

вклада ^{244}Cm в нейтронный выход топлива по мере его выгорания.

Существенно должна меняться форма спектра нейтронного излучения отработавшего топлива и при его выдержке после выгрузки из реактора. В таблице приведены значения $Y_n^{(\text{SF})}$ и $Y_n^{(\alpha n)}$ для топлива с выгоранием $w=30$ кг/т U, характеризующие изменение относительных выходов нейтронов спонтанного деления SF и нейтронов (αn) -реакции на кислороде в зависимости от времени выдержки. Как видно из таблицы, вначале, в течение первых пяти лет, происходит уменьшение вклада нейтронов (αn) -реакций, что связано в основном с распадом ^{242}Cm . При дальнейшей выдержке этот вклад незначительно возрастает, что обусловлено накоплением в топливе ^{238}Pu и ^{241}Am и распадом ^{244}Cm .

На рис. 2 показано изменение формы спектра нейтронного излучения отработавшего UO_2 -топлива с $w=30$ кг/т U в зависимости от времени его выдержки после выгрузки из реактора. Из рисунка видно, что по мере роста $t_{\text{выд}}$ спектр смягчается, средняя энергия спектра \bar{E}_n уменьшается и начиная с $t_{\text{выд}}=3$ года он практически совпадает со спектром нейтронов спонтанного деления ^{244}Cm .

Энергетические спектры, приведенные в работе [5], относящиеся к двум различным значениям выгорания UO_2 -топлива и $t_{\text{выд}}=163$ сут, рассчитывались с исполь-

зованием неверных значений удельных выходов (σn) -нейтронов для $^{242}\text{CmO}_2$ и $^{244}\text{CmO}_2$, в результате чего область энергий 2—4 МэВ, соответствующая нейтронам (σn) -реакции на кислороде, оказалась примерно вдвое завышенной. Кроме того, из работы не ясно, к топливу какого реактора — PWR или BWR — относятся эти спектры и каково его исходное обогащение.

Полученные в данной работе результаты могут представлять интерес при расчете транспортировочных контейнеров, проектировании хранилищ отработавшего топлива и радиационных защит, а также при оценке соответствующих доз нейтронного излучения в различных средах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шиманская Н. С. См. наст. вып., с. 316.
2. Taherzadeh M., Gingo P. «Nucl. Techn.», 1972, v. 15, N 3, p. 396.
3. Габескирия В. Я., Грызина В. В. и др. «Атомная энергия», 1978, т. 44, вып. 5, с. 446.
4. Макарова Т. П. и др. In: 2. Tagung Nukleare Analysenverfahren (Dresden, 1979). Preprints der Vorträge und Poserbeiträge. Dresden, 1979, S. 212.
5. Bailey H. e.a. «Nucl. Techn.», 1973, v. 17, N 3, p. 217.

Поступило в редакцию 17.12.79

УДК 539.12...126.5:621.039.52.44

Выход нейтронного излучения отработавшего топлива реактора ВВЭР

ШИМАНСКАЯ Н. С.

На основании экспериментальных данных об изотопном составе отработавшего топлива реакторов ВВЭР-365 и ВВЭР-440 [1, 2] был рассчитан ожидаемый выход нейтронного излучения этого топлива при разных уровнях его выгорания и различных временах выдержки после выгрузки из реактора.

Известно, что при использовании окисного уранового топлива источником нейтронов являются (αn) -реакции на кислороде и спонтанное деление (SF) нуклидов тяжелых элементов, накапливающихся в топливе при облучении. В работе вычислены парциальные выходы (αn) - и (SF)-нейтронов для основных компонентов отработавшего UO_2 -топлива: ^{235}U , ^{238}U , ^{236}U , ^{237}Np , $^{238-242}\text{Pu}$, 241 , ^{243}Am , 242 , ^{244}Cm . Значения удельных выходов (SF)-нейтронов и удельной α -активности нуклидов брались при этом из работы [3], в которой они были рассчитаны на основании соответствующих оцененных величин периода полураспада $T_{1/2}(\text{SF})$ и $T_{1/2}(\alpha)$. Выходы (αn) -нейтронов для отдельных нуклидов определялись с помощью полуэмпирической формулы [4], связывающей выход нейтронов

(αn) -реакции на кислороде и энергию α -частицы и пересчитанной на UO_2 -мишень.

Полученные для разных уровней выгорания w ($w=10 \div 35$ кг/тU) и различных времен выдержки ($t_{\text{выд}}=0 \div 10$ лет) значения суммарных выходов нейтронного излучения Y_n ($Y_n = Y_n^{(\text{SF})} + Y_n^{(\alpha n)}$) отработавшего топлива приведены в таблице. Изменение Y_n с увеличением глубины выгорания w в указанном диапазоне выгораний для свежезвлеченного топлива ($t_{\text{выд}}=0$) соответствует зависимости $Y_n \sim w^{3,2}$. Для выдержанного топлива степенной показатель несколько больше и меняется в пределах 3,2 — 3,9 для $t_{\text{выд}}=0 \div 10$ лет.

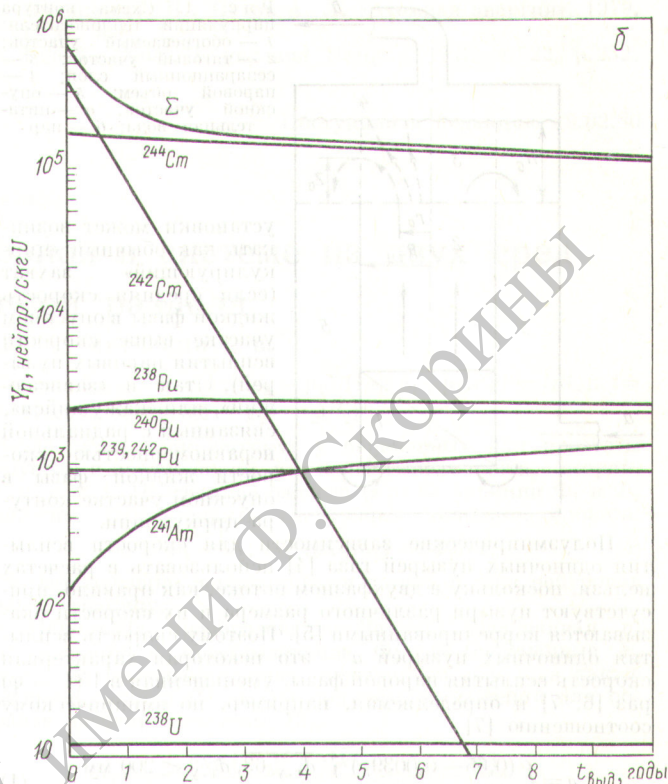
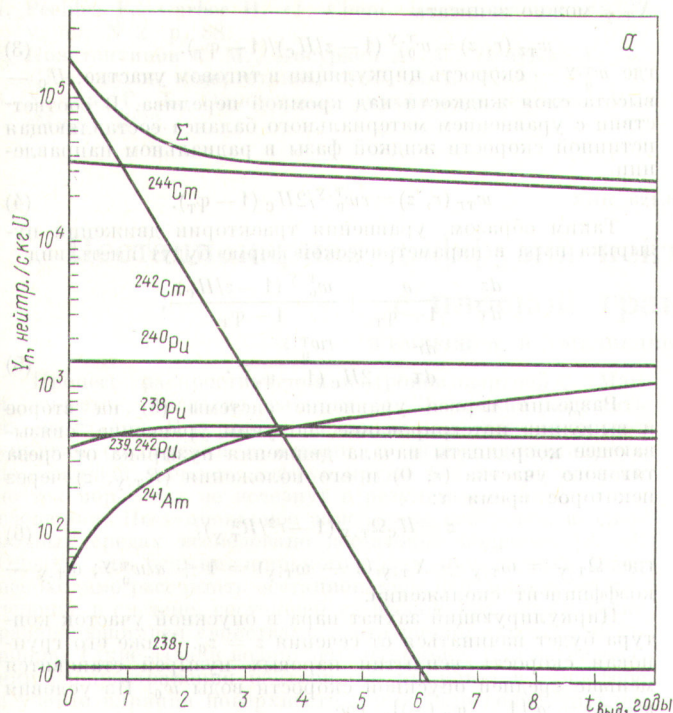
На рисунке для топлива с выгоранием 20 и 30 кг/т U показаны вклады в нейтронный выход отдельных нуклидов и изменение соотношения этих вкладов при изменении глубины выгорания топлива и времени его выдержки. Наиболее существенный вклад при $t_{\text{выд}}=0$ вносит ^{242}Cm . При увеличении выгорания от 10 кг/тU до 35 кг/тU вклад этого нуклида уменьшается с 87 до 60 % при соответствующем возрастании относительного вклада нейтронов ^{244}Cm . При уровнях выгорания, превышающих 15 кг/т U, именно ^{242}Cm и ^{244}Cm определяют интенсивность нейтронного излучения отработавшего топлива реактора типа ВВЭР. При меньших выгораниях заметный вклад вносят изотопы плутония, в первую очередь ^{240}Pu (до 4 % при $w=10$ кг/т U), а также ^{238}Pu и ^{239}Pu . Обычно же по завершении кампании ($w=30 \div 35$ кг/т U) суммарный вклад этих изотопов, а также изотопов U, Np и Am не превышает 1 %.

По мере увеличения времени выдержки топлива соотношение вкладов нейтронного излучения отдельных нуклидов, как это следует из рисунка, существенно меняется. После трех-четырёхлетней выдержки нейтронное излучение отработавшего UO_2 -топлива при уровне выгорания $w \approx 20 \div 35$ кг/т U более чем на 90 % определяется нейтронами спонтанного деления ^{244}Cm .

Точность полученных оценок Y_n , равная 15—20 %, ограничена погрешностью определения выгорания в рабо-

Зависимость Y_n отработавшего топлива ВВЭР ($\alpha_n^0=3\%$) от уровня его выгорания и времени выдержки, нейтр./с кг U, $\times 10^{57}$

w , кг/т U	$t_{\text{выд}}$ годы					
	0	1	2	3	5	10
10	0,156	0,0481	0,0253	0,0204	0,0189	0,0182
20	1,69	0,664	0,434	0,376	0,347	0,301
25	3,36	1,40	0,960	0,844	0,796	0,665
30	5,62	2,49	1,81	1,62	1,47	1,23
35	8,51	4,36	3,38	3,08	2,82	2,34



Зависимость суммарного выхода нейтронов Y_n и парциальных вкладов в него отдельных нуклидов от времени выдержки для отработавшего топлива ВВЭР с первоначальным обогащением $\alpha_0^0 = 3\%$ и глубиной выгорания $w = 20$ (а) и 30 (б) кг/т U

тах [4, 2] и корректностью установленных в них корреляций между выгоранием топлива и его изотопным составом. Результаты аналогичных расчетов, выполненных для водо-водяных реакторов Yankee-Rowe [5] и TRINO [6], свидетельствуют об одинаковом характере зависимости $Y_n(w)$ для реакторов этого типа. Некоторое расхождение наших данных с данными работы [6], касающееся самих значений нейтронных выходов, соотношений парциальных вкладов отдельных нуклидов и формы кривых $Y_n(w)$ для выдержанного топлива, связано, по-видимому, в основном с различием исходных обогащений топлива и энергетических спектров нейтронов активной зоны для разных реакторов. Результаты работы [5] представлены в виде, не позволяющем провести их непосредственное сопоставление с нашими данными. Использование в этой работе неверных значений удельных выходов (αn -нейтронов для $^{242}\text{CmO}_2$ и $^{244}\text{CmO}_2$ существенно завышало (до 30–50% и более) величины Y_n , особенно при малых выдержках и выгораниях, когда велик вклад ^{242}Cm .

Полученные в настоящей работе данные могут быть использованы при прогнозировании ожидаемого уровня нейтронного излучения отработавших твэлов и реакторных кассет реакторов ВВЭР. При этом, естественно, нужно знать распределение выгорания по высоте и диаметру

твэлов и кассет. Следует учитывать также эффект размножения нейтронов, который может заметно увеличить их выход, особенно в случае использования контейнеров из водородсодержащих материалов или с водяным охлаждением, а также при хранении топлива в бассейнах. Установленные зависимости $Y_n(w, t_{\text{выд}})$ могут оказаться полезными и при разработке нейтронных методов пассивного неразрушающего анализа отработавшего ядерного топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габескирия В. Я. и др. «Атомная энергия», 1978, т. 44, вып. 5, с. 446.
2. Макарова Т. П. и др. In: 2 Tagung Nukleare Analysenverfahren (Dresden, 1979). Preprints der Vorträge und Posterbeiträge. Dresden, 1979, S. 242.
3. Шиманская Н. С. Ядерные константы трансактиниевых изотопов топливного цикла. Препринт РИ-70. Л., 1978.
4. Горшков Г. В. и др. Естественный нейтронный фон атмосферы и земли. М., Атомиздат, 1966.
5. Bailey H. e.a. «Nucl. Techn.», 1973, v. 17, N 3, p. 217.
6. Hsue S. «Atomic Energy Rev.», 1978, v. 16, N 1, p. 89.

Поступило в Редакцию 17.12.79

УДК 621.039.52.44

Захват пара в опускном участке контура циркуляции

ПОЛЯНИН Л. Н., ПУТОВ А. Л., ЕФИМОВ А. В.

При определении гидравлических характеристик контура циркуляции реакторов кипящего типа захват пара в опускную ветвь контура принято называть коэффициентом захвата. Он определяется как отношение массового расхода пара через входное сечение опускного участка $G_{\text{п}}^{0,y}$ к полному расходу пара через выходное сечение

подъемного (тягового) участка $G_{\text{п}}^{T,y}$, т. е. $\Psi = G_{\text{п}}^{0,y} / G_{\text{п}}^{T,y} = X_{0,y} / X_{T,y}$, где $X_{0,y}$ и $X_{T,y}$ — соответствующие значения массовых расходных паросодержаний.

На рис. 1 представлена схема контура естественной циркуляции теплоносителя в установках по исследованию захвата пара [1–3]. В зависимости от режима работы