

РАСЧЕТЫ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА РБМК-1000 ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ SCALE-6

Выполнен расчет изотопного состава отработавшего ядерного топлива РБМК с использованием модулей TRITON/T6-DEPL и ORIGEN-ARP программного продукта SCALE-6 и проведено его сравнение с экспериментальным изотопным составом. При анализе результатов расчетов и сравнении их с экспериментальными данными учитывались только актиноиды, которые составляют 99 % массового состава отработавшего ядерного топлива. Проведен расчет изотопного состава для внешнего и внутреннего колец твэлов, а также получено его комбинированное значение. Расхождение с экспериментальными данными по изотомам ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu , которые являются основными вкладчиками в эффективный коэффициент размножения нейтронов, не превышает 22 %. Созданная в данной работе расчетная схема может быть использована для расчета изотопного состава топлива РБМК-1000 программным продуктом SCALE-6.

Ключевые слова: изотопный состав, отработавшее ядерное топливо, РБМК-1000, программный продукт SCALE.

Введение

Согласно [1], в случаях, когда невозможно провести измерение ядерного материала, допускается использование расчетных методик определения количества ядерного материала. Экспериментальное определение значения глубины выгорания тепловыделяющих сборок (ТВС) РБМК-1000 позволит расчетным методом определить изотопный состав ядерного материала в отработавших тепловыделяющих сборках (ОТВС) Чернобыльской АЭС для выполнения этой задачи, а также ряда других задач был приобретен программный продукт SCALE-6. Верификация данного продукта даст возможность определить изотопный состав ОТВС, находящихся на Чернобыльской АЭС, и позволит заявить в Государственную инспекцию ядерного регулирования Украины реальную концентрацию ядерных материалов в отработавшем ядерном топливе (ОЯТ), расчетные значения концентрации ядерных материалов также будут использованы при контроле глубины выгорания ОТВС.

В работах [2, 3] расчеты изотопного состава были выполнены предыдущими версиями программного продукта SCALE, в которых использовались одномерные (SAS2H) и двумерные

(TRITON/NEWT) модули для подготовки библиотек макроскопических сечений выгорания, применяемых для расчета изотопного состава. Опыт данных работ был учтен при создании расчетной схемы ТВС РБМК-1000 с использованием трехмерного модуля (TRITON/T6-DEPL) программного продукта SCALE-6 [4]. Полученные с ее помощью библиотеки макроскопических сечений выгорания использовались для расчета изотопного состава топлива РБМК-1000 с учетом глубины выгорания, а также было выполнено сравнение расчетного изотопного состава с экспериментальным.

Постановка задачи

В качестве исходных данных для расчета изотопного состава ОЯТ использовались геометрические и материальные параметры ТВС и технические характеристики реактора РБМК-1000 [5].

Расчет изотопного состава проводился для ОТВС РБМК-1000 со следующими характеристиками [6]: обогащение топлива по ^{235}U , плотность теплоносителя при работе на мощности реактора, внешнее или внутреннее кольцо твэлов, выгорание, количество суток, которое проработала ТВС на мощности (табл. 1).

Таблица 1. Исходные данные для расчета изотопного состава топлива РБМК-1000

Номер образца	Обогащение ^{235}U , %	Плотность теплоносителя, г/см ³	Кольцо твэлов	Выгорание, МВт · сут/кг (U)	Работа на мощности, сут
1	1,8	0,45	внешнее	17,45	1684
6	1,8	0,76	внутреннее	22,62	1685
9	1,8	0,50	внешнее	11,56	1010
25	2,0	0,45	внутреннее	6,96	278
26	2,0	0,76	внешнее	21,38	1281

Для данных ОТВС имелись экспериментальные значения [7], представленные в [6], концентраций нуклидов, с которыми и выполнялось сравнение полученных результатов изотопного состава расчетным путем. При анализе результатов расчетов и сравнении их с экспериментальными данными учитывались только актиноиды, которые составляют 99 % массового состава ОТВС, а именно: ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{243}Am , ^{242}Cm , ^{244}Cm .

Расчетная схема

В предыдущих версиях программного продукта SCALE использовались модули SAS2H и TRITON/NEWT для подготовки библиотек макроскопических сечений выгорания, применяемых для расчета изотопного состава. Одномерный модуль SAS2H программного продукта SCALE-4 предназначен для создания библиотек констант реакторов с водой под давлением (PWR) и кипящих реакторов (BWR), он также хорошо зарекомендовал себя в создании библиотек для газоохлаждаемых реакторов [8]. Тем не менее SAS2H лучше работает с конфигурациями твэлов западного образца и при появлении дву-

мерного модуля TRITON/NEWT в программном продукте SCALE-5 появилась возможность создать расчетную схему с более точной геометрией РБМК [6]. Последняя версия программного продукта SCALE-6 сделала модуль TRITON трехмерным, что позволило выполнить расчетную схему с практически идентичной геометрией.

Для расчета изотопного состава ОЯТ РБМК-1000 были применены модули TRITON/T6-DEPL и ORIGEN-ARP программного продукта SCALE-6 [9, 10] с использованием 238-групповой библиотеки нейтронно-физических констант. В работах [6, 11] использовалась 44-групповая библиотека нейтронно-физических констант, созданная на базе ENDF/B-V.

Модуль TRITON/T6-DEPL применялся для расчета выгорания топлива РБМК-1000 и подготовки библиотек макроскопических констант в зависимости от глубины выгорания. Полученная библиотека использовалась модулем ORIGEN-ARP для коррекции выгорания и расчета концентраций изотопов при дальнейшей выдержке топлива. Библиотеки макроскопических констант в зависимости от глубины выгорания были получены с помощью TRITON/T6-DEPL, используя расчетную схему, которая приведена на рис. 1.

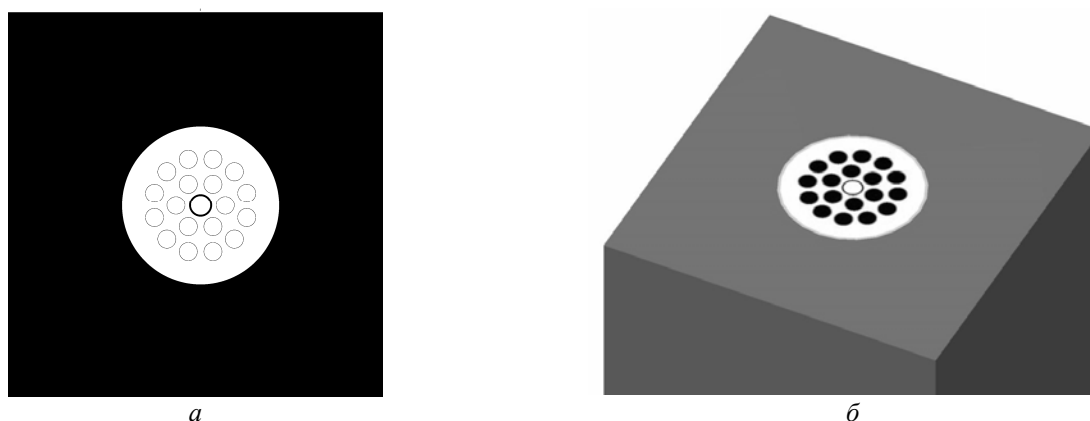


Рис. 1. Расчетная схема для получения библиотек макроскопических констант в зависимости от глубины выгорания топлива РБМК-1000: *а* – вид сверху; *б* – изометрия.

Результаты расчета изотопного состава

Результаты расчетов изотопного состава представлены в виде относительной ошибки определения концентрации нуклидов, рассчитанных в данной работе к представленным в работе [6] (табл. 2).

В связи с отсутствием эксплуатационных характеристик экспериментальных образцов ТВС сложно говорить о сопоставимости расчетных значений с экспериментальными, которые представлены в табл. 2. В источнике [7] отсутствуют значения концентрации ^{241}Am , поэтому не уда-

лось провести сравнение по данному изотопу, но он должен присутствовать в топливе, так как период полураспада ^{241}Pu составляет 14,4 года.

На рис. 2 представлено отклонение экспериментального значения концентраций нуклидов ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu , которые являются основными вкладчиками в эффективный коэффициент размножения нейтронов, от расчетного значения, полученного в данной работе.

В техническом условии и в паспортах на ТВС РБМК-1000 отсутствуют начальные значения концентрации изотопов ^{234}U и ^{236}U , но данные изотопы присутствуют в свежем топливе.

Таблица 2. Относительная ошибка определения концентрации нуклидов: (эксперимент – расчет) × 100 / эксперимент, %

Нуклид	Данная работа	Работа [6]	Данная работа	Работа [6]	Данная работа	Работа [6]	Данная работа	Работа [6]	Данная работа	Работа [6]
	Образец № 1		Образец № 6		Образец № 9		Образец № 25		Образец № 26	
²³⁴ U	-28,36	-26,75	-19,98	-18,30	-25,66	-24,69	-8,42	-1,94	-10,21	-1,61
²³⁵ U	3,06	9,63	-19,42	-7,03	-7,44	-3,57	5,10	1,14	-16,35	-5,53
²³⁶ U	-5,23	-4,59	-4,08	-3,70	1,23	2,58	-3,98	9,44	4,64	4,91
²³⁷ Np	-9,32	4,24	-24,82	-7,77	36,10	44,50	0,46	15,72	21,83	32,31
²³⁸ Pu	-14,87	-1,46	-13,37	-4,16	22,20	30,72	-20,33	4,83	5,81	17,48
²³⁹ Pu	8,70	8,90	-3,81	-3,39	2,06	-0,30	-22,24	-18,81	-4,60	-4,49
²⁴⁰ Pu	11,61	-6,37	13,35	-3,95	16,69	3,68	-32,86	-28,57	15,89	-1,16
²⁴¹ Pu	-13,38	0,97	-17,97	-5,93	-11,64	2,94	-76,88	-37,77	-13,06	0,49
²⁴² Pu	-24,89	-15,60	-14,34	-9,65	-5,31	2,15	-59,97	-18,46	-3,55	1,70
^{242m} Am	-20,51	0,61	-17,77	-33,39	-53,39	-33,39	-	-	-9,95	8,28
²⁴³ Am	-95,49	-73,17	-43,31	-25,32	-15,04	-10,83	70,86	76,93	-23,45	-9,49
²⁴² Cm	5,67	15,62	2,98	11,55	-53,75	-41,02	31,95	46,55	-13,97	-2,09
²⁴⁴ Cm	-37,54	-21,48	-32,66	-14,46	28,06	29,65	44,81	56,42	-14,26	-1,57

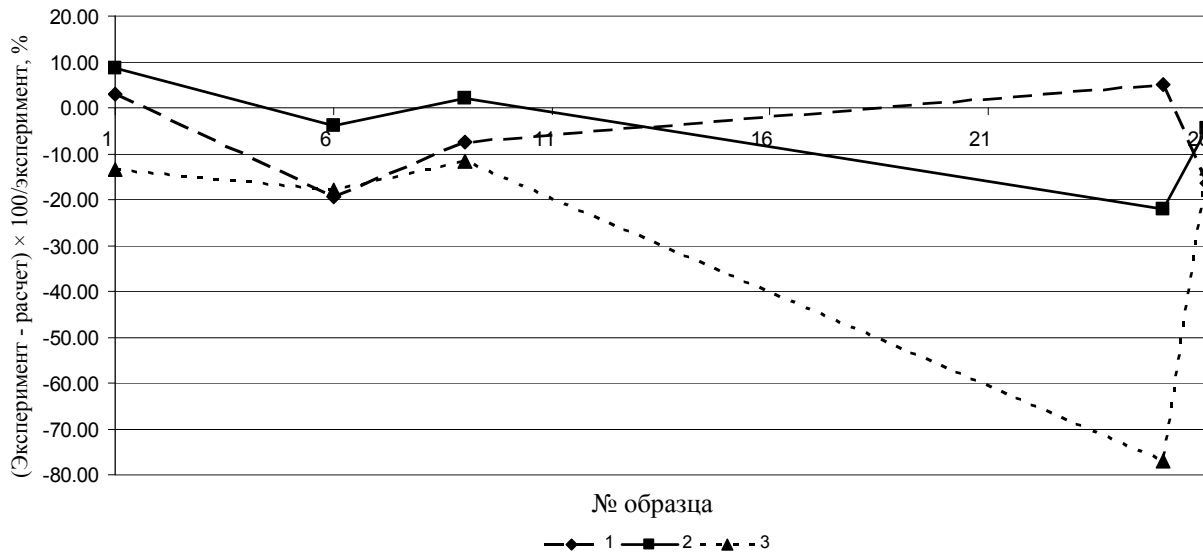


Рис. 2. Относительная ошибка определения концентрации нуклидов: 1 – ²³⁵U; 2 – ²³⁹Pu; 3 – ²⁴¹Pu.

При расчете изотопного состава принималась следующая начальная концентрация изотопов ²³⁴U и ²³⁶U, которая рассчитывалась по формулам (1) и (2), где C(²³⁴U), C(²³⁵U), C(²³⁶U) - концентрации изотопов ²³⁴U, ²³⁵U, ²³⁶U соответственно:

$$C(^{234}\text{U}) = 0,0089 \cdot C(^{235}\text{U}), \quad (1)$$

$$C(^{236}\text{U}) = 0,0046 \cdot C(^{235}\text{U}). \quad (2)$$

Экспериментальный изотопный состав дан для внешнего или внутреннего кольца твэлов в ОТВС [6]. В данной работе был проведен расчет изотопного состава ОТВС для внешнего и внутреннего колец твэлов, а также получено его комбинированное значение. Для выполнения этого

расчета были созданы три отдельные библиотеки макроскопических сечений. Результаты данных расчетов для ОТВС № 25 и № 26 представлены на рис. 3 и 4 соответственно в виде отношения расчетного значения к экспериментальному значению.

Результаты, представленные на рис. 3 и 4, свидетельствуют о лучшем сопоставлении тех значений концентраций нуклидов, которые рассчитаны в соответствии с указанным кольцом твэлов в табл. 1. Для ОТВС № 25 это значения для внутреннего кольца твэлов, а для ОТВС № 26 - внешнего. Комбинированное значение является средним между значениями для внешнего и внутреннего колец твэлов.

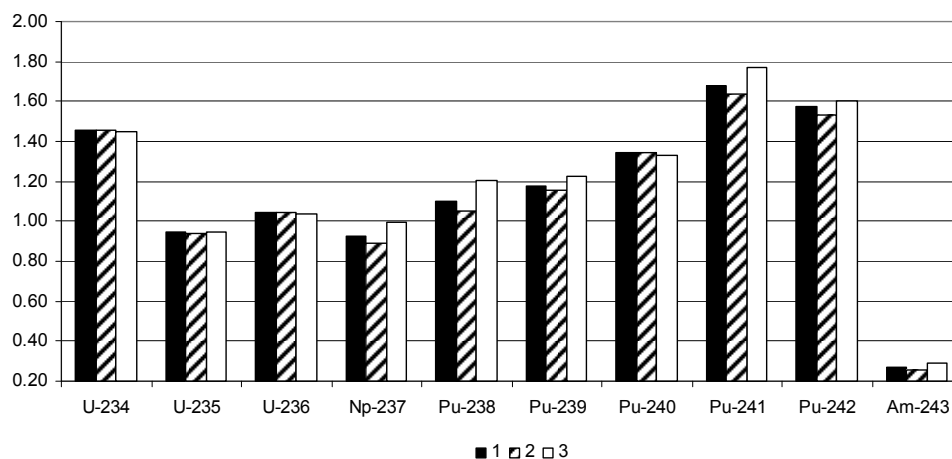


Рис. 3. Расчет изотопного состава ОТВС № 25: 1 – комбинированное значение; 2 – значение для внешнего кольца твэлов; 3 – значение для внутреннего кольца твэлов.

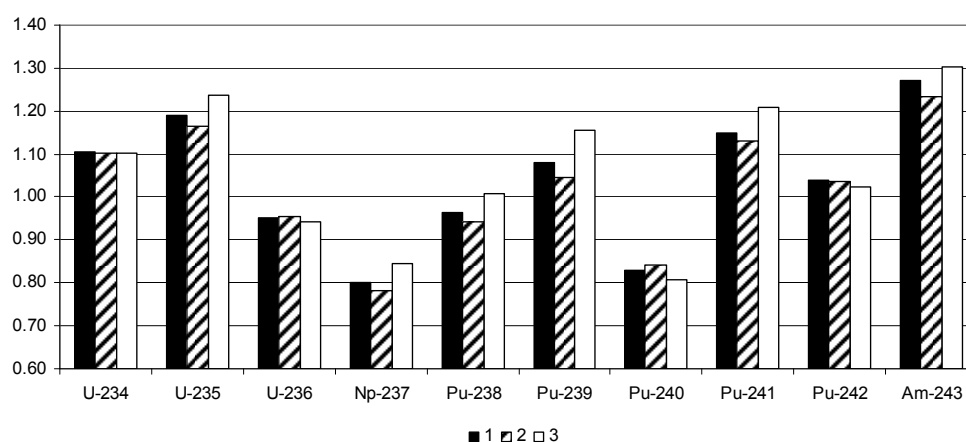


Рис. 4. Расчет изотопного состава для ОТВС № 26: 1 – комбинированное значение; 2 – значение для внешнего кольца твэлов; 3 – значение для внутреннего кольца твэлов.

Выводы

В работе выполнен расчет изотопного состава ОЯТ РБМК с использованием программного продукта SCALE-6 и проведено его сравнение с экспериментальным изотопным составом.

Расхождение с экспериментальными данными по изотомам ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu , согласно рис. 2, не превышает 22 % (исключением является концентрация нуклида ^{241}Pu для образца № 25, которая меньше экспериментального значения на 77 %).

Важным условием при определении изотопного состава является наличие информации, для какого кольца твэлов выполняется расчет (внешнего или внутреннего), если же нет достоверной информации, то необходимо использовать ком-

бинированную библиотеку макроскопических сечений. Результаты изотопного состава с использованием комбинированной библиотеки макроскопических сечений дают средние значения концентраций нуклидов по отношению к концентрациям для внешнего и внутреннего колец твэлов.

Созданная в данной работе расчетная схема может быть использована для расчета изотопного состава топлива РБМК-1000 программным продуктом SCALE-6. Полученный изотопный состав может быть применен для расчета критичности систем транспортировки и хранения ОЯТ РБМК-1000 и выполнения требований государственной системы учета и контроля ядерных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ ГКЯРУ № 24. Положение о системе измерения ядерных материалов. - 2006.
2. Гальченко В. В., Макодим В. И., Соловйов В. В., Илькович В. В. Урахування вигорання ядерного палива при обґрунтуванні ядерної безпеки систем зберігання та транспортування відпрацьованого ядерного палива РВПК-1000 // Ядерна фізика та енергетика. - 2010. - Т. 11, № 4. - С. 415.
3. Plukien R., Plukis A., Germanas D., Remeikis V. Numerical sensitivity study of irradiated nuclear fuel

- evolution in the RBMK reactor // Lithuanian Journal of Physics. - 2009. - Vol. 49, No. 4. - P. 461 - 469.
4. *SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation*, Version 6.0, Vols. 1-3 (ORNL/TM-2005/39, 2009).
 5. *Широков С.В. Ядерні енергетичні реактори: Навч. посібник*. - К.: НТУУ «КПІ». - 1997. - 280 с.
 6. *Murphy B. D. ORIGEN-ARP Cross-Section Libraries for the RBMK-1000 system*, (ORNL/TM-2006/139, November 2006).
 7. *Makarova T. Investigation of Spent Fuel from WWER-440, WWER-100 and RBMK-1000*, report prepared for IAEA by the Khlopin Radium Institute. - 2004.
 8. *Murphy B.D. ORIGEN-ARP Cross-Section Libraries for Magnox, Advanced Gas-Cooled, and VVER Reactor Designs*, (ORNL/TM-2003/263, February 2004).
 9. *DeHart M. D. TRITON: A Two-Dimensional Transport and Depletion Module for Characterization of Spent Nuclear Fuel*, Version 6, Vol. 1, Sect T1 (ORNL/TM-2005/39, 2009).
 10. *Gauld I. C., Bowman S.M., Horwedel J.E. ORIGEN-ARP: Automatic Rapid Processing for Spent Fuel Depletion, Decay, and Source Term Analysis*, Version 6, Vol. 1, Sect D1 (ORNL/TM-2005/39, 2009).
 11. *Ковбасенко Ю.П., Еременко М.Л. Определение изотопного состава отработавшего топлива реакторов РБМК для последующего анализа ядерной безопасности с учетом выгорания топлива // Ядерна та радіаційна безпека*. - 2011. - Т. 50, № 2. - С. 35.

В. В. Соловйов, Є. О. Лебедєв

РОЗРАХУНКИ ІЗОТОПНОГО СКЛАДУ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА РВПК-1000 ДЛЯ ВЕРИФІКАЦІЇ ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ SCALE-6

Виконано розрахунок ізотопного складу відпрацьованого ядерного палива РВПК з використанням модулів TRITON/T6-DEPL та ORIGEN-ARP програмного продукту SCALE-6 та проведено його порівняння з експериментальним ізотопним складом. При аналізі результатів розрахунків та порівняння їх з експериментальними даними враховувались тільки актиноїди, які становлять 99 % масового складу відпрацьованого ядерного палива. Проведено розрахунок ізотопного складу для зовнішнього та внутрішнього кілець твелів, а також отримано його комбіноване значення. Розбіжність з експериментальними даними по ізотопах ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu , які є основними вкладниками в ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів, не перевищує 22 %. Створена в даній роботі розрахункова схема може бути використана для розрахунку ізотопного складу палива РВПК-1000 програмним продуктом SCALE-6.

Ключові слова: ізотопний склад, відпрацьоване ядерне паливо, РВПК-1000, програмний продукт SCALE.

V. V. Soloviov, E. O. Lebedev

CALCULATIONS OF THE NUCLIDE COMPOSITION OF SPENT NUCLEAR FUEL RBMK-1000 FOR VERIFICATION COMPUTER MODULE SCALE-6

The article presents the calculation of the nuclide composition of spent nuclear fuel RBMK using modules TRITON/T6-DEPL and ORIGEN-ARP of modular code system SCALE-6 and comparison with the experimental nuclide composition. In the analysis of the results of calculations and comparison with experimental data were considered only actinides, which constitute 99 % of the mass of spent nuclear fuel. The calculation of the nuclide composition of the inner and outer rings of fuel rods, and its combined value were performed. The discrepancy with the experimental data on isotopes ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu , which are major contributors to the effective neutron multiplication factor, does not exceed 22 %. The design model which was created in this paper can be used to calculate the nuclide composition of the fuel of RBMK-1000 using modular code system SCALE-6.

Keywords: nuclide composition, spent nuclear fuel, RBMK-1000, modular code system SCALE.

Надійшла 08.11.2013

Received 08.11.2013