

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
А К Ц И О Н Е Р Н О Е О Б Щ Е С Т В О
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ –
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А. И. Лейпунского

ФЭИ-3314

А. С. Филиппова, С. В. Забродская,
М. Н. Слюняев, К. В. Тыклеева

**РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ОБЛУЧЕНИЯ МЛАДШИХ АКТИНИДОВ
В БЫСТРОМ СПЕКТРЕ**

Обнинск – 2025

УДК 621.029

Филиппова А.С., Забродская С.В., Слюняев М.Н., Тыклеева К.В.

Расчетные исследования облучения младших актинидов в быстром спектре : Препринт ФЭИ-3314. — Обнинск, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2025. — 18 с.

Ключевые слова: быстрый реактор, нейтронные константы, младшие актиниды, библиотека данных, расчеты экспериментов, программы, образцы БН-350, уран, плутоний.

В препринте представлены новые результаты расчетов и оценка экспериментов по трансмутации МА в реакторе БН–350 на основе обновленной версии программы изотопной кинетики SKIF 1.0 и российской библиотеки файлов оцененных нейтронных данных РОСФОНД-2020.2, разработанных в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ».

The paper presents new calculation results and an evolution of experiments on MA transmutation experiments in the BN-350 reactor based on the updated version of the SKIF 1.0 isotopes kinetics program and ROSFOND-2020.2, developed at Physics and Power Engineering Institute.

ВВЕДЕНИЕ

В начале 90-х годов прошлого века в энергетическом реакторе БН-350 была облучена серия образцов минорных актинидов: Am-241, Np-237, Pu-238, Pu-240, Cm-244. В 2002—2003 годах удалось провести и завершить радиохимический анализ нуклидного состава образцов после облучения. Была получена информация об изотопном составе младших актинидов (МА), накоплении дочерней активности и продуктов деления. Также были проведены предварительные расчеты по изотопной кинетике для сравнения с полученными экспериментальными данными.

В 2017—2018 гг. проведена следующая оценка экспериментов по трансмутации МА в реакторе БН-350 согласно современным требованиям представления информации к экспериментам такого типа. К ним относятся: наличие детального описания самого эксперимента и образцов, описание бенчмарк-моделей нейтронно-физического расчета и изотопной кинетики, результаты сравнения расчетного моделирования с экспериментальными данными, включая погрешности.

В настоящем препринте представлены новые результаты расчетов на основе обновленной версии программы изотопной кинетики SKIF 1.0 и российской библиотеки файлов оцененных нейтронных данных РОСФОНД-2020.2, разработанных в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ».

Описание SKIF 1.0

Версия программы для ЭВМ SKIF 1.0 [1] используется в настоящее время применительно к исследованиям радиационных характеристик топлива быстрых реакторов. SKIF 1.0 разрабатывалась в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» на основе программы CARE [2]. Блок- схема работы программы SKIF 1.0 приведена на рисунке 1.

Область применения программы для ЭВМ SKIF 1.0 – расчет изменения изотопного состава ядерного топлива в процессе облучения и последующей выдержки. Для свежего и отработавшего топлива рассчитываются следующие радиационные характеристики: активности, величины остаточного энерговыделения, мощности источников нейтронного и фотонного излучения.

Область применения программы для ЭВМ по типу объекта использования атомной энергии: атомные электростанции, энергоблоки, исследовательские установки с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, быстрые натриевые реакторы с интегральной и петлевой компоновкой оборудования, производства по изготовлению топлива, ТВЭЛ и ТВС.

Область применения программы для ЭВМ по моделируемым режимам: режимы нормальной эксплуатации, режимы с нарушением нормальной эксплуатации (при моделировании режимов облучения и выдержки ядерного топлива).

С помощью программы для ЭВМ SKIF 1.0 моделируются:

- тепловыделяющие сборки (ТВС) на складе свежего топлива;
- облучение ТВС в реакторе;
- отработавшие ТВС, находящиеся во внутриреакторном хранилище, в бассейне выдержки.

В отличие от прототипа программы для ЭВМ CARE, программа для ЭВМ SKIF 1.0 ориентирована на проведение более детальных исследований как используемых констант нейтронных взаимодействий и распадных характеристик, так и процессов преобразования ядер.

Программа для ЭВМ SKIF 1.0 рассчитывает следующие характеристики:

- изотопный состав актинидов от Th-228 до Cf-252 (138 изотопов) при облучении, выдержке и хранении топлива;
- изотопный состав актинидов, а также их дочерних продуктов распада (120 продуктов их распада от Tl-198 до Ac-229);

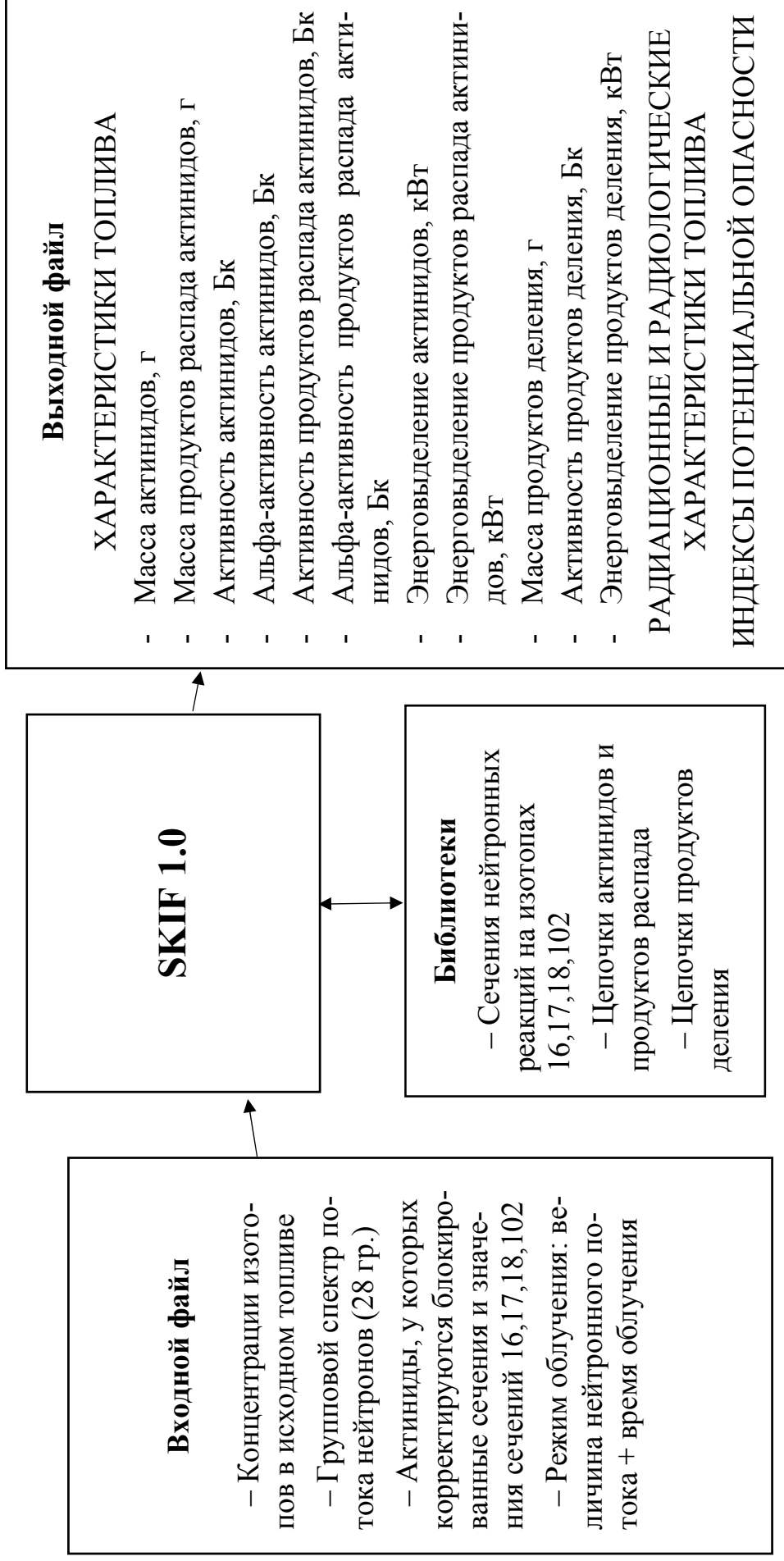


Рис. 1. Блок-схема программы SKIF 1.0

- изотопный состав 1214 продуктов деления (от H-1 до Au-201);
- остаточное энерговыделение от актинидов и их продуктов.

Методика расчета концентраций нуклидов

Программа для ЭВМ SKIF 1.0 рассчитывает ядерные превращения, учитывающие стартовые изотопные составы ториевого, уран-ториевого, уранового, плутониевого, уран-плутониевого топлива и топлива с минорными актинидами (Np, Am, Cm). Ядерные превращения включают нейтронные реакции: (n, f) , (n, γ) , $(n, 2n)$, $(n, 3n)$ и реакции радиоактивного распада: α , β^- , β^+ , изомерные переходы.

Система уравнений, описывающая изменение концентраций изотопов актинидов ρ_n во времени для цепочки из n нуклидов имеет вид:

$$\frac{d\rho_n}{dt} = \lambda_{n-1}^i \rho_{n-1} - \lambda_n \rho_n. \quad (1)$$

При условии, что на интервале времени Δt скорости образования и увода постоянны (λ_{n-1}^i , λ_n), уравнения имеют аналитическое решение. Расчет концентраций актинидов образованных в каждой из цепочек проводится по формуле:

$$\rho_n(t) = \sum_{m=1}^N \rho_m(0) \prod_{j=1}^{m-1} \lambda_j^i \sum_{k=1}^m \frac{e^{-\lambda_k t}}{\prod_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^m (\lambda_l - \lambda_k)}, \quad (2)$$

где N — количество нуклидов в цепочке; m — индекс нуклида в цепочке, от которого рассчитывается вклад в n -й нуклид; $\rho_m(0)$ — ядерное содержание m -го нуклида в начале интервала облучения; $\rho_m(\Delta t)$ — ядерное содержание n -го нуклида в конце интервала облучения Δt ; i — вид ядерных превращений (n, f) , (n, γ) , $(n, 2n)$, $(n, 3n)$; λ_k — скорость полного увода k -ядра, за счет (n, f) , (n, γ) , $(n, 2n)$, $(n, 3n)$; λ_j^i — скорость образования j -ядра по одной из реакций вида i .

При таком подходе считается, что на интервале Δt плотность потока нейтронов $\Phi(E)$ и сечения нейтронных взаимодействий $\sigma_{j-1}^i(E)$ не меняются и скорость образования j -ядра по одной из реакций i имеет следующий вид:

$$\lambda_j^i = \int_E \Phi(E) \sigma_{j-1}^i(E) dE, \quad (3)$$

где i — (n, γ) , $(n, 2n)$, $(n, 3n)$.

В случае радиоактивного распада, скорость образования j -го ядра есть постоянная данного вида распада $(j - 1)$ -го нуклида, умноженная на вероятность получения ядра в основном или метастабильном состоянии ω_{j-1} :

$$\lambda_j^i = \frac{\omega_{j-1} \ln 2}{T_{1/2,j-1}^i}. \quad (4)$$

Входными данными программы являются: плотность потока нейтронов в групповой форме (28 групп в разбивке БНАБ), усредненные по спектру нейтронов сечения деления, радиационного захвата (с учетом эффектов резонансной блокировки), $(n, 2n)$, $(n, 3n)$ для каждого временного интервала.

Описание РОСФОНД-2020.2

Библиотека РОСФОНД-2020.2 является компиляцией современных оценок данных о взаимодействии нейтронов и фотонов с веществом, отобранных из различных отечественных и зарубежных источников на основании анализа полноты, физической обоснованности данных и с учетом новой экспериментальной информации, обеспечивающих повышенную точность нейтронно-физических расчетов.

Библиотека РОСФОНД-2020.2 содержит 694 нейтронных файла общего назначения (для нуклидов от водорода до фермия), включая новые оценки и данные из других источников, в том числе:

(а) полученные в результате работ и принятые на основе анализа из библиотеки файлов ОЯД БРОНД-3.1 [3], это данные для

- топливных материалов (уран-235, 236, 238, плутоний-239, 240, 241),
- теплоносителя и конструкционных материалов (H, D, O, Al, Na, Si, Mn, Nb, Bi, Fe, Cr, Ni, Zr, Pb),
- продуктов деления (Tc-99, Ru-101, Rh-103, Pd-105 и ряд др.),
- минорных актинидов (изотопы нептуния, америция, кюрия);

(б) принятые на основе анализа из библиотеки файлов ОЯД РОСФОНД-2010 [4];

(в) полученные в рамках работы международной группы CIELO [5];

(г) принятые на основе анализа из современных зарубежных библиотек файлов ОЯД ENDF/B-7.1, 8.0 и 8.1 [6], [7], и TENDL-21 [8].

При формировании библиотеки РОСФОНД-2020.2 [9], из 694 файлов предыдущей версии РОСФОНД-2010 было модифицировано 290 файлов

общего назначения, добавлено из других источников 468 файлов по фотонным и термализационным данным и выходам продуктов деления. Для полноты БД РОСФОНД-2020.2, для обеспечения расчетов радиационных и распадных характеристик, в нее включена под-библиотека из 3691 файла по радиационным характеристикам из ENDF/B-VII.1. Под-библиотека термализационных данных РОСФОНД-2010 (20 файлов) на основе анализа заменена на под-библиотеку из 27 файлов из ENDF/B-VIII.1.

Все файлы данных РОСФОНД-2020.2 представлены в общепринятом международном формате ENDF6 [10].

Эксперименты по облучению МА в БН-350

В настоящей работе с использованием системы констант БНАБ-2020.2 и программы изотопной кинетики SKIF 1.0 представлены результаты расчетных исследований по изменению изотопного состава образцов топлива и МА, облученных в БН-350:

- образцы U, Pu в ячейке 90 — исследование оксидного уранового топлива ТВЭЛ;
- образцы Am, Np и Cm в ячейках 89 и 243 — исследования образцов младших актинидов (МА) для обоснования возможности их трансмутации.

Ячейка 90 (4 образца)

Ампульные эксперименты по облучению образцов урана, плутония и смешанного оксидного топлива (МОКС) в ячейке 90 реактора БН-350 были проведены в рамках 22-й и 23-й микрокампаний (МК).

Образцы облучались в межТВЭльном пространстве стандартной ТВС в зоне малого обогащения (ЗМО) реактора БН-350 с вторым типом загрузки [11] (рис. 2).

В ходе эксперимента облучались четыре образца:

- образец высокообогащенного урана-235 (около 90 %);
- образец высокообогащенного плутония-239 (около 96 %);
- два образца смешанного уран-плутониевого топлива на базе энергетического плутония ВВЭР, при идентичном изотопном составе урана и плутония отличавшихся лишь массой, а также положением в активной зоне, так как они были размещены на разных высотах.

Образцы представляли собой капиллярные трубки из стали XI8H10T диаметром 1,2×0,1 мм, внутри которых находились оксиды урана и/или плутония, загруженные методом виброуплотнения.

Параметры проведения эксперимента приведены в таблице 1 [12].

Таблица 1. Параметры облучения образцов в течение 22 и 23 микрокампаний

Параметр	Микрокампания	
	22	23
Место облучения	ЗМО	
Длительность МК (эфф. сут/выдержка)	72,7/22	72,5
Тепловая мощность реактора, МВт	700	
Календарное время облучения, сут	103,9	103,6

Сравнение новых результатов проводилось с предыдущими расчетами, где использовалась программа SKIF с библиотекой констант БНАБ-93 [13].

В таблицах 2–5 представлены расчетно-экспериментальные расхождения для каждого из расчетных вариантов в формате Р/Э – 1, %.

Во втором столбце приведены изменения результатов, связанные с обновлением программы версии SKIF 1.0. В третьем столбце в расчетно-экспериментальном отклонении представлено влияние новых данных по нейтронным сечениям из БНАБ-2020.2.

Таблица 2. Расчетно-экспериментальные отклонения для образца U-235, Р/Э – 1, %

Изотоп	БНАБ-93, SKIF	БНАБ-93, SKIF 1.0	БНАБ-2020.2, SKIF 1.0
U-234	-0,6	-0,5	0,4
U-235	0,2	0,1	0,0
U-236	-3,1	-2,0	1,2
U-238	-0,3	-0,3	-0,3

Из таблицы 2 видно, что расчеты по SKIF 1.0 с библиотекой БНАБ-2020.2 дают близкие к эксперименту результаты. Исходя из этого можно сделать вывод, что усовершенствование программы и обновление данных в библиотеке улучшило согласие с экспериментом.

Таблица 3. Расчетно-экспериментальные отклонения для образца Pu-239, Р/Э – 1, %

Изотоп	БНАБ-93, SKIF	БНАБ-93, SKIF 1.0	БНАБ-2020.2, SKIF 1.0
Pu-238	-9,6	-5,8	-10,4
Pu-239	-0,3	-0,4	-0,4
Pu-240	4,0	4,7	4,7
Pu-241	5,4	6,5	1,6
Pu-242	-35,0	-34,7	-34,3
Am-241	-8,7	-8,7	-9,0
Am-242m	-39,0	-38,8	-35,2
Cm-242	-8,4	-7,3	-6,9

Результаты, полученные для изотопов плутония, очень близки между собой. Можно заметить, что при переходе к обновленной версии SKIF 1.0 с новой библиотекой снижается отклонение в содержании Pu-241 в образце с 5,4 до 1,6 %, Pu-242 в образце — с 35 до 34,3 %. Значения Am-242m также значительно улучшились с 39 до 35,2 %. Однако немного возрастает отклонение в содержании Pu-238 с 9,6 до 10,4 % и Pu-240 с 4,0 до 4,7 %.

Таблица 4. Расчетно-экспериментальные отклонения для нижнего образца МОКС-топлива, Р/Э – 1, %

Изотоп	БНАБ-93, SKIF	БНАБ-93, SKIF 1.0	БНАБ-2020.2, SKIF 1.0
U-235	-0,7	-0,7	-0,7
U-238	0,0	0,0	0,0
Pu-238	4,7	4,8	4,7
Pu-239	0,0	0,1	0,1
Pu-240	-0,3	-0,4	-0,4
Pu-241	0,8	0,7	0,7
Pu-242	-0,6	-0,6	-0,6
Am-241	1,8	1,8	1,8
Am-242m	-15,0	-15,4	-15,4
Cm-242	22,0	21,1	21,1
Cm-243	50,0	49,1	49,1
Cm-244	-54,0	-54,5	-54,5

Для нижнего образца МОКС-топлива результаты расчетов хорошо согласуются между собой. Различия в оценках содержания некоторых изотопов, характерные для всех тестовых задач, обусловлены значениями коэффициента ветвления реакции радиационного захвата. Существенные расхождения между расчетными и экспериментальными данными для изотопов кюрия могут быть связаны как с погрешностями в константах, так и с ошибками в экспериментальных измерениях.

Таблица 5. Расчетно-экспериментальные отклонения для верхнего образца МОКС-топлива, Р/Э – 1, %

Изотоп	БНАБ-93, SKIF	БНАБ-93, SKIF 1.0	БНАБ-2020.2, SKIF 1.0
U-235	-1,5	-1,6	-1,6
U-238	0,0	0,0	0,0
Pu-238	5,1	5,1	5,1
Pu-239	0,1	0,2	0,2
Pu-240	-0,4	-0,4	-0,4
Pu-241	-0,8	-0,9	-0,9
Pu-242	-0,6	-0,6	-0,6
Am-241	-2,3	-2,3	-2,3
Am-242m	-16,0	-15,5	-15,5
Cm-242	23,0	22,5	22,5
Cm-243	30,0	24,5	24,5

Для верхнего образца МОКС-топлива можно сделать такие же выводы, как и для нижнего. Существенные изменения произошли в Cm-243 и данные улучшились с 30 до 24,5 %, и так же в лучшую сторону на 0,5 % изменились расчеты для Cm-242 и Am-242m.

Ячейка 89

В 90-х годах прошлого века в реакторе БН-350 проводились эксперименты с облучением МА: Np-237, Am-241, Cm-244. Анализ показал, что около 10 % МА выгорело, превратившись в продукты деления, а до 25 % трансмутировалось в другие тяжелые нуклиды.

Изучение дочерних актинидов показало, что при многократном цикле они могут эффективно выжигаться и воспроизводить делящиеся изо-

топы плутония, что является важной задачей для быстрых реакторов в замкнутом ядерном топливном цикле. Это подтверждает значимость данных, полученных в БНАБ-350, для разработки и внедрения технологий трансмутации МА в современных быстрых реакторах действующих БНАБ-600 и БНАБ-800, а также проектируемых БНАБ-1200, БР-1200.

В таблицах 6 и 7 представлены расчетно-экспериментальные отклонения для Np-237 и Am-241, соответственно, в формате Р/Э – 1, %. Расчеты производились на двух версиях программы SKIF и SKIF 1.0, а также на БНАБ-93 и ее обновленной версии БНАБ-2020.2.

Таблица 6. Расчетно-экспериментальные отклонения для Np-237, Р/Э – 1, %

Изотоп	БНАБ-93, SKIF	БНАБ-93, SKIF 1.0	БНАБ-2020.2, SKIF 1.0
Pu-236	-5,73	-9,01	-9,21
Np-237*	—	—	—
Pu-238	7,38	0,71	0,71
Pu-239	20,38	12,45	12,45
Pu-240	37,84	28,93	28,93

* Экспериментальные данные по нептуну отсутствуют.

Исходя из таблицы 6 можно сделать вывод, что данные по всем изотопам (кроме Pu-236) улучшились относительно экспериментальных данных после внедрения обновленной программы SKIF 1.0 и библиотеки БНАБ-2020.2.

Таблица 7. Расчетно-экспериментальные отклонения для Am-241, Р/Э – 1, %

Изотоп	БНАБ-93, SKIF	БНАБ-93, SKIF 1.0	БНАБ-2020.2, SKIF 1.0
Pu-238	-3,00	-3,03	-3,03
Pu-239	-27,00	-20,07	-20,07
Pu-242	5,00	6,87	6,87
Am-242m	21,00	1,22	1,22
Am-243	-15,00	-16,66	-16,91
Cm-242	7,00	-11,23	-11,23
Cm-243	-37,00	-20,70	-20,70
Cm-244	-69,00	-61,99	-62,12

Из приведенных в таблице 7 результатов расчетов видно, что данные по Pu-239, Cm-243 и Cm-244 существенно изменились в положительную сторону, а для Am-242m сместились практически на один порядок. Другие изотопы ухудшили свои показатели, однако изменения не велики.

Ячейка 243

В 243 ячейке облучалось несколько образцов МА, в том числе образец Cm-244. Схема капилляра с образцами актинидов, облучённого в составе ТВС ячейки 243, представлена на рисунке 2. Для контроля расположения образца-свидетеля в ТВС в нижнюю часть трубки был загружен и пеленгован образец Ir-192. Облучение проводилось в то же время, что и 89 ячейка.

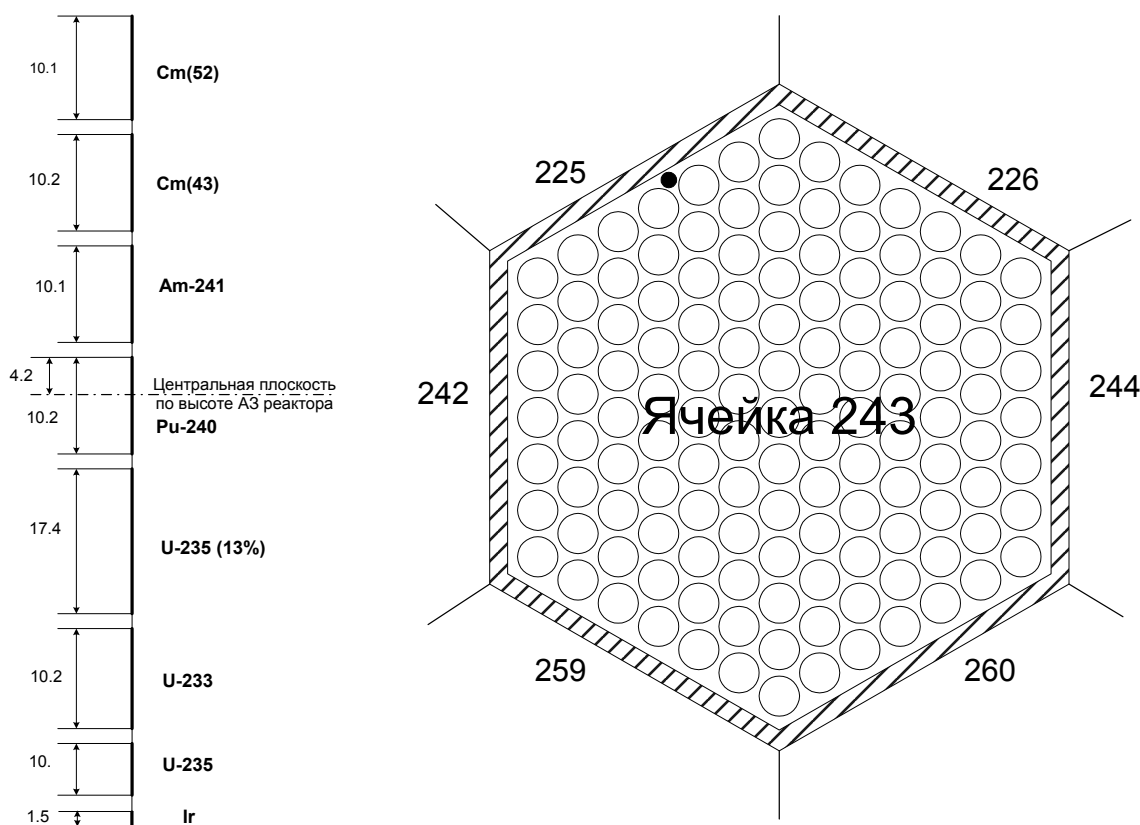


Рис. 2. Схема размещения образцов в капилляре и ТВС реактора БН-350 [12, рис. 1]

В таблицах 8 и 9 приведены расчетно-экспериментальные отклонения для нижнего (43) и верхнего (52) образца Cm-244 соответственно.

Таблица 8. Расчетно-экспериментальные отклонения для Cm-244 (43), Р/Э – 1, %

Изотоп	БНАБ-93, SKIF	БНАБ-93, SKIF 1.0	БНАБ-2020.2, SKIF 1.0
Am-241	-4,796	-7,120	-6,214
Am-242m	-27,723	-25,743	-23,015
Am-243	5,195	2,470	3,810
Cm-243	45,588	40,559	39,880
Cm-244	0,000	0,000	0,000
Cm-245	-16,538	-10,951	-6,595
Cm-246	-6,380	-3,932	-4,451
Cm-247	-50,000	-46,670	-20,644

Таблица 9. Расчетно-экспериментальные отклонения для Cm-244 (52), Р/Э – 1, %

Изотоп	БНАБ-93, SKIF	БНАБ-93, SKIF 1.0	БНАБ-2020.2, SKIF 1.0
Am-241	-7,181	1,632	2,346
Am-242m	-24,000	-12,473	-9,927
Am-243	-5,623	2,981	3,997
Cm-243	43,243	37,587	36,750
Cm-244	0,000	0,000	0,000
Cm-245	-26,907	-10,864	-7,267
Cm-246	-12,909	-0,573	-1,169
Cm-247	-58,537	-42,692	-14,351

Из таблиц видно, что по изотопам Am и Cm наблюдается сближение с экспериментальными данными, и данные более точные по сравнению с предыдущими расчетами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В препринте «Расчетные исследования облучения младших актинидов в быстром спектре» представлены результаты и сравнительный анализ расчетов экспериментов на БН-350 по облучению образцов. Развитие программы SKIF 1.0 и использование библиотеки нейтронных сечений РОСФОНД-2020.2, а также полученной на ее основе групповой библиотеки БНАБ-2020.2. дали уточнение в расчетную оценку экспериментов. Особенно это проявилось для образцов Am-241 и Cm-244.

Полученные результаты расчетных исследований по облучению образцов на БН-350 с апробацией библиотек РОСФОНД-2020.2 и БНАБ-2020.2 для задач изотопной кинетики в реакторах на быстрых нейтронах будут продолжены на новых экспериментах по облучению в действующих реакторах БОР-60, БН-600, БН-800 и проектируемых МБИР и БН-1200.

Сравнительный анализ полученных расчетных и экспериментальных данных показал, что необходимо проводить дополнительные эксперименты по облучению для расширения экспериментальной базы с целью верификации константного обеспечения и расчетных программ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аттестационный паспорт программы для электронных вычислительных машин «SKIF 1.0» № 603 от 23 июля 2024 г.
2. Кочетков А. Л. Программа CARE — расчет изотопной кинетики, радиационных и экологических характеристик ядерного топлива при его облучении и выдержке : Препринт ФЭИ-2431. — Обнинск, ГНЦ РФ – ФЭИ, 1995. — 14 с.
3. Блохин А. И., Гай Е. В., Игнатюк А. В., Коба И. И., Манохин В. Н., Проняев В. Г. Новая версия библиотеки нейтронных данных БРОНД-3.1 // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2016. — Вып. 2. — С. 62—93.
4. РОСФОНД — Российская библиотека файлов оцененных нейтронных данных: https://www.oecd-nea.org/dbdata/data/nds_eval_libs.htm#RUSFOND.
5. Chadwick M., Capote R., Trkov A. et al. CIELO Collaboration Summary Results: International Evaluations of Neutron Reactions on Uranium, Plutonium, Iron, Oxygen and Hydrogen // Nuclear Data Sheets 148 (2018) 189—213.
6. Chadwick M., et al. ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data // Nuclear Data Sheets, 112(12):2887 – 2996, 2011.
7. Brown D. A., Chadwick M. B., Capote R., et al. ENDF/B-VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections, New Standards and Thermal Scattering Data // Nuclear Data Sheets, 148: pp. 1—142 (2018).
8. Библиотека оцененных ядерных данных TENDL-21: https://www.oecd-nea.org/dbdata/data/nds_eval_libs.htm#TENDL-21.
9. Аверченкова Е. П., Дьяченко Я. В., Забродская С. В., Мантуров Г. Н., Мишин В. А., Панова Д. В., Перегудов А. А., Семенов М. Ю., Тормышев И. В., Ляпин Е. П. Формирование системы групповых констант для нейтронно-

физических расчётов реакторов на быстрых нейтронах на основе файлов библиотеки РОСФОНД-2020.2 // Известия вузов. Ядерная энергетика. — 2024. — № 2. — С. 155—169.

10. Формат ENDF6: <https://www-nds.iaea.org/exfor/x4guide/manuals/endf-manual.pdf>.

11. Ганаев И. Х., Лопаткин А. В., Орлов В. В. Гомогенная трансмутация Am, Cm, Np в активной зоне реактора типа БРЕСТ // Атомная энергия. — Т. 89. — Вып. 5. — ноябрь 2000.

12. Хомяков Ю. С., Забродская С. В., Семенов М. Ю. Исследования характеристик топлива быстрых реакторов в БН-350 // Известия вузов. Ядерная энергетика. — 2023. — № 3 — С. 146—152.

13. Мантуров Г. Н., Николаев М. Н., Цибуля А. М. Система групповых констант БНАБ-93. Часть 1: Ядерные константы для расчета нейтронных и фотонных полей излучений // ВАНТ: Серия: Ядерные константы. — М. : 1996. — Вып. 1. — С. 59.

Подписано к печати 30.07.2025.
Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Усл. п. л. 0,7. Уч.-изд. л. 0,6.
Тираж 45 экз. Заказ № 197.

Отпечатано в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» методом прямого репродуцирования
с оригинала авторов.
249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.