

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goldstein H. In: Pros. Fowrth Intern. Conf. on Reactor Shielding. OECD. Paris, 1973, p. 1332.
2. Oblow E. General Sensitivity Theory for Ratiation Transport. ORNL-TM-4110, 1973.
3. Steinberg H. Correlated Sampling and its Implementation in the SAMCEP code. ORNL-RSIC-33, 1971, p. 161.

4. Болятко В. В. и др. В кн.: Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. Вып. 19. М., Атомиздат, 1980, с. 109.
5. Климанов В. А. и др. Распространение ионизирующих излучений в воздухе. М., «Атомиздат», 1979, с. 27.
6. Maieschein F. Engineering Compendium of Radiation Shielding. V. 1. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, N. Y., 1968, p. 76.

Поступило в Редакцию 11.12.79
В окончательной редакции 23.06.80

УДК 539.12...126.5:621.039.52.44

Энергетические спектры нейтронного излучения отработавшего топлива реактора ВВЭР

ШИМАНСКАЯ Н. С.

Проведенная в работе [1] оценка выходов нейтронов спонтанного деления SF и (αn) -нейтронов для отдельных нуклидов, входящих в состав отработавшего топлива ВВЭР, позволяет вычислить энергетические спектры нейтронного излучения этого топлива.

Известно, что спектры нейтронов спонтанного деления и нейтронов (αn) -реакций обычно весьма существенно различаются. Спектры нейтронов деления примерно одинаковы для всех делящихся нуклидов, имеют максимум при 0,8—1 МэВ и простирающийся до 12—15 МэВ «хвост» распределения. Форма спектров (αn) -нейтронов зависит от энергии α -частиц и расположения энергетических уровней компаунд-ядра и ядра-продукта и может меняться в довольно широких пределах.

Спектр нейтронов (αn) -реакции на кислороде относительно мягкий, его максимум лежит в области 2,5—3,0 МэВ, а верхняя граница не превышает 5 МэВ. Средняя энергия этого спектра ($\bar{E}_n = 2,4 \div 2,8$ МэВ в зависимости от α -нуклида) заметно больше, чем для спектра нейтронов деления. Теоретическая форма спектра, рассчитанная в работе [2] с учетом соотношения парциальных сечений реакции $^{18}\text{O}(\alpha n)^{21}\text{Ne}$ с переходом на основной и первые три возбужденных уровня ^{21}Ne и вклада нейтронов реакции $^{17}\text{O}(\alpha n)^{20}\text{Ne}$, согласуется с экспериментально измеренными нейтронными спектрами для окисных соединений α -излучателей.

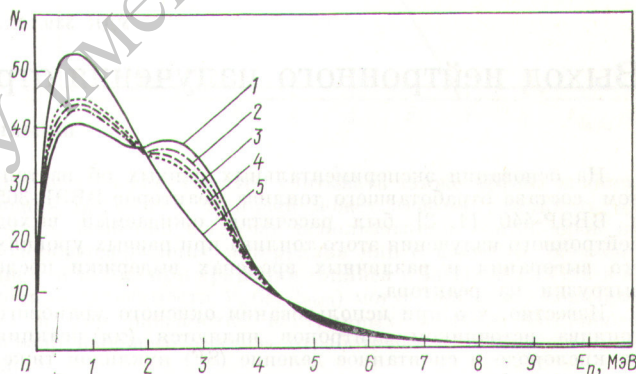
Энергетические спектры нейтронного излучения отработавшего топлива реактора ВВЭР с первоначальным обогащением ^{235}U $\alpha_0^0 = 3\%$ были рассчитаны при разных уровнях его выгорания и различных временах выдержки после выгрузки из реактора. В качестве «опорных» служили спектры нейтронов спонтанного деления ^{240}Pu и ^{244}Cm и спектры нейтронов (αn) -реакций на кислороде при $E_\alpha = 5,49$ МэВ (^{238}Pu), $E_\alpha = 5,80$ МэВ (^{244}Cm) и $E_\alpha = 6,10$ МэВ (^{242}Cm). Расчеты проводили с использованием экспериментальных данных об изотопном составе отработавшего топлива реакторов ВВЭР-365 и ВВЭР-440 [3, 4].

Расчеты показали, что энергетические спектры нейтронов отработавшего UO_2 -топлива заметно меняются по ме-

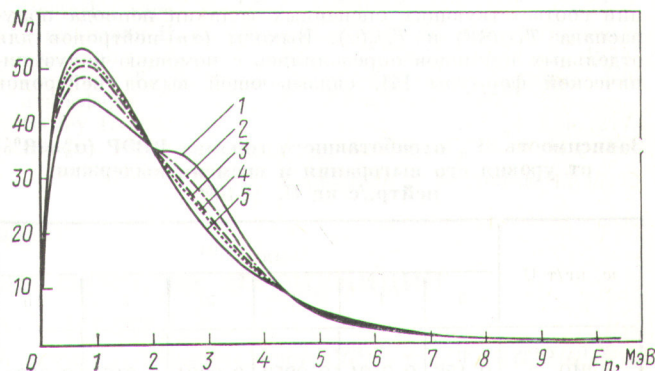
Зависимость $Y_n^{(\text{SF})}$ и $Y_n^{(\alpha n)}$ от времени выдержки отработавшего топлива

$t_{\text{выд}}$, годы	$Y_n^{(\text{SF})}$, %	$Y_n^{(\alpha n)}$, %	$t_{\text{выд}}$, годы	$Y_n^{(\text{SF})}$, %	$Y_n^{(\alpha n)}$, %
0	83,0	17,0	3	96,2	3,8
1	90,3	9,7	5	96,0	4,0
2	94,9	5,1	10	95,6	4,4

ре увеличения его выгорания. На рис. 1 приведены нормированные спектры нейтронного излучения топлива с $\alpha_0^0 = 3\%$ и выгоранием $w = 10 \div 35$ кг/т U. Видно, что при увеличении глубины выгорания спектр нейтронов «смягчается» и его форма приближается к форме спектра нейтронов деления. Это связано с ростом относительного



Р и с. 1. Энергетические спектры нейтронного излучения отработавшего топлива ВВЭР ($\alpha_0^0 = 3\%$) при разных уровнях его выгорания w , кг/т U: 1 — 10 ($\bar{E}_n = 2,19$ МэВ); 2 — 20 ($\bar{E}_n = 2,17$ МэВ); 3 — 30 ($\bar{E}_n = 2,14$ МэВ); 4 — 35 ($\bar{E}_n = 2,13$ МэВ); 5 — спектр нейтронов деления ^{244}Cm ($\bar{E}_n = 2,03$ МэВ)



Р и с. 2. Изменение энергетического спектра нейтронного излучения отработавшего топлива ВВЭР ($\alpha_0^0 = 3\%$, $w = 30$ кг/тU) в зависимости от $t_{\text{выд}}$, годы: 1 — 0 ($\bar{E}_n = 2,14$ МэВ); 2 — 1 ($\bar{E}_n = 2,10$ МэВ); 3 — 2 ($\bar{E}_n = 2,07$ МэВ); 4 — 3 ($\bar{E}_n = 2,04$ МэВ); 5 — спектр нейтронов деления ^{244}Cm ($\bar{E}_n = 2,03$ МэВ)

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 относительных выходов нейтронов (αn) -реакции, 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], относятся к двум различным значениям выгорания UO_2 -топлива и $t_{\text{выд}}=163$ сут, рассчитывались с исполь-

зованием неверных значений удельных выходов (αn) -нейтронов для $^{242}\text{CmO}_2$ и $^{244}\text{CmO}_2$, в результате чего область энергий 2—4 МэВ, соответствующая нейтронам (αn) -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) -реакция 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}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 оценочных величин периода полураспада $T_{1/2}(\text{SF})$ и $T_{1/2}(\alpha)$. Выходы (αn) -нейтронов для отдельных нуклидов определялись с помощью полумпирической формулы [4], связывающей выход нейтронов

Зависимость Y_n отработавшего топлива ВВЭР ($\alpha_0=3\%$) 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

(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 свежизвлеченного топлива ($t_{\text{выд}}=0$) соответствует зависимости $Y_n \sim w^3$. 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 нейтрона ^{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-