сегодня границы безопасности при использовании топлива $(m\%^{232}\text{Th}, n\%^{235}\text{U}, k\%^{239}\text{Pu})\text{O}_2$, где m, n, k – процентное содержание нуклидов в оксидном топливе.

2. Для стандартной конструкции ВВЭР-1000 водно-топливное отношение составляет 1,8. В случае стандартного UO_2 -топлива максимум k_∞ достигается при значении отношения около 2,5. С учетом существования предела линейной тепловой нагрузки для твэлов значение 1,8 выбрано как оптимальное. В случае $(m\%^{232}\text{Th}, n\%^{235}\text{U}, k\%^{239}\text{Pu})\text{O}_2$ -топлива, состав которого соответствует рассмотренным вариантам В, С и D, максимум k_∞ достигается при водно-топливном отношении 10,5. Этот факт обеспечивает возможность поиска и внедрения более совершенных конструкций твэлов и ТВС, а также реализации концепции спектрального регули-

Таблица 11

Содержание нуклидов в ТВС

Количество циклов выгорания	1 + 2 циклы	1+2+3 циклы	1+2+3+4 циклы
Масса ²³⁹ Pu, кг	4.15÷5.70	2.55÷4.43	3.42÷8.12
Масса ²³³ U, кг	9.57÷9.73	9.90÷10.37	10.90÷11.42
Масса ²⁴⁰ Pu, кг	4.13÷4.30	3.65÷4.30	4.66÷7.00
Масса ²⁴¹ Pu, кг	2.90÷3.00	2.72÷2.87	3.45÷93.3
Выгорание ²³⁹ Pu, кг	85.5÷89.05	88.3÷93.65	85.3÷93.3

Таблица 12

Характеристики циклов выгорания

Загрузка (подпитка) 30 ТВС	Цикл; выгорание, ГВт-сут/т	Выгрузка; выгорание, ГВт-сут/т	Состав выгрузки	Дальнейшее использование ТВС
79 т ²³² Th 6.86 т ²³⁹ Pu	Первый 48	30 ТВС 48	15.46 т ²³² Th 0.255 т ²³³ U 0.19 т ²³⁹ Pu 0.093 т ²⁴¹ Pu	Хранение, переработка
15.42 т ²³² Th 1.75 т ²³⁹ Pu	Второй 14.5	30 ТВС 62.5	15.40 т ²³² Th 0.288 т ²³³ U 0.14 т ²³⁹ Pu 0.089 т ²⁴¹ Pu	Хранение, переработка
15.42 т ²³² Th 1.75 т ²³⁹ Pu	Третий 18	30 ТВС 80.5	15.30 т ²³² Th 0.300 т ²³³ U 0.096 т ²³⁹ Pu 0.084 т ²⁴¹ Pu	Хранение, переработка
15.42 т ²³² Th 1.75 т ²³⁹ Pu	Четвертый 17.5	30 ТВС 98	15.25 т ²³² Th 0.334 т ²³³ U 0.154 т ²³⁹ Pu 0.108 т ²⁴¹ Pu	Хранение, переработка
15.42 т ²³² Th 1.75 т ²³⁹ Pu	Пятый (равновесный) 18	31 ТВС 116	14.64 т ²³² Th 0.345 т ²³³ U 0.105 т ²³⁵ U 0.180 т ²³⁹ Pu 0.122 т ²⁴¹ Pu	Хранение, переработка
		30 ТВС 68	Не выгружаются	Перестановка
		30 ТВС 53.5	Не выгружаются	Перестановка
		30 ТВС 35.5	Не выгружаются	Перестановка
		30 ТВС 18	Не выгружаются	Перестановка

рования параметров активной зоны.

3. Использование ($m\%^{232}\text{Th}$, $n\%^{235}\text{U}$, $k\%^{239}\text{Pu}$) O_2 -топлива эффективно при переходе от кампании, образованной 3 циклами выгорания, к кампаниям, состоящим из 4 и 5 циклов. В этом случае обеспечиваются высокие значения выгорания плутония при невысоких значениях коэффициента воспроизводства. Увеличение количества циклов выгорания потребует разработки и привлечения новых материалов, выдерживающих флюенс около 10^{22} см⁻².

4. Среднее значение выгорания для ТВС, которые эксплуатировались в течение 5 циклов выгорания, достигает значения 94,4 ГВт-сут/т (вариант D). Для ТВС с минимальным содержанием ^{239}Pu , которые выгружаются после 1 цикла выгорания в 1 кампанию, оно составляет 52,1 ГВт-сут/т.

5. Интегральные характеристики 1 кампании для ВВЭР-1000 при организации на его базе топливного цикла по варианту D (табл. 12) показывают, что в течение 40 лет может быть, утилизировано около 44 т плутония оружейной кондиции.

Показатели равновесного цикла выгорания

- загрузка ^{232}Th – 12180 кг/ГВт (эл.);
- загрузка Pu (все нуклиды) – 1390 кг/ГВт (эл.);
- выгрузка Pu (все нуклиды) – 357.2 кг/ГВт (эл.);
- сжигание Pu (все нуклиды) – 1032.8 кг/ГВт (эл.);
- выгорание Pu (все нуклиды) – 0.743;
- наработка ^{233}U – 272.5 кг/ГВт (эл.);
- средняя глубина выгорания – 94.4 МВт-сут/кг.

В заключение авторы выражают глубокую признательность проректору Томского политехнического университета профессору А.А. Дульзону и директору Института исследований безопасности и реакторных технологий (ISR-2, Forschungszentrum Juelich, Germany) профессору К. Кугелеру за организацию возможности сотрудничества между российскими и немецкими учеными в области исследований перспективных ядерных топливных циклов, за внимание к работе и полезные обсуждения ее результатов.

Литература

1. Пономарев-Степной Н.Н., Лунин Г.Л., Морозов А.Г., Кузнецов В.В., Кевролев В.В., Кузнецов В.Ф. Легководный ториевый реактор // Атомная энергия. - 1998. - Т. 85. - №4. - с. 263.
2. Мурогов В.М., Дубинин А.А., Зяблицев Д.Н., Илюнин В.Г. и др. Уранториевый топливный цикл: его преимущества и перспектива развития ядерной энергетики на его основе: Препринт ГНЦ РФ ФЭИ – 2448. Обнинск, 1995. – 44 с.
3. Ruetten H.-J., Haas K.A., Brockmann H., Ohlig U., Sherer W. V.S.O.P. (97) Computer Code System for Reactor Physics and Fuel Cycle Simulation. Input Manual and Comments. – Forschungszentrum Juelich, April 1998, Jul-3522.

Поступила в редакцию 22.06.2000

heating of fuel rod simulator, made on special heat-physical test facility is carried out. The results of modelling were used for examination of calculation technique of the heat-exchange in fuel rod subject to core and cladding melting.

УДК 51-72:621.039.73

Efficiency of Fission Products Transmutation \Yu.A. Kazansky, D.A.Klinov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy.Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 9 pages, 2 illustrations, 2 tables.-References, 4 titles.

The transmutation efficiency of dangerous fission products has been considered. Mathematical model and calculation results are presented. It is shown that there is not profit in radioactivity level on the Earth from transmutation if Nuclear Power under operating.

УДК 51-72:539.172.12

Application of NRT-formula for Calculation of Displacement Cross-sections for Materials Irradiated by Nucleons of Intermediate and High Energy \A.Yu. Konobeyev, Yu.V. Konobeev, Yu.A. Korovin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy.Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 6 pages, 5 illustrations.-References, 9 titles.

The behavior of cascade function for calculation of radiation damage in materials has been investigated at high energy of incident ions. The calculation of displacement cross-sections has been carried out for the number of materials with atomic number $Z=13-28$, irradiated by protons with the energy up to 25 GeV. It is shown that the displacement cross-section can be obtained within 5-20% error with the help of NRT-formula.

УДК 51-72:621.039.516.4

Results of the Simulation of Parameters of the Fuel Cycle for the WWER-1000 Reactor with $(m\%Th^{232}, n\%U^{235}, k\%Pu^{239})O_2$ Fuel Compositions \I.V. Shamanin, A.A. Ukhov, H.-J.Ruetten, K.Haas, W.Sherer; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy.Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 12 pages, 4 illustrations, 12 tables.-References, 3 titles.

General parameters of the WWER Reactor using $(m\%Th^{232}, n\%U^{235}, k\%Pu^{239})O_2$ fuel are analyzed. In all considered variations it was assumed that the construction of the active core and the fuel element assemblies are standard as for WWER-1000 reactor. Operation periods of 3, 4 and 5 burnup cycles were examined.

The aim of this study was to investigate the ability of the WWER-1000 as a potential nuclear power installation for the utilization of weapon grade plutonium in thorium-based fuel.

УДК 621.311:621.039.004.7

Decommissioning of the First NPP \G.S.Kotikov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy.Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 5 pages, 1 tables.-References, 3 titles.

The materials about life cycle of the First NPP (Obninsk), with channel reactor are given in this paper. Now station exhaust the resource and in the near future its decommissioning will be made. On the basis of the decision of Government in the First NPP building should the Russian museum of atomic engineering organized.

УДК 621.039.83:539.1:047

Short-lived Radionuclides in Experimental Nuclear Medicine and Biological Studies \G.A. Petrova, V.M. Petriev, V.G. Skvortsov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy.Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 6 pages, 3 illustrations, 2 tables.-References, 6 titles.