

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СФЕРИЧЕСКИХ КРИТИЧЕСКИХ СБОРОК С АКТИВНОЙ ЗОНОЙ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПЛУТОНИЯ (^{239}Pu (~98 %)) В δ -ФАЗЕ И ОТРАЖАТЕЛЯМИ ИЗ ДЮРАЛЮМИНИЯ, СВИНЦА И ВОЛЬФРАМА

**В. Н. Богданов, С. В. Воронцов, Э. А. Гуменных, А. А. Девяткин, А. А. Кайгородов,
М. И. Кувшинов, А. В. Панин, С. В. Финогеев, В. Х. Хоружий**

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

Представлены результаты тестовых (benchmark) критических экспериментов, выполненных на установке ФКБН-2М, со сферическими сборками с активной зоной из металлического плутония (^{239}Pu (~98 %)) в δ -фазе и отражателями из дюралюминия, свинца и вольфрама. Определены критические ($k_{\text{эф}} = 1$) параметры (геометрическая форма и размеры) для заданного нуклидного состава материалов активной зоны и отражателя. Значения $k_{\text{эф}}$ для исследованных критическихборок были также вычислены с использованием метода Монте-Карло и различных библиотек ядерных данных: ENDF/B-7, БАС, JENDL 3.3, JEF-3, CENDL-2. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных результатов исследований.

Ключевые слова: критическая сборка, активная зона, плутоний, отражатель, дюралюминий, свинец, вольфрам, тестовые параметры, коэффициент размножения нейтронов, метод Монте-Карло, ядерные данные, библиотеки ENDF/B-7, БАС, JENDL 3.3, JEF-3, CENDL-2.

EXPERIMENTAL AND CALCULATION PARAMETERS OF SPHERICAL CRITICAL ASSEMBLIES WITH A CORE OF METAL PLUTONIUM (^{239}Pu (~98 %)) IN δ -PHASE AND REFLECTORS OF DURALUMINIUM, LEAD AND TUNGSTEN / V. N. BOGDANOV, S. V. VORONTSOV, E. A. GUMENNYKH, A. A. DEVIATKIN, A. A. KAIGORODOV, M. I. KUVSHINOV, A. V. PANIN, S. V. FINOGEEV, V. Kh. KHORUZHYY // There are presented the results of benchmark critical experiments performed on FKBN-2M facility with spherical assemblies with a core of metal plutonium (^{239}Pu (~98 %)) in δ -phase and reflectors of duraluminium, lead and tungsten. Critical ($k_{\text{ef}} = 1$) parameters (geometric shape and dimensions) for the given nuclide composition of core materials and reflector are determined. The values of k_{ef} for the critical assemblies under investigation were also calculated with the use of Monte-Carlo method and different nuclear data libraries: ENDF/B-7, BAS, JENDL 3.3, JEF-3, CENDL-2. There was performed the comparison of experimental and calculation results of investigations.

Key words: critical assembly, core, plutonium, reflector, duraluminium, lead, tungsten, benchmark test, k_{ef} , Monte-Carlo method, nuclear data, ENDF/B-7, BAS, JENDL 3.3, JEF-3, CENDL-2 libraries.

Введение

Критические параметры сферическихборок широко используются для проверки достоверности данных библиотек констант взаимодействия нейтронов с ядрами веществ. В настоящее время продолжается издание Международного справочника по тестовым (benchmark) критическим сборкам [1], данные которого систематически пополняются и уточняются. В указанном справочнике

содержатся, в частности, характеристики 32 критическихборок, полученные в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». В их число входят две сборки (с активной зоной (АЗ) из ^{239}Pu (98 % по массе) и отражателем из дюралюминия [2] и свинца [3]), близкие (но не тождественные) по составу и геометрии к рассматриваемым в настоящей статье. Данные о критических параметрах сборки с АЗ из ^{239}Pu (98 %) в δ -фазе и отражателем из вольфрама ранее не публиковались. Необходимо отметить,

что отношение массовых долей изотопов $^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}$ в полусферических деталях составляет $\sim 98,3/1,7$. Запись ^{239}Pu (98 %) использовалась ранее [2, 3], поэтому мы будем придерживаться такого обозначения по тексту данной статьи.

Никелевое покрытие плутониевых деталей в представлении к расчетным исследованиям гомогенно размешивалось по объему сборки. Данное упрощение допускалось при формировании критических моделей исследуемыхборок для публикации в справочнике [1]. В состав сплава входят примеси, которые при формировании расчетной модели также представлены изотопом ^{59}Ni .

Отметим, что новые эксперименты, как и прежде, проводились на критическом стенде ФКБН-2М [4]. При этом в измерениях были использованы те же самые детали из плутония и материалов отражателей, что и в ранних экспериментах. Состав используемых плутониевых слоев приведен в работах [2, 3].

Настоящие исследования имели целью уточнить критические параметрыборок с отражателями из дюралюминия и свинца и получить тестовые данные для сборки с АЗ из плутония и отражателем из вольфрама.

1. Процедуры проведения эксперимента и формирования тестовых критических моделей, адекватных реальной сборке

Типовая размножающая сборка (РС) смонтирована на стенде установки ФКБН-2М (рис. 1).

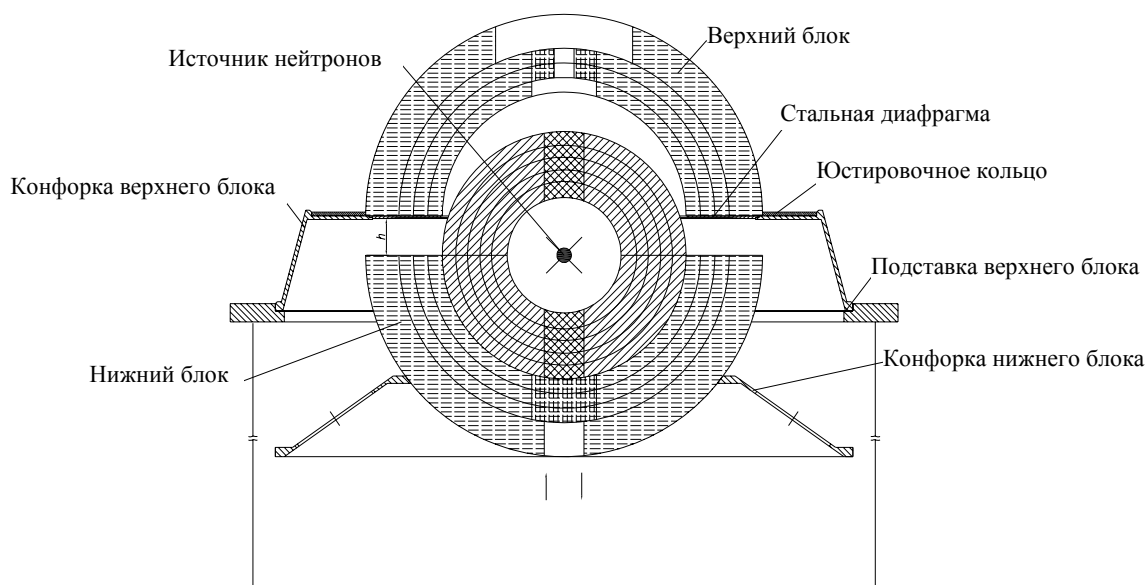


Рис. 1. Схематическое изображение критической сборки: – ^{239}Pu (98 %); – полусферическая пробка ^{239}Pu (98 %); – Al; – полусферическая пробка Al; – воздух

Основным тестовым параметром для критическихборок является эффективный коэффициент размножения нейтронов, $k_{эф} = 1$. Процедура критических измерений на установке ФКБН-2М и формирования расчетной критической модели, адекватной экспериментальной РС, заключается в следующем [4].

Путем изменения состава деталей в РС на стенде установки подбирается конфигурация сборки, близкая к критической. Дистанционно сближаются ее блоки (рис. 1) до критического состояния. Высота подъема нижнего блока критической сборки фиксируется с помощью жестких упоров в механизме перемещения.

Для подобранной системы тщательно измеряется скорость счета штатными «всеволновыми» детекторами от сборки с ^{252}Cf источником нейтронов в центральной полости РС $N_{ист}$ и без него $N_{РС}$. После этого вычисляется коэффициент умножения Q по формуле

$$Q = (N_{ист} - N_{РС})/N_0,$$

где N_0 – скорость счета детектора от ^{252}Cf источника в железном шарике (диаметром 20 мм) на месте расположения центра РС.

В качестве показателя степени подкритичности РС используется отношение $\Delta = 1000/Q$, имеющее линейную зависимость от зазора между блоками РС.

Далее в эксперименте определяется возмущение реактивности РС, обусловленное:

- опорами для каждой части РС, $\Delta_{оп}$ (путем добавления к сборке аналогичных деталей, рис. 2);

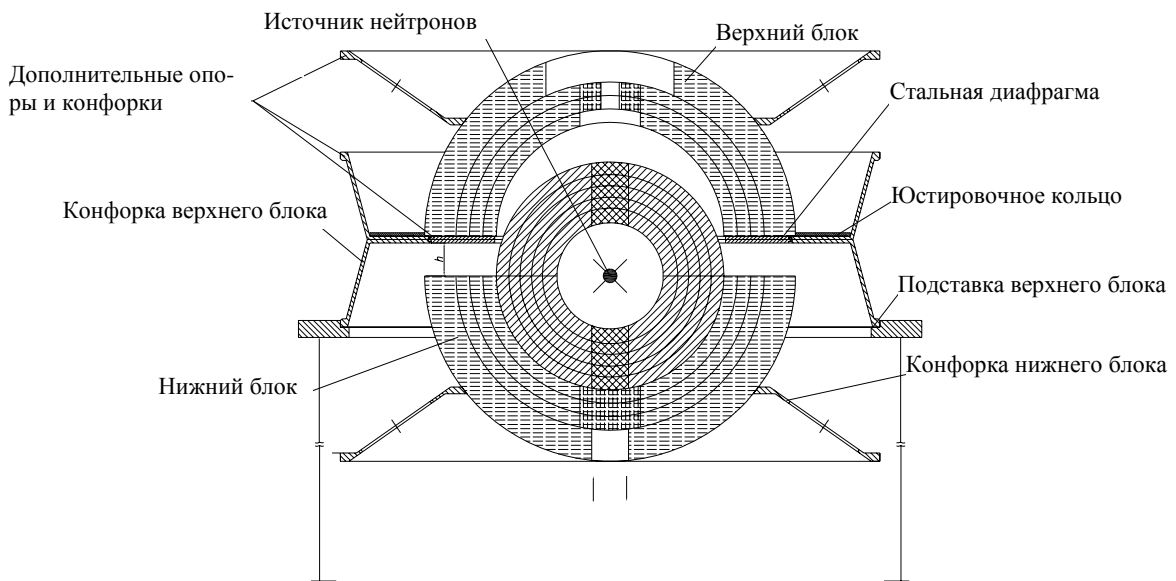







Рис. 2. Размещение дополнительных «опорных» деталей в экспериментах по определению их вклада в реактивность сборки:  – ^{239}Pu (98 %);  – полная пробка ^{239}Pu (98 %);  – Al;  – полная пробка Al;  – воздух

- малыми образцами (пробками, полусферой) из делящихся и конструкционных материалов, входящих в состав РС, Δ_m (путем их удаления или добавления);

- смыканием РС (путем экстраполяции зависимости реактивности РС от размера щели между нижней и верхней частями сборки h к $h = 0$), Δ_h ;

- приведением температуры сборки к 20°C , Δ_T (с помощью расчетов);

- стенами помещения, в котором расположен стенд установки, $\Delta_{от}$ (с помощью расчетов).

На основании данных, полученных при выполнении указанных процедур, формируется стендовая модель экспериментальной сборки со сферической внешней поверхностью, свободной от опорных конструкций и других отражателей, включая стены помещения. Их влияние на реактивность РС учитывается путем внесения поправок к значению Δ_0 , соответствующих реальной экспериментальной сборке.

Реактивность стендовой модели определяется по соотношению

$$\Delta_{сф} = \Delta_0 + \Delta_{оп} + \Delta_h + \Delta_{ст} + \Delta_T.$$

$\Delta_{сф}$ (подкритичность точно сферической сборки) обычно не равна нулю. Стендовая модель слегка подкритическая или надкритическая. Путём изменения одной из характеристик модели (как правило, массы, добавляемой или удаляемой из центральной полости РС) она доводится до кри-

тического состояния: $\Delta = 0$ ($k_{эф} = 1$). Таким путем стендовая модель переходит в разряд расчетной критической ($k_{эф} = 1$) модели, для которой приводятся окончательные характеристики: размеры, масса, нуклидный состав.

Важнейшим этапом работы по формированию тестовой расчетной модели (на основе критических экспериментов) является оценка погрешности определения значения $k_{эф}$.

Заметим, что измерение реактивности реальной РС на стенде ФКБН-2М с необходимой высокой точностью не является самым трудным этапом при получении тестовых данных. Основная трудность в достижении конечной цели заключается в формулировании расчетной модели, адекватной реальной РС, и в достоверной оценке погрешности тестового значения $k_{эф}$.

Расчетная модель экспериментальной критической сборки всегда является идеализированной системой, так как практически невозможно описать до мельчайших подробностей (с высокой точностью) ее конструкцию и нуклидный состав. В частности, это связано с наличием допусков при изготовлении каждой из деталей РС, со сложностью и многообразием предметов, расположенных в помещении стенда ФКБН-2М (детали стенда, датчики нейтронов, технологическое оборудование).

В рассматриваемом аспекте достоинствами тестовых экспериментов на установке ФКБН-2М являются:

- простота нуклидного состава и геометрии экспериментальной РС, близкой к сферической;

- возможность экспериментального определения возмущения реактивности РС, обусловленного технологическим оборудованием (подставками, диафрагмами и др.), образцами из делящихся и конструкционных материалов, влияющих в большей степени на критмассовые характеристики при проведении эксперимента;

- высокая точность измерения реактивности и ее повторяемость при переборках РС.

Указанные достоинства установки ФКБН-2М обеспечивают возможность формирования расчетной критической модели РС, адекватной реальной сборке, с погрешностью значения $k_{эф}$, удовлетворяющей тестовым требованиям.

В настоящей статье полная погрешность определения $k_{эф}$ оценивалась по формуле

$$\delta k/k_{эф} = \left[(\delta k/k)_{экс}^2 + (\delta k/k)_{м.АЗ}^2 + (\delta k/k)_{R АЗ}^2 + (\delta k/k)_{\alpha}^2 + (\delta k/k)_{\beta}^2 + (\delta k/k)_{м.отр}^2 + (\delta k/k)_{R отр}^2 \right]^{1/2},$$

где $(\delta k/k)_{экс}$ – относительная погрешность, обусловленная ошибкой определения Δ (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 знании масс, размеров, атомного содержания делящегося материала и примесей в активной зоне, соответственно. Индексы «АЗ» и «отр» указывают, что соответствующие параметры относятся к активной зоне или к отражателю.

Для сборок с отражателями из дюралюминия ($\Delta k_{эф} = \pm 0,0022$) и свинца ($\Delta k_{эф} = \pm 0,0016$) численные значения всех указанных в настоящей статье погрешностей принимались такими же, что и в справочнике [1]. Это представляется совершенно обоснованным, так как новые эксперименты, как и прежде, проводились на критическом стенде ФКБН-2М [4], и в измерениях были использованы те же самые детали из плутония и материалов отражателей, что и в ранних экспериментах. Для сборок с отражателем из вольфрама погрешность была определена по изложенному выше методу: $\Delta k_{эф} = \pm 0,0015$.

2. Сборка с отражателем из дюралюминия

2.1. Описание стендовой сборки

Стендовая сборка с сомкнутыми на диафрагме блоками имела примерно сферическую форму с воздушной полостью в центре. Она содержала АЗ из металлического плутония и отражатель из дюралюминия. Детали АЗ и отражателя имели полусферическую форму. Характеристики деталей, входящих в состав стендовой сборки (размеры, массы и др.), приведены в табл. 1.

Сборка на критическом стенде была смонтирована в виде двух блоков (см. рис. 1). Верхний блок, составленный из дюралюминиевых полусферических деталей, лежал на стальной диафрагме толщиной 2 мм. Остальные детали входили в нижний (подвижный в вертикальном направлении) блок.

2.2. Результаты измерений на стендовой сборке

В соответствии с алгоритмом, изложенным в разделе 1, для РС с АЗ из плутония и отражателем из дюралюминия были определены значения всех параметров, необходимых для формирования тестовой критической модели. Эти данные представлены в табл. 2.

2.3. Критическая модель упрощенной экспериментальной сборки

Используя результаты измерений, приведенные в табл. 2, можно определить реактивность упрощенной экспериментальной сборки (без опор, при сомкнутых без диафрагмы блоках, при отсутствии стен помещения, при температуре АЗ 20 °С):

$$\Delta_{эф} = \Delta_0 + \Delta_{оп} + 2\Delta_l + \Delta_{ст} + \Delta_r = 13,141.$$

Упрощенная модель РС не является критической. Для условного вывода ее в нижнее критическое состояние необходимо внести в активную зону дополнительное количество плутония. В настоящей работе в целях упрощения расчетной критической модели плутоний массой 172,9 г добавлялся в АЗ в виде сферического слоя, прилегающего к внутренней поверхности сборки.

Таблица 1

Размеры и массы стеновой РС с АЗ из ^{239}Pu (98 %) и отражателем из дюралюминия

Полусфера, №	Радиус, см			Масса полусферы, г
	осевой полости	внутренний	внешний	
Нижний блок РС				
Отражатель				
1	1,35	9,150	11,000	3089,0
2	–	8,350	9,150	1036,7
3	–	7,550	8,350	878,2
4	–	6,750	7,550	705,5
Активная зона из ^{239}Pu (δ , 98 %)				
5	–	6,000	6,750	2935,3
6	–	5,350	6,000	2003,5
7	–	4,660	5,350	1658,1
8	–	4,020	4,660	1158,9
9	–	3,150	4,020	1075,8
10	–	3,150	4,020	1077,4
11	–	4,020	4,660	1156,2
12	–	4,660	5,350	1658,0
13	–	5,350	6,000	2001,0
14	–	6,000	6,750	2922,0
Верхний блок РС				
Отражатель				
15	1,80	6,750	7,550	674,5
16	0,60	7,550	8,350	872,6
17	0,60	8,350	9,150	960,6
18	3,80	9,150	11,000	2805,5

Таблица 2

Значения параметров, необходимых для формирования тестовой критической модели

Параметр	Δ
Реактивность реальной экспериментальной РС, Δ_0	15,027
Возмущение реактивности РС, обусловленное опорами для ее блоков на стенде, $\Delta_{оп}$	2,170
Возмущение реактивности РС, обусловленное добавлением 1 г плутония на поверхность ее внутренней полости*, Δ_m	0,076
Возмущение реактивности РС, обусловленное смыканием нижнего и верхнего блоков на 1 мм, Δ_h	–2,028
Возмущение реактивности РС, обусловленное стенами помещения, в котором расположен стенд установки, $\Delta_{ст}$	0,1
Возмущение реактивности РС, обусловленное приведением температуры сборки к 20 °С, Δ_T	–0,1

* Значение Δ_m определялось экспериментально как среднее значение удельного (на 1 г плутония) возмущения реактивности РС при добавлении полюсной пробки из плутония на внутреннюю поверхность полости в АЗ и при удалении полюсной пробки.

2.4. Характеристики критической модели

Характеристики активной зоны и отражателя критической модели приведены на рис. 3 и в табл. 3. Полусферы с незаполненными полюсными отверстиями в стеновой сборке при переходе к крити-

ческой модели были представлены как сплошные, с соответствующим уменьшением атомной плотности. Единственное различие в геометриях сборок настоящей работы и работы [2] заключается в том, что теперь радиус полости равен 3,056 см.

Размеры, масса и состав критической сборки ($k_{эф} = 1$) с АЗ из ^{239}Pu (98 %) и отражателем из дюралюминия

Размер слоя, см		Масса, г	Атомная плотность, атом/(б·см)		
r_1	r_2		^{239}Pu	^{240}Pu	^{59}Ni
3,056	4,02	2326,1	3,6581E-002	6,688E-004	4,5381E-003
4,02	4,66	2315,1	3,6512E-002	6,674E-004	4,8301E-003
4,66	5,35	3316,0	3,6576E-002	6,688E-004	4,4941E-003
5,35	6,00	4004,5	3,6471E-002	6,667E-004	4,5551E-003
6,00	6,75	5857,3	3,6707E-002	6,711E-004	4,2751E-003
			Al	Fe	Cu
6,75	8,35	3104	5,5645E-002	1,0183E-003	1,0484E-003
8,35	9,15	1998	5,3497E-002	9,7902E-004	1,0079E-003
9,15	11,0	5916	5,1557E-002	9,4353E-004	9,7136E-004

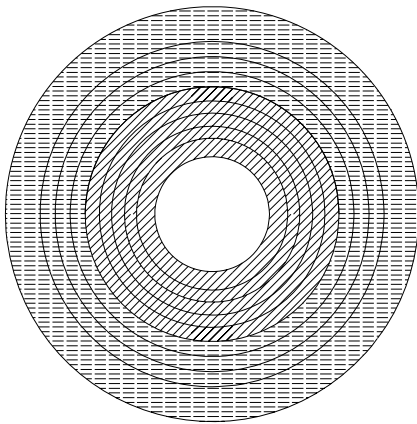


Рис. 3. Геометрия критической модели сборки с АЗ из ^{239}Pu (98 %) и отражателем из дюралюминия:

3. Сборка с отражателем из свинца

3.1. Описание стендовой сборки

Стендовая сборка имела примерно сферическую форму с воздушной полостью в центре. Она содержала АЗ из металлического плутония и отражатель из свинца. Детали АЗ и отражателя имели полусферическую форму. Характеристики деталей, входящих в состав стендовой сборки (размеры, нуклидный состав и др.), приведены в табл. 4.

Сборка на критическом стенде была смонтирована в виде двух блоков (см. рис. 1). Верхний блок, составленный из полусферических деталей, лежал на стальной диафрагме толщиной 1,5 мм. Остальные детали входили в нижний (подвижный по вертикали) блок.

3.2. Результаты измерений на стендовой сборке

В соответствии с вышеизложенным алгоритмом для размножающей сборки с активной зоной из плутония и отражателем из свинца были определены значения всех параметров, необходимых для формирования тестовой критической модели. Эти данные представлены в табл. 5.

3.3. Критическая модель упрощенной экспериментальной сборки

Используя результаты измерений, приведенные в табл. 5, можно определить реактивность упрощенной экспериментальной сборки (без опор, при сомкнутых без диафрагмы блоках, при отсутствии стен помещения, при температуре АЗ 20 °С):

$$\Delta_{сф} = \Delta_0 + \Delta_{оп} + 1,5\Delta_h + \Delta_{ст} + \Delta_r = 5,338.$$

Упрощенная модель РС не является критической. Для условного вывода ее в нижнее критическое состояние необходимо внести в центральную полость дополнительное количество плутония. В настоящей работе в целях упрощения расчетной критической модели плутоний массой 50,3 г добавлялся в АЗ в виде сферического полуслоя, радиусами от 1 см до 1,4 см, прилегающего к внутренней поверхности сборки.

3.4. Характеристики критической модели

Характеристики активной зоны и отражателя критической модели приведены на рис. 4 и в табл. 6. Полусферы с незаполненными полносными отверстиями в стендовой сборке при переходе к критической модели были представлены как сплошные, с соответствующим уменьшением атомной плотности.

Размеры и массы стендовой РС с АЗ из ^{239}Pu (98 %) и отражателем из свинца

Полусфера, №	Радиус, см			Масса полусферы, г
	осевой полости	внутренний	внешний	
Нижний блок РС				
Отражатель				
1	–	6,000	9,150	12907
Активная зона из ^{239}Pu (δ , 98 %)				
2	–	5,350	6,000	2001,0
3	–	4,660	5,350	1658,0
4	–	4,020	4,660	1156,2
5	–	3,150	4,020	1077,4
6	–	1,400	3,150	912,4
7	–	1,000	1,400	54,5
8	–	1,400	3,150	916,5
9	–	3,150	4,020	1075,8
10	–	4,020	4,660	1158,9
11	–	4,660	5,350	1658,1
12	1,10	5,350	6,000	1965,0
Верхний блок РС				
Отражатель				
13	1,10	6,000	9,150	12793

Таблица 5

Значения параметров, необходимых для формирования тестовой критической модели

Параметр	Δ
Реактивность реальной экспериментальной РС, Δ_0	4,916
Возмущение реактивности РС, обусловленное опорами для ее блоков на стенде, $\Delta_{оп}$	2,532
Возмущение реактивности РС, обусловленное добавлением 1 г плутония на поверхность ее внутренней полости*, Δ_m	–0,106
Возмущение реактивности РС, обусловленное смыканием нижнего и верхнего блоков на 1 мм, Δ_b	–1,407
Возмущение реактивности РС, обусловленное стенами помещения, в котором расположен стенд установки, $\Delta_{ст}$	0,1
Возмущение реактивности РС, обусловленное приведением температуры сборки к 20 °С, Δ_T	–0,1

* Значение Δ_m определялось экспериментально как среднее значение удельного (на 1 г плутония) возмущения реактивности РС при добавлении полусферы из плутония радиусом от 1,0 см до 1,4 см на внутреннюю поверхность полости в АЗ и при удалении этой полусферы.

Таблица 6

Размеры, масса и состав критической сборки ($k_{эф} = 1$) с АЗ из ^{239}Pu (98 %) и отражателем из свинца

Размер слоя, см		Масса, г	Атомная плотность, атом/(б·см)		
r_1	r_2		^{239}Pu	^{240}Pu	^{59}Ni
1,00	1,40	50,3	3,527E-002	6,442E-004	6,6481E-003
1,40	3,15	1829	3,658E-002	6,672E-004	4,2293E-003
3,15	4,02	2153,2	3,658E-002	6,688E-004	4,5506E-003
4,02	4,66	2315,1	3,651E-002	6,674E-004	4,8299E-003
4,66	5,35	3316	3,658E-002	6,688E-004	4,4937E-003
5,35	6,00	4004,4	3,647E-002	6,667E-004	4,5554E-003
			Pb		Fe
6,00	9,15	25962	3,2744E-002		1,8347E-005

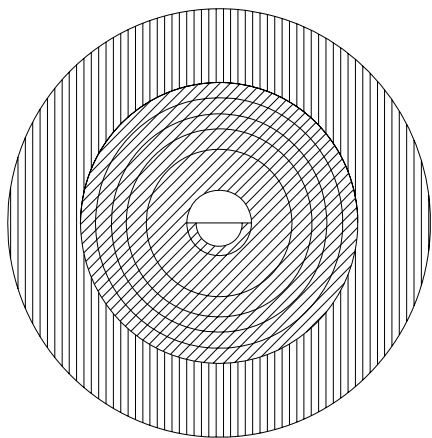


Рис. 4. Геометрия критической модели сборки с АЗ из ^{239}Pu (98 %) и отражателем из свинца:

▨ – ^{239}Pu (98 %); ▤ – Pb; □ – воздух

4. Сборка с отражателем из вольфрама

4.1. Описание стендовой сборки

Стендовая сборка имела примерно сферическую форму с воздушной полостью в центре. Она содержала АЗ из металлического плутония и отражатель из вольфрама. Детали АЗ и отражателя имели полусферическую форму. Характеристики деталей, входящих в состав стендовой сборки (размеры, нуклидный состав и др.), приведены в табл. 7.

Сборка на критическом стенде была смонтирована в виде двух блоков (см. рис. 1). Верхний

блок, составленный из полусферических деталей, лежал на стальной диафрагме толщиной 1,5 мм. Остальные детали входили в нижний (подвижный по вертикали) блок.

4.2. Результаты измерений на стендовой сборке

В соответствии с вышеизложенным алгоритмом для размножающей сборки с активной зоной из плутония и отражателем из вольфрама были определены значения всех параметров, необходимых для формирования тестовой критической модели. Эти данные представлены в табл. 8.

4.3. Критическая модель упрощенной экспериментальной сборки

Используя результаты измерений, приведенные в табл. 8, можно определить реактивность упрощенной экспериментальной сборки (без опор, при сомкнутых без диафрагмы блоках, при отсутствии стен помещения, при температуре АЗ 20 °С):

$$\Delta_{\text{сф}} = \Delta_0 + \Delta_{\text{оп}} + 1,5\Delta_h + \Delta_{\text{ст}} + \Delta_{\text{т}} = -3,032.$$

Упрощенная модель РС не является критической. Для условного вывода ее в нижнее критическое состояние необходимо убрать из активной зоны некоторое количество плутония. В настоящей работе в целях упрощения расчетной критической модели плутоний массой 73 г удалялся из плутониевого сферического слоя с радиусами от 5,35 см до 6 см.

Таблица 7

Размеры и масса стендовой РС с АЗ из ^{239}Pu (98 %) и отражателем из вольфрама

Полусфера, №	Радиус, см			Масса полусферы, г
	осевой полости	внутренний	внешний	
Нижний блок РС				
Отражатель				
1	–	6,000	9,150	21160
Активная зона из ^{239}Pu (δ , 98 %)				
2	–	5,350	6,000	2003,5
3	–	4,660	5,350	1658,1
4	–	4,020	4,660	1158,9
5	1,10	3,150	4,020	1024,7
6	–	1,400	3,150	912,4
7	1,10	3,150	4,020	1023,7
8	–	4,020	4,660	1156,2
9	–	4,660	5,350	1658,0
10	–	5,350	6,000	2001,0
Верхний блок РС				
Отражатель				
11	1,10	6,000	9,150	20627

Значения параметров, необходимых для формирования тестовой критической модели

Параметр	Δ
Реактивность реальной экспериментальной РС, Δ_0	0
Возмущение реактивности РС, обусловленное опорами для ее блоков на стенде, $\Delta_{оп}$	2,443
Возмущение реактивности РС, обусловленное добавлением 1 г плутония в слой с радиусами от 5,35 см до 6 см*, Δ_m	-0,115
Возмущение реактивности РС, обусловленное смыканием нижнего и верхнего блоков на 1 мм, Δ_h	-3,65
Возмущение реактивности РС, обусловленное стенами помещения в котором расположен стенд установки, $\Delta_{ст}$	0,1
Возмущение реактивности РС, обусловленное приведением температуры сборки к 20°C, Δ_T	-0,1

* Значение Δ_m определялось экспериментально как значение удельного (на 1 г плутония) возмущения реактивности РС при добавлении полюсной пробки ($m = 38,1$ г) в полюсное отверстие полусферы из плутония с радиусами от 5,35 см до 6,00 см.

Таблица 9

Размеры, масса и состав критической сборки ($k_{эф} = 1$) с АЗ из ^{239}Pu (98 %) и отражателем из вольфрама

Размер слоя, см		Масса, г	Атомная плотность, атом/(б·см)		
r_1	r_2		^{239}Pu	^{240}Pu	^{59}Ni
1,40	3,15	916,5	3,6891E-002	6,73E-004	4,305E-003
3,15	4,02	2048,4	3,4798E-002	6,36E-004	4,326E-003
4,02	4,66	2315,1	3,6512E-002	6,67E-004	4,8298E-003
4,66	5,35	3316	3,6576E-002	6,69E-004	4,4936E-003
5,35	6,00	3931,4	3,5876E-002	6,56E-004	4,178E-003
			W	Ni	Fe
6,00	9,15	41787	5,788E-002	3,258E-003	1,463E-003

4.4. Характеристики критической модели

Характеристики активной зоны и отражателя критической модели приведены на рис. 5 и в табл. 9. Полусферы с незаполненными полюсными отверстиями в стендовой сборке при переходе к критической модели были представлены как сплошные, с соответствующим уменьшением атомной плотности.

5. Расчетные исследования

Расчеты проводились методом Монте-Карло с помощью пакета программ С-007 [5]. В этих программах заложены решения системы связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов. Для расчета параметров критическихборок или для задач, связанных с ядерной безопасностью, программы предоставляют широкие возможности детального опи-

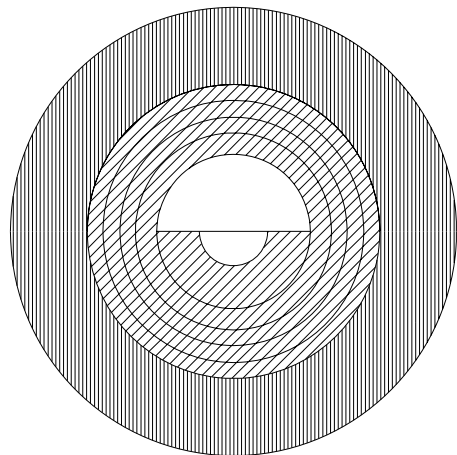


Рис. 5. Геометрия критической модели сборки с АЗ из ^{239}Pu (98 %) и отражателем из вольфрама:

▨ – ^{239}Pu (98 %); ▤ – W; □ – воздух

сания сложной геометрии систем. Программы позволяют использовать различные системы данных о сечениях реакций взаимодействия частиц с веществ-

Расчетные данные для КС с АЗ из ^{239}Pu (98 %) с отражателем из дюралюминия и свинца

Библиотека	^{239}Pu (98 %) + Al		^{239}Pu (98 %) + Pb		^{239}Pu (98 %) + W
	Геометрия из справочника [2]	Настоящая работа	Геометрия из справочника [3]	Настоящая работа	
БАС-78	0,9944	1,0000	0,9981	0,9956	0,9896
ENDF/B-7	0,9927	0,9983	0,9970	0,9953	1,0018
JEF-3	0,9817	0,9873	1,0050	1,0024	0,9941
JENDL 3.3	0,9873	0,9927	1,0046	0,9995	0,9908
CENDL-2	0,9919	0,9975	1,0022	1,0014	0,9924

вом, 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, JEF-3, JENDL 3.3, CENDL-2.

Полученные расчетные данные $k_{\text{эф}}$ для исследуемых в данной работе критических сборок (КС) представлены в табл. 10. Для сравнения в этой же таблице помещены расчетные данные для аналогичныхборок, изученных ранее во ВНИИЭФ, с отражателем из дюралюминия и свинца, в геометрии, представленной в справочнике [1].

Анализируя расчетные данные табл. 10, можно отметить в целом улучшение описания критической модели экспериментально изученной сборки с отражателем из дюралюминия. В прежних данных был выполнен некорректный учет возмущения реактивности исследуемой РС делящимся материалом на поверхности ее внутренней полости. Для сборки с отражателем из свинца критические параметры практически совпадают с полученными ранее данными, что отражается на согласованности расчетных и экспериментальных значений $k_{\text{эф}}$. Для сборки с отражателем из вольфрама наиболее удовлетворительное описание достигается с помощью нейтронно-физических данных библиотеки ENDF/B-7.

Заключение

1. Проведены экспериментальные и расчетные исследования размножающих характеристик трех сферическихборок, содержащих металлический плутоний в δ -фазе в активной зоне и отражатели из дюралюминия, свинца и вольфрама. Полу-

чены экспериментальные материальные параметры дляборок, находящихся в критическом состоянии с учетом запаздывающих нейтронов ($k_{\text{эф}} = 1$), и расчетные значения эффективного коэффициента размножения нейтронов для каждой из этихборок.

2. Для сборки с отражателем из дюралюминия экспериментальные критические параметры уточнены по сравнению с нашими данными, полученными ранее [1]. Для сборки с отражателем из свинца критические параметры практически совпадают с полученными нами данными [1]. Критические параметры для сборки с отражателем из вольфрама публикуются нами впервые.

3. Точность измерения $k_{\text{эф}}$ удовлетворяет требованиям, предъявляемым к тестовым (benchmark) данным.

4. Наилучшее согласие между экспериментальными и расчетными значениями $k_{\text{эф}}$ дляборок с отражателями из дюралюминия и свинца получено при использовании в расчетах ядерных данных библиотек JENDL 3.3 и CENDL-2. Для сборки с отражателем из вольфрама наиболее удовлетворительное описание достигается с помощью нейтронно-физических данных библиотеки ENDF/B-7.

Список литературы

1. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Cooperation and Development, NEA/NSC/DOC(95).

2. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Cooperation and Development, NEA/NSC/DOC(95). Volume I. PUMET-FAST-039. Evaluators (VNIIEF) M. V. Gorbatenko, V. P. Gorelov, V. P. Yegorov, V. G. Zagrafov, V. I. Plyin, M. I. Kuvshinov, V. I. Yuferev.

3. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Cooperation and Development, NEA/NSC/DOC(95). Volume I. PUMET-FAST-035. Evaluators (VNIIEF) M. V. Gorbatenko, V. P. Gorelov, V. P. Yegorov, V. G. Zagrafov, V. I. Ilyin, M. I. Kuvshinov, V. I. Yuferev.

4. Кувшинов М. И., Воронцов С. В., Горелов В. П. Тестовые критические эксперименты на установке ФКБН-2М // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2000. Вып. 2/3. С. 142–154.

5. 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 // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2011. Вып. 1. С. 17–24.

Контактная информация –

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

Статья поступила в редакцию 17.06.2013.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2013, вып. 3, с. 83–93.