

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ НЕЙТРОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРИТИЧЕСКИХ СБОРОК КС-1, КС-2, ..., КС-6

В. Ф. Колесов, В. Х. Хоружий

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, г. Саров Нижегородской обл.

В 2010 г. были опубликованы полученные в экспериментах конца 1950-х гг. нейтронно-физические данные для простых критических сборок КС-1, КС-2, ..., КС-6 с активными зонами из металлического высокообогащенного урана или плутония. Научная значимость информации указанных публикаций, ввиду отдаленности времени ее получения, может быть серьезно поколеблена возможными сомнениями относительно ее точности. В этой связи представлялось целесообразным испытание приведенных в указанных публикациях данных расчетами с помощью наиболее современных, проверенных практикой математических программ и библиотек нейтронных данных.

Проведению этого рода анализа и посвящена настоящая статья.

Ключевые слова: критическая сборка, высокообогащенный уран, плутоний, нейтронные характеристики сборок, интегральные ядерные данные, возмущения реактивности, эксперименты на критических сборках, расчеты критических сборок.

CALCULATION ANALYSIS OF NEUTRON CHARACTERISTICS OF CRITICAL ASSEMBLIES KS-1, KS-2, ..., KS-6 / V. F. KOLESOV, V. Kh. KHORUZHYY // In the year of 2010 there were published neutron and physical data for simple critical assemblies KS-1, KS-2, ..., KS-6 with cores made of metallic high-enriched uranium and plutonium, obtained in the experiments in late 1950. Scientific importance of given published information (due to the time delay of its obtaining) can be seriously doubted in regard to its accuracy. In this connection it seems quite expedient to test data presented in mentioned publications by calculations using up-to-the-minute mathematical programs verified in practice as well as neutron data libraries.

This article is devoted to performance of this kind of analysis.

Key words: critical assembly, high-enriched uranium, plutonium, neutron characteristics of assemblies, integral nuclear data, reactivity perturbations, experiments on critical assemblies, critical assemblies calculations.

Введение

В 2010 г. опубликованы три статьи [1–3] по экспериментальному исследованию нейтронных характеристик шести простых критических сборок из металлического высокообогащенного урана и плутония без отражателей и с отражателями из урана естественного состава. Эти статьи были оформлены по работам, выполненным во ВНИИЭФ еще во 2-й половине 50-х годов прошлого столетия, в открытой печати ранее не опубликованным. Обширная информация по нейтронным характеристикам этих критических сборок, будь она опубликована в любом из прошедших десятилетий, вне сомнения, была бы воспринята специалистами с большим интересом. Можно надеяться, что эта информация и к настоящему вре-

мени не утратила своей актуальности, что материалы указанных статей расширяют арсенал критических сборок и их интегральных параметров, служащих в качестве опоры при обработке используемых в производственных расчетах вычислительных средств. Не исключено, что материалы этих статей помогут выяснению причин недостаточно точной воспроизводимости в расчетах по наиболее современным программам нейтронных характеристик некоторых из критических сборок.

Существенно при этом учитывать, что рассмотренные в статьях критические сборки имеют удобную для проведения расчетов простую структуру и почти идеальную сферически-симметричную геометрию, но делящийся материал некоторых из сборок доступен далеко не всем институтам. К тому же в настоящее время некоторые из

указанных сборок, по тем или иным причинам, даже во ВНИИЭФ не могут быть восстановлены.

Высокая, казалось бы, значимость информации статей [1–3] может быть, однако, серьезно поколеблена возможными сомнениями относительно ее точности. Полувековая отдаленность времени проведения экспериментов, не столь совершенные, как ныне, аппаратура и методы измерений, да и отсутствие на тот период такой, как сейчас, устремленности к получению рафинированных по точности результатов – все это, конечно, создает почву для указанного рода сомнений. В этой связи представлялось весьма целесообразным испытание нейтронно-физической информации статей [1–3] расчетами с помощью наиболее современных, проверенных практикой математических программ и библиотек нейтронных данных.

Настоящая статья посвящена этого рода анализу. С помощью программы С-007 метода Монте-Карло [4] и трех независимых международных библиотек оцененных ядерных данных рассчитаны для всех шестиборок значения $k_{эф}$, полные числа реакций на присутствующих в АЗ и отражателе изотопах урана и плутония, утечка нейтронов при нормировке на один акт деления, а также гистограммы и средняя энергия спектра нейтронов в центре и на границе. С помощью программного комплекса САТУРН [5] и программы АРКТУР [6] рассчитаны возмущения реактивности, производимые в сборках КС-1, КС-2, КС-5 малыми образцами, размещаемыми в центрахборок и в нескольких точках по радиусу сборки КС-1.

Расчеты, как уже сказано, имели целью оценку точности данных статей [1–3] и проверку их соответствия современным требованиям к интегральным нейтронно-физическим данным, получаемым на критических сборках.

1. Баланс и пространственно-энергетические распределения нейтронов в сборках КС-1, КС-2, ..., КС-6

1.1. Краткая информация об экспериментах на критических сборках КС-1, КС-2, ..., КС-6

Приведенные в статьях [1, 2] данные по нейтронно-физическим характеристикам шести критическихборок из урана и плутония без отражателей и с отражателями из урана естественного состава включают сведения о критических размерах и массах, пространственно-энергетических распределениях нейтронов, сечениях ядерных ре-

акций, полных числах реакций и балансе нейтронов в сборках. Эти данные были получены, главным образом, на базе измерения радиальных распределений интенсивности различных энергочувствительных реакций – реакций, для которых с хорошей точностью известен ход сечения в зависимости от энергии нейтронов. В качестве таковых использовались реакции деления ^{235}U , ^{233}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{237}Np , ^{232}Th , а также реакции (n,p) , $(n,2n)$ и (n,α) : $^{32}\text{S}(n,p)$, $^{238}\text{U}(n,2n)$, $^{232}\text{Th}(n,2n)$, $^{238}\text{U}(n,\gamma)$, $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$, $^6\text{Li}(n,\alpha)$, $^{10}\text{B}(n,\alpha)$.

Некоторые из перечисленных реакций осуществляются в самих критическихбороках. Измеренные для них распределения использовались для определения полных чисел реакций и баланса нейтронов в сборках. Эти и другие распределения интенсивностей реакций были использованы также для измерения эффективных сечений реакций.

Исследуемые системы монтировались на стенде критическихборок ФКБН-1 (рис. 1), размещаемом в экспериментальном зале с толстыми бетонными стенами и потолком в качестве биологической защиты. Сборки составлялись из полусферических слоев толщиной 0,7–2 см. Для проведения измерений внутри активных зон и отражателей имелись измерительные каналы диаметром 2,2 см. Эти каналы можно было закладывать специальными цилиндриками из материалов активных зон и отражателей. Геометрические параметры и состав исследуемыхборок представлены в табл. 1.

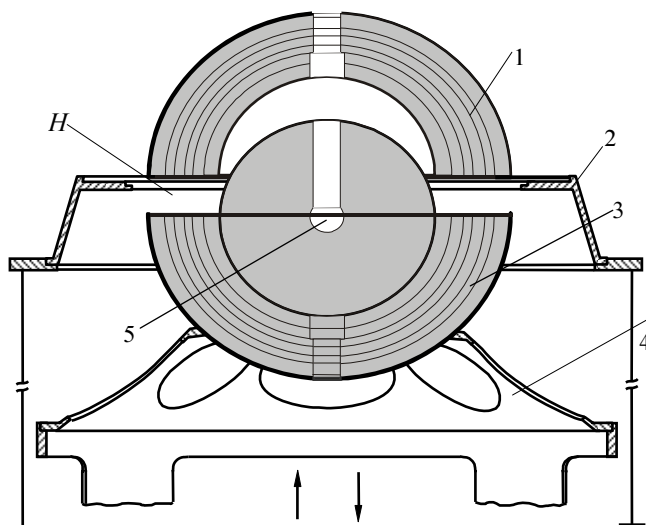


Рис. 1. Схематический разрез критической сборки, размещенной на опорах стенда ФКБН-1 [7]: 1 – верхний блок сборки; 2 – опора для верхнего блока; 3 – нижний блок сборки; 4 – опора нижнего блока; 5 – воздушный канал для детекторов; H – расстояние между блоками

Геометрические параметры и состав критических сборок [1, 2]

Критическая сборка	Активная зона					Отражатель	
	Радиус полости, см	Внешний радиус, см	Плотность, г/см ³	Масса, кг	Состав. Массовая доля, %	Внешний радиус, см	Плотность, г/см ³
КС-1	1,0	9,154	18,40	59,05	²³⁵ U–89,6 ²³⁸ U–10,4	–	–
КС-2	1,4	6,75	15,02	19,34	²³⁹ Pu–95,3 ²⁴⁰ Pu–1,7 Ni–1,2 Ga–1,8	–	–
КС-3	1,0	11,0	18,76	104,5	²³⁵ U–36 ²³⁸ U–64	25,0	18,3
КС-4	1,4	6,75	17,2	21,96	²³⁵ U–89,6 ²³⁸ U–10,4	25,0	18,2
КС-5	0,0	4,67	15,2	6,49	²³⁹ Pu–95,3 ²⁴⁰ Pu–1,7 Ni–1,2 Ga–1,8	32,4	18,3
КС-6	0,0	4,29	18,4	6,05	²³³ U–96 ²³⁸ U–4	32,4	18,3

Как уже говорилось, форма всех сборок сферически-симметричная. Сборки 1, 2 не имеют отражателя, сборки 3–6 имеют отражатель из урана естественного изотопного состава. Приведенные в табл. 1 плотности материалов являются средними по объемам активных зон или отражателей.

Интенсивности всех реакций деления, а также реакций ⁶Li(*n*,α) и ¹⁰B(*n*,α) измерялись малогабаритными ионизационными камерами, имеющими форму диска диаметром от 1,4 до 1,8 см и толщиной от 2 до 3 мм. Каждая камера содержала слои индикаторных веществ общей массой от 0,1 до 2 мг. Ошибка в определении количества вещества в слоях составляла для различных камер от 2 до 7 %.

Распределения плотностей реакций ²³⁸U(*n*,γ), ¹⁹⁷Au(*n*,γ), ³²S(*n*,*p*), ²³⁸U(*n*,2*n*), ²³²Th(*n*,2*n*) определялись с помощью метода активации. После облучения измерялись β-активности ²³⁹Np, ¹⁹⁸Au, ²³⁷U и ²³¹Th. Во всех случаях, за исключением золота, прибегали к методу радиохимической очистки от продуктов сопутствующих реакций и от дочерних продуктов естественного распада исходного вещества. Абсолютный β-счет осуществлялся с помощью 4π-счетчиков.

При проведении измерений камеры или образцы индикаторных веществ устанавливались

в различных точках по радиусу вертикального измерительного канала, закладываемого вкладышами из материала активной зоны. Измеряемые плотности реакций нормировались на один атом изотопа и на один нейтрон утечки из сборки. Поток нейтронов из сборок измерялся с помощью «длинных счетчиков» с точностью 3,5–4 %.

В качестве примера на рис. 2 представлены результаты измерения плотностей реакций в КС-3.

Прямые измерения сечений проводились на нейтронах утечки для большинства реакций деления. Для этой цели использовались хорошо откалброванные делительные камеры, веса делящихся слоев которых были известны с точностью 2–3 %. Поток нейтронов утечки измерялся с помощью «длинных счетчиков» путем сравнения с потоком от эталонного источника, мощность которого была известна с точностью ±3 %.

Сечения на нейтронах утечки для остальных реакций, а также сечения всех реакций для внутренних точек сборок $\sigma_j(r)$ определялись из соотношений

$$\sigma_j(r) = \frac{\alpha_j(r)}{\alpha_g(r)} \sigma_g(r),$$

где $\alpha_j(r)/\alpha_g(r)$ – отношение плотности реакции j к плотности деления Pu в точке r ; $\sigma_g(r)$ – сечение реакции деления Pu²³⁹ в той же точке.

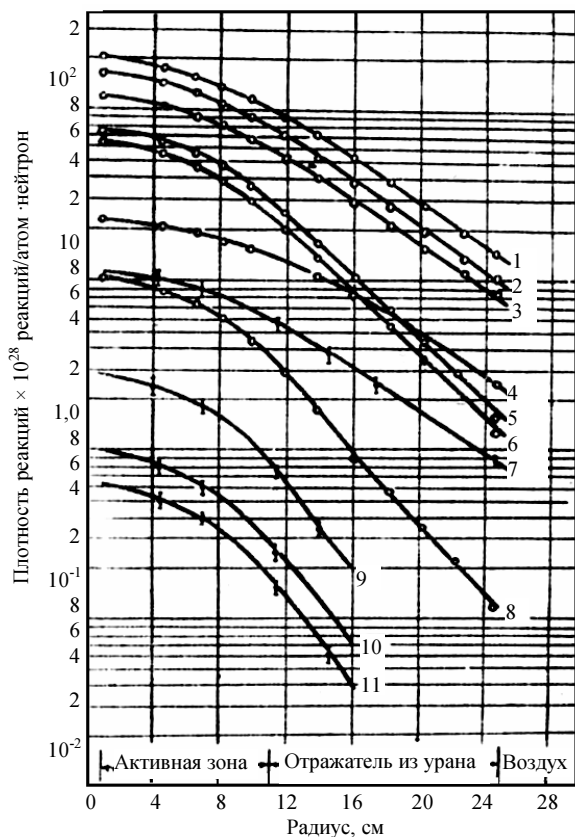


Рис. 2. Распределение плотностей реакций по радиусу сборки КС-3 [2]: 1 – ²³³U(n,f); 2 – ²³⁹Pu(n,f); 3 – ²³⁵U(n,f); 4 – ¹⁹⁷Au(n,γ); 5 – ²⁴⁰Pu(n,f); 6 – ²³⁷Np(n,f); 7 – ²³⁸U(n,γ); 8 – ²³⁸U(n,f); 9 – ³²S(n,p); 10 – ²³⁸U(n,2n); 11 – ²³²Th(n,2n)

Определенные указанными способами сечения реакций использовались для построения нейтронных спектров и спектральных гистограмм. В основном это построение выполнялось с помощью метода интегральных детекторов. Этот метод начали использовать во ВНИИЭФ с 1959 г., как раз со времени исследования критических сборок КС-1, КС-2, ..., КС-6. Тогда Колесовым В. Ф. и Малинкиным А. А., независимо от работ зарубежных авторов, во ВНИИЭФ в те годы неизвестных, был сформулирован и введен в практику алгоритм восстановления спектра нейтронов по откликам пороговых и других энергочувствительных детекторов. Применялось представление искомого реального спектра в виде гистограммы или суперпозиции типовых модельных спектров. Вес каждой ступени гистограммы или модельного спектра определяли в результате процедуры уравнивания с привлечением метода наименьших квадратов [8].

По построенным спектрам в работах [1, 2] рассчитывался ряд интегральных спектральных нейтронных характеристик сборок, в частности, средняя по потоку (локальная или интегральная для всей сборки) энергия нейтронов.

В качестве примера использования этого метода на рис. 3 показаны спектры и спектральные гистограммы потока нейтронов в центре и на границе сборки КС-2, а на рис. 4 – такие же характеристики для нейтронов утечки сборок КС-4-КС-6.

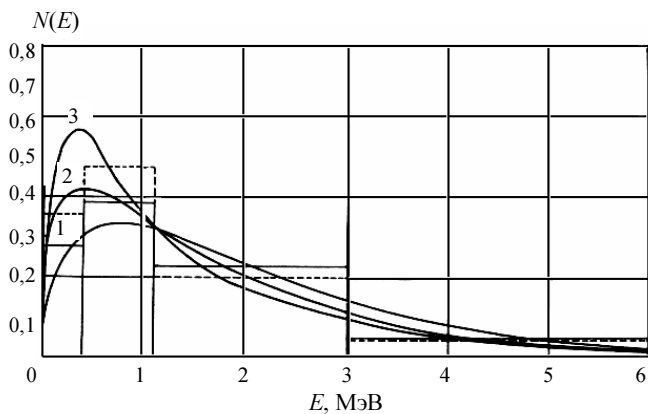


Рис. 3. Спектр нейтронов в центре и на границе сборки КС-2 [1]: 1 – спектр нейтронов деления ²³⁹Pu

$$\left(N(E) = A \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_{sc}} \frac{\sqrt{2E}}{1,1} e^{-\frac{E}{1,1}} \right); 2 – \text{спектр нейтронов на границе КС-2}; 3 – \text{спектр нейтронов в центре КС-2. Гистограммы: — — граница КС-2; - - - - центр КС-2}$$

ниче КС-2; 3 – спектр нейтронов в центре КС-2. Гистограммы: — — граница КС-2; - - - - центр КС-2

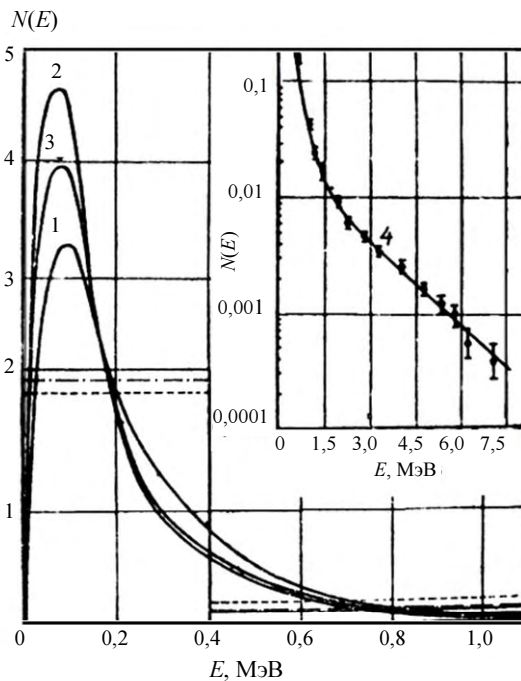


Рис. 4. Спектры нейтронов утечки из сборок КС-4 (1), КС-5 (2), КС-6 (3) [2]. Гистограммы: - - - - КС-4; — — КС-5; - · - · - КС-6. 4 – спектр нейтронов КС-5, измеренный с помощью фотопластинок

Полные числа реакций в сборках КС-1, КС-2, ..., КС-6 определялись путем интегрирования по всему объему распределений характерных для самихборок реакций. Из всех важных дляборок реакций в работах [1, 2] не измерялись лишь реакции (n,γ) на ^{235}U и ^{239}Pu . Вклад этих процессов оценивался по данным измерения сечений (n,γ) на монокроматических нейтронах [9], а также по результатам измерений отношения σ_c/σ_f в быстром реакторе EBR-1 [10].

В табл. 2 приведены относительные значения полных чисел реакций и утечки нейтронов в критических сборках КС-1, КС-2, в табл. 3 – в КС-3–КС-6. Полные числа делений основного изотопа в активных зонах приняты равными 100.

Таблица 2

Полные числа реакций и утечки нейтронов в критических сборках КС-1, КС-2 [1]

Ядерная реакция или утечка	КС-1	КС-2
$^{235}\text{U}(n,f)$	100	–
$^{235}\text{U}(n,\gamma)$ принято	11 ± 2	–
$^{238}\text{U}(n,f)$	$1,86 \pm 0,1$	–
$^{238}\text{U}(n,\gamma)$	$0,36 \pm 0,1$	–
$^{238}\text{U}(n,2n)$	$0,12 \pm 0,015$	–
$^{239}\text{Pu}(n,f)$	–	100
$^{239}\text{Pu}(n,\gamma)$ принято	–	5 ± 1
$^{240}\text{Pu}(n,f)$	–	$1,1 \pm 0,1$
Утечка	160 ± 5	213 ± 6

Таблица 3

Полные числа реакций и утечки нейтронов в критических сборках КС-3–КС-6 [2]

Критическая сборка	Ядерная реакция или утечка	Активная зона	Отражатель
КС-3	$^{235}\text{U}(n,f)$	100	$5,2 \pm 0,2$
	$^{235}\text{U}(n,\gamma)$	$(16 \pm 1,4)$	$(1,2 \pm 0,1)$
	$^{238}\text{U}(n,f)$	$12,8 \pm 0,5$	$21,9 \pm 1,1$
	$^{238}\text{U}(n,\gamma)$	$17,7 \pm 1,7$	$78,1 \pm 8,0$
	$^{238}\text{U}(n,2n)$	$1,2 \pm 0,1$	$1,6 \pm 0,2$
	Утечка	–	101 ± 4
КС-4	$^{235}\text{U}(n,f)$	100	$6,8 \pm 0,4$
	$^{235}\text{U}(n,\gamma)$	$(11,2 \pm 1,1)$	$(1,7 \pm 0,2)$
	$^{238}\text{U}(n,f)$	$1,4 \pm 0,1$	$31 \pm 1,2$
	$^{238}\text{U}(n,\gamma)$	$0,9 \pm 0,1$	$85,9 \pm 7,0$
	$^{238}\text{U}(n,2n)$	$0,08 \pm 0,01$	$1,5 \pm 0,2$
	Утечка	–	138 ± 4

Критическая сборка	Ядерная реакция или утечка	Активная зона	Отражатель
КС-5	$^{239}\text{Pu}(n,f) + ^{240}\text{Pu}(n,f)$	100	–
	$^{239}\text{Pu}(n,\gamma)$	$(5 \pm 0,5)$	–
	$^{235}\text{U}(n,f)$	–	$14,8 \pm 0,6$
	$^{235}\text{U}(n,\gamma)$	–	$(3,0 \pm 0,3)$
	$^{238}\text{U}(n,f)$	–	$49,5 \pm 1,9$
	$^{238}\text{U}(n,\gamma)$	–	192 ± 14
	$^{238}\text{U}(n,2n)$	–	$1,7 \pm 0,2$
	Утечка	–	130 ± 4
КС-6	$^{235}\text{U}(n,f)$	100	–
	$^{235}\text{U}(n,\gamma)$	$(5 \pm 0,5)$	–
	$^{235}\text{U}(n,f)$	–	$11,6 \pm 0,5$
	$^{235}\text{U}(n,\gamma)$	–	$(2,9 \pm 0,3)$
	$^{238}\text{U}(n,f)$	$0,4 \pm 0,02$	$48,7 \pm 2,4$
	$^{238}\text{U}(n,\gamma)$	$(0,2 \pm 0,02)$	(157 ± 14)
	$^{238}\text{U}(n,2n)$	–	$1,7 \pm 0,3$
	Утечка	–	107 ± 3

Примечание. Числа в скобках получены путем косвенных оценок.

Данные табл. 2, 3 предоставляют возможность составления баланса нейтронов и оценки ν – среднего числа нейтронов на акт деления для ^{235}U , ^{233}U и ^{239}Pu , поскольку главную роль в балансе нейтронов играют реакции деления в этих нуклидах. В работах [1, 2] было показано, что баланс нейтронов в рассматриваемых критических сборках соблюдается при следующих значениях ν : $2,67 \pm 0,11$ для ^{235}U в КС-1; $3,14 \pm 0,13$ для ^{239}Pu в КС-2; $2,56$ для ^{235}U в КС-3; $2,60$ для ^{235}U в КС-4; $3,07$ для ^{239}Pu в КС-5; $2,65$ для ^{233}U в КС-6; $2,80$ для ^{238}U ; $2,53$ для ^{235}U в урановых отражателях.

1.2. Расчет нейтронных характеристик критическихборок КС-1, КС-2, ..., КС-6

Расчет нейтронных характеристик критическихборок КС-1, КС-2, ..., КС-6 проводился с помощью программы С-007 метода Монте-Карло [4] с использованием трех независимых международных библиотек оцененных ядерных данных – библиотек ENDF/B-VII, JEF3 и JENDL3.3.

Были рассчитаны для всех шестиборок значения коэффициента размножения нейтронов $k_{\text{эф}}$, полные числа реакций на присутствующих в АЗ и отражателе изотопах урана и плутония и утечка нейтронов из критическихборок при нормировке на один акт деления в ней. Были рассчитаны также

гистограммы энергетического спектра нейтронов в центре и на границе сборок при том же, что в статьях [1, 2], разбиении на участки энергетической шкалы. Принятые в расчетах значения геометрических параметров сборок и состав их областей в точности соответствовали данным табл. 1.

Полученные с помощью расчетов значения $k_{эф}$, ν и Λ для шести сборок представлены в табл. 4, полные числа реакций (n,f) , (n,γ) , $(n,2n)$ в изотопах урана и плутония, нормированные на одно деление в сборке, а также утечка нейтронов из сборок в той же нормировке – в табл. 5, 6.

В табл. 7, 8 приведены рассчитанные по программе Монте-Карло C-007 с использованием нейтронных данных из библиотеки ENDF/B-VII ступенчатые спектры и средние энергии спектров

в центре и на внешней границе сборок КС-1, КС-2, ..., КС-6 (для сборок с отражателем «граница» означает внешнюю границу отражателя).

Как видно из табл. 4–6, расчетные значения $k_{эф}$, ν , Λ , полных чисел реакций (n,f) , (n,γ) , $(n,2n)$ в изотопах урана и плутония, нормированных на одно деление в сборках КС-1, КС-2, ..., КС-6, а также утечки нейтронов из сборок в той же нормировке, заметно зависят от используемой библиотеки ядерных данных. Наибольший разброс в отношениях максимального значения к минимальному, в зависимости от использованных в расчете библиотек, для $k_{эф}$ составляет 0,9%, для ν – 0,3 % и для Λ – 2,8 %.

Таблица 4

Значения $k_{эф}$ для сборок КС-1, КС-2, ..., КС-6, полученные в расчетах с тремя библиотеками ядерных данных

Критическая сборка	Библиотека ядерных данных			
	ENDF/B-VII	JEF3	JENDL3.3	среднее
КС-1	0,9952	0,9982	0,9911	0,9948
КС-2	1,0033	1,0026	0,9993	1,0017
КС-3	0,9973	0,9902	0,9903	0,9926
КС-4	0,9944	0,9869	0,9908	0,9907
КС-5	1,0059	1,0002	0,9971	1,0011
КС-6	0,9925	0,9980	0,9930	0,9945

Таблица 5

Полученные в расчетах с тремя библиотеками ядерных данных нормированные на одно деление в сборке полные числа реакций и утечки нейтронов в сборках КС-1, КС-2

Ядерная реакция, утечка	КС-1				КС-2			
	ENDF/B-VII	JEF3	JENDL3.3	среднее	ENDF/B-VII	JEF3	JENDL3.3	среднее
$^{235}\text{U}(n,f)$	0,9692	0,9650	0,9720	0,9687	–	–	–	–
$^{235}\text{U}(n,\gamma)$	0,1116	0,1110	0,1154	0,1127	–	–	–	–
$^{235}\text{U}(n,2n)$	0,00596	0,00620	0,00584	0,00600	–	–	–	–
$^{238}\text{U}(n,f)$	0,0175	0,0176	0,0177	0,0176	–	–	–	–
$^{238}\text{U}(n,\gamma)$	0,00862	0,00828	0,00830	0,00840	–	–	–	–
$^{238}\text{U}(n,2n)$	$8,78 \cdot 10^{-4}$	$8,87 \cdot 10^{-4}$	$7,09 \cdot 10^{-4}$	$8,25 \cdot 10^{-4}$	–	–	–	–
$^{239}\text{Pu}(n,f)$	–	–	–	–	0,9911	0,9904	0,9872	0,9896
$^{239}\text{Pu}(n,\gamma)$	–	–	–	–	0,0323	0,0374	0,0402	0,0366
$^{239}\text{Pu}(n,2n)$	–	–	–	–	0,00216	0,00279	0,00251	0,0249
$^{240}\text{Pu}(n,f)$	–	–	–	–	0,0121	0,0122	0,0119	0,0121
$^{240}\text{Pu}(n,\gamma)$	–	–	–	–	$9,74 \cdot 10^{-4}$	0,00109	0,00113	0,00106
$^{240}\text{Pu}(n,2n)$	–	–	–	–	$2,75 \cdot 10^{-5}$	$4,05 \cdot 10^{-5}$	$3,55 \cdot 10^{-5}$	$3,45 \cdot 10^{-5}$
Утечка	1,4978	1,5009	1,4959	1,4982	2,1164	2,1132	2,1050	2,1115

Полученные в расчетах с тремя библиотеками ядерных данных нормированные
на одно деление в сборке полные числа реакций и утечка нейтронов в сборках КС-3–КС-6

Ядерная реакция, утечка	КС-3							
	Активная зона				Отражатель			
	ENDF/ B-VII	JEF3	JENDL3.3	среднее	ENDF/ B-VII	JEF3	JENDL3.3	среднее
$^{235}\text{U}(n,f)$	0,7463	0,7352	0,7380	0,7398	0,0325	0,0324	0,0323	0,0324
$^{235}\text{U}(n,\gamma)$	0,1219	0,1203	0,1297	0,1240	0,00672	0,00666	0,00731	0,00690
$^{235}\text{U}(n,2n)$	0,00224	0,00224	0,00214	0,00221	$3,41 \cdot 10^{-5}$	$3,40 \cdot 10^{-5}$	$3,26 \cdot 10^{-5}$	$3,36 \cdot 10^{-5}$
$^{238}\text{U}(n,f)$	0,1032	0,1034	0,1031	0,1032	0,1154	0,1193	0,1168	0,1172
$^{238}\text{U}(n,\gamma)$	0,1270	0,1223	0,1218	0,1237	0,5103	0,4950	0,4912	0,4988
$^{238}\text{U}(n,2n)$	0,00503	0,00487	0,00396	0,00462	0,00592	0,00567	0,00466	0,00542
Утечка	–	–	–	–	0,8346	0,8602	0,8550	0,8499
	КС-4							
$^{235}\text{U}(n,f)$	0,7671	0,7544	0,7615	0,7610	0,0438	0,0436	0,0436	0,0437
$^{235}\text{U}(n,\gamma)$	0,1052	0,1034	0,1099	0,1061	0,00904	0,00896	0,00985	0,00928
$^{235}\text{U}(n,2n)$	0,00364	0,00374	0,00354	0,00364	$5,04 \cdot 10^{-5}$	$5,12 \cdot 10^{-5}$	$4,87 \cdot 10^{-5}$	$5,01 \cdot 10^{-5}$
$^{238}\text{U}(n,f)$	0,0110	0,0109	0,0110	0,0110	0,1726	0,1781	0,1746	0,1751
$^{238}\text{U}(n,\gamma)$	0,00763	0,00723	0,00725	0,00737	0,6896	0,6679	0,6643	0,6739
$^{238}\text{U}(n,2n)$	$5,36 \cdot 10^{-4}$	$5,33 \cdot 10^{-4}$	$4,29 \cdot 10^{-4}$	$4,99 \cdot 10^{-4}$	0,00874	0,00858	0,00699	0,00810
Утечка	–	–	–	–	0,8102	0,8408	0,8346	0,8285
	КС-5							
$^{235}\text{U}(n,f)$	–	–	–	–	0,0807	0,0809	0,0810	0,0809
$^{235}\text{U}(n,\gamma)$	–	–	–	–	0,0177	0,0177	0,0196	0,0183
$^{235}\text{U}(n,2n)$	–	–	–	–	$8,59 \cdot 10^{-5}$	$8,37 \cdot 10^{-5}$	$8,33 \cdot 10^{-5}$	$8,43 \cdot 10^{-5}$
$^{238}\text{U}(n,f)$	–	–	–	–	0,2563	0,2639	0,2581	0,2594
$^{238}\text{U}(n,\gamma)$	–	–	–	–	1,3523	1,3089	1,3086	1,3233
$^{238}\text{U}(n,2n)$	–	–	–	–	0,0153	0,0143	0,0123	0,0140
$^{239}\text{Pu}(n,f)$	0,6622	0,6488	0,6512	0,6541	–	–	–	–
$^{239}\text{Pu}(n,\gamma)$	0,0345	0,0368	0,0397	0,0370	–	–	–	–
$^{239}\text{Pu}(n,2n)$	0,00108	0,00138	0,00124	0,00123	–	–	–	–
$^{240}\text{Pu}(n,f)$	0,00684	0,00678	0,00666	0,00676	–	–	–	–
$^{240}\text{Pu}(n,\gamma)$	$9,24 \cdot 10^{-4}$	0,00100	0,00103	$9,85 \cdot 10^{-4}$	–	–	–	–
$^{240}\text{Pu}(n,2n)$	$1,37 \cdot 10^{-5}$	$1,99 \cdot 10^{-5}$	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$1,70 \cdot 10^{-5}$	–	–	–	–
Утечка	–	–	–	–	0,5794	0,6216	0,6152	0,6054
	КС-6							
$^{233}\text{U}(n,f)$	0,7000	0,7009	0,6971	0,6993	–	–	–	–
$^{233}\text{U}(n,\gamma)$	0,0382	0,0355	0,0364	0,0367	–	–	–	–
$^{233}\text{U}(n,2n)$	$8,86 \cdot 10^{-4}$	0,00111	0,00111	0,00104	–	–	–	–
$^{235}\text{U}(n,f)$	–	–	–	–	0,0686	0,0686	0,0692	0,0688
$^{235}\text{U}(n,\gamma)$	–	–	–	–	0,0150	0,0149	0,0167	0,0155
$^{235}\text{U}(n,2n)$	–	–	–	–	$6,65 \cdot 10^{-5}$	$6,77 \cdot 10^{-5}$	$6,72 \cdot 10^{-5}$	$6,71 \cdot 10^{-5}$
$^{238}\text{U}(n,f)$	0,00306	0,00303	0,00308	0,00306	0,2207	0,2252	0,2238	0,2232
$^{238}\text{U}(n,\gamma)$	0,00143	0,00133	0,00136	0,00137	1,1466	1,1070	1,1136	1,1224
$^{238}\text{U}(n,2n)$	$1,56 \cdot 10^{-4}$	$1,62 \cdot 10^{-4}$	$1,36 \cdot 10^{-4}$	$1,51 \cdot 10^{-4}$	0,0115	0,0114	0,00974	0,0109
Утечка	–	–	–	–	0,4906	0,5222	0,5238	0,5122

Ступенчатый спектр потока нейтронов в сборках КС-1, КС-2, ..., КС-6, рассчитанный с использованием данных из библиотеки ENDF/B-VII

Энергетический интервал, МэВ	Критическая сборка			
	КС-1		КС-2	
	Центр сборки	Внешняя граница	Центр сборки	Внешняя граница
0–0,4	0,643	0,521	0,437	0,360
0,4–1,1	0,447	0,461	0,394	0,395
1,1–3	0,159	0,171	0,194	0,202
3–6	0,037	0,042	0,051	0,056
Энергетический интервал, МэВ	КС-3		КС-4	
0–0,4	1,057	1,590	0,771	1,648
0,4–1,1	0,459	0,417	0,437	0,396
1,1–3	0,096	0,026	0,143	0,023
3–6	0,021	0,001	0,033	0,005
Энергетический интервал, МэВ	КС-5		КС-6	
0–0,4	0,613	1,866	0,519	1,862
0,4–1,1	0,393	0,307	0,404	0,309
1,1–3	0,170	0,014	0,183	0,014
3–6	0,045	0,003	0,047	0,003

Таблица 8

Средняя энергия спектра потока нейтронов \bar{E} в сборках КС-1, КС-2, ..., КС-6, рассчитанная с использованием данных из библиотеки ENDF/B-VII

Критическая сборка	\bar{E} , МэВ	
	Центр сборки	Внешняя граница
КС-1	1,41	1,53
КС-2	1,76	1,86
КС-3	0,961	0,486
КС-4	1,29	0,456
КС-5	1,57	0,354
КС-6	1,62	0,354

1.3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по пространственно-энергетическим распределениям нейтронов в сборках КС-1, КС-2, ..., КС-6

Сравнение расчетных и экспериментальных данных по пространственно-энергетическим распределениям нейтронов проводится в табл. 9 на примере наиболее важных характеристик рассматриваемых критическихборок. В тех случаях, когда расчет выполнялся с использованием трех библиотек оцененных ядерных данных, эксперимент сравнивался со средними значениями расчетных величин, приведенными в табл. 4–6.

Как видно из табл. 9, в ряде случаев расчетные и экспериментальные значения сравниваемых

величин существенно различаются. Это очень заметно выражено в полных числах реакций $^{238}\text{U}(n,f)$ в отражателяхборок КС-3–КС-6, в утечке нейтронов изборок КС-4–КС-6 и в средней энергии нейтронов E на границахборок КС-3–КС-5. В этих случаях расхождение расчетных и экспериментальных значений рассматриваемых характеристик, по всей видимости, выходит за пределы суммарных погрешностей расчета и эксперимента.

По очень важной характеристикеборок – полному числу реакций $^{238}\text{U}(n,\gamma)$, за исключением явно ошибочного значения для активной зоны сборки КС-1, согласие расчета и эксперимента вполне удовлетворительное. То же самое можно сказать в отношении средней энергии нейтронов

Отношение расчетных и экспериментальных значений нейтронных характеристик критическихборок КС-1, КС-2, ..., КС-6

Характеристика	Критическая сборка					
	КС-1	КС-2	КС-3	КС-4	КС-5	КС-6
$k_{эф}$	0,995	1,002	0,993	0,991	1,001	0,995
Полные числа реакций:						
$^{235}\text{U}(n,f)$ в АЗ	1,000	–	1,000	1,000	–	–
$^{235}\text{U}(n,f)$ в отражателе	–	–	0,842	0,844	0,827	0,848
$^{238}\text{U}(n,f)$ в АЗ	0,977	–	1,090	1,033	–	1,095
$^{238}\text{U}(n,\gamma)$ в АЗ	2,40	–	0,945	1,076	–	0,980
$^{238}\text{U}(n,f)$ в отражателе	–	–	0,723	0,742	0,793	0,655
$^{238}\text{U}(n,\gamma)$ в отражателе	–	–	0,863	1,031	1,043	1,022
$^{233}\text{U}(n,f)$ в АЗ	–	–	–	–	–	1,000
$^{239}\text{Pu}(n,f)$ в АЗ	–	1,000	–	–	–	–
$^{240}\text{Pu}(n,f)$ в АЗ	–	1,112	–	–	–	–
$^{239}\text{Pu}(n,f) + ^{240}\text{Pu}(n,f)$ в АЗ	–	–	–	–	1,000	–
Утечка нейтронов из сборки	0,967	1,002	1,138	0,789	0,705	0,684
Средняя энергия \bar{E} :						
центр сборки	1,007	1,035	0,981	1,000	1,121	1,032
внешняя граница сборки	1,027	1,028	1,215	1,267	1,362	1,106

в центрахборок, значений $k_{эф}$ во всехбороках и утечки нейтронов изборок КС-1, КС-2.

Таким образом, по итогам выполненного здесь сравнения можно констатировать, в основном, лишь качественное согласие расчетных и приведенных в статьях [1, 2] экспериментальных данных. Хорошее согласие расчета и эксперимента наблюдается лишь для некоторых характеристик, главным образом, для значений $k_{эф}$ всехборок и чисел реакций $^{238}\text{U}(n,\gamma)$ в отражателях. Эти данные могут быть рекомендованы в качестве ориентира при отработке и проверке расчетных средств в области нейтроники ядерных реакторов. Другие экспериментальные данные могут быть востребованы, например, в качестве ориентира при оценке требований к используемой в аналогичных исследованиях измерительной аппаратуре.

2. Возмущения реактивности вбороках КС-1, КС-2, КС-5

2.1. Ценность информации о возмущениях реактивности в критическихбороках

Измерения возмущений реактивности в критическихбороках дают ценную информацию как о ядерных свойствах веществ, входящих в составборок, так и о свойствах исследуемых возмущающих образцов. Прежде всего это касается интегральных сечений взаимодействия нейтронов

с входящими в состав образцов ядрами. Сказанное нетрудно проиллюстрировать на примере одногрупповой теории возмущений.

Если на расстоянии r от центра сферической сборки поместить малый образец вещества с одногрупповыми параметрами α и β , то, согласно этой теории, отнесенное к 1 см^3 образца изменение реактивности $\delta\rho(r)$ представится соотношением

$$\delta\rho(r) = A[\beta - g(r)\alpha]\Phi^2(r), \quad (1)$$

где $\Phi(r)$ – плотность потока нейтронов, $\text{н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$;

$g(r)$ – функция анизотропии потока;

$A = 1/\int_v v\Sigma_f\Phi^2(r)dv$ – некоторая постоянная

критической сборки;

Σ_f – макроскопическое сечение деления в невозмущенной сборке, см^{-1} ;

$$\alpha = n(\sigma_s + \sigma_f + \sigma_c); \beta = n(\sigma_s + v\sigma_f), \text{ см}^{-1};$$

n – число ядер в 1 см^3 образца.

В транспортном приближении сечение σ_s заменяется транспортным сечением σ_{str} . Используя диффузионное выражение для величины $g(r)$ [11]

$$g(r) = 1 - 3 \left[\frac{j(r)}{\Phi(r)} \right]^2, \quad (2)$$

соотношение (1) можно представить в виде

$$\delta\rho(r) = \left[(v-1)\sigma_f - \sigma_c \right] f_1(r) + \sigma_{tr} f_2(r), \quad (3)$$

где $f_1(r) = An\Phi^2(r)$; $f_2(r) = 3Anj^{-2}(r)$.

Величина $\sigma_{tr} = \frac{\alpha}{n}$ в (3) является полным транспортным сечением, равным $\sigma_f + \sigma_{str} + \sigma_c$. Величина $(v-1)\sigma_f + \sigma_c$ характеризует размножающие или поглощающие свойства вещества. Вид функций $f_1(r)$ и $f_2(r)$ можно определить, измеряя распределения возмущений реактивности для «чистых поглотителей» или «чистых рассеивателей».

Таким образом, измерение возмущений от вносимого в критическую сборку образца дает возможность определять параметры α и β , а также их комбинацию $(\beta - \alpha)$ (или аналогичные им величины $\sigma_{tr} = \frac{\alpha}{n}$, $v\sigma_f + \sigma_{str}$ и $(v-1)\sigma_f - \sigma_c = \frac{\beta - \alpha}{n}$) для этого образца.

Для простейшихборок (дляборок без отражателей) все необходимые для определения одногрупповых параметров величины, и в том числе абсолютную реактивность, измерить сравнительно легко. Однако ошибки в измерениях величин существенно сказываются на точности определяемых одногрупповых параметров. Более надежным способом определения одногрупповых параметров является относительный метод, в котором возмущения исследуемых образцов сравниваются с возмущением от эталонного образца, для которого одногрупповые ядерные параметры известны с хорошей точностью.

Для раздельного определения параметров α и β или соответствующих им величин σ_{tr} и $v\sigma_f + \sigma_{str}$ необходимы измерения возмущений, по крайней мере, в двух точках сборки. В настоящей работе эти параметры определялись из измерений возмущений в центре ($r = 0$) и в точке r_1 вблизи границы активной зоны. Из уравнения (1) для этого случая следуют соотношения

$$\delta\rho(0) = A_n \left(\frac{\beta - \alpha}{n} \right) \Phi^2(0); \quad (4)$$

$$\delta\rho(r_1) = A_n \left(\frac{\beta}{n} - g_1(r_1) \frac{\alpha}{n} \right) \Phi^2(r_1).$$

Величины $\delta\rho(0)$, $\delta\rho(r_1)$, $\Phi(0)$, $\Phi(r_1)$ измерялись в опыте. Коэффициент A определялся по возмущениям от эталонного образца ^{239}Pu , величина $\frac{\beta - \alpha}{n}$ для которого предполагалась известной.

Функция $g(r)$ для исследуемыхборок рассчитывалась на основе численного решения кинетического уравнения. Определяемые из уравнений (4) параметры, очевидно, относятся к некоторому среднему по объему активной зоны спектру нейтронов.

Измерения возмущений реактивности на реакторах и критическихбороках и в настоящее время являются распространенным и эффективным методом определения ядерных свойств элементов и нуклидов. В качестве примера сравнительно недавних работ по этому направлению можно привести доклад [12]. Он содержит результаты выполненных в лаборатории Valduc (Франция), на импульсных реакторах Caliban и Silene, измерений возмущений реактивности от различных делящихся и инертных веществ, в том числе от ^6Li , ^7Li , ^9Be , Al, Fe, Rh, Gd, Am.

Результаты этих измерений и параллельно выполненных расчетов предполагают использовать в целях корректировки нейтронных сечений.

2.2. Краткая информация об измеренных возмущениях реактивности вбороках КС-1, КС-2, КС-5

В статье [3] приведена экспериментальная информация по возмущениям реактивности от малых образцов различных веществ в критическихбороках из высокообогащенного урана и плутония. Измерения проводились на критическихбороках КС-1, КС-2, КС-5 (см. табл. 1). Сборки КС-1, КС-2 не имели отражателя, сборка КС-5 с активной зоной из ^{239}Pu имела отражатель из урана естественного изотопного состава. Сборки монтировались на стенде критическихборок ФКБН-1, представленном на рис. 1.

В экспериментах был применен метод статических возмущений. В качестве возмущающих образцов использовались делящиеся вещества (^{239}Pu , ^{235}U , ^{233}U , ^{238}U , ^{232}Th) и большое число неделящихся веществ. Почти все образцы имели форму цилиндра диаметром и длиной 18 мм. Некоторые из исследуемых веществ (H_2O , D_2O , ^6Li и др.) помещались в тонкостенные цилиндрические контейнеры из меди. Возмущения от контейнеров определялись в отдельных опытах.

При измерениях возмущающий образец вкладывался в тонкую алюминиевую трубу, которая помещалась в вертикальный канал сборки до упора в центральной полости. С целью исключения канального эффекта образец в трубке полностью закладывался цилиндрическими вкладышами из вещества активной зоны или отражателя. Геометрия образца и вкладышей в трубке строго фиксировалась. Реактивность критической сборки измерялась в единицах $\Delta = \frac{1000}{Q}$, где Q – определяе-

мый через поток нейтронов утечки коэффициент умножения нейтронов центрального источника. В опытах определялось изменение реактивности (подкритичности) при помещении образца на расстоянии r от центра сборки, т. е. находилась величина $\delta\Delta = \Delta_0 - \Delta$, где $\Delta_0 = \frac{1000}{Q_0}$ и $\Delta = \frac{1000}{Q}$ – подкритичности сборки без образца и с образцом соответственно.

Единица $1000/Q$ для каждой конкретной сборки связана с абсолютной реактивностью постоянным множителем. Для исследуемыхборок получены экспериментально следующие соотношения (спектр нейтронов близок к спектру деления): для сборки КС-1 – $10^3 \frac{\Delta K}{K} = 0,92 \cdot (1000/Q)$; для КС-2 – $10^3 \frac{\Delta K}{K} = 0,93 \cdot (1000/Q)$; для КС-5 – $10^3 \frac{\Delta K}{K} = 0,84 \cdot (1000/Q)$.

Большинство измерений проведено при значениях Q порядка 300–500. Предел чувствительности метода в измерениях составлял $10^{-2} (1000/Q)$ единиц. Влияние конечных размеров образца на измеряемую величину возмущения учитывалось на основании данных работы [13], содержащей и возмущения второго порядка малости. Поправка в значениях $\delta\Delta$ при переходе от конечных образцов к точечным во многих случаях составляет 10–20%. Поправка наиболее велика в центреборок.

В качестве примера в табл. 10 представлены результаты измерения возмущений для нескольких точек сборки КС-1. На рис. 5, 6 показаны распределения возмущений в сборках КС-1, КС-3 для наиболее представительных образцов. Приведенные значения возмущений соответствуют измерениям с микроколичествами исследуемых веществ. Возмущения представлены в единицах $(1000/Q)$ на грамм-атом вещества. Относительная ошибка

в измеренных возмущениях составляет 2–4% для делящихся и 5–30% для остальных веществ. Относительная ошибка тем больше, чем меньше абсолютная величина измеренного возмущения.

Таблица 10

Вклад в подкритичность $\delta\Delta$ от точечных образцов в сборке КС-1 [3]

Вещество	Возмущение в ед. $(1000/Q)$ на грамм·атом			
	r , см			
	0	4,1	7,1	8,1
H	2,98	1,88	0,92	0,65
D	1,15	0,83	–	0,64
⁶ Li	-2,46	-1,09	0,36	0,31
⁹ Be	0,57	0,62	1,03	0,89
B _{ест}	-0,57	-0,12	0,77	0,80
¹² C	0,084	0,57	0,91	0,74
¹⁶ O	0,28	1,06	1,20	0,98
²³ Na	-0,19	0,79	0,99	0,87
²⁷ Al	-0,11	0,50	0,99	0,75
⁵⁶ Fe	-0,026	0,52	0,80	0,76
⁶⁴ Cu	-0,148	0,56	0,95	0,86
⁶⁵ Zn	-0,164	0,61	1,03	0,88
¹⁰⁸ Ag	-0,68	0,33	1,30	1,12
¹¹² Cd	-0,34	0,61	1,40	1,18
¹¹⁵ In	-1,20	–	1,38	1,25
¹¹⁹ Sn	-0,31	0,68	1,64	1,29
¹²⁷ J	-1,05	-0,05	1,82	1,64
¹⁹⁷ Au	-0,67	0,65	1,91	1,58
²⁰⁷ Pb	-0,20	0,71	1,74	1,52
²⁰⁹ Bi	-0,188	0,66	1,82	1,62
²³³ U	16,5	10,7	5,17	3,58
²³² Th	-0,152	1,91	2,53	2,40
²³⁵ U	9,90	6,73	4,01	2,84
²³⁸ U	1,35	1,64	1,92	1,72
²³⁹ Pu	18,38	12,68	6,23	4,20

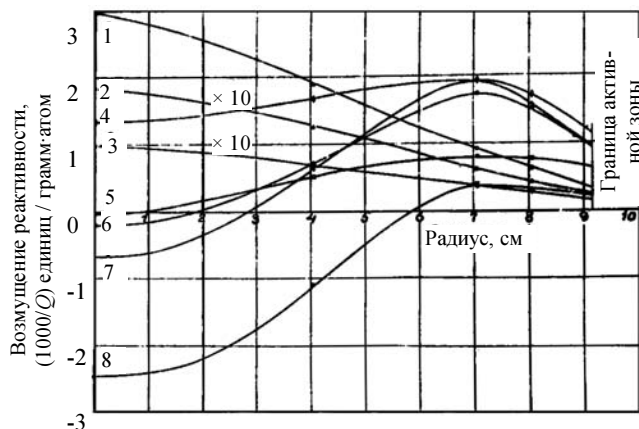


Рис. 5. Распределение возмущений для наиболее представительных образцов в сборке КС-1 [3]: 1 – H; 2 – ²³⁹Pu; 3 – ²³⁵U; 4 – ²³⁸U; 5 – Fe; 6 – Pb; 7 – Au; 8 – ⁶Li

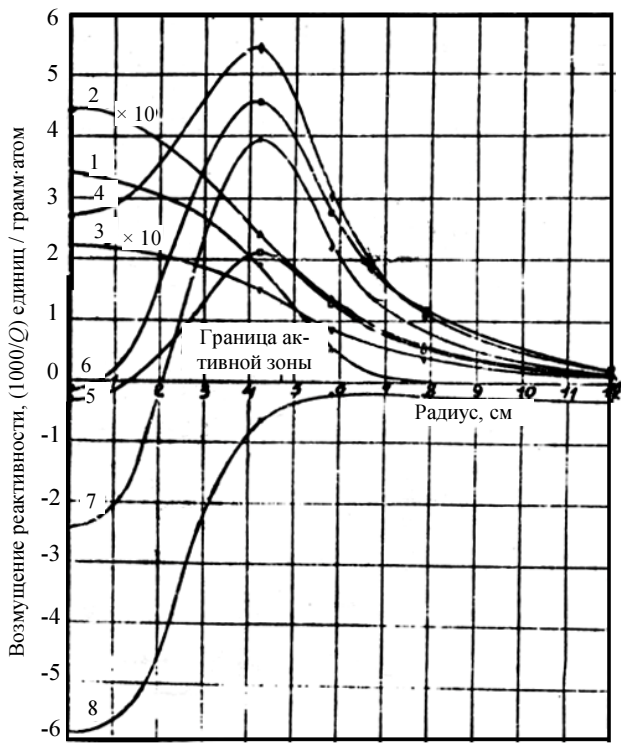


Рис. 6. Распределение возмущений для наиболее представительных образцов в КС-5 [3]: 1 – H; 2 – ^{239}Pu ; 3 – ^{235}U ; 4 – ^{238}U ; 5 – Fe; 6 – Pb; 7 – Au; 8 – ^6Li

На основе измеренных возмущений реактивности для каждой изборок КС-1, КС-2, КС-5 и каждого образца этихборок были определены одногрупповые параметры α , β и их комбинации $(\beta - \alpha)$, соответствующие величинам $\sigma_{tr} = \frac{\alpha}{n}$, $v\sigma_f + \sigma_{str}$ и $(v-1)\sigma_f - \sigma_c = \frac{\beta - \alpha}{n}$. На этой же основе были получены также вполне адекватные значения среднего времени жизни мгновенных нейтронов вбороках КС-1 и КС-2.

2.3. Расчет возмущений реактивности вбороках КС-1, КС-2, КС-5

Расчеты возмущений реактивности в зависимости от радиуса проводились только для сборки КС-1. В этом случае был применен программный комплекс САТУРН, версия 5.2.13 [5], использующий конечно-разностную методику решения задач переноса нейтронов в многогрупповом S_{16} приближении, а также итерационный метод Кэллога с точностью сходимости по $k_{эф}$ 10^{-7} . Расчеты по

комплексу САТУРН выполнены в параллельном режиме с использованием до 80 процессоров.

В случае центрального образца расчеты дляборок КС-2, КС-5 (а также для сборки КС-1, дополнительно к расчетам по программе САТУРН) проводились с помощью одномерной программы АРКТУР [6].

Использованные в расчетах 16-групповые анизотропные нейтронные константы HORA1016 для делящихся материалов подготавливались на основе библиотеки ENDF/B-VI, для других материалов – на основе библиотек ENDF/B-V и ENDF/B-VII. Примененное в константах HORA1016 разбиение шкал летаргии и энергии на группы представлено в табл. 11.

Таблица 11

Разбиение в константах HORA1016 шкал летаргии и энергии на группы

Номер группы	$U = \ln(E_0/E)$	E , МэВ
1	-0,33 – 0,5	13,91 – 6,0653
2	0,5 – 1	6,0653 – 3,6788
3	1 – 1,25	3,6788 – 2,8650
4	1,25 – 1,5	2,8650 – 2,2313
5	1,5 – 1,75	2,2313 – 1,7377
6	1,75 – 2	1,7377 – 1,3534
7	2 – 2,25	1,3534 – 1,0540
8	2,25 – 2,5	1,0540 – 0,8208
9	2,5 – 2,75	0,8208 – 0,6393
10	2,75 – 3	0,6393 – 0,4979
11	3 – 3,5	0,4979 – 0,3020
12	3,5 – 4	0,3020 – 0,1832
13	4 – 5	0,1832 – 0,06738
14	5 – 6	0,06738 – 0,02479
15	6 – 8	0,02479 – 0,003355
16	8 – 12	0,003355 – 6,14·10 ⁻⁵

Полученные в результате расчетов возмущения реактивности для семи наиболее представительных образцов приведены в табл. 12. Числа первой строки соответствуют расчетам по программе САТУРН, второй строки – расчетам по программе АРКТУР.

Как видно из табл. 12, возмущения реактивности от образцов, размещенных в центре сборки КС-1, рассчитанные по трехмерной программе САТУРН и одномерной программе АРКТУР, практически, за исключением двух случаев очень малых значений возмущений, одинаковы.

Расчетные возмущения реактивности (абсолютные $\Delta\rho$ на грамм·атом)
в сборках КС-1, КС-2, КС-5 для семи наиболее представительных образцов

Вещество	Возмущения реактивности, $\Delta\rho$ на грамм·атом					
	КС-1; r , см				КС-2 Центр	КС-5 Центр
	0	4,1	7,1	8,1		
${}^6\text{Li}$	-2,09 -2,11	-1,06 –	0,038 –	0,23 –	– -2,0	– -4,4
${}^9\text{Be}$	0,502 0,503	0,68 –	0,71 –	0,62 –	– 0,29	– 0,42
Cu	-0,063 -0,068	0,42 –	0,76 –	0,73 –	– -0,31	– -0,68
Pb	-0,049 -0,055	0,72 –	1,26 –	1,19 –	– -0,18	– -0,48
${}^{235}\text{U}$	8,67 8,78	6,54 –	3,34 –	2,35 –	– 9,61	– 18,09
${}^{238}\text{U}$	1,11 1,12	1,56 –	1,65 –	1,46 –	– 1,28	– 1,55
${}^{239}\text{Pu}$	17,79 18,12	12,63 –	5,44 –	3,47 –	– 20,53	– 38,0

2.4. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по возмущениям реактивности в сборках КС-1, КС-2, КС-5

Сравнение расчетных и экспериментальных данных по возмущениям реактивности в сборках КС-1, КС-2, КС-5 проводится в табл. 13. Для тех случаев, когда расчет выполнялся с использованием двух программ, в табл. 13 приведено среднее по ним значение.

Как видно из табл. 13, в большинстве точек экспериментальные и расчетные значения возмущений хорошо согласуются. Существенное или заметное расхождение сравниваемых величин наблюдается лишь в нескольких точках для ${}^9\text{Be}$, Pb и, в меньшей степени, ${}^{238}\text{U}$, а также в двух точках с очень малыми значениями возмущений.

Таблица 13

Сравнение экспериментальных (первая строка)
и расчетных (вторая строка) значений возмущений реактивности

Вещество	Возмущения реактивности, $\Delta\rho$ на грамм·атом					
	КС-1; r , см				КС-2 Центр	КС-5 Центр
	0	4,1	7,1	8,1		
${}^6\text{Li}$	-2,26 -2,10	-1,00 -1,06	0,33 0,038	0,29 0,23	-2,2 -2,0	-4,91 -4,4
${}^9\text{Be}$	0,52 0,502	0,57 0,68	0,95 0,71	0,82 0,62	0,30 0,29	0,95 0,42
Cu	-0,136 -0,066	0,52 0,42	0,87 0,76	0,79 0,73	-0,49 -0,31	-0,50 -0,68
Pb	-0,18 -0,052	0,65 0,72	1,60 1,26	1,40 1,19	-0,51 -0,18	-0,10 -0,48
${}^{235}\text{U}$	9,11 8,73	6,19 6,54	3,69 3,34	2,61 2,35	10,39 9,61	18,56 18,09
${}^{238}\text{U}$	1,24 1,12	1,51 1,56	1,77 1,65	1,58 1,46	1,50 1,28	2,26 1,55
${}^{239}\text{Pu}$	16,91 17,95	11,67 12,63	5,73 5,44	3,86 3,47	21,24 20,53	37,3 38,0

При общей оценке точности выполненных в прежние годы экспериментальных данных и степени доверия к ним, надо иметь в виду следующее:

– расхождение в случае малых возмущений проявилось бы и при высоких точностях измерений и расчетов;

– причину расхождений в случае бериллия, свинца, отчасти и урана-238, по всей видимости, следует приписать локальному несовершенству расчетных методов, поскольку и современные данные по измерению критических и других параметров сборок на быстрых нейтронах, содержащих эти элементы, удовлетворительно в расчетах не воспроизводятся.

Таким образом, на основе выполненного здесь сравнения экспериментальных и расчетных данных по возмущениям реактивности, производимым в критических сборках КС-1, КС-2, КС-5 образцами делящихся и инертных веществ, можно уверенно констатировать вполне удовлетворительную точность измеренных в прежние годы возмущений и их соответствие современным требованиям к интегральным ядерным данным, получаемым на критических сборках. Эти экспериментальные данные могут быть рекомендованы в качестве ориентира при отработке и проверке расчетных средств в области нейтронистики ядерных реакторов.

Заключение

В 2010 г. были опубликованы полученные в экспериментах конца 1950-х гг. нейтронно-физические данные для простых критическихборок КС-1, КС-2, ..., КС-6 с активными зонами из металлического высокообогащенного урана или плутония [1–3]. Можно надеяться, что эта информация и к настоящему времени не утратила своей актуальности. В этой связи представлялось целесообразным испытание нейтронно-физической информации статей [1–3] расчетами с помощью наиболее современных, проверенных практикой математических программ и библиотек нейтронных данных.

С помощью программы С-007 метода Монте-Карло [4] и трех независимых международных библиотек оцененных ядерных данных – библиотек ENDF/B-VII, JEF3 и JENDL3.3 – рассчитаны для всех шестиборок значения $k_{эф}$, полные числа реакций на присутствующих в АЗ и отражателе изотопах урана и плутония, утечка нейтронов при нормировке на один акт деления, а также гистограммы и средняя энергия спектра

нейтронов в центре и на границе. С помощью программного комплекса САТУРН [5] и программы АРКТУР [6] рассчитаны возмущения реактивности, производимые в сборках КС-1, КС-2, КС-5 малыми образцами из ${}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{64}\text{Cu}$, ${}^{207}\text{Pb}$, ${}^{235}\text{U}$, ${}^{238}\text{U}$, ${}^{239}\text{Pu}$, размещаемыми в центрахборок и в нескольких точках по радиусу сборки КС-1.

Итоги сравнения экспериментальных данных статей [1–3] и результатов расчета сводятся к следующему заключению:

1. По нейтронным характеристикам критическихборок КС-1, КС-2, ..., КС-6 получено, в основном, лишь качественное согласие расчетных и приведенных в статьях [1, 2] экспериментальных данных. Хорошее согласие расчета и эксперимента наблюдается лишь для некоторых характеристик, главным образом, для значений $k_{эф}$ всехборок и чисел реакций ${}^{238}\text{U}(n,\gamma)$ в отражателях. Эти данные могут быть рекомендованы в качестве ориентира при отработке и проверке расчетных средств в области ядерных реакторов. Другие экспериментальные данные могут быть востребованы, например, в качестве ориентира при оценке требований к используемой в аналогичных исследованиях измерительной аппаратуре.

2. По возмущениям реактивности, производимым в критическихборок КС-1, КС-2, КС-5 образцами делящихся и инертных веществ [3], установлены вполне удовлетворительная точность измеренных возмущений и их соответствие современным требованиям к интегральным ядерным данным, получаемым на критическихборок. Эти экспериментальные данные могут быть рекомендованы в качестве ориентира при отработке и проверке расчетных средств в области ядерных реакторов.

Список литературы

1. Малинкин А. А., Давиденко В. А., Колесов В. Ф., Кувшинов М. И., Сциборский Б. Д. Нейтронные характеристики критическихборок из ${}^{235}\text{U}(89,6\%)$ и ${}^{239}\text{Pu}$ без отражателей // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2010, вып. 2, с. 95–101.

2. Малинкин А. А., Давиденко В. А., Колесов В. Ф., Кувшинов М. И., Сциборский Б. Д. Нейтронные характеристики критическихборок из ${}^{235}\text{U}(36\%)$, ${}^{235}\text{U}(89,6\%)$, ${}^{239}\text{Pu}$ и ${}^{233}\text{U}$ с урановым отражателем // Там же, с. 102–112.

3. Малинкин А. А., Давиденко В. А., Колесов В. Ф. Исследование возмущений реактивности в простых критическихборок // Вопросы атом-

ной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2010, вып. 2, с. 113–120.

4. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П. и др. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов // Вопросы атомной науки и техники, сер. Математическое моделирование физических процессов, 2011, вып. 1, с. 17–24.

5. Шагалиев Р. М., Шумилин В. А., Алексеев А. В. и др. Математические модели и методики решения многомерных задач переноса частиц и энергии, реализованные в комплексе САТУРН-3 // Там же, 1999, вып. 4, с. 20–26.

6. Колесов В. Ф., Гатилова Р. Я., Гударенко Л. Ф. и др. Положительный реактивный эффект в полых критических сборках на замедленных нейтронах // Атомная энергия, 2000, т. 88, вып. 5, с. 323–330.

7. Горелов В. П., Ильин В. И., Кайгородов А. А. и др. Экспериментальные исследования кинетики мгновенных нейтронов в размножающих системах с активной зоной из плутония // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2010, вып. 2, с. 3–13.

8. Колесов В. Ф. Аperiodические импульсные реакторы, т. 1. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007.

9. Гордеев И. В., Кардашев Д. А., Малышев А. В. Справочник по ядерно-физическим константам для расчетов реакторов. – Москва: Атомиздат, 1960.

10. Окрент Д., Эйвери Р., Хаммел Х. Обзор теоретических и экспериментальных основ физики реактора на быстрых нейтронах. Доклад № 609,

представленный США на Первую Международную конференцию по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1955 // Экспериментальные реакторы и физика реакторов. – Москва: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1956.

11. Кодд Д., Шеферд Д., Тайт Д. Физика реакторов на быстрых нейтронах // Успехи в области ядерной энергии. – Москва: Изд-во иностранной литературы, 1958.

12. Casoli P., Authier N. Feasibility of reactivity worth measurements by perturbation method with Caliban and Silene experimental reactors // International conference on the physics of reactors «Nuclear power: A sustainable resource» (Interlaken, Switzerland, Sept. 14–19, 2008). PHYSOR–08, p. 635–642.

13. Hansen G. E., Maler C. Perturbation theory of reactivity coefficients for fast neutron critical systems // Nucl. Sci. and Eng., 1960, vol. 8, N 6, p. 532–542.

Контактная информация –
Колесов Владимир Федорович,
главный научный сотрудник ИЯРФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ

тел.: (831 30) 2–75–11,
e-mail: kolesov@expd.vniief.ru

Статья поступила в редакцию 19.07.2011.

Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 2011, вып. 3, с. 19–33.