

Определение изотопного состава отработавшего топлива реакторов РБМК для последующего анализа ядерной безопасности с учетом выгорания топлива

В настоящее время для промежуточного хранения топлива, выгружаемого или уже выгруженного с энергоблоков Чернобыльской АЭС, используется стационарное хранилище «мокрого» типа ХОЯТ-1. Результаты предварительного анализа критичности ХОЯТ-1 показали необходимость использования при анализе ядерной безопасности в качестве параметра безопасности выгорания топлива *“burnup credit principle”*. В работе приведены результаты отбора и тестирования расчетных кодов для определения изотопного состава отработавшего топлива реакторов РБМК. Проведен анализ и сделаны выводы относительно способов консервативного учета влияния эксплуатационных характеристик выгорания топлива при последующем анализе ядерной безопасности ХОЯТ-1 с учетом выгорания топлива.

Ключевые слова: хранение отработавшего топлива, изотопный состав, реактор РБМК.

Ю. П. Ковбасенко, М. Л. Еременко

Визначення ізотопного складу відпрацьованого палива реакторів РБМК для подальшого аналізу ядерної безпеки з урахуванням вигорання палива

На теперішній час для проміжного зберігання палива, що вивантажується або вже вивантажено з енергоблоків Чернобыльської АЕС, використовується станційне сховище «мокрого» типу СВЯП-1. Результати попереднього аналізу критичності СВЯП-1 показали необхідність використання в процесі аналізу ядерної безпеки за параметр безпеки вигорання палива *“burnup credit principle”*. В роботі наведено результати відбору та тестування розрахункових кодів для визначення ізотопного складу відпрацьованого палива реакторів РБМК. Проаналізовано способи консервативного врахування впливу експлуатаційних характеристик вигорання палива в подальшому аналізі ядерної безпеки СВЯП-1 з урахуванням вигорання палива.

Ключові слова: зберігання відпрацьованого палива, ізотопний склад, реактор РБМК.

© Ю. П. Ковбасенко, М. Л. Еременко, 2011

Энергоблоки №№ 1, 2 и 3 Чернобыльской АЭС находятся в остановленном состоянии после решения правительства Украины о досрочном прекращении их эксплуатации. Для промежуточного хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), выгружаемого с блоков Чернобыльской АЭС, используется стационарное хранилище «мокрого» типа ХОЯТ-1.

Как правило, при анализе ядерной безопасности систем обращения с отработавшим топливом его выгорание не учитывается, т. е. топливо рассматривается как свежее. Такой подход является наиболее простым и консервативным, однако приводит к значительному завышению результатов оценки критичности рассматриваемых систем. Представленные в [1] результаты анализа критичности ХОЯТ-1 при оптимальных условиях замедления нейтронов и в некоторых аварийных ситуациях, предусмотренных требованиями нормативных документов Украины [2], показали необходимость учета выгорания топлива как параметра безопасности. Такой подход, хорошо известный как *“burnup credit principle”*, широко используется в настоящее время в международной практике ([3]–[5] и др.) при анализе критичности систем транспортировки и промежуточного хранения отработавшего топлива.

На первом этапе работ по использованию выгорания в качестве параметра безопасности, как это принято при использовании *“burnup credit principle”*, были собраны и проанализированы экспериментальные и расчетные данные по изотопному составу отработавшего топлива РБМК, а также выбраны и протестированы компьютерные программы, предназначенные для определения изотопного состава этого топлива. Затем было проанализировано влияние условий эксплуатации топлива на изменение концентраций отдельных изотопов. Цель этого анализа (анализа чувствительности) — обеспечить условия соблюдения необходимого уровня консерватизма в последующих расчетах критичности при обосновании ядерной безопасности ХОЯТ-1 с учетом выгорания топлива.

Параметры топливных кассет реактора РБМК-1000. На хранении в ХОЯТ-1 находятся или планируются к размещению два основных типа топливных сборок: штатная тепловыделяющая сборка (ТВС) и тепловыделяющая сборка с регенерированным топливом (ТВС РТ).

Геометрические и материальные параметры ТВС и ТВС РТ, которые использовались в расчетах, соответствуют данным, приведенным в [6]–[8]:

Активная длина топлива в сегменте (высота столба топливных таблеток в холодном состоянии), мм	3460
Таблетка	UO ₂
Обогащение ТВС по ²³⁵ U, %	1,8; 2,0; 2,4±0,05
Внешний радиус таблетки, см	0,575
Длина твэла, м	3,64
Оболочка твэла:	
внутренний/ внешний радиус, см	0,5975 / 0,68
плотность, г/см ³	6,45157
состав, % масс.	Zr — 98,97, Nb — 1, Hf — 0,03
Центральная труба:	
внутренний/ внешний радиус, см	0,625 / 0,75
плотность, г/см ³	6,45157
состав, % масс.	Zr — 97,47, Nb — 2,5, Hf — 0,03

Штатная ТВС и ТВС РТ:

количество сегментов	2
количество твэлов в сегмента	18
общая длина, м	10,015
общая масса стали/ циркония, кг	114,7±1,6
масса урана в ТВС РТ, кг	принимается, что при той же массе урана (114,7 кг) в све- жей ТВС РТ находится 500 г ²³⁶ U и допол- нительно 100 г ²³⁵ U

Дистанционирующая решетка:

состав	сталь
общая масса решеток, кг	1,22

Изображение ТВС и ТВС РТ реактора РБМК-1000 и их основных элементов показаны на рис. 1.

Перечень изотопов и экспериментальные данные. Приступая к вычислению изотопного состава ОЯТ, необходимо определить, какие изотопы из того огромного количества, которые появляются в ОЯТ вследствие цепной реакции (почти весь состав таблицы Менделеева), наиболее значимы с точки зрения учета ядерноопасных материалов и оценки размножающих свойств систем хранения ($K_{эф}$).

Перечень изотопов для анализа критичности систем хранения отработавшего топлива с применением принципа “burn-up credit” определяется на основании данных валидации программ расчета нуклидного состава отработавшего топлива. Учитываются только те изотопы, достоверность расчета концентрации которых получила подтверждение на основе сравнения с экспериментальными данными.

Для тестирования расчетных кодов были выбраны экспериментальные данные, приведенные в [9] для 10 ТВС РБМК с Ленинградской АЭС. Определялись концентрации топливных изотопов, актинидов и некоторых продуктов деления.

Начальное обогащение ТВС РБМК составляет, %: 1,8, 2,0 (штатные кассеты), 2,02, 2,09 (тепловыделяющая сборка с регенерированным топливом). ТВС РБМК были выгружены из активной зоны в 1976—1989 годах. Отобранные кассеты отработали от одного до пяти лет. Определен изотопный состав 41 образца с разными уровнями выгорания и разным положением по высоте кассеты, что важно с точки зрения неоднородного состава активной зоны реактора РБМК в аксиальном направлении (плотность теплоносителя, температура замедлителя и т. д.).

В работе [9] проведена классификация образцов с точки зрения достоверности полученных данных и возможности их использования для сравнения с результатами расчета. Часть образцов рекомендована для тестирования программ, часть образцов следует использовать с осторожностью, результаты по одному образцу признаны ошибочными.

Погрешность измерений (приблизительно 1÷7 %) указана для каждого значения выгорания и концентрации изотопа.

Условия выгорания топлива и его дальнейшей выдержки не известны. В расчетах принималось, что выгорание топлива происходило на номинальном уровне мощности реактора.

Приведенная информация касается концентрации топливных изотопов и актинидов в отработавшем топливе. Информация относительно концентрации продуктов деления содержится в недостаточном объеме. Поэтому для дальнейшего анализа мы ограничились следующими топливными изотопами и актинидами: ²³⁴U, ²³⁵U, ²³⁶U, ²³⁸U, ²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu, ²⁴¹Pu, ²⁴²Pu, ²³⁷Np, ²⁴³Am, ²⁴²Cm, ²⁴⁴Cm.

Описание программ и расчетных моделей. Топливо реактора РБМК достаточно сложное с точки зрения разработки геометрической модели, что обусловлено:

а) наличием двух замедлителей. Топливная кассета РБМК (рис. 1) расположена в центре графитового блока (рис. 2). Расстояние между кассетами довольно большое и намного больше, чем между топливными стержнями. В канале, где расположена кассета, также есть вода, точнее пароводяная смесь с разной плотностью по высоте канала;

б) нерегулярным расположением топливных стержней в кассете. Стержни расположены по двум кольцам (рис. 1);

в) наличием в топливной ячейке конструктивных элементов — центральной трубы и трубы канала, в которой расположена кассета.

На первом этапе для проведения сравнительного анализа и выбора наиболее подходящего для решения поставленной задачи программного продукта выполнено тестирование отобранных программ на основе данных, приведенных в [9]. Для определения изотопного состава отработавших сборок РБМК были отобраны американский пакет программ SCALE и программа HELIOS компании SCANDPOWER.

Структурно пакет программ SCALE состоит из расчетных модулей, объединяющих программы, необходимые для решения той или иной расчетной задачи (анализ критичности, радиационной безопасности, теплопередачи, распределения изотопного состава в зависимости от выгорания). Наиболее полное описание программ, которые входят в состав пакета программ SCALE, приведено в [12].

Пакет программ SCALE разработан и валидирован, в первую очередь, для расчета топливных систем реакторов типа PWR и BWR. В последние годы этот пакет начал широко использоваться для моделирования систем обращения с топливом реакторов ВВЭР и РБМК. Вопрос применимости пакета SCALE и его библиотек нейтронно-физических констант для моделирования систем обращения с топливом реакторов ВВЭР и РБМК рассмотрен в работе [14].

Для расчета изотопного состава отработавшего топлива в зависимости от выгорания в использовался расчетный модуль TRITON пакета программ SCALE [13], который позволяет моделировать процессы выгорания топлива в сложных двумерных геометриях.

Код HELIOS [10], [11] предназначен для выполнения расчетов пространственно-энергетического распределения плотности потока нейтронов в транспортном приближении для ячейки (это может быть в случае ВВЭР-1000 тепловыделяющая сборка, в случае РБМК-1000 — тепловыделяющая сборка и графитовый замедлитель) ядерного реактора. Расчет ячейки выполняется в двумерной геометрии, что позволяет адекватно отражать геометрию и состав сборки (ячейки) в поперечном сечении (учитывается местоположение различных компонентов сборки: центральной трубы; тепловыделяющих элементов различного обогащения; тепловыделяющих элементов, содержащих выгорающий поглотитель различной концентрации; трубы топливного канала и т. д.).

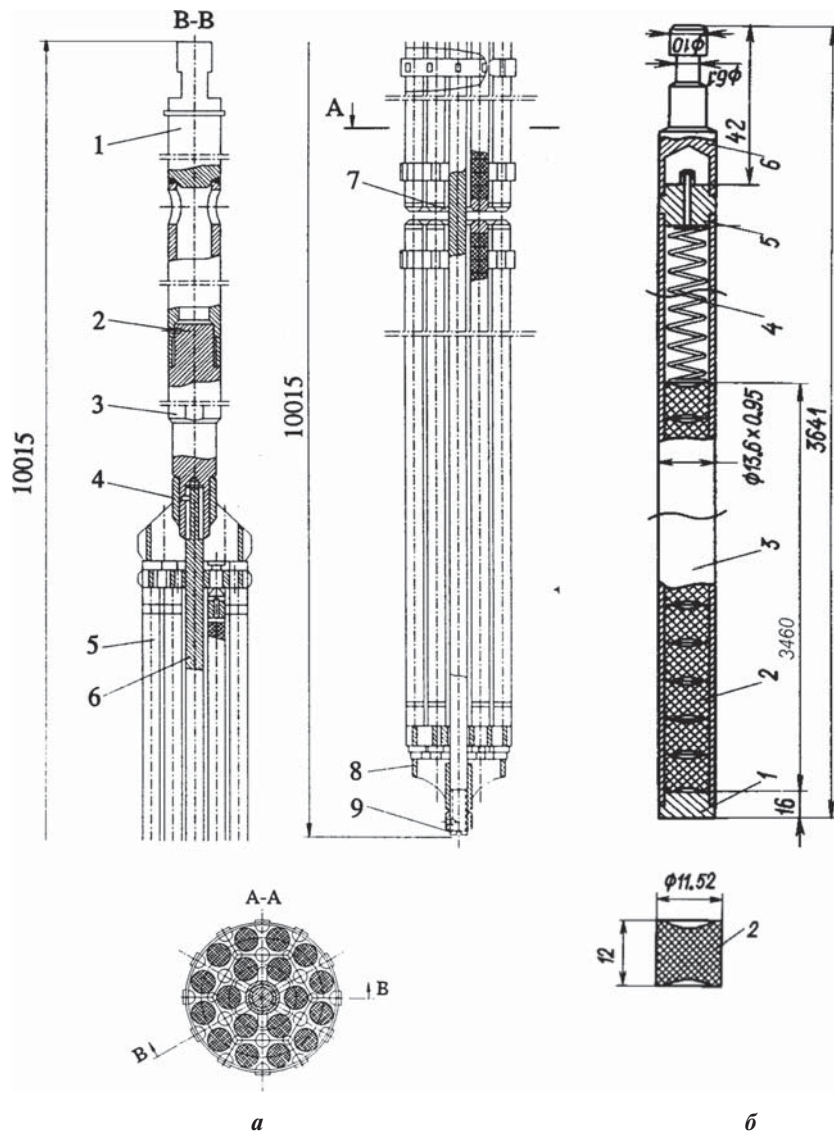


Рис. 1. Особенности конструкции топливных элементов РБМК-1000:
 а — схема ТВС РБМК-1000: 1 — подвеска; 2 — верхняя заглушка; 3 — адаптер; 4 — соединительный элемент; 5 — топливный элемент; 6 — несущий стержень; 7 — концевик; 8 — нижняя головка; 9 — предохранительная гайка;
 б — схема ТВЭЛ ТВС РБМК-1000: 1 — нижняя заглушка; 2 — топливные таблетки; 3 — оболочка; 4 — пружина; 5 — вкладыш; 6 — наконечник

В настоящее время код HELIOS является одной из наиболее широко используемых в мировой практике компьютерных программ, применяемых для всех типов реакторов [11].

На основании геометрических характеристик топлива РБМК-1000 разработаны расчетные модели для модуля TRITON и кода HELIOS. Расчетная ячейка (рис. 2) представляет собой четвертую часть кассеты и графитового замедлителя с условиями зеркального отражения на границах.

Все ТВС моделировались потвэльно (рис. 3). Расположение элементов ТВС, их геометрия и материальный состав соответствуют описанию, приведенному выше. Эффективная плотность цилиндрического уранового сердечника, которым моделировалась топливная часть ТВЭЛ, определялась исходя из общей массы топлива в ТВС с учетом технологических допусков.

Результаты расчетного моделирования экспериментальных данных работы [9] с помощью модуля TRITON для

18 образцов, полученных из трех ТВС (№№ 5–8, 10–17, 20–25), и с помощью кода HELIOS для всех образцов (41 шт.) представлены в табл. 1.

Анализ результатов моделирования экспериментальных данных. Анализируя результаты расчетного моделирования экспериментальных данных, сразу можно отметить, что модуль TRITON и код HELIOS дают большую среднеквадратичную погрешность (более 20 %) при определении концентраций таких изотопов, как ^{238}Pu , ^{242}Pu , ^{237}Np , ^{243}Am , ^{242}Cm и ^{244}Cm . Поэтому такие изотопы можно исключить из дальнейшего рассмотрения.

Из оставшихся семи изотопов ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu и ^{241}Pu следует исключить из рассмотрения изотопы ^{234}U и ^{236}U . В паспортах на ТВС реакторов РБМК и ВВЭР не указываются начальные концентрации изотопов ^{234}U и ^{236}U в свежем топливе (в отличие от паспортов

Таблица 1. Относительная ошибка определения концентрации изотопов: эксперимент–расчет /эксперимент×100 %

№ образца	Изотоп												
	²³⁴ U	²³⁵ U	²³⁶ U	²³⁸ U	²³⁸ Pu	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴² Pu	²³⁷ Np	²⁴³ Am	²⁴² Cm	²⁴⁴ Cm
TRITON													
5	-10,60	2,10	-4,33	0,04	14,47	12,57	-6,16	11,88	1,35	17,73	-2,89	36,74	-7,21
6	-11,34	-9,71	-3,97	0,10	19,90	5,56	-2,75	5,81	5,27	-1,41	1,01	39,47	4,26
7	-3,15	-3,16	1,74	-0,17	36,29	11,31	-0,30	13,00	10,19	27,19	11,03	41,02	5,45
8	-7,91	10,15	-5,21	0,08	13,89	1,51	-15,22	-1,39	-17,63	35,63	4,29	36,42	-10,89
10	-14,84	-2,94	-7,69	0,02	32,60	16,36	4,64	19,74	8,63	49,00	15,15		
11	-11,87	5,13	-17,27	0,03	11,65	8,13	-15,11	-6,14	-47,90	33,43	-53,57		
12	-11,96	-5,81	-4,93	0,06	38,63	13,93	2,47	14,89	15,87		3,57		
13	-12,80	-2,36	-5,77	0,05	37,94	9,47	5,58	8,73	3,15	46,58	0,92		
14	-9,56	2,14	-8,30	0,06	30,36	8,16	-0,64	0,53	-3,33	-1,63	-21,23		
15	-0,63	22,40	-15,69	-0,08	15,06	22,91	0,38	9,55	-22,26	14,25	-81,39		
16	-13,03	-3,43	-5,64	0,03	42,28	17,51	4,71	20,14	18,29	37,36	1,85		
17	-11,59	-1,60	-5,37	0,08	35,08	8,03	-0,47	10,66	7,26		-0,33		
20	-4,49	0,42	4,56	0,01	-2,17	-4,82	-19,02	1,78	-11,20	30,28	56,98	57,85	43,95
21	-4,01	1,15	2,57	0,01	-1,84	4,92	-7,47	3,80	-11,90	26,43	21,52	58,44	-14,21
22	-5,15	1,63	2,06	-0,02	3,95	8,41	-1,91	8,19	1,09	27,43	20,12	59,44	57,40
23	-63,07	-4,22	17,72	0,10	38,55	9,76	12,48	23,01	28,55	32,67	76,39	77,50	79,43
24	-58,98	2,08	7,29	-0,01	17,08	5,74	-4,83	2,88	-9,04	35,25	53,38	59,83	7,52
25	-59,66	2,17	8,85	0,03	10,99	-11,36	-25,24	-10,93	1,66	24,06	81,98	48,75	65,61
HELIOS													
1	-9,42	-1,90	0,33	-0,53	-0,54	4,42	-2,45	-3,17	-1,87	4,58	-44,50	23,22	-5,53
2	-0,08	4,37	-1,88	-0,51	-2,67	2,67	-1,89	-2,04	-4,87	18,15	-29,67	17,92	-13,94
3	21,17	74,82	-10,01	-1,09	-35,19	42,00	19,72	22,97	-55,09	9,71	-44,27	10,37	-318,94
4	-5,73	-10,51	1,38	-0,51	20,62	0,78	2,44	6,86	16,61	29,25	10,03	33,74	41,68
5	-1,46	-8,80	1,65	-0,42	-2,72	-0,50	-3,16	-7,89	-3,73	12,64	-8,13	12,71	-6,51
6	-3,22	-18,59	-0,14	-0,41	12,43	1,87	0,49	0,69	8,46	0,99	10,92	25,34	22,64
7	3,87	-21,39	6,05	-0,83	25,77	1,47	3,11	0,38	10,77	24,26	11,54	20,54	12,89
8	0,86	6,01	-1,26	-0,44	9,72	-1,75	-12,45	-6,02	-12,72	38,19	16,75	26,39	12,76
9	-5,36	-5,32	4,68	-0,45	21,08	-5,88	1,97	-8,05	1,82	37,43	-11,49	-35,04	21,76
10	-3,59	-2,86	1,57	-0,51	16,81	1,02	-2,39	-10,73	-11,26	43,35	-7,57	-	-
11	-2,80	-1,44	0,22	-0,55	17,24	1,22	-2,24	-8,49	-18,12	37,88	-12,28	-	-
12	-1,97	-8,61	2,32	-0,44	28,84	3,37	3,13	-2,09	9,98	-	-2,03	-	-
13	-5,69	-17,07	7,28	-0,58	43,79	3,14	15,46	10,44	25,62	51,60	32,75	-	-
14	-2,90	-11,60	4,51	-0,59	37,99	4,11	9,72	5,07	21,93	10,19	21,00	-	-
15	7,84	20,76	-8,44	-0,59	2,20	16,75	2,09	-1,21	-25,32	13,42	-79,17	-	-
16	-2,74	-6,83	2,26	-0,46	29,70	4,72	4,85	-0,44	9,75	32,84	-9,24	-	-
17	-1,87	-1,64	1,34	-0,48	29,70	2,69	0,68	3,12	8,02	-	7,64	-	-
18	3,12	-14,78	3,95	-0,49	17,28	0,88	3,95	2,62	12,14	19,73	2,39	29,21	27,72
19	0,74	-18,17	3,29	-0,47	25,13	0,71	3,10	-1,30	11,73	13,51	18,54	30,39	23,15
20	7,50	-0,81	13,39	-0,50	-20,27	-24,69	-27,15	-31,56	-28,69	22,96	48,73	21,75	31,08
21	7,74	-0,07	10,13	-0,50	-15,52	-8,30	-10,27	-15,74	-17,33	21,49	18,79	25,62	-16,97
22	6,88	0,69	9,09	-0,52	-12,92	-5,88	-6,05	-14,88	-8,62	20,74	11,80	23,88	52,72
23	4,28	-10,41	26,97	-0,49	42,54	7,30	25,63	32,30	52,27	34,64	86,41	73,17	89,50
24	6,60	-4,32	16,84	-0,59	20,14	1,33	9,00	10,16	22,54	36,42	70,92	48,01	48,48
25	6,52	-3,48	18,49	-0,54	12,44	-18,36	-9,06	-8,29	26,88	23,69	87,91	39,90	78,82
26	6,41	-12,70	7,79	-0,39	14,47	-1,52	1,43	3,31	13,65	34,39	13,08	2,34	19,40
27	7,23	-7,01	7,68	-0,42	9,17	-0,10	0,53	1,05	9,31	39,58	10,20	11,87	24,49
28	7,98	-1,87	-0,49	-0,34	5,43	-1,26	-5,71	-14,92	-11,76	37,43	-346,83	16,76	-7,65
29	14,16	11,39	-2,67	-0,31	2,66	7,45	0,91	1,47	-5,48	20,61	-9,90	1,12	-34,25
30	14,86	20,12	-2,28	-0,27	6,60	9,29	1,07	3,66	-8,01	33,75	-40,51	-6,51	-56,42
31	9,68	8,99	-1,49	-0,32	12,87	5,49	-1,77	4,68	1,98	22,01	5,56	3,23	-2,98
32	6,53	0,56	-3,05	-0,56	18,94	7,32	2,05	9,73	10,88	32,78	-	-25,43	69,85
33	6,28	-2,76	-4,26	-0,50	16,92	4,28	1,73	4,49	8,68	16,17	8,28	-19,02	-42,63
34	2,11	-25,26	1,11	-0,70	33,37	-0,16	8,12	8,63	30,44	29,92	27,54	52,47	57,21
35	-0,70	0,93	-1,70	-0,01	2,94	0,85	-7,22	-10,06	-12,78	10,09	-322,51	28,68	5,90
36	-0,72	3,79	-1,31	0,03	3,36	5,12	-4,08	-4,24	-9,22	16,30	-45,87	-4,25	-15,85
37	-3,56	-10,70	-0,50	-0,12	22,79	4,22	5,13	6,33	17,98	16,05	-6,75	23,18	28,94
38	-2,77	1,88	-2,90	-0,06	7,29	4,70	-1,23	0,61	3,33	13,03	-9,38	20,10	11,08
39	-1,58	10,45	-3,41	-0,05	20,94	10,13	2,40	2,48	-0,49	27,82	-38,71	18,16	29,19
40	-10,91	3,90	-12,99	-0,10	30,58	9,48	9,39	19,16	22,69	37,42	-125,11	42,45	65,92
41	-10,17	-12,47	-8,19	-0,13	34,48	9,82	20,35	25,60	42,98	-15,96	-115,40	63,12	63,78

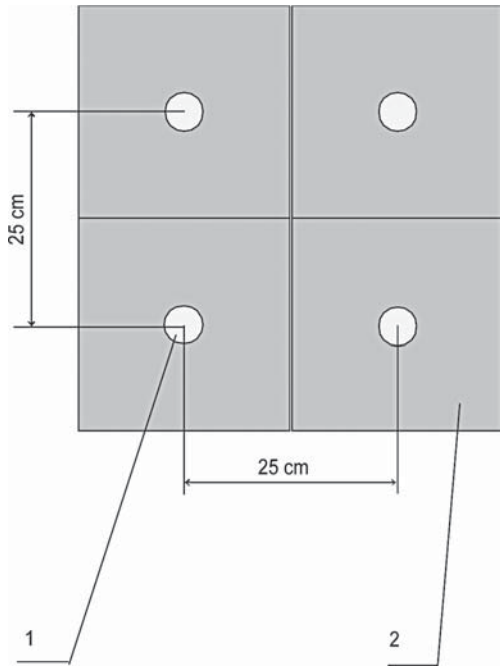
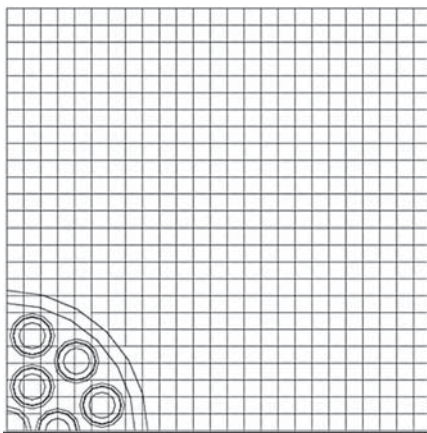


Рис.2 . Расположение кассет в активной зоне реактора РБМК-1000:
1 — топливная кассета; 2 — графит

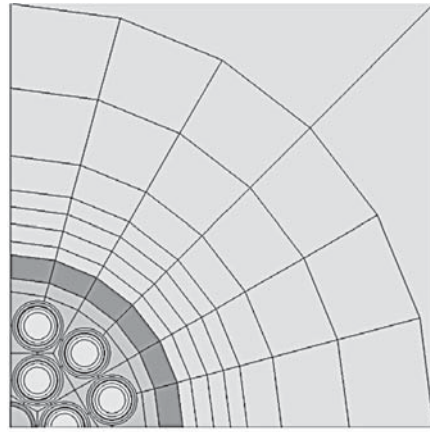
реакторов ВВЭР-1000 Запорожской АЭС в 2003 г. НАЭК «Энергоатом» был разработан и введен в действие документ [15], в котором определялась процедура учета выгорания топлива при анализе критичности загрузок контейнеров хранения. В этом документе, на основании предварительного анализа, устанавливается тот же перечень изотопов, которые можно использовать при анализе ядерной безопасности с учетом выгорания топлива: ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu и ^{241}Pu . Следовательно, для дальнейшего использования в расчетах предлагается перечень изотопов, уже утвержденный ранее для топлива реакторов ВВЭР-1000.

Использование в расчетах коэффициента размножения нейтронов данных по концентрации только пяти трансураниевых изотопов приводит к завышению результатов расчетов (рис. 4). Например, для ОТВС с начальным обогащением 2,0 % (с учетом технологических допусков на массу и обогащение топлива) на уровне выгорания порядка 20 МВт·сут/кг U это завышение несколько превышает 5 %. Фактически этот консерватизм, закладываемый учетом только пяти изотопов при оценках ядерной безопасности, направлен на компенсацию возможных неточностей при определении глубины выгорания ОЯТ и компенсацию погрешностей определения изменения изотопного состава ОЯТ в зависимости от выгорания.

Результаты, полученные по различным программам для отобранных изотопов, представлены в табл. 2. Как видно



а



б

Рис. 3. Расчетная модель ТВС РБМК-1000:
а — пакет SCALE, модуль TRITON; б — код HELIOS

ТВС западных реакторов PWR и BWR). Эти изотопы присутствуют в свежем топливе и изменение их концентраций с выгоранием существенно зависит от заданных начальных значений. Не следует путать содержание изотопа ^{236}U в свежем топливе и данные о содержании 500 г ^{236}U в регенерированном топливе (см. с. 36). Эти 500 г добавляются как следствие процесса регенерации топлива. Однако и в обычном (нерегенерированном) свежем топливе содержится некоторое количество изотопов ^{234}U и ^{236}U . Таким образом, при анализе ядерной безопасности с учетом выгорания топлива можно рекомендовать учитывать выгорание по следующим пяти изотопам: ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu .

При лицензировании первого в Украине промежуточного хранилища сухого типа для отработавшего топлива

из этой таблицы, обе программы дают приблизительно одинаковые погрешности при определении выбранных изотопов.

Отклонения расчетных результатов для программ SCALE (модуль TRITON) и HELIOS от экспериментальных данных для различных образцов показаны на рис. 5—9. Для сравнения на этих же рисунках представлены аналогичные результаты, полученные ранее с помощью хорошо известной английской программы WIMS специалистами РНЦ «Курчатовский институт» [9].

В качестве интегральных параметров, характеризующих степень отличия между экспериментальными и расчетными величинами, выбраны максимальная и минимальная погрешности по каждому изотопу и среднеквадратичное отклонение (СКВО) по всем образцам.

Таблица 2. Сравнение результатов моделирования для пяти изотопов U и Pu

Ошибка определения концентрации, (эксперимент–расчет)/эксперимент×100 %	Изотоп				
	²³⁵ U	²³⁸ U	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu
TRITON					
Минимальная	–9,71	–0,17	–11,36	–25,24	–10,93
Максимальная	22,40	0,10	22,91	12,48	23,01
СКВО	6,44	0,07	11,24	9,56	11,69
HELIOS					
Минимальная	–21,39	–0,83	–24,69	–27,15	–31,56
Максимальная	20,76	–0,41	16,75	25,63	32,30
СКВО	10,67	0,53	9,02	11,20	13,16

Как видно из этих рисунков, для всех рассматриваемых изотопов программа HELIOS дает более консервативные результаты по сравнению с программой SCALE. Поэтому для дальнейших расчетов изотопного состава отработавшего топлива реакторов РБМК можно рекомендовать использование кода HELIOS.

Расчетный анализ зависимости изотопного состава отработавшего топлива от условий его эксплуатации. Одним из важных этапов внедрения “burnup credit principle” является анализ влияния изменений эксплуатационных характеристик выгорания топлива на концентрацию отдельных изотопов. При этом такой анализ необходимо проводить с точки зрения обеспечения приемлемого уровня консерватизма при расчете критичности системы, т. е. нужно выполнить «анализ чувствительности». Для этого определяется изотопный состав отработавшего топлива РБМК при различных условиях его эксплуатации и затем для полученной концентрации изотопов рассчитывается критичность системы хранения ХОЯТ-1.

В ходе оценки различных условий эксплуатации топлива РБМК учитывалось влияние следующих параметров:

- уровня мощности и графика несения нагрузки;
- плотности и температуры графита (замедлителя) и воды (теплоносителя);
- температура оболочки твэла, центральной трубы и топливного канала;
- месторасположение твэла в кассете.

Наибольшее влияние на изотопный состав отработавшей ТВС оказывают плотность воды в технологическом канале и уровень мощности, чуть меньшее — месторасположение твэла в кассете (наружное или внутренне кольцо).

Концентрация изотопов определялась отдельно для внутреннего или наружного кольца твэлов в соответствии с данными, приведенными в [9].

На основании полученных результатов определяется консервативный набор условий выгорания топлива РБМК. При этом следует учитывать различие материального состава системы при облучении топлива и его хранении в ХОЯТ-1. Облучение топлива происходит в ячейке реактора РБМК, где основным замедлителем является графит, а присутствие воды в качестве теплоносителя меньше влияет на замедляющие свойства системы. В ячейке ХОЯТ-1 при оценках критичности в соответствии с нормативными документами Украины в качестве замедлителя рассматривается водовоздушная смесь оптимальной плотности.

Предельные изменения эксплуатационных параметров выгорания топлива РБМК представлены ниже:

- Плотность теплоносителя (вода), г/см³ 0,2±0,8
- Температура теплоносителя (вода), К 543±563
- Плотность замедлителя (графит), г/см³ 1,65
- Температура замедлителя (графит), К 693±853
- Температура топлива (UO₂), К 1020
- Мощность кассеты, Вт/г U 6.6±26.2

Характеристики реактора и топлива РБМК выбраны в соответствии с [6]–[8].

Оценка влияния неопределенностей эксплуатационных характеристик выгорания топлива на критичность ХОЯТ-1 выполнялась с использованием пакета расчетных кодов SCALE (последовательность CSAS26). Моделировалась бесконечная решетка ячеек ХОЯТ-1 размером 230×110 мм [1].

Температура воды принималась равной 20 °С, плотность воды в пенале — 0,8 г/см³, в межпенальном пространстве — 0 г/см³. Эти плотности оптимальны с точки зрения максимального коэффициента размножения $K_{эф}$ системы и выбраны в соответствии с выводами [1].

В ходе расчетов критичности оценивалось влияние следующих эксплуатационных параметров:

- изменения плотности теплоносителя;
- изменения температуры теплоносителя;
- изменения температуры замедлителя;
- изменения температуры топлива;
- изменения мощности кассеты;
- радиальной неравномерности выгорания кассеты.

Оценка влияния неравномерности выгорания кассеты на ее размножающие свойства проводилась путем сравнения $K_{эф}$ для двух случаев: одинакового для всех твэлов изотопного состава и изотопного состава, задаваемого отдельно для внутреннего и внешнего кольца твэлов кассеты РБМК. При этом изотопный состав по кольцам твэлов в зависимости от выгорания определялся при расчете ячейки кодом HELIOS.

На основании анализа полученных результатов можно заключить, что только два параметра оказывают заметное влияние на изотопный состав кассеты РБМК с точки зрения размножающих свойств ячейки ХОЯТ-1: изменение плотности теплоносителя и температуры замедлителя (рис. 10). Влияние изменений остальных параметров

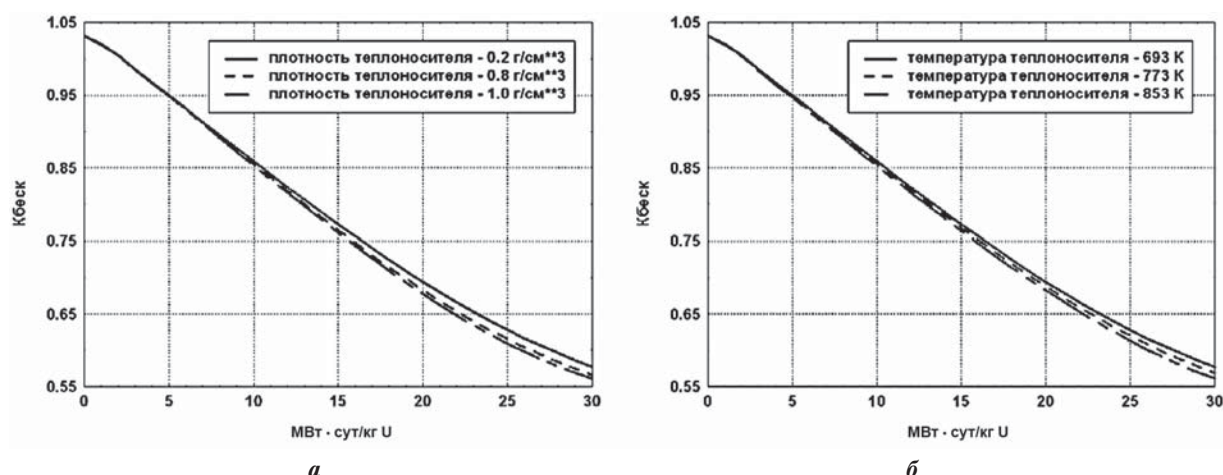


Рис. 10. Влияние на размножающие свойства ячейки хранилища ХОЯТ-1 изменений в процессе эксплуатации кассеты РБМК:
 а — плотности теплоносителя в ходе облучения кассеты РБМК; б — температуры замедлителя

Выводы

1. На основании анализа расчетных данных, полученных с помощью программ SCALE (модуль TRITON) и HELIOS, можно сделать следующие выводы:

разработанные модели топливной кассеты РБМК позволяют адекватно моделировать изменение изотопного состава топлива в процессе его выгорания;

ошибку определения концентрации изотопов урана и плутония можно оценить как $\pm 10\%$ и рекомендовать использовать это значение в дальнейшем. Ошибка определения концентрации остальных изотопов превышает это значение.

2. При анализе ядерной безопасности ХОЯТ-1 с учетом выгорания топлива рекомендовано учитывать изменение концентраций следующих пяти изотопов: ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu .

Этот перечень изотопов уже используется в настоящее время для топлива реакторов ВВЭР-1000 при анализе ядерной безопасности контейнерной системы сухого хранения отработавшего топлива на Запорожской АЭС.

3. По результатам анализа зависимости изотопного состава отработавшего топлива от условий его эксплуатации отобраны значения эксплуатационных параметров РБМК Чернобыльской АЭС, при которых топливо, находящееся на хранении в ХОЯТ-1, будет обладать наиболее высокими размножающими свойствами (т. е. консервативные условия в соответствии с общими требованиями по ядерной безопасности).

Список литературы

1. Отчет по оценке безопасности ХОЯТ-1. Версия 3.00.
2. ПНАЭГ-14029-91. Правила безопасности при хранении и транспортировке ядерного топлива на объектах атомной энергетики.
3. Advances in Applications of Burnup Credit to Enhance Spent Fuel Transportation, Storage, Reprocessing and Disposition, IAEA TM-26988, 2005.

4. Burnup Credit in the Criticality Safety Analyses of PWR Spent Fuel in Transport and Storage Casks, US NRS, ISG-8.

5. Deutsche Norm. Kritikalitätssicherheit bei der Handhabung und Lagerung von Brennelementen in Brennelementlagerbecken von Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren unter Anrechnung des Brennelementabbrandes. DIN 25471, 1999.

6. ТВС РБМК-1000. Техническое описание. 862.00.000 ТО.

7. ТВС РБМК-1000. Технические условия. ТУ 95.508678–, ТУ 95.80481–.

8. Almenas K., Kalitka A., Uspuras E. Ignalina RBMK-1500. A Source Book. Kaunas, 1994.

9. Бурлаков Е.В., Бегичев С.Н. и др. Нуклидный состав образцов отработанного топлива РБМК-1000 (эксперименты и расчеты). — М: РИЦ «Курчатовский институт», 2003.

10. HELIOS Methods. Studsvik@Scandpower. 01 December 2005.

11. HELIOSLICENSES/INSTALLATIONS. Studsvik@Scandpower. 2005.

12. SCALE User's Manual. NUREG/CR-0200 Revision 6. RNL/NUREG/CSD-2/V2/R6.

13. TRITON: A two-dimensional transport and depletion module for characterization of spent nuclear fuel. ORNL/TM-2005/39 Version 6 Vol. I, Sect. T1.

14. Kovbasenko Y., Khalimonchuk V., Kuchin A., Bilodid Y., Yermenko M., Dudka O. NUREG/CR-6736, PNNL-13694. Validation of SCALE Sequence CSAS26 for Criticality Safety Analysis of VVER and RBMK Fuel Designs. — Washington, U.S.NRS, 2002.

15. Методические указания по выполнению обоснования ядерной безопасности топливной загрузки ВКХ СХОЯТ с учетом глубины выгорания отработавшего ядерного топлива 00.ОБ. УУ.МУ.09. — Энергодар, 2003.

Надійшла до редакції 21.09.2010.