

**ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА НУКЛИДОВ ПРИ КОНТРОЛЕ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ
ОТРАБОТАВШИХ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК РБМК-1000**

© 2011 г. А. А. Кучмагра, О. С. Молчанов, Г. И. Одинокин

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль

Рассмотрены вопросы, связанные с выбором нуклидов, учитываемых в методике контроля глубины выгорания отработавшего ядерного топлива, основанной на методе нейтронной радиометрии. Проанализированы состав источников нейтронов (как при спонтанном делении, так и за счет (α, n) -реакций на кислороде оксидного топлива) отработавших тепловыделяющих сборок РБМК-1000, выход нейтронов каждого нуклида и вклад этого параметра в суммарный выход нейтронов при различных параметрах отработавшего ядерного топлива (глубины выгорания и времени выдержки). На основании проведенного анализа определен оптимальный состав нуклидов, учет которых необходим при контроле глубины выгорания ядерного топлива.

Ключевые слова: отработавшее ядерное топливо, контроль глубины выгорания, выход нейтронов, спонтанное деление, α -активность нуклидов.

Контроль глубины выгорания (далее – выгорание) ядерного топлива отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) при загрузке их на хранение, целесообразность которого обоснована в ряде работ (например, [1, 2]), основан на методе нейтронной радиометрии [1], предусматривающем определение суммарного выхода нейтронов в единицу времени (далее – выход нейтронов), испускаемых ОТВС. Обоснованность выбора для контроля выгорания метода нейтронной радиометрии приведена в [2].

При контроле выгорания ОТВС используется статистический ансамбль данных предыдущих измерений выхода нейтронов от ОТВС. Информационной характеристикой выхода нейтронов является измеряемая техническими средствами скорость счета нейтронов (ССН). При этом в методике контроля глубины выгорания возникает задача корректировки ССН от каждой ОТВС, полученной на момент ее измерения, на одно и то же время выдержки (как правило, это либо момент выгрузки ОТВС из реактора, либо время выдержки контролируемой ОТВС). Эта задача решается просто при известном нуклидном составе, определяющем общий выход нейтронов каждой ОТВС, путем пересчета выхода нейтронов от каждого нуклида по закону его радиоактивного распада.

Значительный опыт по контролю выгорания накоплен в процессе эксплуатации сухого хранилища отработавшего ядерного топлива (СХОЯТ) ЗАЭС. Этот опыт представляет большой интерес и его целесообразно использовать при разработке общих методических подходов контроля выгорания. Однако метод выбора учитываемых при этом нуклидов в общем случае, например для ОТВС РБМК-1000, не может быть принят, так как выгорание всех контролируемых на ЗАЭС ОТВС превышает 14 МВт·сут/кг урана, а время выдержки лежит в диапазоне 5÷10 лет [3]. При таких условиях подавляющий вклад (более 95 %) в выход нейтронов дает только один нуклид – ^{244}Cm . И выбор нуклидов, используемых для контроля выгорания, можно ограничить только этим нуклидом (что и делается на ЗАЭС). В общем случае значения как выгорания, так и выдержки для отдельных ОТВС могут выходить за указанные диапазоны, и в этом случае соизмеримый с ^{244}Cm вклад вносят и другие нуклиды (например, при малых выгораниях – некоторые изотопы плутония, а при больших выдержках – ^{241}Am за счет его накопления в результате β -распада ^{241}Pu). В частности, минимальное выгорание отдельных ОТВС, находящихся в ХОЯТ-1 ЧАЭС, составляет менее 1 МВт·сут/кг урана, а максимальная выдержка – 30 лет. Это приводит к существенным трудностям, так как указанная выше задача пересчета ССН на другие моменты времени при неизвестном изотопном составе контролируемой ОТВС не представляется возможным. На ЗАЭС в методике контроля выгорания учитывается только один изотоп ^{244}Cm , пересчет ССН осуществляется

по закону распада этого изотопа. Поэтому при разработке методики контроля выгорания применительно к ЧАЭС необходимо искать другой методический подход, отличный от применяемого на ЗАЭС, учитывающий определенный состав нуклидов - источников нейтронов отработавшего ядерного топлива (ОЯТ).

Казалось бы, для точного расчета выхода нейтронов от каждой ОТВС необходимо учитывать все нуклиды, являющиеся источниками нейтронов. Однако учет нуклидов, дающих незначительный вклад в общую эмиссию нейтронов помимо громоздкости расчетов, может приводить при пересчете на более короткие времена выдержки к существенным дополнительным погрешностям. Дело в том, что неопределенность расчетных значений концентраций нуклидов – источников нейтронов (и, соответственно, их вклад в общий выход нейтронов) в зависимости от выгорания существенно возрастает по мере увеличения их атомного номера (так, относительная погрешность вычисления концентрации ^{239}Pu составляет около 3 %, тогда как ^{244}Cm - около 30 % [1]), и малые по абсолютной, но большие по относительной величине значения погрешности после пересчета могут существенно увеличить общую относительную погрешность, доведя ее до не приемлемого значения. Расчет конкретных значений этих погрешностей не входит в задачу настоящей статьи, однако, хоть и гипотетическое, но вполне реальное предположение о их наличии предполагает целесообразность оптимизации состава нуклидов, учитываемых при контроле выгорания.

Таким образом, указанная выше задача сводится к выбору оптимального состава используемых для контроля выгорания нуклидов, а именно минимального состава нуклидов, обеспечивающего, тем не менее, контроль глубины выгорания с приемлемой достоверностью.

Общая нейтронная эмиссия выгруженного топлива складывается из двух основных составляющих: нейтронов спонтанного деления нуклидов как исходного ядерного топлива (изотопов урана), так и нуклидов, образовавшихся в цепочках деления при облучении ядерного топлива, и вторичных нейтронов, возникающих за счет (α , n)-реакций на кислороде оксидного топлива (имеет место и третья составляющая – нейтроны вынужденного деления, однако в ОТВС РБМК-1000 эта составляющая практически отсутствует, т.е. пренебрежимо мала, и мы ее не рассматриваем). В табл. 1 [4] приведены концентрации (кг/т) основных долгоживущих актиноидов в облученном топливе ТВС реактора РБМК-1000 с обогащением 2 % по ^{235}U для выдержки 0,5 года и 10 лет, а также и для трех значений выгорания в зависимости от режимов облучения ТВС в реакторе:

время облучения 800 сут, выгорание 19,74 МВт·сут/кг урана;
время облучения 1100 сут, выгорание 24,91 МВт·сут/кг урана;
время облучения 1400 сут, выгорание 29,285 МВт·сут/кг урана.

Очевидно, что качественный состав долгоживущих актиноидов такой же и при других параметрах (обогащении, выгорании, выдержке) облученного топлива в ОТВС. Другие нуклиды, образующиеся в ТВС за период кампании реактора, не представляют интереса (в рамках рассматриваемых в настоящей статье задач). Они либо успевают распасться за время даже минимальной выдержки ОТВС (как правило, не менее 5 лет), либо их концентрация пренебрежимо мала, либо они не являются источниками нейтронов.

В настоящей статье представляют интерес не собственно концентрации входящих в состав ОТВС нуклидов, а их вклады в общий выход нейтронов. Определение значений этих вкладов в целом не представляет труда при наличии данных по массовому составу нуклидов, постоянных их распадах, выходу нейтронов на деление (как при спонтанном делении, так и за счет (α , n)-реакций на кислороде оксидного топлива при α -распаде). Однако определенную трудность (хоть и решаемую) в отбор представляющих интерес нуклидов вносит возможное накопление в процессе выдержки ОТВС дополнительных (дочерних) нуклидов за счет цепочек распада отдельных материнских нуклидов в ОЯТ (например, накопления ^{241}Am за счет β -распада изотопа ^{241}Pu и ^{238}Pu за счет α -распада ^{242}Cm).

Таблица 1. Концентрация (кг/т) основных актиноидов в ОТВС РБМК-1000 с начальным обогащением 2,0 %

Изотоп	Время выдержки 0,5 года			Время выдержки 10 лет		
	Глубина выгорания, МВт·сут/кг урана			Глубина выгорания, МВт·сут/кг урана		
	19,74	24,91	29,29	19,74	24,91	29,29
U ²³⁸	9,66·10 ²	9,62·10 ²	9,58·10 ²	9,66·10 ²	9,62·10 ²	9,58·10 ²
U ²³⁵	4,91	2,94	1,78	4,91	2,94	1,78
Pu ²³⁹	2,83	2,63	2,46	2,83	2,63	2,46
U ²³⁶	2,35	2,61	2,71	2,35	2,61	2,71
Pu ²⁴⁰	1,81	2,19	2,42	1,81	2,19	2,42
Pu ²⁴¹	6,22·10 ⁻¹	7,13·10 ⁻¹	7,47·10 ⁻¹	3,95·10 ⁻¹	4,53·10 ⁻¹	4,75·10 ⁻¹
Pu ²⁴²	2,87·10 ⁻¹	5,08·10 ⁻¹	7,37·10 ⁻¹	2,87·10 ⁻¹	5,08·10 ⁻¹	7,37·10 ⁻¹
Pu ²³⁸	3,96·10 ⁻²	6,81·10 ⁻²	9,58·10 ⁻²	3,97·10 ⁻²	6,84·10 ⁻²	9,49·10 ⁻²
Am ²⁴³	3,36·10 ⁻²	7,38·10 ⁻²	1,24·10 ⁻¹	3,36·10 ⁻²	7,38·10 ⁻²	1,24·10 ⁻¹
Am ²⁴¹	2,83·10 ⁻²	3,57·10 ⁻²	3,95·10 ⁻²	2,53·10 ⁻¹	2,93·10 ⁻¹	3,09·10 ⁻¹
Cm ²⁴²	3,19·10 ⁻³	5,21·10 ⁻³	6,58·10 ⁻³	5,62·10 ⁻⁷	7,90·10 ⁻⁷	9,21·10 ⁻⁷
Cm ²⁴⁴	2,69·10 ⁻³	8,15·10 ⁻³	1,73·10 ⁻²	1,87·10 ⁻³	5,66·10 ⁻³	1,20·10 ⁻²
Am ^{242m}	2,41·10 ⁻⁴	3,38·10 ⁻⁴	3,94·10 ⁻⁴	2,30·10 ⁻⁴	3,24·10 ⁻⁴	3,77·10 ⁻⁴
Cm ²⁴³	1,00·10 ⁻⁴	2,06·10 ⁻⁴	2,99·10 ⁻⁴	7,97·10 ⁻⁵	1,63·10 ⁻⁴	2,38·10 ⁻⁴
Cm ²⁴⁵	6,11·10 ⁻⁵	1,95·10 ⁻⁴	4,13·10 ⁻⁴	6,11·10 ⁻⁵	1,95·10 ⁻⁴	4,13·10 ⁻⁴
Cm ²⁴⁶	8,60·10 ⁻⁶	4,37·10 ⁻⁵	1,29·10 ⁻⁴	8,60·10 ⁻⁶	4,37·10 ⁻⁵	1,29·10 ⁻⁴
Pu ²⁴⁴	4,56·10 ⁻⁶	1,09·10 ⁻⁵	1,99·10 ⁻⁵	4,56·10 ⁻⁶	1,09·10 ⁻⁵	1,99·10 ⁻⁵
Cm ²⁴⁷	4,71·10 ⁻⁸	3,12·10 ⁻⁷	1,11·10 ⁻⁶	4,71·10 ⁻⁸	3,12·10 ⁻⁷	1,11·10 ⁻⁶
Am ²⁴²	2,88·10 ⁻⁹	4,05·10 ⁻⁹	4,72·10 ⁻⁹	2,76·10 ⁻⁹	3,88·10 ⁻⁹	4,52·10 ⁻⁹
Cm ²⁴⁸	1,66·10 ⁻⁹	1,55·10 ⁻⁸	7,12·10 ⁻⁸	1,66·10 ⁻⁹	1,55·10 ⁻⁸	7,12·10 ⁻⁸

Для выбора нуклидов, учитываемых при контроле выгорания, необходим расчет выхода нейтронов всех индуцирующих (прямо или косвенно) нейтроны нуклидов, наработанных в ТВС за время кампании реактора, и выбор из них тех нуклидов (в порядке убывания вклада в общий для ТВС выход нейтронов), суммарный выход нейтронов которых составляет, к примеру, 95 % общего выхода нейтронов.

В табл. 2 представлены данные по удельному выходу нейтронов (с⁻¹·кг⁻¹) при спонтанном делении и за счет (α, n)-реакций [6] (в скобках даны соответствующие периоды полураспадов), а также суммарный удельный выход нейтронов.

Используя данные табл. 1, суммарный удельный выход нейтронов из табл. 2, рассчитаем, в качестве примера, выход нейтронов в ОТВС РБМК-1000 от каждого нуклида и их процентный вклад в суммарный выход нейтронов (учитывая, что начальная масса урана в ТВС составляет 114,7 кг). Результаты расчетов приведены в табл. 3, в которой, как и в табл. 1, данные представлены для трех значений выгорания (в соответствии с режимами облучения ТВС) и при двух значениях выдержки - 0,5 года и 10 лет.

Анализ представленных в табл. 3 результатов расчета показывает, что основной вклад в выход нейтронов дают изотопы ²⁴⁴Cm и (на начальном этапе выдержки) ²⁴²Cm, причем при больших выгораниях вклад ²⁴⁴Cm превосходит вклад ²⁴²Cm даже при малых временах выдержки.

Определенный, хоть и незначительный, вклад дают четные изотопы плутония, ²³⁸U и (при больших выдержках) ²⁴¹Am, вклады которых (как и ²⁴²Cm) растут с уменьшением выгорания и при малых выгораниях могут конкурировать с вкладами изотопов кюрия, особенно при больших выдержках. Кроме того, при отборе необходимых при контроле выгорания

нуклидов необходимо учитывать быстрое накопление ^{238}Pu за счет α -распада ^{242}Cm (на начальном этапе выдержки) и накопление ^{241}Am за счет β -распада ^{241}Pu (особенно при большой выдержке). Для этого дополнительно исследуем вклады в суммарный выход нейтронов пред-

Таблица 2. Выход нейтронов спонтанного деления и (α , n)-реакций

Нуклид	Выход нейтронов спонтанного деления, $\text{с}^{-1}\cdot\text{кг}^{-1}$	Период полураспада спонтанного деления, лет	Выход нейтронов (α , n)-реакции, $\text{с}^{-1}\cdot\text{кг}^{-1}$	Период полураспада для α -распада, лет	Суммарный выход нейтронов, $\text{с}^{-1}\cdot\text{кг}^{-1}$
^{235}U	$2,99\cdot 10^{-1}$	$3,50\cdot 10^{17}$	$7,10\cdot 10^{-1}$	$7,04\cdot 10^8$	1,01
^{234}U	5,02	$2,10\cdot 10^{16}$	$3,00\cdot 10^3$	$2,45\cdot 10^5$	$3,01\cdot 10^3$
^{236}U	5,49	$1,95\cdot 10^{16}$	$2,40\cdot 10^1$	$2,34\cdot 10^7$	$2,95\cdot 10^1$
^{238}U	$1,36\cdot 10^1$	$8,20\cdot 10^{15}$	$8,30\cdot 10^{-2}$	$4,47\cdot 10^9$	$1,37\cdot 10^1$
^{239}Pu	$2,18\cdot 10^1$	$5,48\cdot 10^{15}$	$3,81\cdot 10^4$	$2,41\cdot 10^4$	$3,81\cdot 10^4$
^{241}Pu	$5,00\cdot 10^1$	$2,50\cdot 10^{15}$	$1,30\cdot 10^3$	$5,90\cdot 10^5$	$1,35\cdot 10^3$
^{241}Am	$1,18\cdot 10^3$	$1,05\cdot 10^{14}$	$2,69\cdot 10^6$	$4,34\cdot 10^2$	$2,69\cdot 10^6$
^{240}Pu	$1,02\cdot 10^6$	$1,16\cdot 10^{11}$	$1,41\cdot 10^5$	$6,56\cdot 10^3$	$1,16\cdot 10^6$
^{242}Pu	$1,72\cdot 10^6$	$6,84\cdot 10^{10}$	$2,00\cdot 10^3$	$3,76\cdot 10^5$	$1,72\cdot 10^6$
^{238}Pu	$2,59\cdot 10^6$	$4,77\cdot 10^{10}$	$1,34\cdot 10^7$	$8,77\cdot 10^1$	$1,60\cdot 10^7$
^{244}Cm	$1,08\cdot 10^{10}$	$1,35\cdot 10^7$	$7,73\cdot 10^7$	$1,81\cdot 10^1$	$1,09\cdot 10^{10}$
^{242}Cm	$2,10\cdot 10^{10}$	$6,56\cdot 10^6$	$3,76\cdot 10^9$	$4,45\cdot 10^{-1}$	$2,48\cdot 10^{10}$

Таблица 3. Выход нейтронов ОТВС РБМК-1000

Нуклид	Выход нейтронов, $\text{с}^{-1}/\text{TBC}$			Вклад в суммарный выход нейтронов, %		
	Глубина выгорания, МВт·сут/кг урана			Глубина выгорания, МВт·сут/кг урана		
	19,74	24,91	29,29	19,74	24,91	29,29
Выдержка 0,5 года						
^{235}U	$5,68\cdot 10^{-1}$	$3,40\cdot 10^{-1}$	$2,06\cdot 10^{-1}$	$4,44\cdot 10^{-6}$	$1,33\cdot 10^{-6}$	$5,03\cdot 10^{-7}$
^{236}U	7,95	8,83	9,17	$6,21\cdot 10^{-5}$	$3,46\cdot 10^{-5}$	$2,24\cdot 10^{-5}$
^{241}Pu	$9,63\cdot 10^1$	$1,10\cdot 10^2$	$1,16\cdot 10^2$	$7,52\cdot 10^{-4}$	$4,33\cdot 10^{-4}$	$2,83\cdot 10^{-4}$
^{238}U	$1,52\cdot 10^3$	$1,51\cdot 10^3$	$1,50\cdot 10^3$	$1,18\cdot 10^{-2}$	$5,92\cdot 10^{-3}$	$3,67\cdot 10^{-3}$
^{241}Am	$8,74\cdot 10^3$	$1,10\cdot 10^4$	$1,22\cdot 10^4$	$6,82\cdot 10^{-2}$	$4,32\cdot 10^{-2}$	$2,98\cdot 10^{-2}$
^{239}Pu	$1,24\cdot 10^4$	$1,15\cdot 10^4$	$1,08\cdot 10^4$	$9,66\cdot 10^{-2}$	$4,51\cdot 10^{-2}$	$2,63\cdot 10^{-2}$
^{242}Pu	$5,67\cdot 10^4$	$1,00\cdot 10^5$	$1,46\cdot 10^5$	0,44	0,39	0,36
^{238}Pu	$7,26\cdot 10^4$	$1,25\cdot 10^5$	$1,76\cdot 10^5$	0,57	0,49	0,43
^{240}Pu	$2,41\cdot 10^5$	$2,92\cdot 10^5$	$3,22\cdot 10^5$	1,88	1,14	0,79
^{244}Cm	$3,36\cdot 10^6$	$1,02\cdot 10^7$	$2,16\cdot 10^7$	26,2	39,9	52,7
^{242}Cm	$9,06\cdot 10^6$	$1,48\cdot 10^7$	$1,87\cdot 10^7$	70,7	58,1	45,6
Сумма	$1,28\cdot 10^7$	$2,55\cdot 10^7$	$4,09\cdot 10^7$	100	100	100
Выдержка 10 лет						
^{235}U	$5,68\cdot 10^{-1}$	$3,40\cdot 10^{-1}$	$2,06\cdot 10^{-1}$	$2,03\cdot 10^{-5}$	$4,43\cdot 10^{-6}$	$1,31\cdot 10^{-6}$
^{236}U	7,95	8,83	9,17	$2,84\cdot 10^{-4}$	$1,15\cdot 10^{-4}$	$5,83\cdot 10^{-5}$
^{241}Pu	$6,12\cdot 10^1$	$7,01\cdot 10^1$	$7,36\cdot 10^1$	$2,19\cdot 10^{-3}$	$9,13\cdot 10^{-4}$	$4,68\cdot 10^{-4}$
^{238}U	$1,52\cdot 10^3$	$1,51\cdot 10^3$	$1,50\cdot 10^3$	$5,42\cdot 10^{-2}$	$1,96\cdot 10^{-2}$	$9,56\cdot 10^{-3}$
^{241}Am	$7,81\cdot 10^4$	$9,04\cdot 10^4$	$9,54\cdot 10^4$	2,79	1,18	0,61
^{239}Pu	$1,24\cdot 10^4$	$1,15\cdot 10^4$	$1,08\cdot 10^4$	0,44	0,15	0,07
^{242}Pu	$5,67\cdot 10^4$	$1,00\cdot 10^5$	$1,46\cdot 10^5$	2,03	1,31	0,93
^{238}Pu	$7,28\cdot 10^4$	$1,25\cdot 10^5$	$1,74\cdot 10^5$	2,60	1,63	1,11
^{240}Pu	$2,41\cdot 10^5$	$2,92\cdot 10^5$	$3,22\cdot 10^5$	8,62	3,79	2,05
^{244}Cm	$2,33\cdot 10^6$	$7,06\cdot 10^6$	$1,50\cdot 10^7$	83,4	91,9	95,2
^{242}Cm	$1,60\cdot 10^3$	$2,24\cdot 10^3$	$2,62\cdot 10^3$	$5,71\cdot 10^{-2}$	$2,92\cdot 10^{-2}$	$1,66\cdot 10^{-2}$

Сумма	$2,8 \cdot 10^6$	$7,68 \cdot 10^6$	$1,57 \cdot 10^7$	100	100	100
-------	------------------	-------------------	-------------------	-----	-----	-----

представленных в табл. 3 нуклидов при малом выгорании и при большой выдержке, используя данные, представленные ЧАЭС по ОТВС с наименьшим выгоранием (ОТВС № 4.24.61619.97, обогащение 2,4 %, выдержка 8 лет, выгорание 93 МВт·сут/ТВС = 0,81 МВт·сут/кг урана) и ОТВС с наибольшей выдержкой (ОТВС № Р-1372.10.76, обогащение 1,8 %, выдержка 29 лет, выгорание 1201 МВт·сут/ТВС = 10,47 МВт·сут/кг урана).

Следует отметить, что минимальная выдержка всех имеющихся на ЧАЭС и предназначенных для контроля ОТВС составляет 8 лет. При такой выдержке процесс накопления ^{238}Pu за счет α -распада ^{242}Cm практически завершен, и концентрация самого ^{242}Cm , как следует из представленных данных по всем ОТВС, пренебрежимо мала (см. табл. 2). Поэтому нуклид ^{242}Cm в дальнейшем не рассматривается. В табл. 4 представлены данные и результаты расчета вкладов в общий выход нейтронов рассматриваемых нуклидов для указанных ОТВС. В столбцах под графой (1) представлены данные для ОТВС № 4.24.61619.97, под графой (2) – для ОТВС № Р-1372.10.76.

Таблица 4. Результаты расчетов для ОТВС № 4.24.61619.97 (1) и ОТВС № Р-1372.10.76 (2)

Нуклид	Содержание, г/ТВС		Выход нейтронов, $\text{с}^{-1}/\text{ТВС}$		Вклад в суммарный выход нейтронов, %	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
^{241}Am	$1,42 \cdot 10^{-2}$	$2,19 \cdot 10^1$	$3,83 \cdot 10^1$	$5,90 \cdot 10^4$	0,8	19,9
^{244}Cm	$3,67 \cdot 10^{-9}$	$7,15 \cdot 10^{-3}$	$4,00 \cdot 10^{-2}$	$7,78 \cdot 10^4$	0,0008	26,2
^{238}Pu	$1,70 \cdot 10^{-3}$	$7,04 \cdot 10^{-1}$	$2,72 \cdot 10^1$	$1,13 \cdot 10^4$	0,6	3,8
^{239}Pu	$4,55 \cdot 10^1$	$2,76 \cdot 10^2$	$1,74 \cdot 10^3$	$1,05 \cdot 10^4$	36,6	3,5
^{240}Pu	1,17	$1,07 \cdot 10^2$	$1,36 \cdot 10^3$	$1,25 \cdot 10^5$	28,6	42,0
^{241}Pu	$2,76 \cdot 10^{-2}$	5,99	$3,72 \cdot 10^{-2}$	8,38	0,0008	0,003
^{242}Pu	$4,50 \cdot 10^{-4}$	6,75	$7,74 \cdot 10^{-1}$	$1,16 \cdot 10^4$	0,02	3,9
^{234}U	$1,79 \cdot 10^1$	$1,49 \cdot 10^1$	$5,37 \cdot 10^1$	$4,49 \cdot 10^1$	1,1	0,02
^{238}U	$1,12 \cdot 10^5$	$1,10 \cdot 10^5$	$1,53 \cdot 10^3$	$1,51 \cdot 10^3$	32,3	0,5

Как видно из табл. 4, при малых выгораниях основной вклад в выход нейтронов дает ^{238}U , что связано с малой наработкой остальных источников нейтронов. При больших выдержках преимущество имеют долгоживущие нуклиды (с учетом их массовых долей) ^{242}Pu , ^{240}Pu и ^{244}Cm , а также ^{241}Am , в достаточных количествах накопленный за счет β -распада ^{241}Pu .

В общем случае при всех рассмотренных вариантах подавляющий вклад в суммарный выход нейтронов дают нуклиды ^{244}Cm , ^{240}Pu . Причем при больших выгораниях преобладает вклад ^{244}Cm (более 75 % при глубине выгорания больше 17 МВт·сут/кг урана). При выгорании меньше 10 МВт·сут/кг урана более 50 % суммарного выхода нейтронов дает ^{240}Pu . При малых выгораниях (до 5 МВт·сут/кг урана) наряду с ^{240}Pu существенный вклад дают изотопы ^{238}U и ^{239}Pu . Вклад ^{241}Am особенно ощутим при больших временах выдержки. Некоторый вклад в суммарный выход нейтронов дают нуклиды ^{238}Pu и ^{242}Pu , однако их общий вклад не превышает 8 %.

На рис. 1 показаны графики зависимости выхода нейтронов отдельных нуклидов и суммарного выхода нейтронов от глубины выгорания для ОТВС с начальным обогащением 2,4 % и со временем выдержки 8 лет.

На рис. 2 показан относительный вклад каждого нуклида в суммарный выход нейтронов в зависимости от выгорания для той же выборки ОТВС.

Анализ этих данных и сравнение их с приведенными выше справочными данными

указывает на качественное совпадение распределений выхода нейтронов по нуклидам. Количественное различие этих показателей объясняется различными значениями как выгораний, так и выдержек конкретных ОТВС.

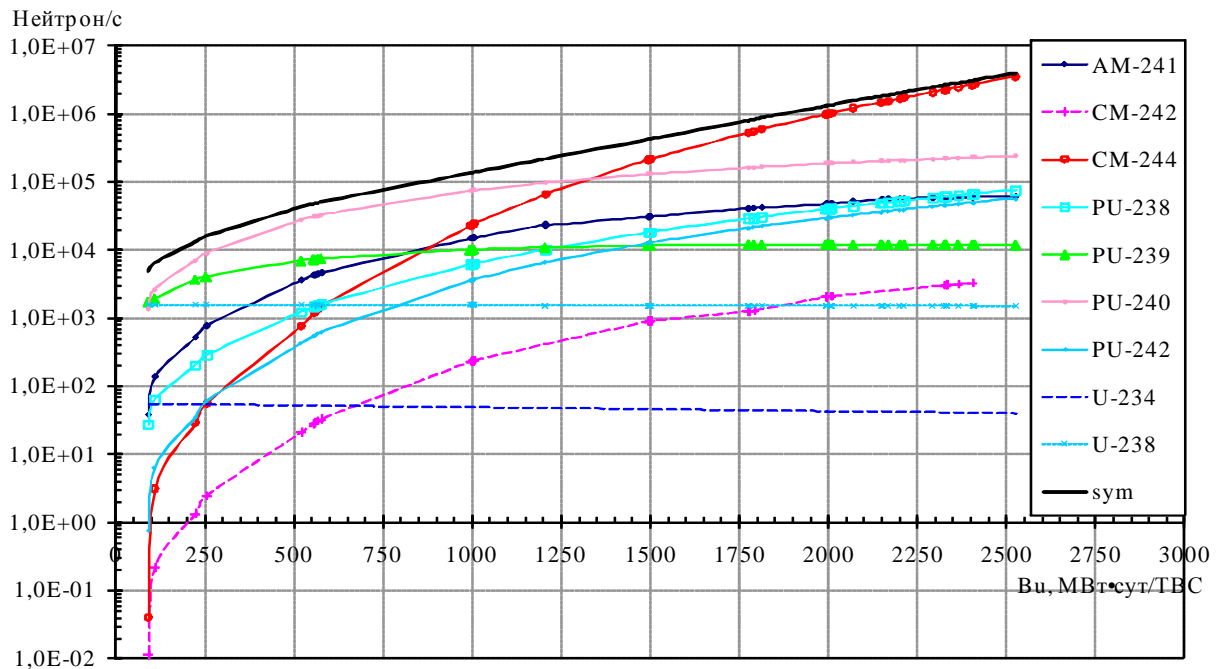


Рис. 1. Зависимость выхода нейтронов основных нуклидов ОТВС с начальным обогащением 2,4 % и временем выдержки 8 лет от глубины выгорания.

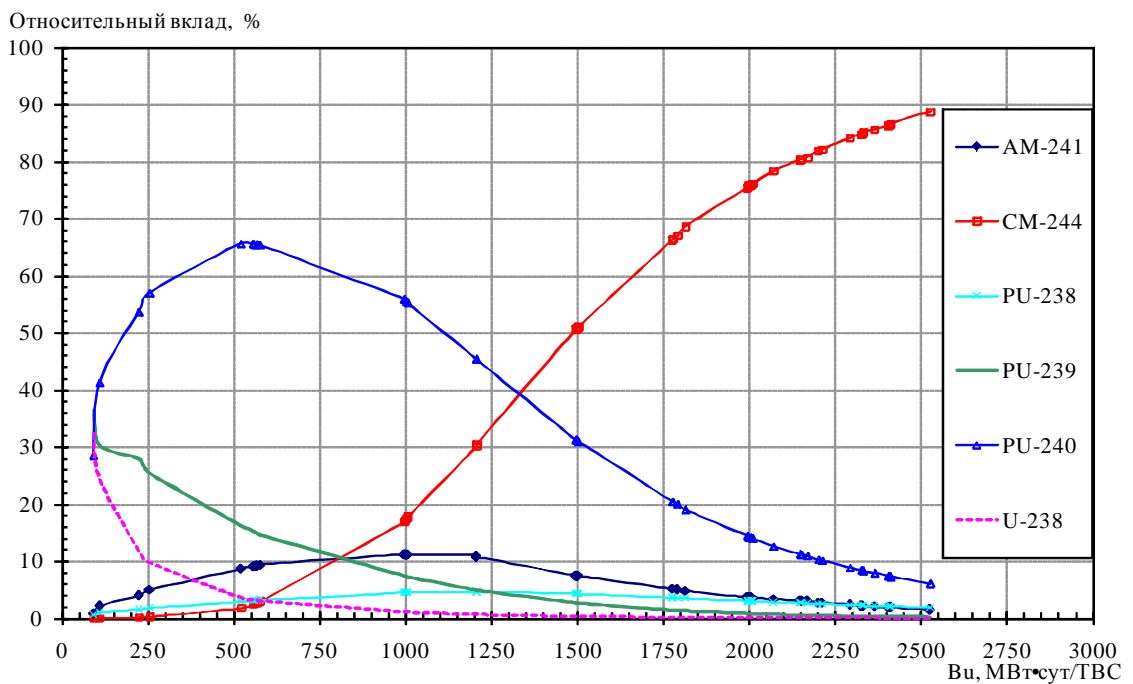


Рис. 2. Относительный вклад наиболее нейтронно-активных нуклидов в суммарный выход нейтронов ОТВС РБМК-1000 с начальным обогащением 2,4 % в зависимости от глубины выгорания.

По рассмотренным материалам можно сделать следующие выводы:
 в методике контроля глубины выгорания вполне достаточно учитывать только нуклиды ^{244}Cm , ^{240}Pu , ^{239}Pu , ^{238}Pu , ^{238}U и ^{241}Am ;
 при больших выдержках необходимо иметь информацию о массовой доле ^{241}Pu , явля-

ющегося материнским нуклидом для ^{241}Am .

Авторы выражают благодарность коллективу отдела ядерной безопасности ЧАЭС за предоставленную информацию для подготовки данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов В. В. Ядерно-физические методы контроля делящихся веществ. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 185 с.
2. Кучмагра А. А., Молчанов О. С., Одинокин Г. И. и др. Учет глубины выгорания отработавшего ядерного топлива при эксплуатации сухого хранилища на Запорожской АЭС // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2008. – Вип. 10. – С. 20 – 31.
3. Отчет по анализу безопасности сухого хранилища отработавшего ядерного топлива Запорожской АЭС. Версия 02.
4. Колобашкин В. М., Рубцов П. М., Рушанский П. А., Сидоренко В. Д. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива: Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1983.
5. Коренков А. Г., Макарова Т. П., Степанов А. В. и др. Определение нейтронной эмиссии отработавшего топлива РБМК по результатам разрушающего анализа // Атомная энергия. - Октябрь 2002. - Т. 93, вып. 4.
6. Дуглас Д., Энслин Н., Смит Х, Крайнер С.. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов; Пер. с англ. – М.: Бином, 2000.– 703с.

ОБГРУНТУВАННЯ ПЕРЕЛІКУ НУКЛІДІВ ЩОДО КОНТРОЛЮ ГЛИБИНИ ВИГОРЯННЯ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА РВПК-1000

О. А. Кучмагра, О. С. Молчанов, Г. І. Одинокін

Розглянуто питання, пов'язані з вибором нуклідів, що враховуються в методиці контролю глибини вигорання відпрацьованого ядерного палива, заснованої на методі нейтронної радіометрії. Проаналізовано склад джерел нейтронів (як при спонтанному поділі, так і за рахунок (α, n) -реакцій на кисні оксидного палива) відпрацьованих тепловиділяючих збірок, вихід нейтронів кожного нукліда і внесок цього параметра в його загальне значення при різних параметрах відпрацьованого палива (глибини вигорання та часу витримки). На підставі аналізу визначено оптимальний склад нуклідів, облік яких необхідний при контролі глибини вигорання ядерного палива.

Ключові слова: відпрацьоване ядерне паливо, глибина вигорання, вихід нейтронів, α -активність.

THE CHOICE OF NUCLIDES FOR BURNUP ACCOUNTING AT THE SPENT FUEL RBPB-1000

O. A. Kuchmagra, O. S. Molchanov, G. I. Odinokin

Composition of sources of neutrons (both at the spontaneous division and due to (α, n) - reaction on oxygen of oxide fuel) of the spent fuel assemblies, speeds of emission of neutrons of every nuclide is analysed . The choice of nuclides for burnup accounting at the spent fuel assemblies is grounded.

Keywords: spent fuel, burnup accounting, emission of neutrons, α -activity.

Поступила в редакцію 13.01.11