

УДК 621.039

В.Г. ПЕТРОСЯН, Т.Л. САФАРЯН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОРИЙСОДЕРЖАЩЕГО ТОПЛИВА В ВОДО-ВОДЯНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛУТОНИЯ И ВЫСОКООБОГАЩЕННОГО УРАНА

Рассматриваются различные варианты вовлечения тория в ядерную энергетику на основе реакторов водо-водяного типа и использования оружейных делящихся материалов. Расчетные исследования ориентируются на применение открытого топливного цикла с максимальным использованием энергетического потенциала нарабатываемого ^{233}U при глубоком выгорании топлива. Анализируются топливные загрузки и схемы перестановок топлива в активной зоне неизменной конструкции, обеспечивающие повышение эффективности и внутренней самозащитности.

Ключевые слова: ядерный реактор, топливо, цикл, обогащение, выгорание, флюенс, топливная кассета.

Введение. Принципиальные мотивы, преимущества и аргументы в пользу постепенного вовлечения в ядерную энергетику уран-ториевого топливного цикла подробно рассмотрены в [1], в котором изложены результаты экспериментов в этом направлении за рубежом. В последние годы появились новые аспекты проблемы вовлечения тория в ядерную энергетику, в частности, поиск путей использования плутония оружейной кондиции и высокообогащенного урана в ядерно-энергетических установках, использующих топливо на основе тория. Такая возможность может быть реализована в реакторах типа ВВЭР с ториевой загрузкой (ВВЭР-Т). Концепция такого реактора изложена в [2] и предполагает изменение базовых конструктивных решений реактора типа ВВЭР-1000. В этой работе рассматривается замкнутый топливный цикл, требующий внедрения технологии переработки ториевого топлива.

Несомненный интерес представляет вариант, не требующий изменений конструкции серийных реакторов последнего поколения при переходе на торийсодержащее топливо и обеспечивающий возможность организации открытого ядерного топливного цикла при реализации длинных и сверхдлинных кампаний [3, 4]. В этих работах определены ключевые критерии возможности организации открытого цикла на базе реакторов типа ВВЭР-1000 с использованием имеющихся природных запасов тория. Современный этап развития мировой ядерной энергетики потребует больших затрат природного урана, доступные запасы которого существенно меньше, чем ториевые. В России имеется необходимый начальный запас ядерно-чистого тория, и, кроме того, торий попутно добывается при разработке ряда месторождений уранового сырья. Именно поэтому на первом этапе вполне оправданно рассматривать вариант открытого топливного цикла. Кроме того, основным типом реакторов, интенсивно строящихся в настоящее время, являются реакторы типа ВВЭР и PWR, которые будут работать не менее 60-ти лет. Нарботка плутония в

настоящее время происходит в основном в этих реакторах. Накопленные запасы плутония стимулируют исследования по его повторному использованию в реакторах этого типа. Это еще один аргумент в пользу рассмотрения возможности применения ториевого топлива в реакторах существующего типа.

Обоснование. Как было сказано, на начальном этапе внедрения ториевого топлива вполне можно ограничиться рассмотрением открытого топливного цикла с максимальным использованием энергетического потенциала ^{233}U для увеличения выгорания топлива. Известно, что равновесная концентрация ^{233}U в ториевом цикле достигается в течение более длительного промежутка времени и при более высоком выгорании топлива (~ 8 лет, $\text{RT} > 80 \text{ МВт-сут/кг т.м.}$), чем равновесная концентрация плутония в урановом топливном цикле. Это связано с более высоким сечением поглощения тепловых нейтронов торием по отношению к урану и существенно меньшим сечением поглощения тепловых нейтронов ^{233}U в сравнении с ^{239}Pu . Однако при этом равновесная концентрация ^{233}U в тории будет выше, чем равновесная концентрация ^{239}Pu в урановом топливе. Поэтому ториевый цикл требует более высокого начального обогащения топлива по делящимся нуклидам для достижения существенной доли удельной энергосвязки за счет вторичного горючего. Поскольку, как ожидается, внедрение ториевых загрузок - дело отдаленного будущего, то можно предположить, что к тому времени будут разработаны тепловыделяющие элементы, выдерживающие глубокое выгорание топлива.

Расчетный инструмент и геометрия модели. В данной работе рассматривается торий-плутониевый цикл с высоким выгоранием топлива. Расчеты анализа эффективности торий-плутониевого топливного цикла проводились с использованием программы VSOP, в которой реальная гексагональная структура активной зоны и перестановки тепловыделяющих сборок (ТВС) в процессе перегрузок моделируются цилиндрической геометрией активной зоны с зонными перестановками топлива (рис. 1 и 2).

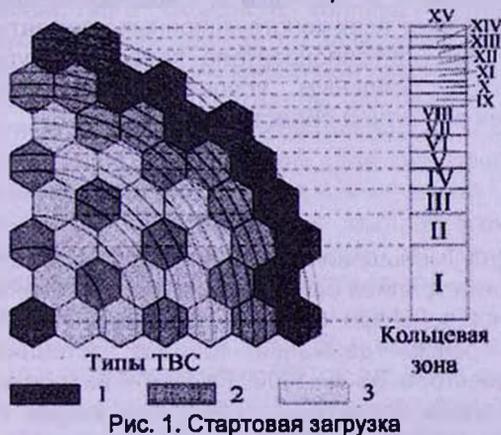


Рис. 1. Стартовая загрузка

Подготовка гомогенизированных констант для различных зон реактора осуществляется в мультигрупповом приближении для гомогенной среды, в качестве которой выступает одна тепловыделяющая сборка. Для получения групповых констант в резонансной области энергий используется теорема эквивалентности. Далее производится свертка мультигрупповой системы констант в малогрупповую (в частности шестигрупповую), с помощью которой производится расчет пространственно-энергетического

распределения нейтронов и изменения нуклидного состава топлива в процессе выгорания и при перестановках топлива. Вопросы обоснования применения программы VSOP для анализа выгорания топлива в реакторах типа ВВЭР представлены в [3].

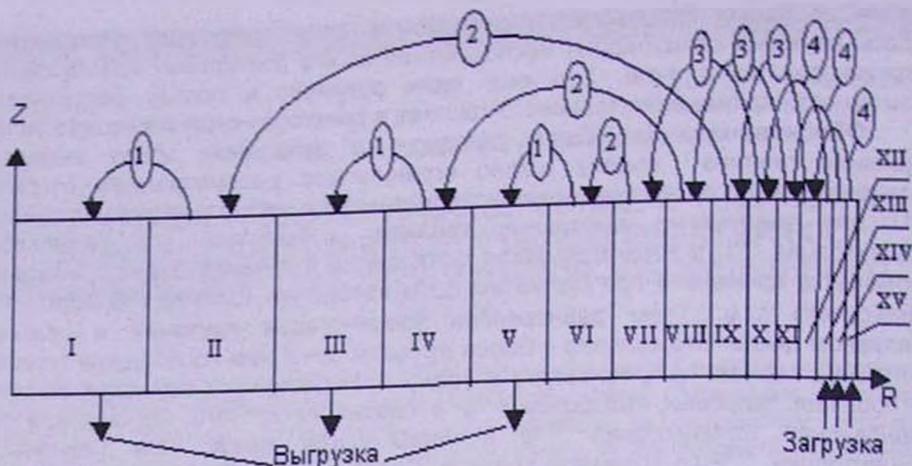


Рис. 2. Схема перемещений с учетом перемешивания (Z – аксиальное направление)

Поскольку в реальном случае геометрические характеристики ТВС неизменны, то в ходе расчетных процедур необходимо учитывать, что в одном и том же радиальном секторе находятся ТВС с различным нуклидным составом. "Гомогенизированная" концентрация нуклида "п" в радиальном секторе "Г" определяется соотношением

$$C_i^n = \sum_{k=1}^3 P_{ki} c_k^n,$$

где P_{ki} – содержание ТВС типа k в i -ом радиальном секторе; c_k^n – "гомогенизированная" концентрация нуклида n в ТВС типа k . Предварительная процедура "гомогенизации" предполагает учет всех конструктивных элементов ТВС и активной зоны, а также наличие H_3BO_3 в теплоносителе первого контура. Это позволяет достаточно близко к реальным условиям определить материальный состав во всех элементах расчетной области.

Расчетные модели

Торий-плутониевая загрузка. Для уменьшения степени неравномерности энерговыделения при глубоком выгорании топлива был выбран режим движения топлива "от периферии к центру активной зоны при частичном перемешивании в азимутальном направлении". Такой режим движения топлива оставляет неизменной работоспособность СУЗ реактора ВВЭР-1000. Глубокое выгорание топлива достигается применением топлива подпитки с 10% обогащением по плутонию оружейного качества и использованием схем частичных перегрузок с 4 и 5 циклами перестановок ТВС в активной зоне. Для моделирования переходного процесса стартовая загрузка содержала топливо с обогащением в 6, 8 и 10%. Для достижения установившегося режима перегрузок требуется пять

циклов перегрузки, при этом достигаются следующие показатели эффективности топливного цикла:

среднее выгорание топлива – 94,4 МВт-сут/кг тяжелого металла (*m.m.*);
длина кампании ~ 8,3 года;

доля энерговыработки, реализуемая за счет сжигания, - ^{233}U ~ 25 %;

наработка ^{233}U – 329,45 кГВт(электрических(эл.)) (2,1%);

относительная глубина выгорания Pu (все нуклиды) – 0,743;

значение флюенса повреждающих нейтронов - $9,18 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$.

Интегральные характеристики показывают, что в течение 8 лет может быть утилизировано около 5500 кг плутония оружейной кондиции. На рис. 3 приведены массы основных актиноидов для ТВС топлива подпитки в течение кампании.

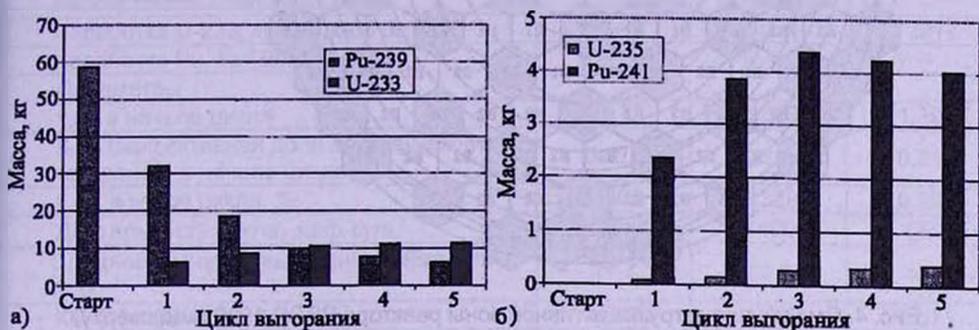


Рис. 3. Массы основных актиноидов в расчете на одну ТВС (Pu^{241} в основном выжигается)

Торий-уран-плутониевая загрузка (смешанная). При замещении стандартного оксидного топлива торий-плутониевым возникает проблема, обусловленная дефицитом запаздывающих нейтронов. В стационарном режиме они не играют существенной роли. Однако при рассмотрении переходных процессов это обстоятельство имеет важное значение. Полная загрузка активной зоны торий-плутониевым оксидным топливом влечет за собой уменьшение эффективной доли запаздывающих нейтронов практически в три раза по сравнению с урановой загрузкой. Для повышения доли запаздывающих нейтронов в активной зоне предлагается смешанная загрузка, состоящая из топлива двух сортов. Во-первых, это топливо с торий-плутониевой загрузкой, а во-вторых - торий с высокообогащенным ураном. Глубокое выгорание топлива достигается применением топлива подпитки с обогащением по плутонию оружейного качества в 12,9% и использованием схем частичных перегрузок с 4 циклами перестановок ТВС в активной зоне. Для моделирования переходного процесса смешанная стартовая загрузка содержала топливо с обогащением по плутонию 6,9%(Z), 8,9%(Z1), 10,9%(Z2) и 12,9%(Z3), а по ^{235}U – 3,8%(B), 4,8%(B1) и 6,8%(B2) (рис.4).

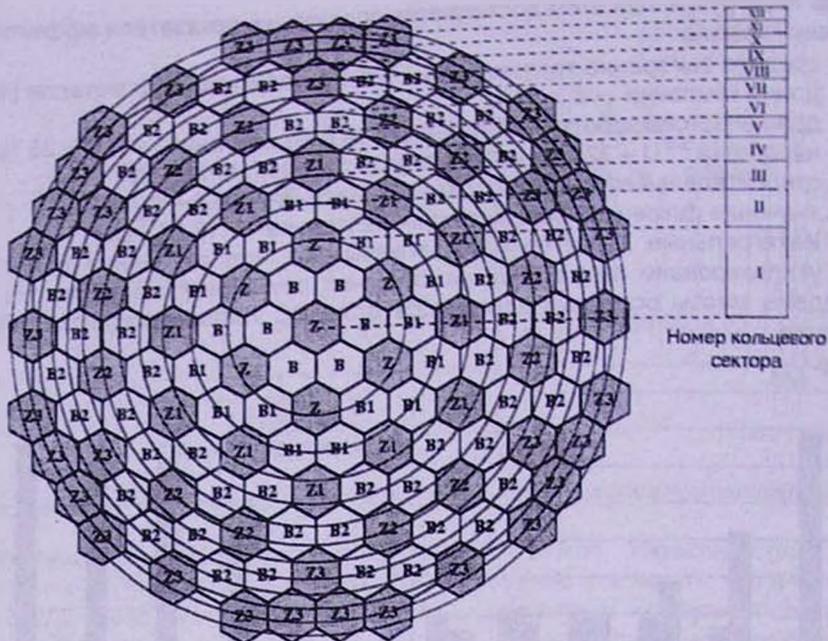


Рис. 4. Смешанная загрузка активной зоны реактора ВВЭР-1000 (вид сверху)

Бланкетные ТВС, содержащие топливную композицию $\text{ThO}_2\text{-}^{235}\text{UO}_2$, загружаются в активную зону только в начале кампании. Для достижения установившегося режима перегрузок требуется четыре цикла перегрузки, при этом достигаются следующие показатели эффективности топливного цикла:

среднее выгорание топлива – $125,9 \text{ МВт}\cdot\text{сут}/\text{кг т.м}$;

длина кампании ~ 9 лет;

доля энерговыработки, реализуемая за счет сжигания, - ^{233}U ~ 23 %;

наработка ^{233}U – $446,1 \text{ кгГВт(эл.)}$ (2,3%);

относительная глубина выгорания Pu (все нуклиды) – 0,81;

значение флюенса повреждающих нейтронов - $9,45 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$.

Смешанная ториевая загрузка позволяет при маневрировании мощностью реактора в начальных циклах избежать сложностей, обусловленных дефицитом запаздывающих нейтронов. Смешанная (^{232}Th , ^{235}U , ^{239}Pu) O_2 топливная загрузка обеспечивает преимущество перед стандартной схемой на базе UO_2 топлива и схемой на базе $(\text{Th}, \text{Pu})\text{O}_2$ топлива. Оно особенно проявляется при сравнении балансов масс нуклидов с таковыми для стандартной урановой и торий-плутониевой загрузок для первых циклов (см. табл.). Кроме преимуществ, обусловленных уникальным сочетанием параметров, которые определяют экономические показатели использования топлива и степень ядерной и экологической безопасности, смешанная загрузка обеспечивает наиболее жесткий спектр нейтронов в активной зоне. Смещение максимума спектра в эпитепловую область обеспечивает уменьшение чувствительности ядерной

энергетической установки к процессам, вызывающим отравление продуктами деления неравновесной и равновесной концентраций.

Таблица

Основные параметры первых циклов выгорания

Балансы масс основных нуклидов во всех периферийных ТВС	Схема загрузки		
	стандартная	смешанная	торий-плутониевая
Загрузка Th-232, <i>кг/Вт (эл.)</i>	—	14765,1	17326,2
Загрузка U-238, <i>кг/Вт (эл.)</i>	23897,4	16,2	—
Загрузка Pu, <i>кг/Вт (эл.)</i>	—	1821	1931,1
Расход Pu / Загрузка Pu	—	0,954	0,739
Загрузка U-235, <i>кг/Вт (эл.)</i>	1064,0	222	—
Расход U-235 / Загрузка U-235	0,632	0,0405	—
Наработка U-233, <i>кг/Вт(эл.)</i>	—	231,9	291
Наработка Pu, <i>кг/Вт(эл.)</i>	186,0	—	—
Параметры			
$k_{эфф}$ в начале цикла	1,173	1,356	1,392
$\beta_{эфф}$ (эффективная доля запаздывающих нейтронов) в начале цикла, %	0,672	0,346	0,210
$\beta_{эфф}$ в конце цикла, %	0,462	0,329	0,226
Длительность цикла, <i>эфф сут.</i>	298,5	1400	1250
Среднее значение выгорания, <i>МВт-сут/кг т.м.</i>	11,7	52,2	45,5
Коэффициент воспроизводства	0,697	0,525	0,571
ТКР (температурный коэффициент реактивности, Допплер-эффект), $(^{\circ}\text{C})^{-1}$	$-2,15 \cdot 10^{-5}$	$-3,2 \cdot 10^{-5}$	$-3,2 \cdot 10^{-5}$
Стационарное отравление Xe ¹³⁵	$-3,26 \cdot 10^{-2}$	$-1,6 \cdot 10^{-2}$	$-1,8 \cdot 10^{-2}$
Доля энерговыработки по нуклидам, %	U 233	—	21,7
	U 235	73,6	28
	Pu 239	23,7	41,6
	Pu 241	2,7	8,7
			11,1

Заключение. Результаты расчетного анализа показывают, что применение ториевого топлива с плутонием оружейного качества при ориентации на глубокое выгорание топлива (≈ 90 *МВт-сут/кг т.м.*) позволяет накопить в отработанном топливе заметное количество ²³³U ($\approx 2,1\%$), внести существенный вклад в удельную энерговыработку топлива за счет сжигания ²³³U и добиться глубокого выжигания оружейного плутония ($\approx 70\%$). Однако требуют внимательного рассмотрения вопросы компенсации избыточной реактивности и оценка плотностного коэффициента реактивности в реакторе с торий-плутониевой загрузкой. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что при модификации регламентов управления реактором в существующих реакторах ВВЭР-1000 имеется принципиальная возможность использования торий-уран-плутониевой и безурановой торий-плутониевой загрузок в полномасштабном варианте. Но для его практического применения требуются дополнительные расчетные исследования по состоянию тепловыделяющих элементов при глубоких выгораниях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муроков В.М., Троянов М.Ф., Шмелев А.М. Использование тория в ядерных реакторах. —М.: Энергоатомиздат, 1983. —96 с.
2. Galperin A., Reichert P., Radkowsky A. Thorium fuel cycle for light water reactors – reducing proliferation potential of nuclear power fuel cycle // Science & Global Security. – 1997. –V. 6.–P. 267-292
3. The use of (Th,U,Pu)O₂ Fuel in a water-water energy reactor (WWER-1000): Physics and fuel cycle simulation by means of the V.S.O.P. (97) computer code / I.V. Shamanin, A.A. Ukhov, H.J. Rutten and etc. // Forschungszentrum Jülich. - FZJ – ISR – IB –1/1999. —40 p.
4. Результаты моделирования параметров топливного цикла для водо-водяного энергетического реактора / И.В. Шаманин, А.А. Ухов, Г.И. Рюттен и др. // Известия вузов. Сер. Ядерная энергетика. —2000. —№ 4. —С. 53–64.

ЗАО "Научно-исследовательский институт энергетики". Материал поступил в редакцию 29.06.2009.

Վ.Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Տ.Լ. ՍԱՖԱՐՅԱՆ

ԹՐՈՐԻՈՄ ՊԵՐՈՒՆԱԿՈՂ ՎԱՌԵԼԻՔԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՈՒՄԸ ԶՐԱ-ԶՐԱՅԻՆ ԷՆԵՐԳԵՏԻԿ ՌԵԱԿՏՈՐՆԵՐՈՒՄ՝ ՊԼՈՒՏՈՆԻՈՒՄԻ ԵՎ ՀԱՐՍԱԳՎԱԾ ՈՒՐԱՆԻ ԿԻՐԱՆՄԱՄԸ

Դիտարկվում են միջուկային էներգետիկայում՝ ջրա-ջրային տեսակի ռեակտորներում թրորումի օգտագործման տարբեր եղանակները՝ ռազմական տրոհվող նյութերի կիրառմամբ: Հաշվարկային ուսումնասիրություններն ուղղված են բաց վառելիքային ցիկլի կիրառմանը՝ վառելիքի խորը այրման ընթացքում առաջացող ²³³U-ի էներգետիկ պոտենցիալի առավելագույն օգտագործմամբ: Վերլուծվում են վառելիքի բեռնավորման և անփոփոխ կոնստրուկցիայով ակտիվ զոտում վառելիքի տեղափոխման սխեմաները, որոնք ապահովում են շահագործման արդյունավետության բարձրացումը և ներքին ինքնապաշտպանվածությունը: *Ստանդային բառեր.* միջուկային ռեակտոր, վառելիք, ցիկլ, հարստացում, այրվածություն, ֆլուենս, ջերմանջատիչ էլեմենտների համակարգ:

V.G. PETROSYAN, T.L. SAFARYAN

THORIUM OXIDE FUEL USE IN WWER TYPE NUCLEAR REACTORS WITH UTILIZATION OF ENRICHED URANIUM AND PLUTONIUM

Different variants of thorium inclusion in water-cooled and water-moderated nuclear reactors (WWER) through utilization of weapon grade fissile materials are examined. The research is oriented for utilization of open fuel cycle with maximal use of energy potential, gained by ²³³U through high fuel burn-up. Fuel load and fuel transposition schemes at the active core with constant constructions providing enhancement of efficiency and internal self-protection are analyzed.

Keywords: nuclear reactor, fuel, cycle, enrichment, burn-up, fluency, fuel assembly.