

О РАВНОВЕСНОМ ИЗОТОПНОМ СОСТАВЕ ТОРИЙ-УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

В. Е. Маршалкин, В. М. Повышев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Выполнены оценки равновесных значений изотопного состава и времен выхода в равновесие при рециклировании торий-уран-плутониевого оксидного топлива в реакторах типа ВВЭР с использованием тяжелой воды и ее разбавления легкой водой. Показано, что и в равновесном режиме реактор может работать с самовоспроизводством активных изотопов.

Ключевые слова: кинетика реакторов, водо-водяные реакторы со смесью тяжелой и легкой воды, торий-уран-плутониевое оксидное ядерное топливо, расширенное воспроизводство, равновесный изотопный состав.

ON EQUILIBRIUM ISOTOP COMPOSITION OF THORIUM-URANIUM-PLUTONIUM FUEL CYCLE / V. Ye. MARSHALKIN, V. M. POVYSHEV // The equilibrium isotope ratios and the equilibrium onset times during the recycling process of the thorium-uranium-plutonium oxide fuel in the VVER-type reactors using heavy water diluted with light water have been estimated. It has been shown that in the equilibrium state such reactor can also operate with self-reproduction of active isotopes.

Key words: kinetics of reactors, water-cooled and water-moderated reactors with mixture of heavy and light water, thorium-uranium-plutonium oxide nuclear fuel, expanded reproduction (breeding), equilibrium isotope ratio.

Введение

В статьях [1–3] показана возможность решения проблем современной ядерной энергетики путем ее перевода на замкнутый торий-уран-плутониевый топливный цикл. При этом обеспечивается самовоспроизводство топлива, что повышает на два порядка топливный ресурс, повышается безопасность работы реактора, упрощается решение проблемы обращения с высокоактивными отходами, появляется технологический барьер на пути несанкционированного распространения изотопа ^{233}U . Использование высокообогащенного урана, энергетического плутония и излишков оружейного плутония для перевода [4] ядерной энергетики на замкнутый торий-уран-плутониевый топливный цикл является наиболее разумным и эффективным их использованием.

Основное отличие торий-уранового топлива от уран-уранового заключается в появлении ^{233}U в изотопном составе облученного топлива. Этот изотоп характеризуется наиболее высоким значе-

нием сечения деления и наиболее низким значением сечения радиационного захвата нейтронов при всех значениях их энергии. Поэтому подавляющая часть вторичных нейтронов, сопровождающих поглощение нейтрона ^{233}U , поглощается либо снова ^{233}U , либо ^{232}Th с наработкой ^{233}U . При этом относительная доля поглощенных нейтронов с наработкой ^{234}U получается наиболее низкой. Число вторичных нейтронов на поглощенный ^{233}U нейтрон любой энергии превышает два нейтрона, что при их экономии позволяет одновременно поддерживать реакцию деления последующих ядер и воспроизводство делящихся ядер. Радиационный захват нейтронов ^{234}U сопровождается наработкой активного изотопа ^{235}U , который делится нейтронами всех значений энергии, что обуславливает относительно низкую наработку ^{236}U и изотопов последующих более тяжелых элементов.

Дополнительным источником нейтронов является деление порогово делящихся ядер (^{234}U , ^{236}U , ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu), нарабатываемых в процессе облучения, а также ^{232}Th , используемо-

го в качестве сырьевого материала, нейтронами высокой энергии. Для необходимого ужесточения спектра нейтронов достаточно использования тяжелой воды вместо легкой воды и уменьшения водо-топливного отношения в реакторах типа ВВЭР с торий-уран-плутониевым топливом и нет необходимости в быстрых реакторах с металлическим теплоносителем.

Сравнительно низкая наработка ^{236}U и последующих пороговых изотопов тяжелых элементов (^{237}Np , ^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu) сопровождается поглощением нейтронов с меньшей на порядок вероятностью, чем в стандартном уран-урановом топливе. При этом заселение активных изотопов ^{239}Pu и ^{241}Pu и их деление нейтронами любой энергии улучшает нейтронный баланс и ограничивает наработку изотопов америция и последующих элементов. Таким образом, использование сырьевого тория позволяет замкнуть торий-уран-плутониевый топливный цикл с глубокой трансмутацией актиноидов реакцией деления ядер и выйти на равновесный изотопный состав в торий-уран-плутониевом топливе. Сравнительно низкое содержание изотопов плутония в торий-уран-плутониевом топливе соответственно понижает в нем нейтронный фон, что облегчает изготовление свежего топлива.

1. Равновесный изотопный состав торий-уран-плутониевого топлива

Более подробно об описанных во введении нейтронной кинетике и изотопном преобразовании говорится в нашей статье [3], в которой приведены результаты расчетов изменения изотопного состава в десяти последовательных кампаниях по четыре года каждая. Расчеты выполнены в ячеечном приближении. За основу была принята ячейка МАГАТЭ [5] с уменьшенным внешним радиусом воды, равным 0,7 см. Старт каждой кампании начинался с использованием тяжелой воды в качестве теплоносителя, поддержание критического состояния осуществлялось разбавлением тяжелой воды легкой водой. Стартовая топливная композиция первой кампании содержала 72 кг изотопа ^{233}U и 928 кг ^{232}Th на тонну тяжелого металла оксидного торий-уранового топлива. Для обеспечения критического состояния на старте каждой последующей кампании оказывалось достаточно 0,96–0,97 количества актиноидов предыдущей кампании, с соответствующим добавлением ^{232}Th до тонны тяжелого металла, что и оп-

ределяет расширенное воспроизводство активных изотопов.

Стартовая топливная композиция десятой кампании содержала 73,7 кг изотопа ^{233}U и 896 кг ^{232}Th на тонну тяжелого металла оксидного торий-уранового топлива. При этом в стартовом топливе десятой кампании содержалось 18,5 кг ^{234}U , 6,2 кг ^{235}U , 3,3 кг ^{236}U , 0,88 кг ^{237}Np , 0,80 кг ^{238}Pu , 0,20 кг ^{239}Pu , 0,05 кг ^{240}Pu , 0,03 кг ^{241}Pu на тонну тяжелого металла, наработанных в девяти предыдущих кампаниях. Результаты расчетов показывают практически постоянное содержание изотопа ^{233}U в топливе стартовых композиций при увеличении содержания нарабатываемых изотопов за счет выгорания ^{232}Th . Это позволяет надеяться на приемлемую оценку равновесного содержания нарабатываемых изотопов (более тяжелых, чем ^{233}U) в рециклируемом топливе. Для этого в системе уравнений изотопной кинетики для изотопов более тяжелых, чем ^{233}U , потребуем равенства нулю скорости изменения концентрации изотопов. То есть примем равными нулю производные, а концентрацию изотопа ^{233}U зафиксируем. Таким образом, система дифференциальных уравнений превращается в систему алгебраических уравнений относительно равновесных значений концентрации ядер тяжелее ^{233}U , заселяемых в соответствии с непрерывным облучением нейтронами. Содержание изотопа ^{233}U принято равным 73 кг на тонну тяжелого металла. Скорости реакций деления ядер и радиационного захвата ими нейтронов приняты постоянными и равными их значениям на старте десятой кампании.

Во втором столбце табл. 1 приведены значения равновесных значений (кг/т) долгоживущих изотопов, полученные с использованием значений скоростей реакций, соответствующих старту десятой кампании. Для оценки устойчивости полученных значений к разбавлению тяжелой воды легкой водой расчет повторен с использованием значений скоростей реакций, соответствующих концу десятой кампании. Результаты этого расчета приведены в третьем столбце табл. 1. Наконец, с равновесным составом топлива, полученным с использованием значений скоростей реакций, соответствующих началу десятой кампании (второй столбец), по методу Монте-Карло посчитаны скорости нейтронных реакций и с их значениями получены новые значения равновесного изотопного состава, которые приведены в четвертом столбце табл. 1. Для каждого варианта равновесного изотопного состава приведено значение эффективного коэффициента размножения нейтронов в бесконечной сре-

Таблица 1

Оценка равновесных значений (кг/т)
с использованием скоростей реакций
из десятой кампании

	$T = 0$ лет	$T = 4$ года	М-К ($T = 0$)
K_{∞}	0,998	0,993	0,990
Изотопы	Стационарные значения концентраций [кг/т]		
^{244}Cm	0,04923	0,0557	0,04986
^{243}Am	0,02331	0,02684	0,02334
^{243}Cm	0,00039	0,0004	0,00039
^{242}Pu	0,03529	0,04062	0,03558
^{242}Cm	0,00767	0,00799	0,00775
^{241}Pu	0,26025	0,27068	0,26157
^{241}Am	0,04791	0,05405	0,04718
^{240}Pu	0,51169	0,3731	0,5127
^{239}Pu	1,01773	1,02104	1,02169
^{238}U	0,01295	0,01246	0,01319
^{238}Pu	2,96631	3,08994	2,96949
^{237}Np	2,16415	2,18782	2,16949
^{236}U	6,45546	6,62921	6,45738
^{235}U	7,66975	7,85721	7,64856
^{234}U	20,96264	20,84949	20,88703

де K_{∞} . Приведенные в табл. 1 значения иллюстрируют приемлемую устойчивость.

Вместе с этим полученные значения равновесных значений долгоживущих изотопов являются оценкой сверху, потому что при ее проведении содержание всех изотопов, кроме ^{233}U , непрерывно увеличивалось с увеличением времени облучения. В расчетах изменения изотопного содержания в десяти последовательных кампаниях содержание всех изотопов понижалось на (3–4)% после каждой кампании, что соответствует реальному рециклированию топлива. Ниже мы продолжим обсуждение точности приведенных в табл. 1 значений, а здесь обсудим полученные результаты.

Значение эффективного коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде, равное $K_{\infty} = 0,99$, для равновесного изотопного состава с удовлетворительной точностью подтверждает достаточную реактивность такого топлива для реального рециклирования. Резервом ее повышения является возможность увеличения содержания уран-плутониевой смеси в топливе, получаемая на финише каждой кампании.

Основное содержание в топливе равновесного состава, после тория, составляют долгоживущие изотопы урана. Содержание нептуния находится на уровне 0,2 %, а сравнительно короткоживущего изотопа ^{238}Pu – на уровне 0,3 %, что является до-

пустимым с точки зрения нейтронного баланса и представляется приемлемым при изготовлении свежего топлива. Малыми значениями характеризуется содержание более тяжелых изотопов плутония, а содержание изотопов америция и кюрия носит вообще следовый характер.

2. Времена выхода изотопов на равновесные значения

Значения времен подхода к этим равновесным значениям приведены в табл. 2 и получены следующим способом. Решается система дифференциальных уравнений с использованием значений скоростей реакций, соответствующих старту десятой кампании, с начальным (при $t = 0$) условием содержания ^{233}U , принятого равным 73 кг на тонну тяжелого металла. Для каждого изотопа определяются значения времен, при которых их содержание на 5 %; 1 %; 0,1 % ниже равновесного. Полученные значения приведены в табл. 2 и характеризуют выход на равновесные значения.

Несмотря на относительную малость вероятности радиационного захвата нейтронов ^{233}U , наибольшую вероятность его деления и высокую веро-

Таблица 2

Продолжительность облучения [годы]
для достижения содержания на 5 %, 1 %, 0,1 %
ниже равновесного (стационарного) значения (кг/т)
долгоживущих изотопов

	Содержание в стационарном состоянии	Годы достижения стационарного состояния с отклонением		
		5,0 %	1,0 %	0,10 %
^{244}Cm	0,04986	133,5	168,2	216,5
^{243}Am	0,02334	128,5	163,2	211,5
^{243}Cm	0,00039	128,9	163,6	211,8
^{242}Pu	0,03558	126,3	160,9	209,1
^{242}Cm	0,00775	127,6	162,2	210,6
^{241}Pu	0,26157	122,9	157,5	205,7
^{241}Am	0,04718	127	161,6	209,9
^{240}Pu	0,5127	118,9	153,5	201,8
^{239}Pu	1,02169	110,2	144,5	192,7
^{238}U	0,01319	107,6	143,4	192,8
^{238}Pu	2,96949	104,2	138,5	186,6
^{237}Np	2,16949	90,6	124	171,7
^{236}U	6,45738	83,2	116,5	164,3
^{235}U	7,64856	51,6	80,3	127,3
^{234}U	20,88703	44,3	73,3	120,6

тность радиационного захвата нейтронов нарабатываемым ^{234}U , со временем (больше 11; 18; 30 кампаний) накапливается значительное количество ^{234}U .

Равновесное значение ^{235}U на порядок меньше содержания основного делящегося изотопа ^{233}U , что определяется его наработкой при поглощении нейтронов ^{234}U и выгоранием в процессах деления и радиационного захвата нейтронов ^{235}U . Время выхода ^{235}U на равновесное значение значительно дольше, чем аналогичного выхода для ^{234}U на начальном этапе. Следует отметить, что деление ^{235}U понижает вероятность радиационного захвата нейтронов ^{235}U и последующими изотопами и сопровождается значительным улучшением нейтронного баланса в активной зоне.

Относительно большое количество ^{236}U обуславливается сравнительно высокой вероятностью радиационного захвата нейтронов ^{235}U относительно вероятности радиационного захвата нейтронов самим ^{236}U . При этом получается значительное повышение времени выхода на равновесное значение для ^{236}U относительно ^{235}U .

Сравнительно низкое содержание ^{237}Np и высокое содержание ^{238}Pu обусловлены соответственно высоким и низким значениями сечений радиационного захвата нейтронов ими. Имеет место дальнейшее увеличение времен выхода на их равновесные значения.

Низкое значение сечения радиационного захвата нейтронов ^{238}Pu , сравнительно высокая относительная вероятность деления ^{239}Pu сопровождаются уменьшением его равновесного значения и дальнейшим увеличением времени выхода на его равновесное значение.

Деление изотопов ^{239}Pu , ^{241}Pu нейтронами всех энергий понижает их содержание и содержание последующих изотопов плутония, америция, кюрия, а также улучшает нейтронный баланс. При этом увеличиваются времена их выхода на равновесные значения.

В порядке заключения этого и предыдущего разделов отметим следующее. Наиболее высокое значение сечения деления для ^{233}U и наиболее низкое значение сечения радиационного захвата нейтронов им при всех значениях их энергии обуславливают наиболее низкие равновесные значения последующих изотопов и элементов. Деление всех изотопов жесткими нейтронами, а изотопов ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu – нейтронами всех энергий, также понижает равновесные значения последующих изотопов и элементов. При этом времена достижения равновесных значений последующих изотопов

и элементов увеличиваются относительно значений для предыдущих изотопов.

Большое число сделанных приближений при получении этих значений, по-видимому, внесли значительную погрешность в их величины. Однако полученные закономерности представляются вполне разумными.

3. Изотопное преобразование топлива в пятнадцати последовательных кампаниях

Оцененное время выхода на равновесное значение даже для ^{234}U оказалось более долгим, чем облучение в десяти [3] последовательных кампаниях. С целью обеспечения непосредственной проверки соответствия друг другу оцененных выше равновесных значений и времен выхода на них, с одной стороны, и полученных аналогичных значений в процессе расчетов последовательных кампаний, с другой стороны, мы продлили расчеты [3] последовательного облучения до пятнадцати кампаний. Общая картина изотопного преобразования в пятнадцати последовательных кампаниях представлена на рис. 1 и 2 (см. цветную вкладку).

Данные рис. 1 и 2 показывают следующее. В процессе каждой кампании наиболее интенсивно реализуется наработка продуктов деления и выгорание тория. При постоянной наработке продуктов деления (постоянной мощности) во всех кампаниях содержание тория сравнительно быстро уменьшается в каждой кампании и относительно медленно в каждой последующей кампании относительно предыдущей. При этом содержание ^{233}U остается практически постоянным, а наблюдается рост содержания более тяжелых изотопов и элементов. Можно увидеть выход на равновесное значение содержания ^{234}U . Вместе с этим видно, что значения изотопов плутония далеки от выхода на равновесие.

Более детальную картину изотопного преобразования, начиная с ^{233}U , при облучении в пятнадцати кампаниях можно увидеть на рис. 3 и 4 (см. цветную вкладку), где опущено изменение тория. Пилообразный характер кривых иллюстрирует увеличение наработки каждого изотопа в течение четырехлетней кампании, уменьшение (96 %–97 %) количества наработанных изотопов (^{233}U и более тяжелых) до уровня, необходимого для старта последующей кампании, и соответствующее добавление тория. На рис. 3 и 4 видно практически одинаковое изменение содержания ^{233}U в каждой кампании, рост содержания других изотопов в каждой

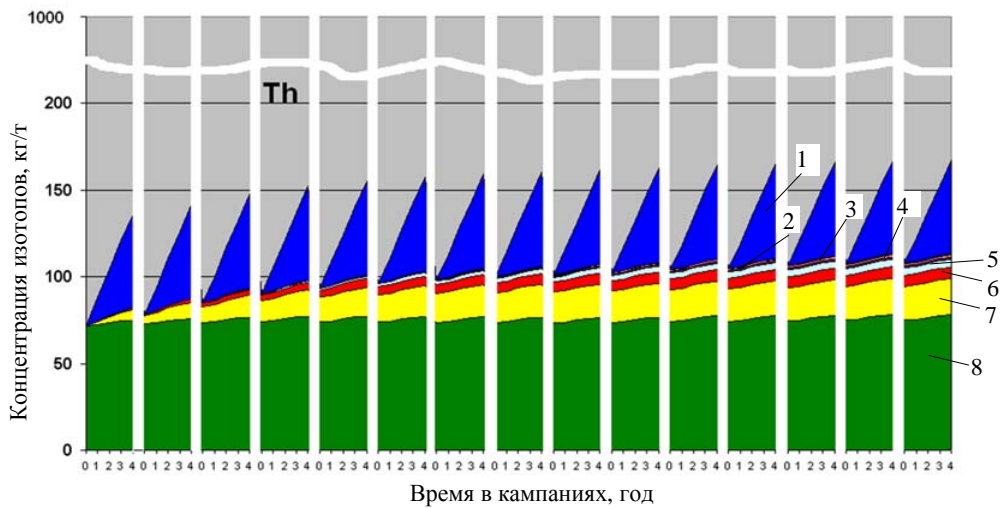


Рис. 1. Изотопное преобразование в пятнадцати последовательных кампаниях:
 1 – продукты деления; 2 – сумма изотопов Pu; 3 – ^{238}Pu ; 4 – ^{237}Np ; 5 – ^{236}U ; 6 – ^{235}U ; 7 – ^{234}U ; 8 – ^{233}U

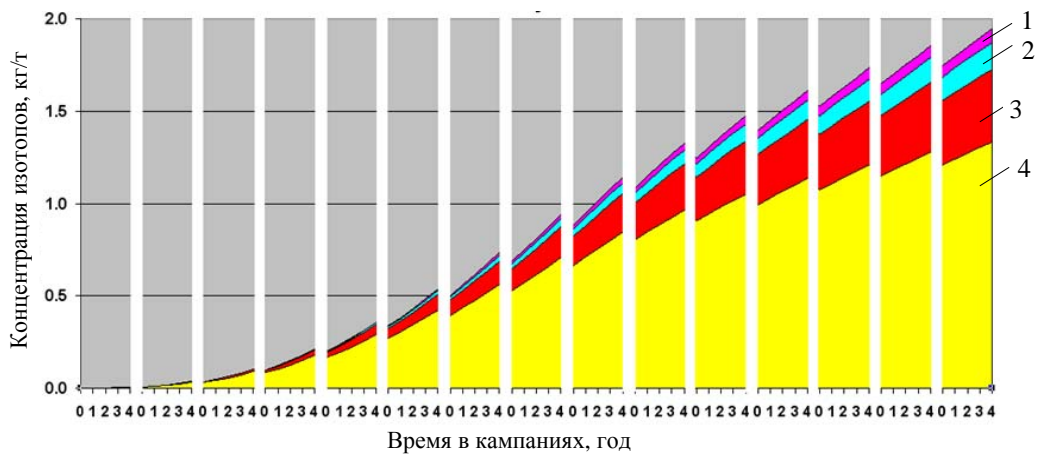


Рис. 2. Преобразование изотопов плутония в пятнадцати последовательных кампаниях:
 1 – ^{241}Pu ; 2 – ^{240}Pu ; 3 – ^{239}Pu ; 4 – ^{238}Pu

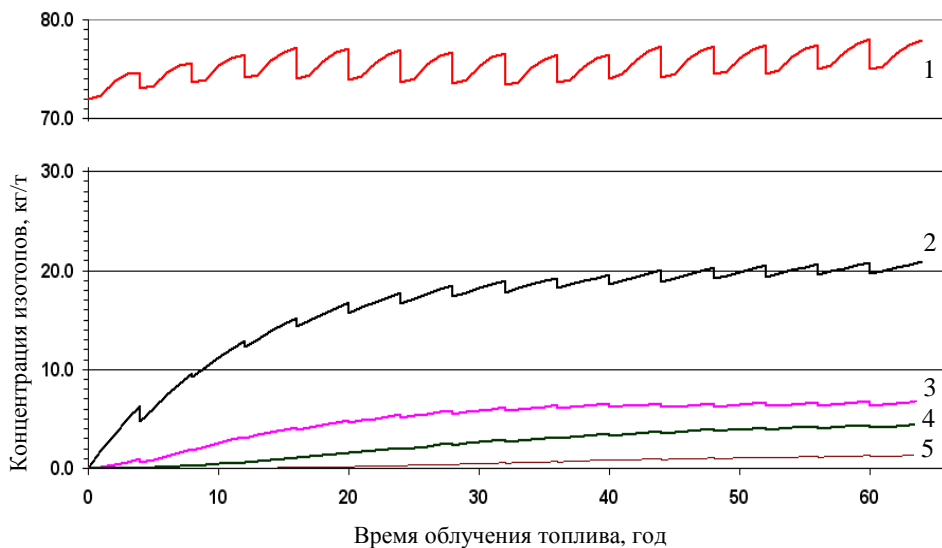


Рис. 3. Временная зависимость изменения изотопного состава рециркулируемого топлива.
 Изотопы урана: 1 – ^{233}U , 2 – ^{234}U , 3 – ^{235}U , 4 – ^{236}U ; 5 – сумма изотопов Pu

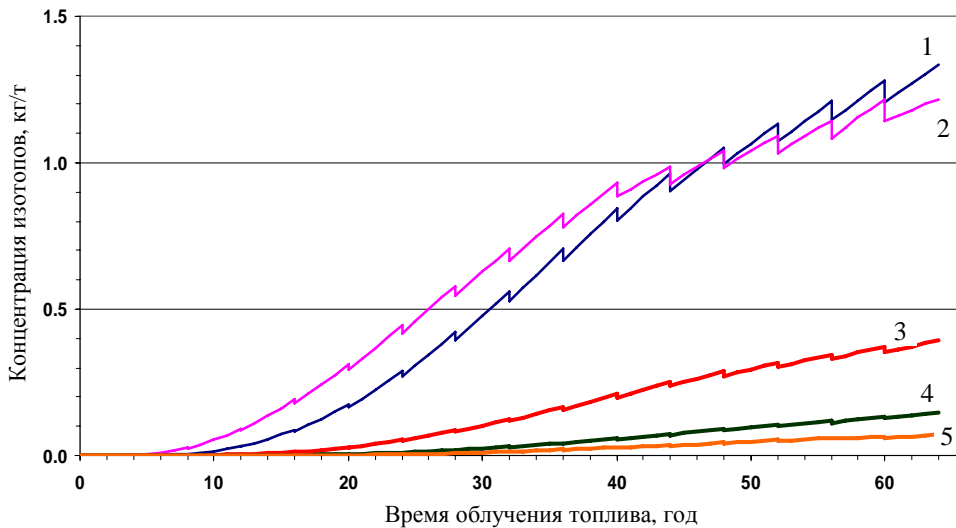


Рис. 4. Временная зависимость изменения изотопного состава рециклируемого топлива. Изотопы нептуния и плутония: 1 – ^{238}Pu ; 2 – ^{237}Np ; 3 – ^{239}Pu ; 4 – ^{240}Pu ; 5 – ^{241}Pu

кампании и с ростом числа кампаний. Совпадение значений ^{234}U на старте (19,6 кг/т) и финише (20,9 кг/т) четырнадцатой и пятнадцатой кампаний прямо указывает на его выход в равновесное состояние в конце четырнадцатой кампании, что соответствует времени облучения ~55 лет. Таким образом получается хорошее совпадение результатов расчетов (20,9 кг/т) для равновесного содержания ^{234}U , полученных оценкой, и в четырнадцати последовательных кампаниях.

Видно качественное понижение содержания и скорости роста изотопов ^{235}U , ^{236}U относительно ^{234}U , а ^{239}Pu , ^{240}Pu – относительно ^{238}Pu . Можно отметить существенное замедление роста накопления изотопов ^{235}U , ^{236}U при подходе к ~60 годам облучения. Вместе с этим содержание ^{237}Np и изотопов плутония продолжает быстро нарастать с ростом времени облучения.

4. Изменение нейтронной кинетики в пятнадцати кампаниях

Нейтронная кинетика в бесконечной среде непосредственно определяется рождением нейтронов в топливе и их поглощением в активной зоне. Основной механизм рождения нейтронов – деление ядер топлива, а механизм их поглощения – деление ядер топлива, радиационный захват ядрами топлива, в том числе продуктами деления ядер, ядрами оболочки и теплоносителя.

На рис. 5 и 6 (см. цветную вкладку) приведены удельные значения (кг/т) изотопов, испытывавших деление в каждой из пятнадцати кампаний.

Кривые, соединяющие точки, показывают изменения значений каждого из разделившихся изотопов в процессе кампании. Распределение количеств делений в каждой кампании между изотопами определяется, в первую очередь, значениями содержания этих изотопов с учетом рециклирования топлива. В первой кампании делению подвергались, в основном, стартовые изотопы ^{233}U и ^{232}Th . Числа делений ^{232}Th остаются практически постоянными во всех кампаниях в соответствии со сравнительно малыми изменениями ^{232}Th между кампаниями. Падение числа делений ^{233}U с ростом номера кампании сопровождается ростом чисел делений ядер остальных изотопов по мере их наработки, особенно ^{235}U , ^{234}U и ^{239}Pu . Деление пороговых изотопов ^{232}Th и ^{234}U быстрыми нейтронами значительно улучшает нейтронный баланс в активной зоне.

На рис. 7 и 8 (см. цветную вкладку) представлены удельные значения (кг/т) изотопов топлива, испытавших радиационный захват нейтронов в каждой из пятнадцати кампаний. Видно, что радиационный захват нейтронов стартовыми изотопами ^{233}U , ^{232}Th и нарабатываемым ^{233}Pa является максимальным в первой кампании, понижается в каждой из последующих кампаний, оставаясь преобладающим. Радиационный захват нейтронов растет для всех остальных нарабатываемых изотопов с ростом числа кампаний в соответствии с накоплением нарабатываемых изотопов при рециклировании. Большим ростом радиационного захвата нейтронов характеризуется захват изотопом ^{234}U в соответствии с его наиболее интенсивной наработкой и сравнительно большим сечением радиационного захвата нейтронов.

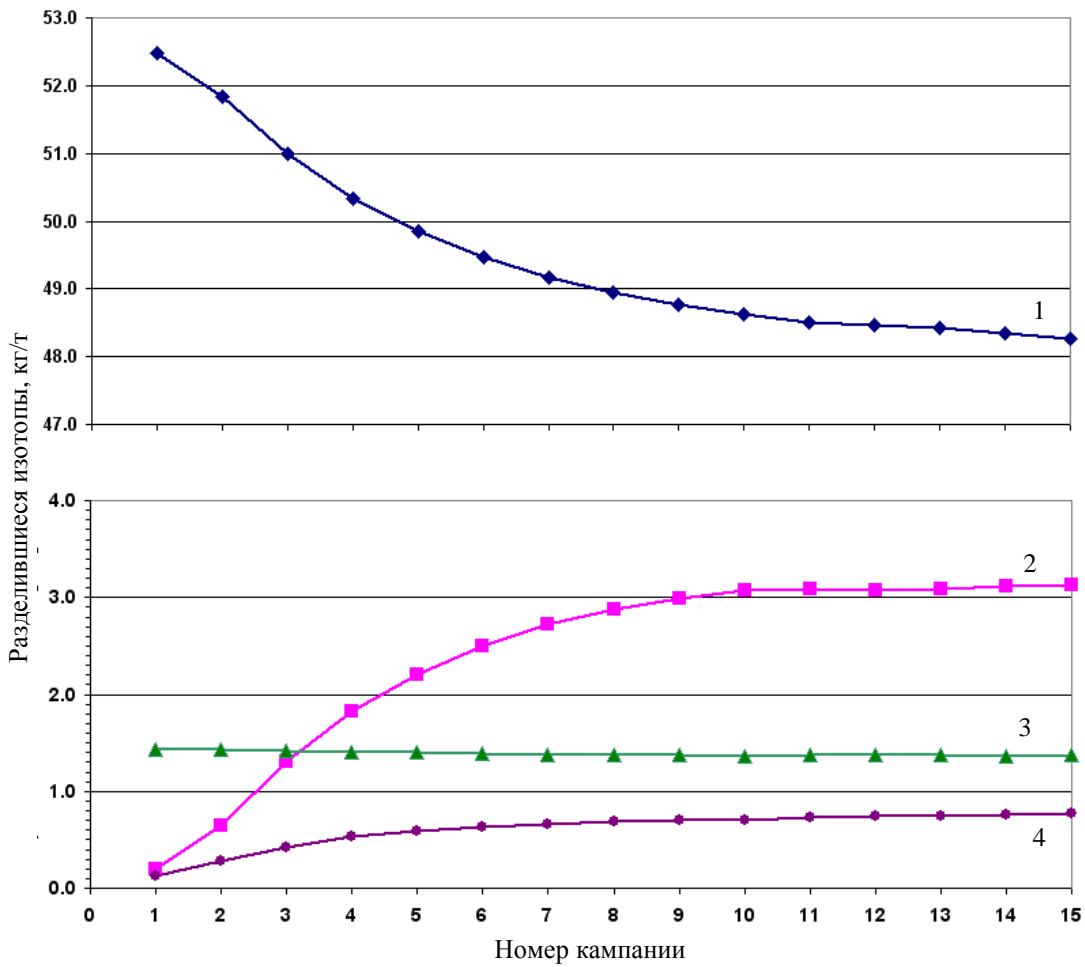


Рис. 5. Удельные значения (кг/т) изотопов урана и тория, испытывавших деление в каждой из пятнадцати кампаний:
1 - ^{233}U ; 2 - ^{235}U ; 3 - ^{232}Th ; 4 - ^{234}U

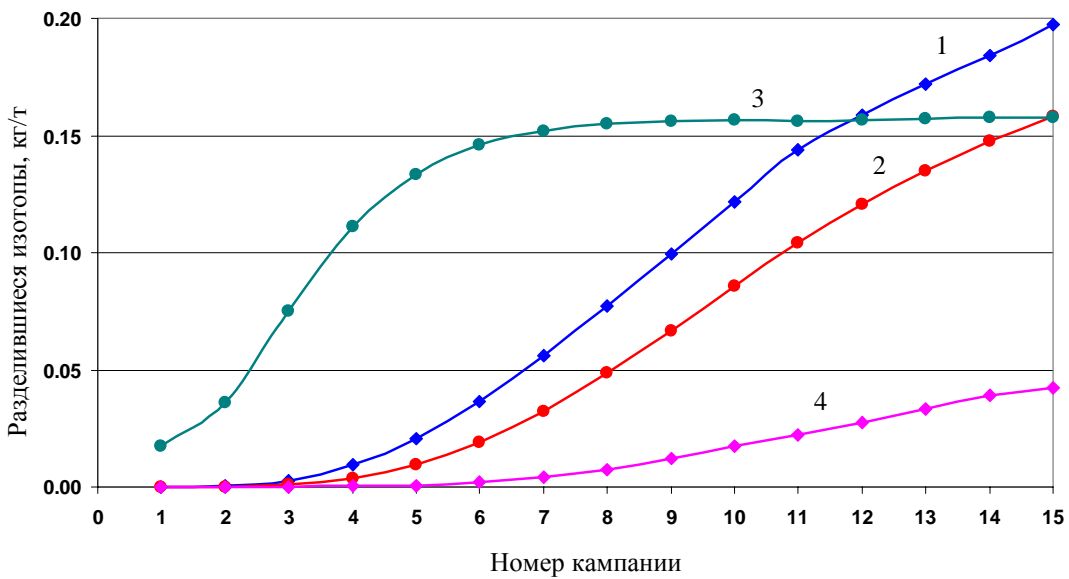


Рис. 6. Удельные значения (кг/т) изотопов плутония и урана, испытывавших деление в каждой из пятнадцати кампаний: 1 - ^{238}Pu ; 2 - ^{239}Pu ; 3 - ^{232}U ; 4 - ^{241}Pu

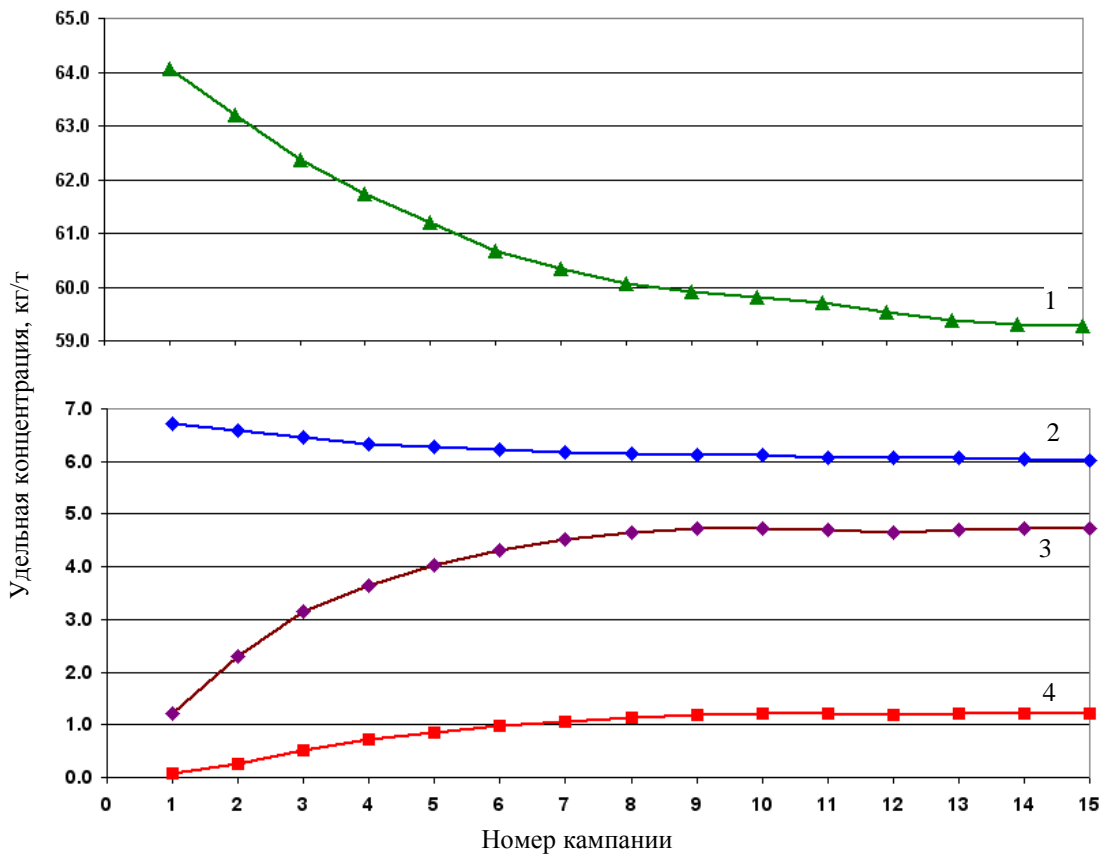


Рис. 7. Удельные значения (кг/т) изотопов урана и тория, испытавших радиационный захват нейтронов в каждой из пятнадцати кампаний: 1 – ^{232}Th ; 2 – ^{233}U ; 3 – ^{234}U ; 4 – ^{235}U

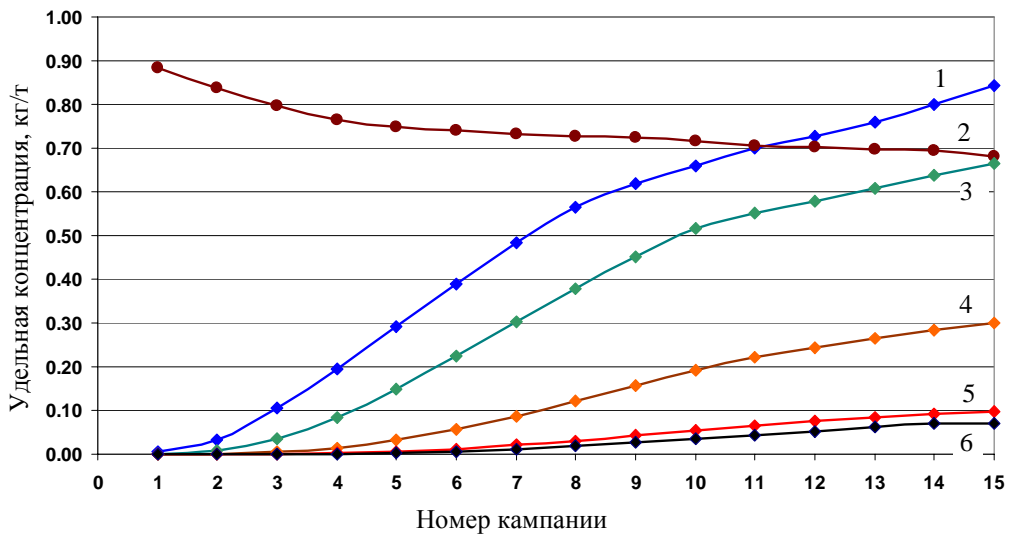


Рис. 8. Удельные значения (кг/т) изотопов протактиния, урана, нептуния и плутония, испытавших радиационный захват нейтронов в каждой из пятнадцати кампаний: 1 – ^{236}U ; 2 – ^{233}Pa ; 3 – ^{237}Np ; 4 – ^{238}Pu ; 5 – ^{239}Pu ; 6 – ^{240}Pu

Превышение сечения деления ядер ^{235}U относительно сечения радиационного захвата нейтронов ими при всех значениях энергии нейтронов обуславливает сравнительно низкую наработку ^{236}U и изотопов более тяжелых элементов.

Итак, нейтронная кинетика в торий-уран-плутониевом топливе реакторов типа ВВЭР с использованием тяжелой воды в качестве теплоносителя может обеспечить расширенное воспроизводство активных изотопов в замкнутом по актиноидам торий-уран-плутониевом топливном цикле, в том числе при достижении равновесного изотопного состава актиноидов. Поддержание критического состояния реактора без использования обычного запаса реактивности и его компенсации поглотителями нейтронов, а за счет смягчения энергетического распределения нейтронов путем разбавления тяжелой воды легкой водой, обеспечивают экономию нейтронов для их эффективного использования – деления ядер и воспроизводства делящихся ядер.

Выполненная к настоящему времени работа и полученные результаты позволяют считать, что нейтронная кинетика и изотопное преобразование в замкнутом торий-уран-плутониевом топливном цикле представляются наиболее оптимальными и эффективными. Требуется конструкторская проработка возможностей адаптации активной зоны реакторов типа ВВЭР, а может, и канальных тяжелых реакторов, по обеспечению использованных выше условий. Необходимы технологии переработки облученного и изготовления свежего топлива с широким изотопным составом актиноидов.

Заключение

В заключение подчеркнем основные результаты выполненной работы.

Выполнены оценки равновесных значений изотопного состава и времен выхода в равновесие при рециклировании торий-уран-плутониевого оксидного топлива в реакторах типа ВВЭР с использованием тяжелой воды и ее разбавления легкой водой. Показано, что и в равновесном режиме реактор может работать с самовоспроизводством активных изотопов.

Полученные результаты позволяют считать, что нейтронная кинетика и изотопное преобразование в замкнутом торий-уран-плутониевом топливном цикле представляются наиболее оптимальными и эффективными. Требуется конструкторская проработка возможностей адаптации ак-

тивной зоны реакторов типа ВВЭР, а может, и канальных реакторов, по обеспечению использованных выше условий. Необходимы технологии переработки облученного и изготовления свежего топлива с широким изотопным составом актиноидов.

Список литературы

1. Маршалкин В. Е., Повышев В. М. Расширенное воспроизводство ^{233}U в торий-урановом топливном цикле в реакторах типа ВВЭР с использованием тяжелой воды // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2013. Вып. 3. С. 12–29.

2. Маршалкин В. Е., Повышев В. М. Утилизация энергетического плутония и высокообогащенного урана с наработкой ^{233}U в реакторах типа ВВЭР с использованием тория и тяжелой воды // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2014. Вып. 3. С. 42–60.

3. Маршалкин В. Е., Повышев В. М. Замкнутый торий-уран-плутониевый топливный цикл – будущее ядерной энергетики // Атом, 2014, № 62, с. 37–40.

4. Маршалкин В. Е., Повышев В. М., Трутнев Ю. А. Целесообразность использования избыточных количеств оружейного урана и плутония и энергетического плутония для перевода тепловых реакторов на замкнутый торий-урановый топливный цикл // Труды семинара «Новые подходы к ядерным топливным циклам и схемам захоронения отходов с учетом существующих избыточных количеств оружейных урана и плутония и энергетического плутония» / Под ред. В. Е. Маршалкина. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1998, с. 179–187.

5. Calculation of the isotopic composition, crosssections and fluxes for a typical PWR-cell loaded with (PU-Th) O_2 -fuel, as a function of the fuel burnup. Report of IAEA, 1996.

Контактная информация –

Маршалкин Василий Ермолаевич,
ведущий научный сотрудник ИТМФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ,
тел. (831 30) 2-86-52,
e-mail: marshalkin@vniief.ru

Статья поступила в редакцию 05.06.2015.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, вып. 4, с. 3–11.