

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕСТОВЫХ (BENCHMARK) СФЕРИЧЕСКИХ КРИТИЧЕСКИХ СБОРОК С АКТИВНОЙ ЗОНОЙ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПЛУТОНИЯ (^{239}Pu (88 %)) В α -ФАЗЕ И ОТРАЖАТЕЛЕМ ИЗ ОБЕДНЕННОГО УРАНА

М. И. Кувшинов, С. В. Воронцов, В. Х. Хоружий

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, г. Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37

Представлены результаты анализа выполненных ранее в РФЯЦ-ВНИИЭФ на установке ФКБН критических экспериментов с металлическими сборками, имеющими активную зону (АЗ) из ^{239}Pu ($\approx 88\%$) в α -фазе и отражатель из ^{238}U . Определены критические ($k_{\text{эф}} = 1 \pm 0,0016$) параметры для АЗ и отражателя. Экспериментальные значения $k_{\text{эф}}$ сравнивались с расчетными, полученными с использованием различных библиотек ядерных данных (БАС, ENDF/B-7, JEF3, JENDL3.3, CENDL). Критические сборки могут быть рекомендованы в качестве тестовых (Benchmark) для включения их в международный справочник по ядерной безопасности.

Ключевые слова: нейтрон, критическая сборка, активная зона, плутоний, отражатель, обедненный уран, тестовые параметры, реактивность, эффективный коэффициент размножения, метод Монте-Карло, библиотеки ядерных данных.

EXPERIMENTAL AND CALCULATION PARAMETERS OF BENCHMARK SPHERICAL ASSEMBLIES WITH CORE MADE OF METALLIC PLUTONIUM (^{239}Pu (88 %)) IN α -PHASE AND DEPLETED URANIUM REFLECTOR / M. I. KUVSHINOV, S. V. VORONTSOV, V. Kh. KHORYZHY // Presented are results of analysis of critical experiments with metallic assemblies performed earlier in RFNC-VNIIEF on FKBN facility. These assemblies possess a core made of plutonium (^{239}Pu ($\approx 88\%$)) in α -phase and a ^{238}U reflector. Critical ($k_{\text{ef}} = 1 \pm 0,0016$) parameters for the core and reflector are determined. Experimental values k_{ef} are compared to the calculated ones, obtained by the use of different nuclear data libraries (BAS, ENDF/B-7, JEF3, JENDL3.3, CENDL). Critical assemblies can be recommended as benchmark ones for their incorporating into the International reference book on Nuclear safety.

Key words: neutron, critical assembly, core, plutonium, reflector, depleted uranium, test parameters, reactivity, efficient multiplication factor, Monte-Carlo method, nuclear data libraries.

Введение

Тестовые (Benchmark) эксперименты служат основным критерием проверки ядерных констант и расчетных кодов, используемых в технической физике.

В настоящее время наиболее систематизированными являются Benchmark данные о критических экспериментах в международном справочнике ICSBER (International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiment) [2]. В частности, в этом справочнике содержатся параметры более 30 критическихборок, ядерно-физические характеристики которых изучены в РФЯЦ-

ВНИИЭФ. Содержание справочника систематически пополняется. При этом главным критериальным параметром является эффективный коэффициент размножения нейтронов в критической системе $k_{\text{эф}} = 1$. Важнейшим (заключительным) этапом получения данных для справочника является формирование параметров тестовых критических систем (подготовка и анализ результатов экспериментальных и расчетных исследований).

В настоящей статье такая работа проведена для критических сферическихборок с активной зоной из металлического плутония (^{239}Pu ($\approx 88\%$)) в α -фазе и отражателем из обедненного урана толщиной 10,98 см и 2,89 см. (Далее по тексту

сборку с толщиной отражателя 10,98 см будем обозначать «сборка № 1», а сборку с толщиной отражателя 2,89 см – «сборка № 2»). Тестовые данные для указанных сборок получены на основании тщательного анализа сохранившихся в архиве РФЯЦ-ВНИИЭФ записей процедур выполненных ранее критмассовых измерений. При анализе были отобраны только те экспериментальные сборки, для которых погрешность измерений удовлетворяет современным требованиям.

Кроме того, были проведены расчеты значений $k_{эф}$ для этих (Benchmark) сборок с использованием метода Монте-Карло и нескольких библиотек ядерных данных (БАС, ENDF/B-7, JEF3, JENDL3.3, CENDL). Результаты расчетов также представлены в статье.

Изложение материала, в основном, соответствует формату международного справочника [2]. Однако с целью уменьшения объема статьи описание некоторых методик измерений сокращено. Подробно эти методики рассматривались нами ранее в работах [1], [3] и др.

1. Алгоритм подготовки тестовых данных

Основным тестовым (Benchmark) параметром для размножающих нейтроны сборок (РС) является эффективный коэффициент размножения нейтронов $k_{эф}$. В эксперименте параметрами, определяющими степень критичности РС, служат реактивность (ρ) или подкритичность ($\Delta = 1000/Q$, где Q – коэффициент умножения нейтронов изотопного источника в сборке). Вблизи критического состояния РС $\Delta \approx \left| \left(1 - 1/k_{эф} \right) \right|$. В критическом состоянии сборки $k_{эф} = 1$; $\rho = 0$, $\Delta = 0$.

Алгоритм подготовки Benchmark данных состоит в следующем [1]. Рассматриваются экспериментальные стендовые сборки, близкие к критическим, на предмет полноты сведений об используемых в них материалах, методик измерений, результатов и их погрешности.

На основании экспериментальных данных формулируется расчетная модель критической системы ($k_{эф} = 1$). При этом оцениваются погрешности в $k_{эф}$ (или в реактивности, или в коэффициенте умножения) путем уточняющих экспериментов по возмущению реактивности, а также путем расчетов коэффициентов «чувствительности» $k_{эф}$ к изменению различных параметров сборки (плотности материалов, нуклидного состава и др.).

Конечным результатом указанных работ является подробное описание критической ($k_{эф} = 1$) конфигурации и нуклидного состава сборки, для которой приводится также погрешность определения $k_{эф}$. Значение погрешности $\delta k_{эф}$ для Benchmark сборок должна составлять менее 1 %.

2. Сборка с отражателем из ^{238}U толщиной 10,98 см (сборка № 1)

2.1. Описание стендовой сборки

Схематический вид сборки на критическом стенде ФКБН представлен на рис. 1.

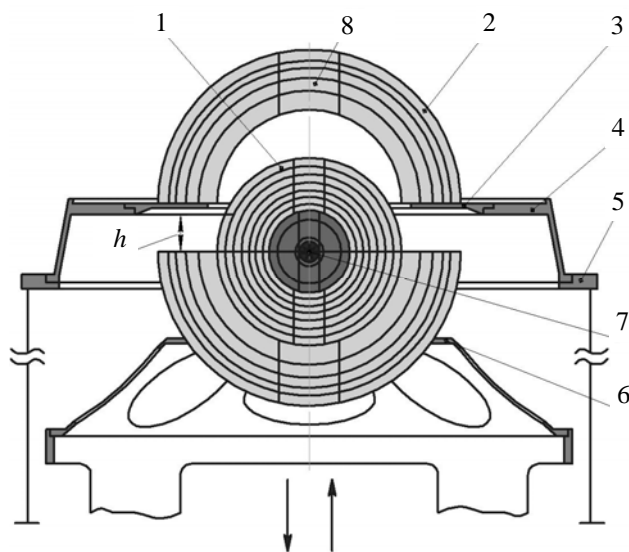


Рис. 1. Схема размещения размножающей сборки № 1 на стенде ФКБН: 1 – нижний (подвижный) блок сборки; 2 – верхний (неподвижный) блок; 3 – стальная диафрагма; 4, 5 – опоры для верхнего блока; 6 – опора для нижнего блока; 7 – источник нейтронов; 8 – пробки; h – расстояние между блоками; \square – обедненный уран; \blacksquare – плутоний

Активная зона (АЗ) из плутония содержит три сферических слоя, составленных из полусферических деталей, и сплошной шарик в центре. Отражатель из обедненного урана состоит из двух блоков, составленных также из полусферических слоев.

В сомкнутом состоянии блоков критическая сборка имеет форму, близкую к сферической. Геометрические размеры и нуклидный состав всех деталей, входящих в сборку, представлены в табл. 1 и 2.

Важно отметить, что полусферы из плутония и урана имеют полусферические отверстия, которые мо-

Характеристики компонентов АЗ стеновой (подкритической) сборки № 1

№ слоя	Размеры слоя, см		Массовая доля компонентов, %				Масса (с пробками) до покрытия, г	Масса (с пробками) после покрытия, г
	$R_{\text{внут}}$	$R_{\text{нар}}$	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	примеси		
0	0	1,00	87,71	10,31	1,72	0,26	80,29	80,58
1	1,00	1,40	87,56	10,26	1,93	0,25	135,23	135,43
2	1,40	3,15	88,66	9,70	1,42	0,22	2260,6	2261,4
3	3,15	4,02	88,16	10,02	1,58	0,24	2650,0	2651,3

Таблица 2

Характеристики компонентов отражателя стеновой сборки № 1

№ слоя	Размеры слоя, см		Массовая доля компонентов, %			Масса с пробками, г
	$R_{\text{внут}}$	$R_{\text{нар}}$	^{235}Pu	^{238}U	примеси	
1	4,020	4,660	0,44	99,06	0,50	2742
2	4,660	5,350	0,44	99,06	0,50	3930
3	5,350	6,000	0,45	99,05	0,50	4744
4	6,000	6,750	0,44	99,06	0,50	6949
5	6,750	7,550	0,44	99,06	0,50	9310
6	7,550	8,350	0,44	99,06	0,50	11510
7	8,350	9,150	0,44	99,06	0,50	13950
8	9,150	11,00	0,47	99,03	0,50	41770
9	11,00	12,25	0,45	99,05	0,50	37650
10	12,25	13,25	0,44	99,06	0,50	36380
11	13,25	14,00	0,44	99,06	0,50	30560
12	14,00	15,00	0,46	99,04	0,50	46940

гут закрываться пробками из того же материала. Путем удаления или добавления пробок в полусферы (при сохранении их радиальных размеров) изменялась реактивность сборки. Верхний (неподвижный) блок сборки, содержащий пять полусфер (с № 8 по № 12 по табл. 2) лежит на стальной диафрагме толщиной 2 мм. Остальные детали отражателя входят в нижний блок сборки, который имеет возможность перемещаться в вертикальном направлении до упора в диафрагму.

2.2. Процедура критмассовых измерений

Штатная процедура критмассовых измерений на установке ФКБН заключается в следующем [1]. Путем изменения состава деталей в размножающей системе на стенде установки подбирается конфигурация сборки, близкая к критической. Дистанционно сближаются ее блоки (рис. 1) до критического состояния РС. Высота подъема нижнего блока сборки фиксируется с помощью жестких упоров в механизме перемещения.

Наиболее близкий к критическому состоянию вариант сборки называют стеновой размножающей системой.

Для подобранной стеновой РС тщательно измеряется штатными «всеволновыми» детекторами скорость счета от сборки с ^{252}Cf (или иным) источником нейтронов в центральной полости РС (N) и без него (N_{ϕ}). После этого вычисляется коэффициент умножения нейтронов в сборке Q по формуле

$$Q = (N - N_{\phi}) / N_0, \quad (1)$$

где N_0 – скорость счета детектора от ^{252}Cf источника, размещенного на месте центра РС (при отсутствии ее на стенде).

В качестве показателя степени подкритичности РС используется отношение $\Delta = 1000/Q$, имеющее практически линейную зависимость от зазора между блоками сборки (вблизи ее критического состояния).

Особенность рассматриваемого в настоящем разделе статьи дополнительного варианта крит-

массовых измерений и определения значения Q для стендовой сборки обусловлена тем фактом, что сборка № 1 не имела воздушной полости в центре АЗ. В силу этого для определения значения Q стендовой сборки № 1 использовались дополнительные измерения на РС, отличающейся от тестовой наличием центральной полости диаметром 2 см, в которой размещался источник нейтронов. Из дополнительных измерений определялось соотношение $A = N/N_{\phi}$, которое затем использовалось для определения Q тестовой (без центральной полости) сборки № 1:

$$Q = AN_{\phi}/N_0. \quad (2)$$

С целью обеспечения возможности наиболее точного определения материальных характеристик стендовой сборки (геометрии и состава деталей), соответствующих ее критическому состоянию, в эксперименте измерялось возмущение подкритичности $\delta(\Delta)$ РС, обусловленное:

- шариком из ^{239}Pu ($\approx 88\%$) диаметром 20 мм, размещенным в центре РС ($\delta\Delta_{\text{ш}}$);
- полюсной пробкой (массой 66,53 г) в верхней

полусфере из плутония с радиусами (3,15–4,02) см ($\delta\Delta_m$);

- изменением зазора между блоками РС ($\delta\Delta_h$).

С помощью расчетов оценивалось также возмущение подкритичности ($\delta\Delta$) РС, обусловленное:

- опорами для ее блоков на стенде ($\delta\Delta_{\text{оп}}$);
- приведением температуры сборки к $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\delta\Delta_T$);

– стенами помещения, в котором расположен стенд установки ФКБН ($\delta\Delta_{\text{от}}$).

2.3. Результаты измерений подкритичности стендовой сборки № 1 и оценка ее возмущений образцами из делящегося материала и экспериментальным оборудованием

Результаты измерений подкритичности стендовой сборки № 1, а также оценка ее возмущений образцами из делящегося материала и экспериментальным оборудованием представлены в табл. 3. Эти данные необходимы для формирования критической модели упрощенной экспериментальной сборки (см. раздел 2.4).

Таблица 3

Результаты измерений и расчетных оценок параметров РС № 1, необходимые для формирования ее тестовой критической модели

Параметр	Δ^* , $\delta\Delta$
1. Подкритичность стендовой РС при сомкнутых на стальной диафрагме (толщиной 2 мм) нижнем и верхнем блоках, $\Delta_{\text{ст}}$	$13,75 \pm 0,05$
2. Возмущение подкритичности РС, обусловленное смыканием ее нижнего и верхнего блоков на 1 мм, $\delta\Delta_h$	$-0,94 \pm 0,03$
3. Возмущение подкритичности РС, обусловленное удалением 1 г плутония из сферического слоя, имеющего радиусы (3,15–4,02) см, $\delta\Delta_m$	$0,152 \pm 0,04$
4. Возмущение подкритичности РС, обусловленное удалением 1 г плутония из ее центра (шарика), $\delta\Delta_{\text{ш}}$	$0,324 \pm 0,04$
5. Возмущение подкритичности РС, обусловленное опорами для ее блоков на стенде**, $\delta\Delta_{\text{оп}}$	$0,85 \pm 0,05$
6. Возмущение подкритичности РС, обусловленное стенами помещения, в котором расположен стенд установки**, $\delta\Delta_{\text{от}}$	$\leq 0,05$
7. Возмущение подкритичности РС, обусловленное приведением температуры сборки к $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{эксп}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)**, $\delta\Delta_T$	$-0,8 \pm 0,05$

* Подкритичность $\Delta = 1000/Q$, где Q – коэффициент умножения нейтронов изотопного источника в сборке. В критическом состоянии сборки $\Delta = 0$, $k_{\text{эф}} = 1$; $\rho = 0$.

** Значения Δ и $\delta\Delta$ для параметров 1, 2, 3 и 4 измерялись в эксперименте, значения $\delta\Delta$ для параметров 5–7 оценивались расчетным путем. При этом соотношение между $\delta k_{\text{эф}}$ и $\delta\Delta$ определялось по возмущению этих параметров ($k_{\text{эф}}$ и Δ), вносимому при удалении из РС образца из плутония (шарика).

2.4. Формирование упрощенной критической модели экспериментальной сборки № 1

На основании данных, приведенных в табл. 3, была сформирована стендовая модель экспериментальной сборки со сферической внешней поверхностью, свободной от опорных конструкций и других отражателей, включая стены помещения. Их влияние на реактивность РС учитывалось путем внесения поправок к значению подкритичности $\Delta_{ст}$ для реальной стендовой сборки. Эти поправки также представлены в табл. 3.

Значение подкритичности сферической модели стендовой сборки (отклонение стендовой модели от критического по запаздывающим нейтронам состояния) Δ_m определялось по соотношению

$$\Delta_m = \Delta_{ст} + \Delta_{оп} + t\Delta_h + \Delta_{от} + \Delta_{т} = 13,75 + 0,75 - 1,88 + 0,05 - 0,8 = 11,87, \quad (3)$$

где $t = 2$ мм – толщина диафрагмы.

Стендовая модель оказалась подкритической ($\Delta_m = 11,87$).

Для достижения критичности такой модели сборки ($\Delta_m = 0$) в объем сферического слоя АЗ, имеющего радиусы (3,15–4,02) мм, была условно добавлена масса плутония, равная 78,1 г. Это значение получено на основании экспериментальных данных о возмущении подкритичности РС, обусловленное 1 г плутония в сферическом слое, имеющего радиусы (3,15–4,02) см, в табл. 3 ($\delta\Delta_m = 0,152/1$ г).

Таким способом была сформирована упрощенная сферическая критическая ($k_{эф} = 1$) модель экспериментальной сборки. Особо отметим, что при формировании этой модели характеристики отражателя (размеры, масса и нуклидный состав) не изменялись. Их значения соответствовали данным, приведенным в табл. 2.

Характеристики АЗ (размеры, масса и нуклидный состав) для критической модели сборки приводятся в табл. 4 и 5. В табл. 6 приведена атомная плотность материала, атом/(барн·см), в сферических слоях отражателя критической сборки.

Таблица 4

Характеристики компонентов АЗ критической сборки № 1

№ слоя	Размеры слоя, см		Массовая доля компонентов, %				Масса до покрытия, г	Масса после покрытия, г
	$R_{внут}$	$R_{нар}$	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	примеси		
0	0	1,00	87,71	10,31	1,72	0,26	80,29	80,58
1	1,00	1,40	87,56	10,26	1,93	0,25	135,23	135,43
2	1,40	3,15	88,66	9,70	1,42	0,22	2260,6	2261,4
3	3,15	4,02	88,16	10,02	1,58	0,24	2730,0	2731

Таблица 5

Атомная плотность материала, атом/(барн·см), в сферических слоях активной зоны критической сборки № 1

Активная зона, $^{239}\text{Pu}(\alpha, 88\%)$								
№ слоя	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	Fe	C	H	N	O
0	$4,2477 \times 10^{-2}$	$4,9721 \times 10^{-3}$	$8,2604 \times 10^{-4}$	$3,3168 \times 10^{-4}$	$1,4128 \times 10^{-3}$	$3,5765 \times 10^{-4}$	$3,8604 \times 10^{-5}$	$5,7227 \times 10^{-5}$
1	$4,0832 \times 10^{-2}$	$4,7646 \times 10^{-3}$	$8,9253 \times 10^{-4}$	$2,9942 \times 10^{-4}$	$1,9549 \times 10^{-3}$	$8,1789 \times 10^{-4}$	$8,8281 \times 10^{-5}$	$1,3087 \times 10^{-4}$
2	$4,2276 \times 10^{-2}$	$4,6060 \times 10^{-3}$	$6,7147 \times 10^{-4}$	$2,6534 \times 10^{-4}$	$1,1053 \times 10^{-3}$	$2,0011 \times 10^{-4}$	$2,1600 \times 10^{-5}$	$3,2020 \times 10^{-5}$
3	$4,292 \times 10^{-2}$	$4,858 \times 10^{-3}$	$7,628 \times 10^{-4}$	$3,126 \times 10^{-4}$	$1,228 \times 10^{-3}$	$2,832 \times 10^{-4}$	$3,057 \times 10^{-5}$	$4,532 \times 10^{-5}$

Атомная плотность материала, атом/(барн·см),
в сферических слоях отражателя критической сборки № 1

№ слоя	Отражатель из обедненного урана			
	²³⁵ U	²³⁸ U	C	Fe
1	2,037×10 ⁻⁴	4,528×10 ⁻²	2,808×10 ⁻³	3,702×10 ⁻⁴
2	2,037×10 ⁻⁴	4,528×10 ⁻²	2,808×10 ⁻³	3,702×10 ⁻⁴
3	2,077×10 ⁻⁴	4,514×10 ⁻²	2,800×10 ⁻³	3,691×10 ⁻⁴
4	2,043×10 ⁻⁴	4,541×10 ⁻²	2,813×10 ⁻³	3,713×10 ⁻⁴
5	2,040×10 ⁻⁴	4,535×10 ⁻²	2,813×10 ⁻³	3,708×10 ⁻⁴
6	2,041×10 ⁻⁴	4,538×10 ⁻²	2,814×10 ⁻³	3,7106×10 ⁻⁴
7	2,042×10 ⁻⁴	4,538×10 ⁻²	2,815×10 ⁻³	3,710×10 ⁻⁴
8	2,125×10 ⁻⁴	4,422×10 ⁻²	2,743×10 ⁻³	3,616×10 ⁻⁴
9	2,043×10 ⁻⁴	4,439×10 ⁻²	2,754×10 ⁻³	3,630×10 ⁻⁴
10	2,007×10 ⁻⁴	4,461×10 ⁻²	2,767×10 ⁻³	3,647×10 ⁻⁴
11	1,969×10 ⁻⁴	4,377×10 ⁻²	2,715×10 ⁻³	3,578×10 ⁻⁴
12	2,093×10 ⁻⁴	4,449×10 ⁻²	2,760×10 ⁻³	3,638×10 ⁻⁴

2.5. О погрешности определения параметра $k_{эф}$ в эксперименте

Представленные в табл. 5 и 6 материальные параметры сборки соответствуют критической модели, $k_{эф} = 1$. При оценке погрешности определения этого значения $k_{эф}$ целесообразно считать, что для всех входящих в сборку деталей операции взвешивания, измерения размеров, определения нуклидного содержания материалов активной зоны и отражателя являются независимыми, и все они независимы от процедуры измерений на критическом стенде. Тогда полную погрешность $k_{эф}$ можно вычислять по формуле

$$\delta k/k_{эф} = \left[(\delta k/k)_{экс}^2 + (\delta k/k)_{мАЗ}^2 + (\delta k/k)_{РАЗ}^2 + (\delta k/k)_{\alpha}^2 + (\delta k/k)_{\beta}^2 + (\delta k/k)_{мотр}^2 + (\delta k/k)_{ротр}^2 \right]^{1/2}, \quad (4)$$

где $(\delta k/k)_{экс}$ – относительная погрешность, обусловленная ошибкой определения значения подкритичности РС (а также процедурой приведения результатов измерений к условиям критической сферической модели); $(\delta k/k)_{м}$, $(\delta k/k)_{R}$, $(\delta k/k)_{\alpha}$, $(\delta k/k)_{\beta}$ – относительные погрешности, обусловленные неопределенностями в значениях масс, размеров, атомного содержания делящегося материала и примесей в активной зоне, соответственно. Индексы «АЗ» и «отр» указывают, что эти параметры относятся к активной зоне и к отражателю, соответственно. Численные значения погрешностей $\Delta k_{эф} = \pm 0,0016$ принимались такими же, как и в справочнике [2], что примерно эквива-

лентно погрешности определения критической массы плутония в исследуемых сборках $\Delta m/m \approx \pm 0,1$ %. Это представляется совершенно обоснованным, так как рассматриваемые в настоящей статье эксперименты проводились в РФЯЦ-ВНИИЭФ на критическом стенде ФКБН [1], и в измерениях были использованы те же самые детали из плутония и обедненного урана, что и в работе [2].

2.6. Расчетные исследования

Расчеты $k_{эф}$ для исследуемыхборок проводились методом Монте-Карло с помощью пакета программ С-007. В этих программах заложены решения системы связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов. Для расчета параметров критическихборок или для решения задач, связанных с ядерной безопасностью, программы предоставляют широкие возможности детального описания сложной геометрии систем. Программы позволяют использовать различные системы данных о сечениях реакций взаимодействия частиц с веществом, иначе говоря, различные системы констант переноса для моделирования траекторий частиц. Для решения спектрального линейного интегродифференциального кинетического уравнения используются константы переноса с непрерывной зависимостью от энергии частиц. В настоящей работе использованы нейтронно-физические данные библиотек БАС-78, ENDF/B-7, JENDL3.3, JEF3, CENDL-2. Расчетные значения $k_{эф}$ для сборки № 1 приведены в табл. 7.

Таблица 7

Расчетные значения $k_{эф}$ для экспериментальной критической сборки № 1 ($k_{эф} = 1,0000 \pm 0,0016$)

Библиотека	БАС	ENDF/V7	JENDL3.3	JEF3	CENDL-2
$k_{эф}$	1,0006	1,0008	0,9937	0,9966	0,9978

Из табл. 7 следует, что наилучшее согласие расчетных значений $k_{эф}$ имеет место при использовании первых двух библиотек ядерных данных.

3. Сборка с АЗ из ^{239}Pu (88 %) в α -фазе и отражателем из ^{238}U толщиной 2,89 см (сборка № 2)

3.1. Описание стеновой сборки № 2

Стеновая сборка № 2 по конструкции, используемым деталям в АЗ и отражателе, а также способу размещения ее на критическом стенде ФКБН мало отличается от стеновой сборки № 1, рассмотренной в разделе 2.

Сборки № 1 и № 2 различаются следующими параметрами:

- массой плутония в составе АЗ (в $\approx 1,5$ раза);
- толщиной отражателя из ^{238}U (в $\approx 3,8$ раза);
- границей раздела сборки на нижний и верхний блоки.

Схематический вид сборки № 2 на критическом стенде ФКБН представлен на рис. 2.

Активная зона из плутония сборки № 2 содержит три сферических слоя, составленных из полусферических деталей. В центре АЗ имеется воздушная полость диаметром 28 мм. Характерис-

тики компонентов АЗ и отражателя стеновой (подкритической) сборки № 2 (размеры, массы и нуклидный состав сферических слоев) представлены в табл. 8 и 9, соответственно.

Верхний (неподвижный) блок сборки № 2, содержащий 2 полусферы (из слоев № 3 и № 4 по табл. 9), лежит на стальной диафрагме толщиной 1 мм. Остальные детали отражателя входят в нижний блок сборки, который имеет возможность перемещаться в вертикальном направлении до упора в диафрагму. В сомкнутом состоянии блоков критическая сборка № 2 имеет форму, близкую к сферической.

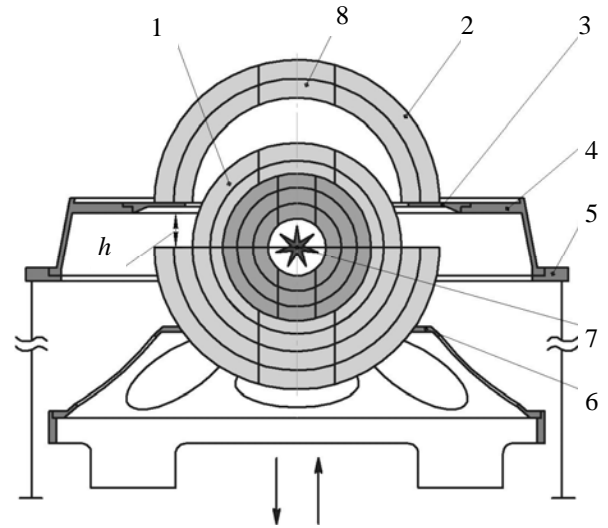


Рис. 2. Схематический вид сборки № 2 на критическом стенде ФКБН: 1 – нижний (подвижный) блок сборки; 2 – верхний (неподвижный) блок; 3 – стальная диафрагма; 4, 5 – опоры для верхнего блока; 6 – опора для нижнего блока; 7 – источник нейтронов; 8 – пробки; h – расстояние между блоками; – обедненный уран; – плутоний

Таблица 8

Характеристики компонентов АЗ (размеры, массы и нуклидный состав сферических слоев) стеновой подкритической сборки № 2

№ слоя	Размеры слоя, см		Массовая доля компонентов, %				Масса (с пробками) до покрытия, г	Масса (с пробками) после покрытия, г
	$R_{внут}$	$R_{нар}$	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	примеси		
1	1,40	3,15	88,66	9,70	1,42	0,22	2260,6	2261,4
2	3,15	4,02	88,16	10,02	1,58	0,24	2650,0	2651,3
3	4,02	4,66	89,22	9,29	1,26	0,23	2865,0	2867,2

Характеристики слоев из ^{235}U (размеры, массы и нуклидный состав)
для стеновой подкритической сборки № 2

№ слоя	Размеры слоя, см		Массовая доля компонентов, %			Масса с пробками, г
	$R_{\text{внут}}$	$R_{\text{нар}}$	^{235}U	^{238}U	примеси	
1	4,660	5,350	0,44	99,06	0,50	4052
2	5,350	6,000	0,45	99,05	0,50	4891
3	6,000	6,750	0,44	99,06	0,50	7164
4	6,750	7,550	0,44	99,06	0,50	9598

3.2. Процедура критмассовых измерений

Процедура критмассовых измерений на сборке № 2 практически не отличалась от таковой для сборки № 1, рассмотренной в разделе 2.2.

3.3. Результаты измерений подкритичности стеновой сборки № 2 и оценка ее возмущений образцами из ^{239}Pu (88 %) в α -фазе, из ^{235}U и экспериментальным оборудованием

Результаты измерений подкритичности стеновой сборки № 2, описанной в разделе 3.1, а также оценка ее возмущений образцами из делящегося материала и экспериментальным оборудованием представлены в табл. 10.

3.4. Формирование упрощенной критической модели экспериментальной сборки № 2

На основании данных, приведенных в табл. 9, по методике, описанной в разделе 2.4, была сформирована стеновая модель экспериментальной сборки № 2, свободной от опорных конструкций и других отражателей, включая стены помещения. Значение подкритичности сферической модели стеновой сборки (отклонение стеновой модели от критического по запаздывающим нейтронам состояния) Δ_m определялось по соотношению

$$\Delta_m = \Delta_{\text{ст}} + \Delta_{\text{оп}} + \Delta_h + \Delta_{\text{от}} + \Delta_T = 1,50 - 0,95 + 0,15 + 0,10 - 0,8 = 0,00 \quad (5)$$

Таблица 10

Результаты измерений и расчетных оценок параметров РС № 2, необходимые для формирования ее тестовой критической модели

Параметр	Δ^* , $\delta \Delta$
1. Подкритичность стеновой РС при сомкнутых на стальной диафрагме (толщиной 1 мм) нижнем и верхнем блоках, Δ	$1,50 \pm 0,005$
2. Возмущение подкритичности РС, обусловленное смыканием ее нижнего и верхнего блоков без диафрагмы, $\delta \Delta_h$	$-0,95 \pm 0,03$
3. Возмущение подкритичности РС, обусловленное опорами для ее блоков на стенде**, $\delta \Delta_{\text{оп}}$	$0,15 \pm 0,05$
4. Возмущение подкритичности РС, обусловленное стенами помещения, в котором расположен стенд установки**, $\delta \Delta_{\text{от}}$	$0,10 \pm 0,05$
5. Возмущение подкритичности РС, обусловленное приведением температуры сборки к 20°C ($T_{\text{экс}} = 25^\circ\text{C}$)**, $\delta \Delta_T$	$-0,80 \pm 0,05$

* Подкритичность $\Delta = 1000/Q$, где Q – коэффициент умножения нейтронов изотопного источника в сборке. В критическом состоянии сборки $\Delta = 0$, $k_{\text{эф}} = 1$, $\rho = 0$.

** Значения $\delta \Delta$ для параметров 1, 2 и 3 измерялись в эксперименте, значения $\delta \Delta$ для параметров 4, 5 оценивались расчетным путем. При этом соотношение между $\delta k_{\text{эф}}$ и $\delta \Delta$ определялось по возмущению этих параметров ($k_{\text{эф}}$ и Δ), вносимому при добавлении в РС образца из плутония в виде полусферы с радиусами 1,0–1,4 см.

Таким способом была сформирована упрощенная сферическая критическая ($k_{эф} = 1$) модель экспериментальной сборки № 2. Стендовая модель сборки № 2 оказалась в пределах погрешности измерений критической.

Характеристики АЗ (размеры, масса и нуклидный состав) для критической модели сборки № 2 приводятся в табл. 11 и 12. В табл. 13 приведена атомная плотность материала, атом/(барн·см), в сферических слоях отражателя критической сборки.

Эти данные использовались нами при расчете $k_{эф}$ по методу Монте-Карло (см. раздел 2.6).

3.5. О погрешности определения параметра $k_{эф}$ в эксперименте

Представленные в табл. 12 и 13 материальные параметры сборки № 2 соответствуют критической модели, $k_{эф} = 1$. Численные значения погрешностей $k_{эф} = \pm 0,0016$ принимались такими же, как и в справочнике [2]. Правомерность такого решения была обоснована в разделе 2.5.

Таблица 11

Характеристики компонентов АЗ (размеры, массы и нуклидный состав сферических слоев) стендовой критической сборки № 2

№ слоя	Размеры слоя, см		Массовая доля компонентов, %				Масса (с пробками) до покрытия, г	Масса (с пробками) после покрытия, г
	$R_{внут}$	$R_{нар}$	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	примеси		
1	1,4	3,15	88,66	9,70	1,42	0,22	2260,5	2261,3
2	3,15	4,02	88,16	10,02	1,58	0,24	2650,0	2651,3
3	4,02	4,66	89,22	9,29	1,26	0,23	2865,0	2867,2

Таблица 12

Атомная плотность материала, атом/(барн·см), в сферических слоях активной зоны критической сборки № 2

Активная зона, ^{239}Pu (α , 88%)								
№ слоя	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	Fe	C	H	N	O
1	$4,229 \times 10^{-2}$	$4,608 \times 10^{-3}$	$6,717 \times 10^{-4}$	$2,097 \times 10^{-4}$	$1,044 \times 10^{-3}$	$2,037 \times 10^{-4}$	$2,117 \times 10^{-5}$	$2,067 \times 10^{-5}$
2	$4,170 \times 10^{-2}$	$4,720 \times 10^{-3}$	$7,412 \times 10^{-4}$	$2,268 \times 10^{-4}$	$1,130 \times 10^{-3}$	$2,244 \times 10^{-4}$	$2,260 \times 10^{-5}$	$2,262 \times 10^{-5}$
3	$4,246 \times 10^{-2}$	$4,403 \times 10^{-3}$	$5,947 \times 10^{-4}$	$2,186 \times 10^{-4}$	$1,089 \times 10^{-3}$	$2,145 \times 10^{-4}$	$2,193 \times 10^{-5}$	$2,204 \times 10^{-5}$

Таблица 13

Атомная плотность материала, атом/(барн·см), в сферических слоях отражателя критической сборки № 2

Отражатель из обедненного урана				
№ слоя	^{235}U	^{238}U	C	Fe
1	$2,100 \times 10^{-4}$	$4,668 \times 10^{-2}$	$2,895 \times 10^{-3}$	$3,816 \times 10^{-4}$
2	$2,141 \times 10^{-4}$	$4,654 \times 10^{-2}$	$2,887 \times 10^{-3}$	$3,805 \times 10^{-4}$
3	$2,106 \times 10^{-4}$	$4,682 \times 10^{-2}$	$2,904 \times 10^{-3}$	$3,828 \times 10^{-4}$
4	$2,103 \times 10^{-4}$	$4,675 \times 10^{-2}$	$2,900 \times 10^{-3}$	$3,822 \times 10^{-4}$

3.6. Расчетные исследования

Расчеты $k_{эф}$ для сборки № 2 проводились так же, как и для сборки № 1. Использовался метод Монте-Карло и пакет программ C-007 [4]. Несколько подробнее об этом сказано в разделе 2.6. Расчетные значения $k_{эф}$ для сборки № 2 приведены в табл. 14.

Таблица 14

Расчетные значения $k_{эф}$ для экспериментальной критической сборки № 2 ($k_{эф} = 1,0000 \pm 0,0016$)

Библиотека	БАС	ENDF/B7	JENDL3.3	JEF3	CENDL-2
$k_{эф}$	0,9973	0,9994	0,9931	0,9965	0,9970

Из табл. 14 следует, что наилучшее согласие расчетных значений $k_{эф}$ с экспериментальными обеспечивают константы библиотек ENDF/B-7, БАС и CENDL-2.

Заключение

1. Представлены результаты анализа критических экспериментов, выполненных ранее во ВНИИЭФ на установке ФКБН [1] с металлическими сборками, имеющими активную зону (АЗ) из ^{239}Pu ($\approx 88\%$) в α -фазе и отражатель из ^{238}U .

2. Определены критические ($k_{эф} = 1$) параметры (геометрическая форма, размеры и массы) для заданного нуклидного состава материалов АЗ и отражателя. Экспериментальные погрешности определения $k_{эф} = 1$ для обеихборок составляют $\Delta k_{эф} = \pm 0,0016$. Это примерно эквивалентно погрешности определения критической массы плутония в исследуемых сборках $\Delta m/m \approx \pm 0,1\%$.

3. Сравнение экспериментальных значений $k_{эф}$ с расчетными, полученными с использованием различных библиотек ядерных данных (БАС, ENDF/B-7, JEF3, JENDL3.3, CENDL), показало, что наилучшее согласие между ними обеспечивают константы библиотек БАС, CENDL-2 и ENDF/B-7.

4. Представленные данные удовлетворяют требованиям для тестовых (Benchmark) критическихборок и могут быть рекомендованы для включения их в международный справочник [2].

Список литературы

1. Кувшинов М. И., Воронцов С. В., Горелов В. П. и др. Тестовые критические эксперименты на установке ФКБН-2М // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2000. Вып. 2/3. С. 142–154.
2. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Cooperation and Development, NEA/NSC/DOC(95). Volume I. PU-MET-FAST-041. Valuers (VNIIEF) M. V. Gorbatenko, V. P. Gorelov, V. P. Yegorov, V. G. Zagrafov, V. I. Ilyin, M. I. Kuvshinov, V. I. Yuferev.
3. Воронцов С. В., Кувшинов М. И. Критические эксперименты на сборках с металлическим плутонием, выполненные в РФЯЦ-ВНИИЭФ // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2013. Вып. 3. С. 3–11.

Контактная информация –

Кувшинов Михаил Иванович,
главный научный сотрудник ИЯРФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ,
тел. (831 30) 2-25-95.

Статья поступила в редакцию 10.06.2014.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2014, вып. 3, с. 24–33.