

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

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

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

Представлены результаты анализа критических экспериментов с металлическими сборками, имеющими активную зону (АЗ) из ^{239}Pu ($\approx 88\%$) в α -фазе и отражатель из Be. Эти эксперименты были проведены М. И. Кувшиновым, А. А. Малинкиным и В. П. Егоровым в РФЯЦ-ВНИИЭФ на установке ФКБН в 1965 году.

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, бериллий, 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 REFLECTED BY BERYLLIUM / M. I. KUVSHINOV, S. V. VORONTSOV, V. Kh. KHORUZHYY // Presented are results of analysis of critical experiments with metallic assemblies possessing a core of (^{239}Pu ($\approx 88\%$)) in α -phase and a Be reflector performed earlier in RFNC-VNIEF at FKBN facility. The experiments were carried out by M. I. Kuvshinov, A. A. Malinkin and V. P. Egorov at FKBN in 1965.

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, 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, beryllium, test parameters, reactivity, efficient multiplication factor, Monte-Carlo method, nuclear data libraries.

Введение

В настоящей статье продолжен начатый авторами статьи в работе [1] анализ сохранившихся в архиве РФЯЦ-ВНИИЭФ записей процедур проведения критических экспериментов, выполненных ранее на установке ФКБН [2]. На сей раз рассмотрены сборки, имеющие активную зону из «энергетического» [3] металлического плутония в α -фазе (^{239}Pu ($\approx 88\%$)) и отражатель из Be. Эти эксперименты были проведены М. И. Кувшиновым, А. А. Малинкиным и В. П. Егоровым в РФЯЦ-ВНИИЭФ на установке ФКБН в 1965 году.

Важно отметить, что анализируемые критические сборки, содержащие в АЗ «энергетический» (^{239}Pu ($\approx 88\%$)) металлический плутоний в α -фазе, являются уникальными. Кроме РФЯЦ-ВНИИЭФ, нигде в мире такие эксперименты ни до 1965, ни позднее не проводились. Обусловлено это исключительной опасностью работы с деталями из такого плутония (как в отношении высокой радиоактивности, так и в отношении достижения случайной критичности в силу высокой плотности α -плутония и, соответственно, малых размеров критической системы). Вместе с тем знание ядерно-физических характеристик «энергетического»

плутония является важным, так как в настоящее время в промышленных энергетических реакторах нарабатывается плутоний с большим содержанием других (кроме ^{239}Pu) изотопов плутония.

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) [4]. В частности, в этом справочнике содержатся параметры более 30 критических сборок, ядерно-физические характеристики которых изучены в РФЯЦ-ВНИИЭФ. Содержание справочника систематически пополняется. При этом главным критерием является эффективный коэффициент размножения нейтронов в критической системе $k_{эф} = 1$.

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 трех КС с активной зоной из «энергетического» металлического плутония в α -фазе и отражателем из бериллия: двух сферически симметричных сборок с толщиной отражателя 2,10 см, 8,20 см и одной осесимметричной с толщиной отражателя 17,50 см. (Далее по тексту сборку с толщиной отражателя 2,10 см будем обозначать «сборка № 1», а сборки с толщиной отражателя 8,20 см и 17,50 см – «сборка № 2» и «сборка № 3», соответственно).

Кроме того, для указанных сборок были проведены расчеты значений $k_{эф}$ с использованием метода Монте-Карло и нескольких библиотек ядерных данных (БАС, ENDF/B-7, JEF3, CENDL-2). Результаты расчетов также представлены в статье.

Изложение материала, в основном, соответствует формату международного справочника [4]. Однако с целью уменьшения объема статьи описание некоторых методик измерений сокращено. Подробно эти методики рассматривались ранее в работах [1, 2, 5] и др.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность А. К. Житнику и О. Ю. Пашариной за оказанную консультацию и реализацию расчетов по методу Монте-Карло, а также С. А. Игумнову за помощь в оформлении рисунков.

1. Алгоритм подготовки тестовых данных

Основным тестовым (Benchmark) параметром для размножающих нейтроны сборок 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 $\Delta \approx |(1 - 1/k_{эф})|$. В критическом состоянии сборки $k_{эф} = 1$, $\rho = 0$, $\Delta = 0$.

Алгоритм подготовки Benchmark данных состоит в следующем [1, 2]. Рассматриваются экспериментальные стендовые сборки, близкие к критическим, на предмет полноты сведений об используемых в них материалах, методиках 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) как путем уточняющих экспериментов по возмущению реактивности, так и 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 должно составлять менее 1 %.

2. Сборка с АЗ из «энергетического» металлического плутония в α -фазе и отражателем из Ве толщиной 2,10 см (сборка № 1)

2.1. Описание стендовой сборки № 1

Схематический вид сборки № 1 на критическом стенде ФКБН представлен на рис. 1.

Активная зона (АЗ) из плутония содержит четыре сферических слоя, составленных из полусферических деталей. Отражатель из бериллия состоит из двух блоков, составленных также из полусферических слоев. Геометрические размеры и нуклидный состав всех деталей, входящих в сборку, представлены в табл. 1 и 2. Важно отметить, что полусферы из плутония и бериллия име-

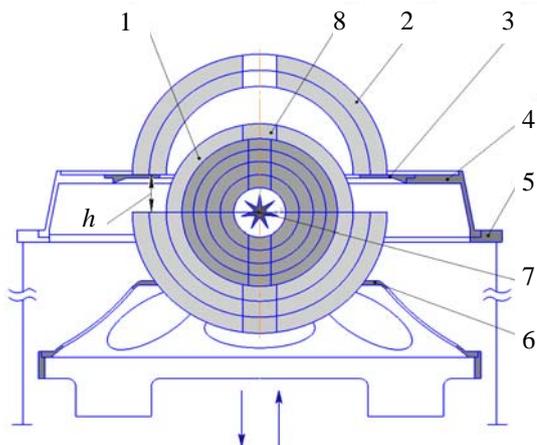


Рис. 1. Схема размещения размножающей сборки № 1 на стенде ФКБН: 1 – нижний (подвижный) блок сборки; 2 – верхний (неподвижный) блок; 3 – стальная диафрагма; 4, 5 – опоры для верхнего блока; 6 – опора для нижнего блока; 7 – источник нейтронов; 8 – пробки; h – расстояние между блоками; ■ – бериллий; ■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

ют полюсные отверстия, которые могут 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 две бериллиевые полусферы (№ 2 и № 3 по табл. 2), 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 имеет форму, близкую к сферической.

2.2. Процедура критмассовых измерений

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

Наиболее близкий к критическому состоянию вариант сборки называют стендовой РС.

Для подобранной стендовой 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).

Таблица 1

Характеристики компонентов АЗ стендовой (подкритической) сборки № 1

№ слоя	$R_{\text{вн}},$ см	$R_{\text{нар}},$ см	Нуклидный состав, массовая доля, %				Масса (с пробками) до покрытия, г	Масса (с пробками) после покрытия, г
			^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	примеси		
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
4	4,02	4,66	89,22	9,29	1,26	0,23	2865,0	2867,2

Таблица 2

Характеристики полусфер из Ве (размеры, массы и состав) для стендовой подкритической сборки № 1

№ слоя	$R_{\text{вн}},$ см	$R_{\text{нар}},$ см	Состав, массовая доля, %			Суммарная масса, г
			Ве	Fe	Cu	
Верхние полусферы						
1	4,66	5,35	99,8	0,01	0,01	195,5 (с пробкой)
2	5,35	6,00	99,8	0,01	0,01	236,0 (с пробкой)
3	6,00	6,75	99,8	0,01	0,01	347,6 (с пробкой)
Нижние полусферы						
1	4,66	5,35	99,8	0,01	0,01	195,5 (с пробкой)
2	5,35	6,00	99,8	0,01	0,01	232,8 (без пробки)
3	6,00	6,75	99,8	0,01	0,01	344,0 (без пробки)

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

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 (или полусферой) из ^{239}Pu ($\approx 88\%$), размещенным в центральной полости РС ($\delta\Delta_m$);
- изменением зазора между блоками РС ($\delta\Delta_h$).

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

- добавлением полюсных пробок в полусферы верхнего блока отражателя ($\delta\Delta_{\text{Be}}$);
- опорами для блоков РС 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, пробками из Ве и экспериментальным оборудованием

Результаты измерений подкритичности стендовой сборки № 1, а также оценка ее возмущений образцами из делящегося материала, пробками из

Ве и экспериментальным оборудованием представлены в табл. 3. Эти данные необходимы для формирования критической модели упрощенной экспериментальной сборки (см. раздел 2.4).

Значения Δ и $\delta\Delta$ для параметров 1–3 табл. 3 измерялись в эксперименте, значения $\delta\Delta$ для параметров 4–7 оценивались расчетным путем. При этом соотношение между $\delta k_{\text{эф}}$ и $\delta\Delta$ определялось путем сравнения экспериментального ($\delta\Delta$) и расчетного ($\delta k_{\text{эф}}$) значений возмущения базовой стендовой сборки, обусловленного сближением нижнего и верхнего блоков сборки на 1 мм.

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 в значение подкритичности $\Delta_{\text{ст}}$ для реальной стендовой сборки. Эти поправки представлены в табл. 3.

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

$$\Delta_m = \Delta_{\text{ст}} + t\delta\Delta_h + \delta\Delta_{\text{Be}} + \delta\Delta_{\text{оп}} + \delta\Delta_{\text{от}} + \delta\Delta_T = 3,83 - 1,10 - 1,00 + 1,50 + 0,10 - 0,80 = 2,53, \quad (2)$$

где $t = 1$ мм – толщина диафрагмы.

Т а б л и ц а 3

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

Параметр	Значения подкритичности и ее возмущения, ш.ед.
1. Подкритичность стендовой РС при сомкнутых на стальной диафрагме толщиной 1 мм нижнем и верхнем блоках, $\Delta_{\text{ст}}$	$3,83 \pm 0,05$
2. Возмущение подкритичности РС, обусловленное приближением ее нижнего блока к верхнему на 1 мм, $\delta\Delta_h$	$-1,10 \pm 0,03$
3. Возмущение подкритичности РС, обусловленное добавлением 1 г плутония в центральную полость АЗ, $\delta\Delta_m$	$-0,133 \pm 0,002$
4. Возмущение подкритичности РС, обусловленное добавлением полюсных пробок в полусферы верхнего блока отражателя из Ве, $\delta\Delta_{\text{Be}}$	$-1,00 \pm 0,02$
5. Возмущение подкритичности РС, обусловленное опорами для ее блоков на стенде, включая диафрагму (при их удалении), $\delta\Delta_{\text{оп}}$	$1,50 \pm 0,02$
6. Возмущение подкритичности РС, обусловленное стенами помещения, в котором расположен стенд установки (при их удалении), $\delta\Delta_{\text{от}}$	0,1
7. Возмущение подкритичности РС, обусловленное приведением температуры сборки к $20\text{ }^\circ\text{C}$, $\delta\Delta_T$	$-0,8 \pm 0,05$
Суммарное значение подкритичности сферической модели стендовой сборки, Δ_m	2,53

Стендовая модель оказалась подкритической ($\Delta_m = 2,53$).

Для достижения критичности такой модели сборки ($\Delta_m = 0$) в сферическую полость АЗ, к внутренней поверхности слоя, имеющего радиус 1,00 см, была условно добавлена масса плутония, равная 19,0 г (слой «0» в табл. 4 и 5). При этом согласно данным табл. 3 значение возмущения при добавлении 1 г плутония в центральную полость сборки принималось равным 0,133 ш.ед.

Таким способом была сформирована упрощенная сферическая критическая ($k_{эф} = 1$) модель экспериментальной сборки (рис. 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 из Ве. Значения радиусов всех сферических слоев отражателя в критической модели совпадают с экспериментальными. Незначительно изменена только плотность двух внешних слоев отражателя, что обу-

словлено добавлением в них полюсных пробок, отсутствующих в экспериментальной сборке. Это сделано с той целью, чтобы иметь сферически симметричную расчетную модель критической модели.

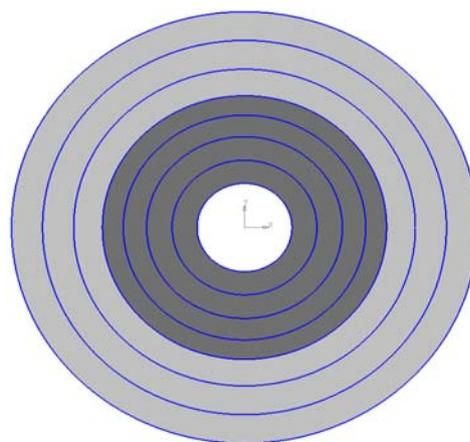


Рис. 2. Упрощенная сферическая критическая ($k_{эф} = 1$) модель экспериментальной сборки № 1 (■ – бериллий; ■ – плутоний)

Таблица 4

Характеристики компонентов АЗ критической сборки № 1

№ слоя	$R_{вн}$, см	$R_{нар}$, см	Нуклидный состав, массовая доля, %				Масса до покрытия, г	Масса после покрытия, г
			^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	примеси		
0	0,91	1,00	87,71	10,31	1,72	0,26	99,31	99,60
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
4	4,02	4,66	89,22	9,29	1,26	0,23	2865,0	2867,2

Таблица 5

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

№ слоя	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	Fe	C	H	N	O
0	$4,2477 \cdot 10^{-2}$	$4,9721 \cdot 10^{-3}$	$8,2604 \cdot 10^{-4}$	$3,3168 \cdot 10^{-4}$	$1,4128 \cdot 10^{-3}$	$3,5765 \cdot 10^{-4}$	$3,8604 \cdot 10^{-5}$	$5,7227 \cdot 10^{-5}$
1	$4,0832 \cdot 10^{-2}$	$4,7646 \cdot 10^{-3}$	$8,9253 \cdot 10^{-4}$	$2,9942 \cdot 10^{-4}$	$1,9549 \cdot 10^{-3}$	$8,1789 \cdot 10^{-4}$	$8,8281 \cdot 10^{-5}$	$1,3087 \cdot 10^{-4}$
2	$4,2276 \cdot 10^{-2}$	$4,6060 \cdot 10^{-3}$	$6,7147 \cdot 10^{-4}$	$2,6534 \cdot 10^{-4}$	$1,1053 \cdot 10^{-3}$	$2,0011 \cdot 10^{-4}$	$2,1600 \cdot 10^{-5}$	$3,2020 \cdot 10^{-5}$
3	$4,292 \cdot 10^{-2}$	$4,858 \cdot 10^{-3}$	$7,628 \cdot 10^{-4}$	$3,126 \cdot 10^{-4}$	$1,228 \cdot 10^{-3}$	$2,832 \cdot 10^{-4}$	$3,057 \cdot 10^{-5}$	$4,532 \cdot 10^{-5}$
4	$4,4136 \cdot 10^{-2}$	$4,9926 \cdot 10^{-3}$	$7,8998 \cdot 10^{-4}$	$3,2126 \cdot 10^{-4}$	$1,2617 \cdot 10^{-3}$	$2,9109 \cdot 10^{-4}$	$3,1419 \cdot 10^{-5}$	$4,6577 \cdot 10^{-5}$

Таблица 6

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

№ слоя	Be	Fe	Cu
1	$1,224 \cdot 10^{-1}$	$1,978 \cdot 10^{-6}$	$1,739 \cdot 10^{-6}$
2	$1,213 \cdot 10^{-1}$	$1,961 \cdot 10^{-6}$	$1,724 \cdot 10^{-6}$
3	$1,224 \cdot 10^{-1}$	$1,979 \cdot 10^{-6}$	$1,739 \cdot 10^{-6}$

2.6. Расчетные исследования

Расчеты $k_{эф}$ для исследуемых сборок проводились методом Монте-Карло с помощью пакета программ C-007. В этих программах заложены решения системы связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов. Для расчета параметров критическихборок или 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, 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/B7	JEF3	CENDL-2
$k_{эф}$	0,9969	0,9980	0,9997	1,0037

Из табл. 7 следует, что наилучшее согласие расчетных значений $k_{эф}$ имеет место при использовании библиотек JEF3 и ENDF/B-7.

3. Сборка с АЗ из «энергетического» металлического плутония в α -фазе и отражателем из Ве толщиной 8,20 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. Однако значения параметров их компонентов имеют значительные различия. В сборке № 2 по сравнению со сборкой № 1:

- толщина отражателя из Ве примерно в 4 раза больше;

Отметим, что материальные характеристики активной зоны и отражателя критической модели ($\Delta = 0$) очень мало отличаются от соответствующих характеристик подкритической экспериментальной сборки ($\Delta = 3,83$):

- масса плутония в АЗ увеличилась на 0,36 %;
- масса бериллия в отражателе увеличилась на 0,45 %.

Это может служить свидетельством того, что упрощение расчетной модели критической сборки до сферически симметричной геометрии не должно приводить к заметной погрешности вычисления значения $k_{эф}$ для изучаемой сборки.

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

Представленные в табл. 4–6 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 не зависят от процедуры измерений на критическом стенде. Тогда полную погрешность $k_{эф}$ можно вычислять по формуле

$$\delta k/k_{эф} = \left[(\delta k/k)_{экс}^2 + (\delta k/k)_{МАЗ}^2 + (\delta k/k)_{РАЗ}^2 + (\delta k/k)_{\alpha}^2 + (\delta k/k)_{\beta}^2 + (\delta k/k)_{мотр}^2 + (\delta k/k)_{ротр}^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

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» в (3) указывают, что эти параметры относятся к активной зоне и к отражателю, соответственно.

Численное значение погрешности $\Delta k_{эф} = \pm 0,0016$ принималось таким же, как и в справочнике [4], что примерно эквивалентно относительной погрешности определения критической массы плутония в исследуемых сборках $\Delta M/M = \pm 0,1$ %.

– масса плутония в составе АЗ в $\approx 1,6$ раза меньше;

– изменена граница раздела по радиусу сборки на нижний и верхний блоки (НБ и ВБ);

– увеличена в 2 раза толщина стальной диафрагмы между НБ и ВБ сборки.

Схематический вид сборки № 2 на критическом стенде ФКБН представлен на рис. 3.

Активная зона из плутония сборки № 2 содержит три сферических слоя, составленных из полусферических деталей. В центре АЗ имеется воздушная полость диаметром 20 мм. Характеристики компонентов АЗ и отражателя стендовой (подкритической) сборки № 2 (размеры, массы и нуклидный состав слоев) представлены в табл. 8 и 9, соответственно.

Верхний (неподвижный) блок сборки № 2, содержащий 2 полусферы (из слоев № 8 ВБ и № 9 ВБ по табл. 9), лежит на стальной диафрагме толщиной 2 мм. Важно отметить, что в полусферах верхнего блока стендовой сборки отсутствовали полюсные пробки. Диаметр полюсных отверстий – 26 мм.

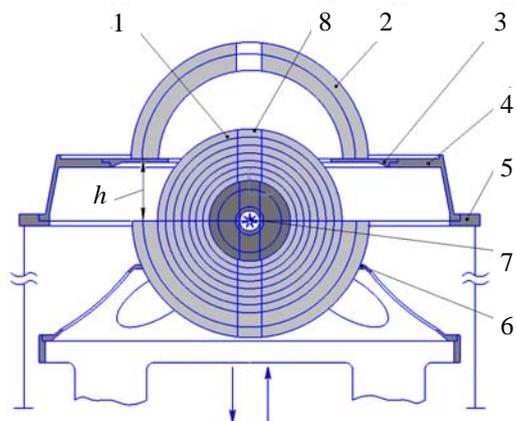


Рис. 3. Схематический вид сборки № 2 на критическом стенде ФКБН: 1 – нижний (подвижный) блок сборки; 2 – верхний (неподвижный) блок; 3 – стальная диафрагма; 4, 5 – опоры для верхнего блока; 6 – опора для нижнего блока; 7 – источник нейтронов; 8 – пробки; h – расстояние между блоками; ■ – бериллий; ■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

Остальные детали отражателя входят в нижний блок сборки, который имеет возможность перемещаться в вертикальном направлении до упора в диафрагму. В сомкнутом состоянии блоков сборка № 2 имеет форму, близкую к сферической.

Таблица 8

Характеристики компонентов АЗ стендовой (подкритической) сборки № 2

№ слоя	$R_{\text{вн}}$, см	$R_{\text{нар}}$, см	Нуклидный состав, массовая доля, %				Масса (с пробками) до покрытия, г	Масса (с пробками) после покрытия, г
			^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	примеси		
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 9

Характеристики слоев из Ве (размеры и масса) для стендовой сборки № 2

№ слоя	$R_{\text{вн}}$, см	$R_{\text{нар}}$, см	Форма слоя	Масса, г		
				пробок	слоя без пробок	суммарная
1	4,02	4,66	сфера	$4,70 \cdot 2 = 9,40$	265,3	274,7
2	4,66	5,35	сфера	$4,22 \cdot 2 = 8,44$	385,0	393,4
3	5,35	6,00	сфера	$4,78 \cdot 2 = 9,56$	465,6	475,2
4	6,00	6,75	сфера	$5,51 \cdot 2 = 11,02$	687,9	703,5
5	6,75	7,55	сфера	$5,88 \cdot 2 = 11,76$	928,1	944,9
6	7,55	8,35	сфера	$5,88 \cdot 2 = 11,76$	1146,3	1162,5
7	8,35	9,15	сфера	$5,88 \cdot 2 = 11,76$	1394,3	1411,1
8 НБ	9,15	11,0	полусфера	$13,60 \cdot 1 = 13,60$	2152,5	2166,1
8 ВБ	9,15	11,0	полусфера	пробки нет	2152,5	2152,5
9 НБ	11,0	12,25	полусфера	$9,19 \cdot 1 = 9,19$	1868,5	1877,7
9 ВБ	11,0	12,25	полусфера	пробки нет	1868,5	1868,5

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

3.3. Результаты измерений подкритичности стендовой сборки № 2 и оценка ее возмущений образцами из делящегося материала, пробками из Ве и экспериментальным оборудованием

Результаты измерений подкритичности стендовой сборки № 2, описанной в разделе 3.1, а также оценка ее возмущений образцами из делящегося материала, пробками из Ве и экспериментальным оборудованием, представлены в табл. 10. Эти данные необходимы для формирования критической модели упрощенной экспериментальной сборки (см. раздел 3.4).

Значения Δ и $\delta\Delta$ для параметров 1, 2, 3 табл. 10 измерялись в эксперименте, значения $\delta\Delta$ для параметров 4–7 оценивались расчетным путем. При этом соотношение между $\delta k_{эф}$ и $\delta\Delta$ определялось путем сравнения экспериментального ($\delta\Delta$) и расчетного ($\delta k_{эф}$) значений возмущения базовой стендовой сборки, обусловленного сближением нижнего и верхнего блоков сборки на 1 мм, а также добавлением 1 г плутония в центральную полость активной зоны.

3.4. Формирование упрощенной критической модели экспериментальной сборки № 2

На основании данных, приведенных в табл. 10, 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 представлены в табл. 10. Значение подкритичности сферической модели стендовой сборки (отклонение стендовой модели от критического по запаздывающим нейтронам состояния) Δ_m определялось по соотношению:

$$\Delta_m = \Delta_{ст} + t\delta\Delta_h + \delta\Delta_{Ве} + \delta\Delta_{оп} + \delta\Delta_{от} + \delta\Delta_T = 9,95 - 1,90 - 5,19 + 1,77 + 0,1 - 0,8 = 3,93, (4)$$

где $t = 2$ мм – толщина диафрагмы.

Стендовая модель оказалась подкритической ($\Delta_m = 3,93$).

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

Параметр	Значения подкритичности и ее возмущения, ш.ед.
1. Подкритичность стендовой РС при сомкнутых НБ и ВБ на стальной диафрагме толщиной 2 мм, $\Delta_{ст}$	$9,95 \pm 0,05$
2. Возмущение подкритичности РС, обусловленное приближением ее нижнего блока к верхнему на 1 мм, $\delta\Delta_h$	$-0,95 \pm 0,03$
3. Возмущение подкритичности РС, обусловленное добавлением 1 г плутония в центральную полость АЗ, $\delta\Delta_m$	$-0,284 \pm 0,002$
4. Возмущение подкритичности РС, обусловленное добавлением полусных пробок в отражатель, $\delta\Delta_{Ве}$	$-5,19 \pm 0,02$
5. Возмущение подкритичности РС, обусловленное опорами для ее блоков на стенде, включая диафрагму (при их удалении), $\delta\Delta_{оп}$	$1,77 \pm 0,02$
6. Возмущение подкритичности РС, обусловленное стенами помещения, в котором расположен стенд установки (при их удалении), $\delta\Delta_{от}$	0,1
7. Возмущение подкритичности РС, обусловленное приведением температуры сборки к 20 °С, $\delta\Delta_T$	$-0,8 \pm 0,05$

Для достижения критичности такой модели сборки ($\Delta = 0$) в сферическую полость АЗ к внутренней поверхности слоя, имеющего радиус 1,00 см, была условно добавлена масса плутония, равная 13,87 г. При этом, согласно данным табл. 10, значение возмущения при добавлении 1 г плутония в центральную полость сборки принималось равным 0,284 ш.ед. Таким способом была сформирована упрощенная сферическая критическая ($k_{эф} = 1$) модель экспериментальной сборки (рис. 4).

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. Значения радиусов всех сферических слоев отражателя в критической модели совпадают с экспериментальными.

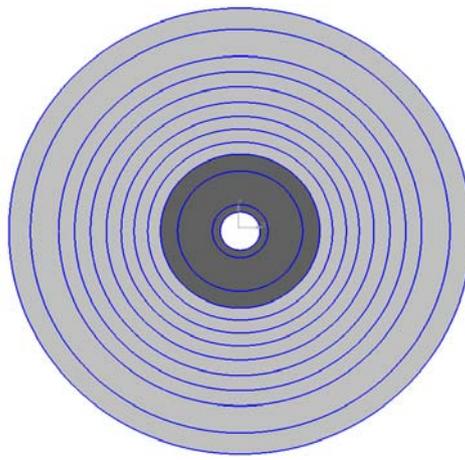


Рис. 4. Упрощенная сферическая критическая ($k_{эф} = 1$) модель экспериментальной сборки № 2:
 – бериллий; – плутоний

Таблица 11

Характеристики компонентов АЗ критической сборки № 2

№ слоя	$R_{вн}$, см	$R_{нар}$, см	Нуклидный состав, массовая доля, %				Масса до покрытия, г	Масса после покрытия, г
			^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	примеси		
1	0,94	1,40	87,56	10,26	1,93	0,25	149,23	149,4
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 12

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

№ слоя	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	Fe	C	H	N	O
1	$4,089 \cdot 10^{-2}$	$4,772 \cdot 10^{-3}$	$8,939 \cdot 10^{-4}$	$2,332 \cdot 10^{-4}$	$1,1628 \cdot 10^{-3}$	$3,304 \cdot 10^{-4}$	$2,327 \cdot 10^{-5}$	$2,324 \cdot 10^{-5}$
2	$4,229 \cdot 10^{-2}$	$4,608 \cdot 10^{-3}$	$6,717 \cdot 10^{-4}$	$2,096 \cdot 10^{-4}$	$1,044 \cdot 10^{-3}$	$2,071 \cdot 10^{-4}$	$2,092 \cdot 10^{-5}$	$2,0887 \cdot 10^{-5}$
3	$4,170 \cdot 10^{-2}$	$4,720 \cdot 10^{-3}$	$7,412 \cdot 10^{-4}$	$2,268 \cdot 10^{-4}$	$1,130 \cdot 10^{-3}$	$2,244 \cdot 10^{-4}$	$2,260 \cdot 10^{-5}$	$2,262 \cdot 10^{-5}$

Таблица 13

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

№ слоя	Be	Fe	Cu
1	$1,223 \cdot 10^{-1}$	$1,977 \cdot 10^{-6}$	$1,737 \cdot 10^{-6}$
2	$1,224 \cdot 10^{-1}$	$1,978 \cdot 10^{-6}$	$1,739 \cdot 10^{-6}$
3	$1,213 \cdot 10^{-1}$	$1,961 \cdot 10^{-6}$	$1,724 \cdot 10^{-6}$
4	$1,224 \cdot 10^{-1}$	$1,979 \cdot 10^{-6}$	$1,739 \cdot 10^{-6}$
5	$1,225 \cdot 10^{-1}$	$1,981 \cdot 10^{-6}$	$1,741 \cdot 10^{-6}$
6	$1,221 \cdot 10^{-1}$	$1,974 \cdot 10^{-6}$	$1,735 \cdot 10^{-6}$
7	$1,223 \cdot 10^{-1}$	$1,977 \cdot 10^{-6}$	$1,738 \cdot 10^{-6}$
8	$1,226 \cdot 10^{-1}$	$1,982 \cdot 10^{-6}$	$1,742 \cdot 10^{-6}$
9	$1,216 \cdot 10^{-1}$	$1,967 \cdot 10^{-6}$	$1,728 \cdot 10^{-6}$

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

Представленные в табл. 11, 12 и 13 материальные параметры сборки № 2 соответствуют критической модели, $k_{эф} = 1$. Численное значение погрешности $\Delta k_{эф} = \pm 0,0016$ принималось таким же, как и в справочнике [4]. Правомерность такого решения была обоснована разделе 2.5.

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 С-007. Несколько подробнее об этом сказано в разделе 2.6. Расчетные значения $k_{эф}$ для сборки № 2 приведены в табл. 14.

Из табл. 14 следует, что наилучшее согласие расчетных значений $k_{эф}$ имеет место при использовании библиотек ENDF/B-7 и JEF3.

Таблица 14

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

Библиотека	БАС	ENDF/B-7	JEF3	CENDL-2
$k_{эф}$	0,9945	0,9998	1,0010	1,0076

4. Сборка с АЗ из «энергетического» металлического плутония в α -фазе и отражателем из Ве толщиной 17,5 см (сборка № 3)

4.1. Описание стеновой сборки № 3

Стеновая сборка № 3, как и рассмотренные выше сборки № 1 и № 2, содержит в активной зоне металлический плутоний ^{239}Pu ($\approx 88\%$) в α -фазе и отражатель из бериллия. По конструкции, используемым деталям в АЗ и отражателе (в виде полусфер) и способу размещения на критическом стенде ФКБН эта сборка мало отличается от стеновыхборок № 1 и № 2. Способ размещения сборки № 3 на критическом стенде ФКБН аналогичен тому, который был изложен дляборок № 1 и № 2 (см. рис. 1 и 3).

Главной особенностью сборки № 3 является то, что она не содержит в своем составе полюсных пробок ни в одной из используемых полусфер из

плутония и бериллия (отметим, что нижние полусферы из плутония изготовлены без полюсных отверстий). Кроме того, стендовая сборка № 3 (в отличие отборок № 1 и № 2) становится критической при наличии воздушной щели между диафрагмой и торцевой поверхностью нижнего блока РС (еще до смыкания). Принимая во внимание указанные обстоятельства, критическую модель стеновой сборки представим осесимметричной (двумерной) конфигурации.

Состав деталей в активной зоне и отражателе в критической модели и в стеновой экспериментальной сборке полностью совпадают. Кроме того, в состав критической модели включена также стальная диафрагма, на которой размещен верхний блок стеновой сборки (рис. 5). Активная зона из плутония сборки № 3 содержит два сферических слоя, составленных из полусферических деталей. Верхние полусферы имеют осевое отверстие диаметром 22 мм. В центре АЗ имеется воздушная полость диаметром 28 мм. Характеристики компонентов АЗ и отражателя стеновой (подкритической) сборки № 3 (размеры, массы и нуклидный состав сферических слоев представлены в табл. 15 и 16, соответственно).

Верхний (неподвижный) блок сборки № 3, содержащий 7 полусфер из бериллия (слои № 8–14 по табл. 16), лежит на стальной диафрагме толщиной 3 мм. Остальные детали отражателя входят в нижний блок сборки, который имеет возможность перемещаться в вертикальном направлении.

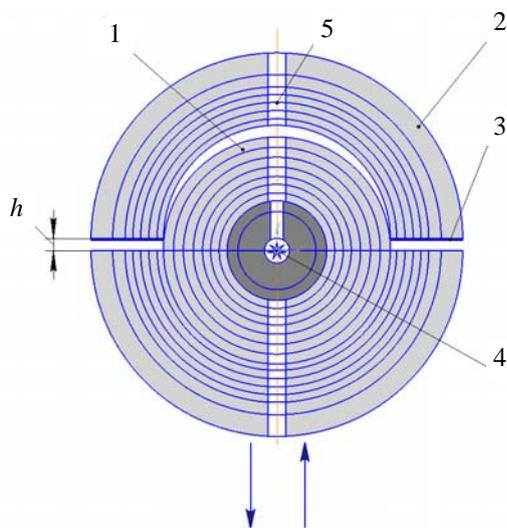


Рис. 5. Схематический вид критической модели сборки № 3: 1 – нижний (подвижный) блок сборки; 2 – верхний (неподвижный) блок; 3 – стальная диафрагма; 4 – источник нейтронов; 5 – воздушный канал, h – расстояние между блоками; – бериллий; – плутоний

Характеристики компонентов (полусфер) АЗ стендовой сборки № 3 и ее критической модели
(детали одни и те же)

№ слоя	$R_{\text{вн}},$ см	$R_{\text{нар}},$ см	Нуклидный состав, массовая доля, %				Масса (без пробок) до покрытия, г	Масса (без пробок) после покрытия, г
			^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	примеси		
1ВБ	1,40	3,15	88,66	9,70	1,42	0,22	990,95	991,34
1НБ	1,40	3,15	88,66	9,70	1,42	0,22	1128,5	1128,84
2ВБ	3,15	4,02	88,16	10,02	1,58	0,24	1245,70	1246,18
2НБ	3,15	4,02	88,16	10,02	1,58	0,24	1337,25	1338,62

Таблица 16

Характеристики компонентов (размеры и массы сферических слоев) отражателя из Ве стендовой (подкритической) сборки № 3 и ее критической модели (детали одни и те же)

№ слоя	$R_{\text{вн}},$ см	$R_{\text{нар}},$ см	Масса, г
1	4,020	4,660	265,3
2	4,660	5,350	385,0
3	5,350	6,000	465,6
4	6,000	6,750	687,9
5	6,750	7,550	928,1
6	7,550	8,350	1146,3
7	8,350	9,150	1394,3
8	9,150	11,00	4305,0
9	11,00	12,25	3844,0
10	12,25	13,25	3737,0
11	13,25	14,00	3194,0
12	14,00	15,00	4833,0
13	15,00	18,00	18900,0
14	18,00	21,50	31871,0

В критическом состоянии сборка № 3 имеет воздушный зазор между торцевой плоскостью нижнего блока и нижней поверхностью стальной диафрагмы, равный $h_{\text{кр}} = 15,33$ мм.

4.2. Процедура критмассовых измерений

Процедура критмассовых измерений на сборке № 3 практически не отличалась от таковой для сборок № 1 и № 2, рассмотренной в разделах 2.2 и 3.2.

В эксперименте измерялась зависимость подкритичности стендовой РС ($\Delta_{\text{ст}}$) от воздушного зазора (h) между торцевой плоскостью нижнего блока сборки и нижней плоскостью стальной диафрагмы (опорой для верхнего блока).

Критическая геометрия экспериментальной сборки определялась путем вычисления значения зазора ($h_{\text{кр}}$), при которой $\Delta_{\text{ст}} = 0$. При этом исходили из значения минимального достигнутого в экс-

перименте значения зазора ($h = 16,5$ мм), при котором $\Delta_{\text{ст}} = 3,12$ ш.ед., и зависимости $\Delta_{\text{ст}}$ от h .

4.3. Результаты измерений подкритичности стендовой сборки № 3 и оценка ее возмущений экспериментальным оборудованием

Результаты измерений подкритичности стендовой сборки № 3 при минимальном, реализованном в эксперименте, значении воздушной щели между диафрагмой и торцевой поверхностью нижнего блока, а также возмущений подкритичности РС, обусловленных приближением ее нижнего блока к верхнему на 1 мм, экспериментальным оборудованием и другими факторами, представлены в табл. 17. Эти данные необходимы для формирования критической модели упрощенной экспериментальной сборки (см. раздел 4.4).

Значения Δ и $\delta\Delta$ для параметров 1 и 2 табл. 17 измерялись в эксперименте, значения $\delta\Delta$ для параметров 3–5 оценивались расчетным путем. При этом соотношение между $\delta k_{\text{эф}}$ и $\delta\Delta$ определялось путем сравнения экспериментального ($\delta\Delta$) и расчетного ($\delta k_{\text{эф}}$) значений возмущения базовой стендовой сборки, обусловленного сближением нижнего и верхнего блоков сборки на 1 мм.

4.4. Формирование упрощенной критической модели экспериментальной сборки № 3

На основании данных, приведенных в табл. 17, была сформирована осесимметричная (двумерная) модель экспериментальной сборки, содержащая в своем составе стальную диафрагму (опору верхнего блока сборки). Влияние на реактивность РС других опорных конструкций критического стенда и стен помещения учитывалось путем внесения поправок к значению подкритичности $\Delta_{\text{ст}}$ (см. табл. 17).

Таблица 17

Результаты измерений и расчетных оценок параметров РС № 3, необходимые для формирования ее тестовой критической модели

Параметр	Значения подкритичности и ее возмущения, ш.ед.
1. Подкритичность стендовой РС при минимальном, реализованном в эксперименте, значении воздушной щели между диафрагмой и торцевой поверхностью нижнего блока $h = 16,5$ мм, $\Delta_{ст}$	$3,12 \pm 0,05$
2. Возмущение подкритичности РС, обусловленное приближением ее нижнего блока к верхнему на 1 мм, $\delta\Delta_h$	$-1,87 \pm 0,03$
3. Возмущение подкритичности РС, обусловленное опорами для ее блоков на стенде (при их удалении), исключая диафрагму, $\delta\Delta_{оп}$	$0,05 \pm 0,02$
4. Возмущение подкритичности РС, обусловленное стенами помещения, в котором расположен стенд установки (при их удалении), $\delta\Delta_{от}$	$0,05 \pm 0,02$
5. Возмущение подкритичности РС, обусловленное приведением температуры сборки к 20 °С, $\delta\Delta_T$	$-0,8 \pm 0,05$

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

$$\Delta_m = \Delta_{ст} + \delta\Delta_{оп} + \delta\Delta_{от} + \delta\Delta_T = 3,12 + 0,05 - 0,05 - 0,80 = 2,32 \text{ ш.ед.}, \quad (5)$$

Стендовая модель оказалась подкритической ($\Delta_m = 2,32$ ш.ед.).

Чтобы привести в критическое состояние стендовую сборку, имеющую подкритичность

$\Delta_m = 2,42$ ш.ед. при расстоянии между диафрагмой и торцевой поверхностью нижнего блока $h = 16,5$ мм, необходимо поднять ее нижний блок на высоту $\Delta h = 1,27$ мм. При этом критический воздушный зазор между диафрагмой и торцевой поверхностью нижнего блока будет равен $h_{кр} = 15,33$ мм.

Таким способом была сформирована упрощенная осесимметричная критическая ($\Delta = 0$, $k_{эф} = 1$) модель экспериментальной сборки, схематическое изображение которой было представлено выше, на рис. 4.

Характеристики АЗ (размеры, масса и нуклидный состав) для критической модели сборки № 3 соответствуют данным, приведенным в табл. 15 и 16. Значения радиусов всех сферических слоев отражателя в критической модели совпадают с экспериментальными. В табл. 18 и 19 приведены значения атомной плотности, атом/(барн·см), материала в сферических слоях активной зоны и отражателя критической модели сборки № 3 (детали одни и те же).

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

Представленные в табл. 18 и 19 материальные параметры сборки № 3 соответствуют критической модели, $k_{эф} = 1$. Численные значения погрешностей ($k_{эф} = 1 \pm 0,0016$) принимались такими же, как и в справочнике [4]. Правомерность такого решения была обоснована в разделе 2.5.

4.6. Расчетные исследования

Расчеты $k_{эф}$ для сборки № 3 проводились так же, как и дляборок № 1 и № 2. Использовался метод Монте-Карло и пакет программ С-007. Несколько подробнее об этом сказано в разделе 2.6. Расчетные значения $k_{эф}$ для сборки № 3 приведены в табл. 20.

Из табл. 20 следует, что наилучшее согласие расчетных значений $k_{эф}$ имеет место при использовании библиотеки ENDF/B-7.

Таблица 18

Атомная плотность материала, атом/(барн·см), в сферических слоях активной зоны критической сборки № 3

№ слоя	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	Fe	C	H	N	O
1	$4,222 \cdot 10^{-2}$	$4,600 \cdot 10^{-3}$	$6,706 \cdot 10^{-4}$	$2,093 \cdot 10^{-4}$	$1,043 \cdot 10^{-3}$	$2,067 \cdot 10^{-4}$	$2,089 \cdot 10^{-5}$	$2,085 \cdot 10^{-5}$
2	$4,211 \cdot 10^{-2}$	$4,766 \cdot 10^{-3}$	$7,484 \cdot 10^{-4}$	$2,290 \cdot 10^{-4}$	$1,141 \cdot 10^{-3}$	$2,266 \cdot 10^{-4}$	$2,283 \cdot 10^{-5}$	$2,2847 \cdot 10^{-5}$

Атомная плотность материала, атом/(барн·см), в сферических слоях отражателя критической сборки № 3

№ слоя	Be	Fe	Cu
1	$1,223 \cdot 10^{-1}$	$1,977 \cdot 10^{-6}$	$1,737 \cdot 10^{-6}$
2	$1,224 \cdot 10^{-1}$	$1,978 \cdot 10^{-6}$	$1,739 \cdot 10^{-6}$
3	$1,213 \cdot 10^{-1}$	$1,961 \cdot 10^{-6}$	$1,724 \cdot 10^{-6}$
4	$1,224 \cdot 10^{-1}$	$1,979 \cdot 10^{-6}$	$1,739 \cdot 10^{-6}$
5	$1,225 \cdot 10^{-1}$	$1,981 \cdot 10^{-6}$	$1,741 \cdot 10^{-6}$
6	$1,221 \cdot 10^{-1}$	$1,974 \cdot 10^{-6}$	$1,735 \cdot 10^{-6}$
7	$1,223 \cdot 10^{-1}$	$1,977 \cdot 10^{-6}$	$1,738 \cdot 10^{-6}$
8	$1,226 \cdot 10^{-1}$	$1,982 \cdot 10^{-6}$	$1,742 \cdot 10^{-6}$
9	$1,216 \cdot 10^{-1}$	$1,967 \cdot 10^{-6}$	$1,728 \cdot 10^{-6}$
10	$1,228 \cdot 10^{-1}$	$1,985 \cdot 10^{-6}$	$1,745 \cdot 10^{-6}$
11	$1,225 \cdot 10^{-1}$	$1,981 \cdot 10^{-6}$	$1,741 \cdot 10^{-6}$
12	$1,227 \cdot 10^{-1}$	$1,983 \cdot 10^{-6}$	$1,743 \cdot 10^{-6}$
13	$1,231 \cdot 10^{-1}$	$1,990 \cdot 10^{-6}$	$1,749 \cdot 10^{-6}$
14	$1,241 \cdot 10^{-1}$	$2,006 \cdot 10^{-6}$	$1,763 \cdot 10^{-6}$

Таблица 20

Расчетные значения $k_{эф}$ для экспериментальной критической сборки № 3 ($k_{эф} = 1,0000 \pm 0,0016$)

Библиотека	БАС	ENDF/B-7	JEF3	CENDL-2
$k_{эф}$	0,9867	1,0016	1,0052	1,0095

Заключение

1. Представлены результаты анализа критических экспериментов, выполненных в РФЯЦ-ВНИИЭФ на установке ФКБН с тремя близкими к сферическим сборками, имеющими активную зону из «энергетического» (массовая доля $^{239}\text{Pu} \approx 88\%$) металлического плутония в α -фазе и отражатель из бериллия.

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

3. Сравнение экспериментальных значений $k_{эф}$ с расчетными, полученными с использованием различных библиотек ядерных данных (БАС, ENDF/B-7, JEF3, CENDL-2), показало, что наи-

лучшее согласие обеспечивают константы библиотеки ENDF/B-7.

4. Представленные в отчете данные удовлетворяют требованиям для тестовых (Benchmark) критическихборок и могут быть рекомендованы для включения их в международный справочник ICSBEP (International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiment) [4].

Список литературы

1. Кувшинов М. И., Воронцов С. В., Хоружий В. Х. Экспериментальные и расчетные параметры тестовых (benchmark) сферических критическихборок с активной зоной из металлического плутония (^{239}Pu (88 %)) в δ -фазе и отражателем из обедненного урана // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2014. Вып. 3. С. 24–33.

2. 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.

3. Андрюшин И. А., Юдин Ю. А. Риски распространения и проблема энергетического плутония. – Саранск: Красный Октябрь, 2007. 124 с.

4. 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. Valuators (VNIIEF) M. V. Gorbatenko, V. P. Gorelov, V. P. Yegorov, V. G. Zagrafov, V. I. Ilyin, M. I. Kuvshinov, V. I. Yuferev.

5. 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. 8(83130) 6-59-42

Статья поступила в редакцию 05.06.2015.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, вып. 4, с. 25–38.