

Расчеты показывают, что при $d/r_{di} \leq 1,5$ можно получить КПД рекуперации $\sim 90\%$. Учет влияния рассеянного магнитного поля на траектории приводит к следующим результатам. Магнитное поле порядка $0,02 \bar{H}$ незначительно искажает траектории и, следовательно, мало влияет на КПД рекуперации; поле порядка $H_{кр} = 0,1 \bar{H}$ уже является опасным (где $\bar{H} = Mcv_0/er_{di}$ — характерный масштаб магнитного поля). Для параметров пучка $W_0 = 160$ кэВ, $I = 200$ А, $j = 65$ мА/см², $r_{di} = 13$ см размеры рекуператора таковы: $x_p = 52,4$ см, $H = 6300$ Гс, $H_{кр} = 630$ Гс ($d = 20$ см, $d/r_{di} = 1,5$).

Для устранения опасности возникновения виртуального анода предлагается создать на собирающей поверхности слой термоэммиттеров, при этом электроны будут компенсировать избыточный ионный заряд и отражения ионов не произойдет. Чтобы устранить влияние маг-

нитного поля, ограничивающего подвижность электронов, необходимо снизить внешнее магнитное поле до 10 Гс и создать дополнительное магнитное поле $\sim 10-20$ Гс, ориентированное примерно по нормали к собирающей поверхности. В этом случае электроны могут уходить достаточно далеко от поверхности рекуперации навстречу потоку ионов, а энергия электронов не будет превышать 100 эВ и не будет сильно снижать эффективность прямого преобразования энергии ионов.

Поступила в Редакцию 8.IV.77

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bender D., Barr W., Moir R. Preprint UCRL-77239, 1975.
2. Молоковский С. И., Сушков А. Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. Л., «Энергия», 1972.
3. Вычислительные методы в физике плазмы. Под ред. Б. Олдера и др. М., «Мир», 1974.
4. Смирнов В. М. «ЖЭТФ», 1966, т. 50, вып. 4, с. 1005.

УДК 621.039.524.4:621.039.311.2

Исследование возможностей накопления ²³³U в реакторах типа ВВЭР при минимальном образовании ²³²U

Юрлова Л. Н., Поляков А. А., Рухло В. П., Титаренко Ю. Е., Бобров С. А.

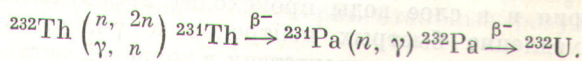
В настоящей работе исследованы условия относительного накопления ²³²U и ²³³U при различных способах и композициях загрузки ²³²Th в реактор типа ВВЭР. Исследования проводились на уран-водной подкритической сборке, имитирующей кассету водо-водяных энергетических реакторов.

При облучении ²³²Th потоком нейтронов и γ -квантов наряду с накоплением ²³³U происходит образование ²³²U, продукты α -распада которого излучают высокоэнергетические γ -кванты. Наличие высокоэнергетического γ -излучения в выгружаемом топливе значительно усложняет его переработку и последующее использование ²³³U. Поэтому в работе основное внимание уделялось исследованию возможностей уменьшения накопления ²³²U по отношению к накоплению ²³³U.

Способы уменьшения относительного накопления ²³²U/²³³U при облучении тория

Схема ядерных превращений ²³²Th при облучении в реакторе представлена на рис. 1. Накопление ²³²U в основном определяется следую-

щей цепочкой реакций:



Характерной особенностью процесса образования ядер ²³²U при облучении тория являются пороговые $(n, 2n)$ - и (γ, n) -реакции на ²³²Th, ²³³Pa и ²³³U ($E_{\text{порог}}^{232}\text{Th} = 6,4$ МэВ, $E_{\text{порог}}^{233}\text{Pa} = 6,0$ МэВ, $E_{\text{порог}}^{233}\text{U} = 5,9$ МэВ) [1], которые указывают на возможность снижения скорости накопления ²³²U за счет уменьшения плотности потока нейтронов и γ -квантов с энергиями выше порога этих реакций.

Источники излучений, вызывающих образование ²³²U, можно условно разделить на две группы: внешние источники, обусловленные рождением нейтронов и γ -квантов вне тория, и внутренние источники — нейтроны и γ -кванты деления ²³³U, накапливающегося в тории. Вклад внешних источников при работе реактора на постоянной мощности практически не изменяется в процессе всей кампании, в то время как вклад внутренних источников будет увеличиваться с накоплением ²³³U и при его достаточно высоких концентрациях станет определяющим.

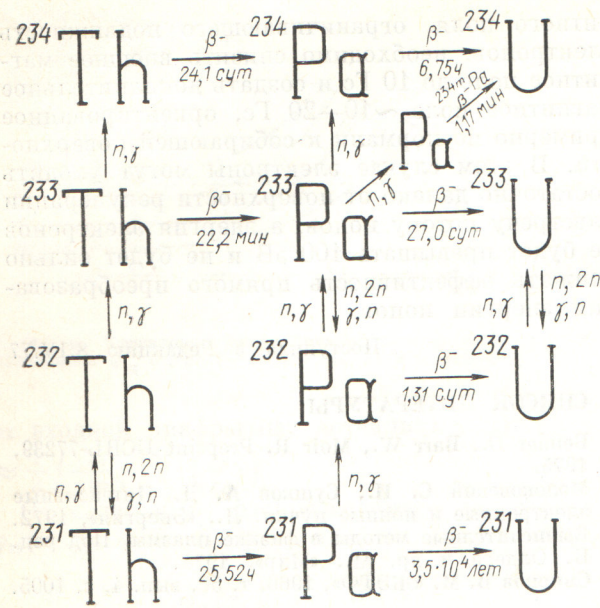


Рис. 1. Схема ядерных превращений ^{232}Th при облучении в реакторе

Для защиты от внешних источников излучения был рассмотрен следующий вариант: в центре активной зоны уран-водной подкритической сборки помещалась вставка из ториевых стержней. В этом случае на внешних рядах тория и в слое воды происходит эффективное замедление быстрых нейтронов и γ -квантов. Очевидно, что при отсутствии в ториевой вставке материалов, являющихся источниками высокоэнергетических захватных γ -квантов, такое размещение тория приводит к снижению в среднем по вставке скорости образования ^{232}U . Кроме того, для дальнейшего уменьшения накопления ^{232}U внешний ряд вставки может быть набран из стержней, заполненных тяжелым элементом, обладающим достаточно большим сечением неупругого рассеяния и малым сечением поглощения нейтронов.

Подобная защита от высокоэнергетических нейтронов и γ -квантов эффективна только в начале кампании, когда концентрация ^{233}U незначительна. Влияние внутренних источников накопления ^{232}U можно значительно уменьшить, поместив внутри ториевых стержней рассеиватель нейтронов, гомогенно введенный с торием по объему стержней. На практике эта схема была реализована путем изготовления стержней, заполненных смесью двуокиси тория и висмута с достаточно высокой концентрацией последнего. В этом случае уменьшается скорость

накопления ^{232}U и одновременно растет скорость образования ^{233}U за счет увеличения эффективного резонансного интеграла тория.

Методика измерения отношения скоростей реакций, ведущих к образованию ^{233}U и ^{232}U

Условия накопления ^{233}U и ^{232}U можно оценить, измерив скорости (n, γ) - и $(n, 2n)$ -реакций на ^{232}Th . Скорость ^{232}Th (n, γ) ^{233}Pa -реакции определяли методом γ -спектрометрии. При этом регистрировали интенсивность γ -излучения ^{233}Pa с энергией $E_\gamma = 311,9$ кэВ и выходом 84% [2].

Изотопы, образующиеся при α -распаде ^{232}Th , создают фон, существенно усложняющий выделение γ -линий ^{231}Th . Это приводит к невозможности прямых измерений скорости ^{232}Th $(n, 2n)$ ^{231}Th -реакций на подкритических и критических установках с малым потоком нейтронов. Поскольку для исследования условий накопления ^{232}U интерес представляют нейтроны с энергией выше 6,5 МэВ, их регистрировали с помощью алюминиевых детекторов по $^{27}\text{Al}(n, \alpha)$ ^{24}Na -реакции, которая имеет эффективный порог $E_{\text{эф}}^{27\text{Al}(n, \alpha)} = 7,45$ МэВ, достаточно близкий к эффективному порогу $(n, 2n)$ -реакции на ^{232}Th — $E_{\text{эф}}^{232\text{Th}(n, 2n)} = 7,6$ МэВ [3].

Оценки, проведенные для реакторов типа ВВЭР, показывают, что вклад (γ, n) -реакций в скорость образования ^{232}U составляет не более 18% и может быть учтен расчетным путем.

Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования ядерно-физических свойств уран-водной системы при введении в нее тория проводили на подкритической сборке, установленной в физическом зале ИРТ МИФИ [4]. В ходе экспериментов часть урановых твэлов заменяли ториевыми, изго-

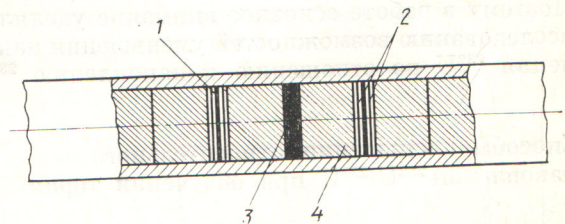


Рис. 2. Схема загрузки образцов в экспериментальный стержень:

1 — алюминиевая фольга; 2 — алюминиевые прокладки; 3 — таблетка из ThO_2 ; 4 — блочки из ThO_2

товленными из таблеток спеченной двуокиси тория диаметром 7,65 мм и плотностью 7,73 г/см³. Размеры и покрытие ториевых стержней идентичны урановым твэлам. Стержни, в которых облучались образцы, имели разборную конструкцию. В измерениях использовали образцы из двуокиси тория толщиной 500 мкм и диаметром 7,65 мм и образцы из химически чистого алюминия толщиной 100 мкм и диаметром 7,65 мм. Схема загрузки образцов в экспериментальный стержень показана на рис. 2.

Результаты измерений

Ториевая вставка различных размеров (внешние источники излучения). Измерения скоростей ^{232}Th (n, γ)- и ^{27}Al (n, α)-реакций (соответственно A^{Th} и A^{Al}) были выполнены при равномерном размещении 37 ториевых стержней по площади подкритической сборки и при увеличении числа ториевых стержней в центральной вставке от 1 до 37. Измеренные скорости реакций и их отношения ($A^{\text{Al}}/A^{\text{Th}}$) представлены в табл. 1, где за единицу принято отношение скоростей реакций в одиночном ториевом стержне, размещенном в центре сборки. При увеличении числа ториевых стержней скорости реакций измеряли в каждом ряду центральной вставки.

Ториевая вставка с ^{235}U (внешние и внутренние источники излучения). Для исследования условий образования ^{232}U и ^{233}U при накопле-

нии в облученном тории делящегося изотопа были проведены измерения, подобные описанным выше при введении в ториевые стержни добавки из двуокиси урана (6,5% обогащения по ^{235}U). Концентрация урана в стержнях из двуокиси тория составляла 1 кг ^{235}U /1 кг ThO_2 . В этих и последующих опытах образцы для регистрации скорости (n, γ)-реакции не отличались по составу от стержней центральной ториевой вставки.

Висмут-ториевая вставка (внешние источники излучения). Чтобы исследовать влияние тяжелого рассеивателя на скорость накопления ^{233}U и ^{232}U , была проделана серия экспериментов по измерению скоростей ^{232}Th (n, γ)- и ^{27}Al (n, α)-реакций в различных точках центральной вставки, собранной из стержней, заполненных смесью торий — висмут. Концентрация висмута в стержнях составляла 92%. Схема загрузки образцов и методика облучений оставались аналогичными описанным выше.

Висмут-ториевая вставка с ^{235}U (внешние и внутренние источники излучения). Влияние накопления делящегося изотопа на скорость ^{232}Th (n, γ)- и ^{27}Al (n, α)-реакций при наличии в ториевых стержнях тяжелого рассеивателя изучали на центральной вставке, собранной из стержней, заполненных смесью $\text{ThO}_2 + \text{Bi}$ (92%) + UO_2 (6,5% обогащения по ^{235}U). Соотношение между содержанием UO_2 и ThO_2 сохранено таким же, как и в опытах с ($\text{ThO}_2 + \text{UO}_2$)-вставкой. Экспериментальные резуль-

Скорости реакций A^{Al} и A^{Th} и их отношения в центральной ториевой вставке с разным числом ThO_2 -стержней

Таблица 1

Число ThO_2 -стержней	Измеряемая активность	Ряд вставки, в котором проводились измерения				Среднее по вставке	Равномерное размещение 37 стержней из ThO_2
		первый	второй	третий	четвертый		
1	A^{Al}	$1 \pm 0,029$				$1,000 \pm 0,039$	—
	A^{Th}	$1 \pm 0,019$					
	$A^{\text{Al}}/A^{\text{Th}}$	$1 \pm 0,039$					
1+6	A^{Al}	$0,784 \pm 0,026$	$0,826 \pm 0,013$			$0,664 \pm 0,016$	—
	A^{Th}	$1,432 \pm 0,035$	$1,207 \pm 0,018$				
	$A^{\text{Al}}/A^{\text{Th}}$	$0,547 \pm 0,023$	$0,684 \pm 0,015$				
1+6+12	A^{Al}	$0,566 \pm 0,009$	$0,614 \pm 0,015$	$0,639 \pm 0,015$		$0,543 \pm 0,016$	—
	A^{Th}	$1,404 \pm 0,017$	$1,256 \pm 0,023$	$1,097 \pm 0,019$			
	$A^{\text{Al}}/A^{\text{Th}}$	$0,403 \pm 0,008$	$0,489 \pm 0,015$	$0,582 \pm 0,017$			
1+6+12+18	A^{Al}	$0,410 \pm 0,022$	$0,436 \pm 0,022$	$0,489 \pm 0,024$	$0,533 \pm 0,024$	$0,511 \pm 0,016$	$0,967 \pm 0,029$
	A^{Th}	$1,041 \pm 0,019$	$1,097 \pm 0,022$	$1,026 \pm 0,024$	$0,921 \pm 0,018$		
	$A^{\text{Al}}/A^{\text{Th}}$	$0,394 \pm 0,022$	$0,397 \pm 0,022$	$0,477 \pm 0,025$	$0,579 \pm 0,029$		

Скорости реакций A^{Al} и A^{Th} и их отношения в центральной вставке при разной ее загрузке

Загрузка	Измеряемая активность	Ряд вставки, в котором проводились измерения				Среднее по вставке	Равномерное размещение 37 стержней из ThO ₂
		первый	второй	третий	четвертый		
ThO ₂	A^{Al}	0,410±0,022	0,436±0,022	0,489±0,024	0,533±0,024	0,511±0,016	0,967±0,029
	A^{Th}	1,041±0,019	1,097±0,022	1,026±0,024	0,921±0,018		0,948±0,018
	A^{Al}/A^{Th}	0,394±0,022	0,397±0,022	0,477±0,025	0,579±0,029		1,020±0,060
ThO ₂ + UO ₂	A^{Al}	1,106±0,035	1,046±0,042	0,971±0,033	0,769±0,037	0,893±0,029	1,308±0,046
	A^{Th}	1,071±0,022	1,141±0,024	1,028±0,023	0,912±0,026		0,955±0,017
	A^{Al}/A^{Th}	1,033±0,039	0,917±0,042	0,945±0,037	0,843±0,049		1,370±0,081
ThO ₂ + Bi	A^{Al}	0,396±0,022	0,438±0,018	0,529±0,026	0,544±0,024	0,380±0,011	0,927±0,037
	A^{Th}	1,375±0,024	1,617±0,026	1,471±0,021	1,248±0,022		0,929±0,017
	A^{Al}/A^{Th}	0,288±0,017	0,271±0,012	0,360±0,019	0,436±0,021		0,998±0,059
ThO ₂ + Bi + UO ₂	A^{Al}	0,672±0,026	0,650±0,024	0,606±0,022	0,579±0,018	0,430±0,010	0,962±0,044
	A^{Th}	1,361±0,016	1,602±0,014	1,519±0,022	1,274±0,024		0,931±0,021
	A^{Al}/A^{Th}	0,494±0,020	0,406±0,015	0,399±0,016	0,454±0,016		1,033±0,061

таты для различных композиций центральной вставки из 37 ториевых стержней представлены в табл. 2.

Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные зависимости отражают относительные изменения спектра нейтронов в областях, характерных для ^{232}Th (n, γ)- и ^{232}Th ($n, 2n$)-реакций. Поэтому наблюдаемые закономерности соответствуют изменениям в накоплении ^{232}U и ^{233}U .

Анализ зависимостей скоростей ^{232}Th (n, γ)- и ^{27}Al (n, α)-реакций от геометрии и композиции ториевой вставки показывает, что увеличение размеров ториевой вставки приводит к уменьшению в среднем по вставке доли нейтронов с энергией выше 6,5 МэВ за счет эффективного замедления нейтронов от внешних источников на ядрах тория и водорода. При введении вставки из 37 ториевых стержней получено уменьшение отношения скоростей ^{27}Al (n, α)- и ^{232}Th (n, γ)-реакций по сравнению с равномерным размещением такого же количества ториевых стержней. Введение в ториевую вставку добавки из ^{235}U , имитирующей накопление ^{233}U в исследуемой системе, существенно увеличивает отношение скоростей ^{27}Al (n, α)- и ^{232}Th (n, γ)-реакций за счет внутренних источников нейтронов деления. Разбавление двуокиси тория висмутом приводит к значительно-

му снижению влияния внутренних источников излучений.

Таким образом, при введении в 37 стержней центральной вставки смесей ThO₂ + Bi и ThO₂ + Bi + UO₂ измеряемое отношение скоростей реакций уменьшается примерно в 3 раза по сравнению с равномерным размещением ториевых стержней в UO₂-сборке. Экстраполяция полученных результатов при дальнейшем увеличении размеров вставок из (ThO₂ + Bi)- и (ThO₂ + Bi + UO₂)-стержней к стандартным размерам кассеты реакторов типа ВВЭР показывает возможность уменьшения данного отношения в 10—12 раз.

Полученные в работе относительные значения могут быть приведены к абсолютным путем измерения отношений скоростей ^{27}Al (n, α)/ ^{232}Th (n, γ)- и ^{232}Th ($n, 2n$)/ ^{232}Th (n, γ)-реакций на действующих энергетических реакторах типа ВВЭР.

Поступила в Редакцию 4.V.77

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1971, v. 14, p. 807.
2. Bowman W., MacMurdo K. «Atomic Data and Nucl. Data Tables», 1974, v. 13, № 2—3.
3. Бондарс Х. Н., Вейнберге Я. К., Лапенас А. А. В кн.: Ядерные константы. Вып. 15. М., Атомиздат, 1974, с. 63.
4. Юрова Л. Н. и др. «Атомная энергия», 1978, т. 44, вып. 6, с. 518.