

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕСТОВЫХ (BENCHMARK) СФЕРИЧЕСКИХ КРИТИЧЕСКИХ СБОРОК С АКТИВНОЙ ЗОНОЙ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПЛУТОНИЯ ( $^{239}\text{Pu}$ (98 %)) В $\delta$ -ФАЗЕ И СОСТАВНЫМ ОТРАЖАТЕЛЕМ, СОДЕРЖАЩИМ СЛОИ ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНА И СТАЛИ

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

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

Представлены результаты анализа выполненных ранее в РФЯЦ-ВНИИЭФ на установке ФКБН критических экспериментов на сборках с активной зоной (АЗ) из металлического  $^{239}\text{Pu}$  ( $\approx 98\%$ ) в  $\delta$ -фазе и составным отражателем, содержащим слои из полиэтилена и стали. Эти эксперименты были проведены М. И. Кувшиновым, А. А. Малинкиным и В. П. Егоровым в РФЯЦ-ВНИИЭФ на установке ФКБН в 1963 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 (BAS-78, ENDF/B-7.1, JENDL-4, JEF-3, CENDL-2). 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, полиэтилен, тестовые параметры, реактивность, эффективный коэффициент размножения, метод Монте-Карло, библиотеки ядерных данных.

**EXPERIMENTAL AND CALCULATION PARAMETERS OF BENCHMARK SPHERICAL ASSEMBLIES WITH A CORE OF METALLIC PLUTONIUM ( $^{239}\text{Pu}$  (98 %)) IN  $\delta$ -PHASE AND COMPOUND REFLECTOR CONTAINING LAYERS OF POLYETHYLENE AND STEEL / 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 at FKBN facility. These assemblies possess a core made of plutonium ( $^{239}\text{Pu}$  ( $\approx 98\%$ )) in  $\delta$ -phase and a compound reflector containing layers of polyethylene and steel. Critical ( $k_{\text{ef}} = 1 \pm 0.0016$ ) parameters for the core and reflector are determined. Experimental values of  $k_{\text{ef}}$  are compared to the calculated ones, obtained by Monte-Carlo method using different nuclear data libraries (BAS-78, ENDF/B-7.1, JENDL-4, JEF-3, CENDL-2). Critical assemblies can be recommended as benchmark ones to be incorporated into the International reference book on Nuclear safety.

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

### Введение

Целью работы является формирование тестовых (benchmark) критическихборок на основе результатов критмассовых экспериментов, выполненных М. И. Кувшиновым, А. А. Малинкиным и В. П. Егоровым в 1963 г. в РФЯЦ-ВНИИЭФ на установке ФКБН, и современных методов расчета. Актуальность работы определяется следующим. При работах с делящимися материалами часто используются устройства, содержащие в своей кон-

струкции чередующиеся слои (полиэтилен + сталь). Для обеспечения ядерной безопасности таких работ необходимо знать критические параметры «слоистых»борок. С этой целью во ВНИИЭФ проводились критические эксперименты на сферическихбороках, содержащих в АЗ металлический  $^{239}\text{Pu}$  (98 %) в  $\delta$ -фазе и отражатели в виде слоев из  $(\text{CH}_2)_n + \text{Fe}$  («слоистые» отражатели). При этом были изучены размножающие характеристики «слоистых»борок с различной толщиной слоя из полиэтилена.

В настоящее время представляется целесообразным на основании полученных ранее экспериментальных данных провести (на современном научно-техническом уровне) расчетно-аналитическую работу по формированию тестовых (benchmark) критических «слоистых» сборок. Результаты этой работы могут быть использованы для проверки и верификации ядерных констант конструкционных материалов, применяемых при расчете различных технических конструкций (ядерных реакторов, технологического оборудования при работах с плутонием и др.). Наиболее систематизированными являются benchmark данные о критических экспериментах в международном справочнике ICSBER (International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiment) [1]. 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 критических сборок с активной зоной из металлического плутония ( $^{239}\text{Pu}$  (98 %)) в  $\delta$ -фазе и отражателями в виде чередующихся слоев из  $(\text{CH}_2)_n + \text{Fe}$  («слоистые» отражатели).

Кроме того, для указанных сборок были проведены расчеты значений  $k_{эф}$  с использованием метода Монте-Карло и нескольких библиотек ядерных данных. Результаты расчетов также представлены в статье.

Изложение материала, в основном, соответствует формату справочника [1], использованному нами ранее в работе [2]. Однако с целью уменьшения объема описание некоторых методик измерений, а также конструкций экспериментального оборудования, сокращено. В ряде случаев они представлены лишь ссылками на предшествующие разделы или более ранние наши публикации [2–4].

Для каждой сборки результат исследований представлен в двух разделах. В первом разделе описана методика экспериментов, приведены результаты измерений подкритичности различных вариантов размножающих нейтроны сборок, и на

основании полученных данных сформированы критические ( $k_{эф} = 1$ ) модели экспериментальных сборок.

Во втором разделе приводятся результаты расчета  $k_{эф}$  для критических моделей сборок. Расчеты были выполнены методом Монте-Карло. При этом использовались данные различных библиотек ядерных констант (BAS-78, ENDF/B-7.1, JENDL-4, JEF-3, CENDL-2) и физические характеристики материалов, входящих в состав изучаемых сборок, заимствованные из международного справочника [1].

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

## 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 размножающей системы (РС), служат реактивность ( $\rho$ ) 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 [2, 3]. Рассматриваются экспериментальные стендовые сборки, близкие к критическим, на предмет полноты сведений об используемых в них материалах, методиках измерений, результатах 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. Методика расчетных исследований

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 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 (BAS-78, ENDF/B-7.1, JENDL-4, JEF-3, CENDL-2).

## 3. Сборка, содержащая слои из полиэтилена толщиной 3,75 см и стали (сборка № 1)

### 3.1. Описание стеновой сборки № 1

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

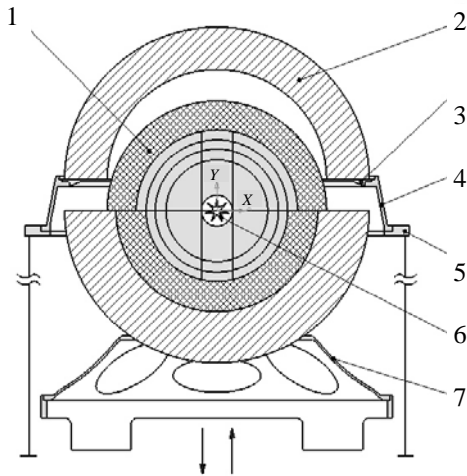





Рис. 1. Схематический вид размножающей сборки № 1 на стенде ФКБН: 1 – нижний (подвижный) блок сборки; 2 – верхний (неподвижный) блок; 3 – стальная диафрагма; 4, 5 – опоры для верхнего блока; 6 – источник нейтронов; 7 – опора для нижнего блока;  – Pu;  –  $(CH_2)_n$ ;  – Fe

На критическом стенде ФКБН размножающая сборка смонтирована в виде двух блоков, верхнего и нижнего. Верхний (неподвижный) блок сборки имеет форму полусферы и содержит только отражатель из стали. Он лежит на стальной диафрагме толщиной 1 см. Все остальные детали стеновой сборки, включая АЗ, входят в нижний блок сборки, который имеет возможность перемещаться в вертикальном направлении до упора в диафрагму. Сближение нижнего и верхнего блоков стеновой сборки увеличивает значение коэффициента умножения нейтронов. Внешний отражатель нижнего блока из стали также имеет полусферическую форму. Его внутренний радиус вплотную прилегает к нижней полусфере из полиэтилена. В сомкнутом состоянии блоков стеновая сборка имеет форму, близкую к сферической.

Активная зона из плутония составлена из полусферических деталей. Важно отметить, что полусферы из плутония имеют полюсные отверстия, которые могут закрываться пробками из того же материала. Путем удаления или добавления пробок в плутониевые полусферы изменялась реактивность сборки при подборе ее критической конфигурации. Для этой же цели использовались полусферические детали из  $^{239}\text{Pu}$  (98 %) в  $\delta$ -фазе диаметром 20–28 мм.

Отражатель из полиэтилена состоит из двух полусфер (нижней и верхней), вплотную прилегающих к деталям из плутония. Отметим, что для сборки № 1 внутренний и внешний радиусы этих полусфер имеют различные значения. Однако их толщины близки друг к другу. Внешний отражатель нижнего блока из стали также имеет полусферическую форму. Его внутренний радиус вплотную прилегает к нижней полусфере из полиэтилена. В сомкнутом состоянии блоков стеновая сборка имеет внешнюю форму, близкую к сферической. Важно отметить, что внутренняя структура стеновой сборки не является сферически симметричной. Она обладает только осевой симметрией. Это обстоятельство приводит к необходимости использовать двумерные программы расчета  $k_{эф}$ .

Материальные характеристики стеновой размножающей сборки № 1, наиболее близкой к критическому состоянию, представлены в табл. 1.

В наших расчетных оценках  $k_{эф}$ , представленных в работе [1] (для стали – Pu MET-FAST-026, для полиэтилена – Pu MET-FAST-024), было установлено, что указанные количества примесей в стали и полиэтилене не приводят к значимому изменению значения  $k_{эф}$  ( $\delta k_{эф} \approx 10^{-5}$ ). Поэтому в настоящей работе влияние примесей в материа-

лах отражателя на критичность сборки не учитывались (ввиду их малого значения).

Таблица 1

*Размеры и массы сферической (составленной из полусферических деталей и полюсных пробок) РС с АЗ из  $^{239}\text{Pu}$  (98 %) и слоистым отражателем, содержащим полиэтилен + сталь (стендовая сборка № 1)*

| Радиус полусферы, см                                  |            | Масса полусферы (с пробкой), г* |
|---|------------|---------------------------------|
| внешний   | внутренний |                                 |
| Нижний блок КС  |            |                                 |
| Отражатель из стали                                   |            |                                 |
| 25,0  | 8,35       | 258736,2                        |
| Отражатель из полиэтилена                             |            |                                 |
| 8,35  | 4,66       | 916,3                           |
| 4,660   | 4,020      | 1156,225                        |
| 4,020   | 3,150      | 1075,848                        |
| 3,150   | 1,40       | 912,432                         |
| Верхний блок КС                                       |            |                                 |
| Активная зона из $^{239}\text{Pu}$ ( $\delta$ , 98 %) |            |                                 |
| 1,4   | 3,150      | 913,912                         |
| 3,150   | 4,020      | 1077,39                         |
| 4,020   | 4,660      | 1158,586                        |
| 4,660   | 5,350      | 1658,250                        |
| Отражатель из полиэтилена                             |            |                                 |
| 5,35  | 9,15       | 1168                            |
| Отражатель из стали                                   |            |                                 |
| 9,15  | 25,0       | 233271                          |

\* Сталь содержит примеси (массовая доля, %): С 0,3; Mn 0,4; Si 0,1; Cr 0,3; Cu 0,3. Полиэтилен содержит примеси (массовая доля, %): Si 0,002; Fe 0,002; Cl 0,003; В  $10^{11}$ ; Cd  $10^{-12}$ .

### 3.2. Процедура критмассовых измерений

Штатная процедура критмассовых измерений на установке ФКБН заключается в следующем [2]. 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 стендовой размножающей системой (РС).

Для подобранной стендовой РС тщательно измеряется штатными «всеволновыми» детекторами скорость счета нейтронов от сборки с  $^{252}\text{Cf}$  (или иным) источником нейтронов в центральной

полости РС ( $N$ ) и без него ( $N_{\Phi}$ ). 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 нейтронов от  $^{252}\text{Cf}$  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.

С целью обеспечения возможности наиболее точного определения материальных характеристик стендовой сборки (геометрии и состава деталей), соответствующих ее критическому состоянию, в эксперименте измерялось:

- возмущение подкритичности РС, обусловленное удалением диафрагмы и последующим приближением ее нижнего блока к верхнему до их смыкания,  $\delta\Delta_h$ ;

- возмущение подкритичности РС, обусловленное добавлением 1 г плутония в центральную полость АЗ,  $\delta\Delta_m$ ;

С помощью расчетов оценивались также возмущения подкритичности ( $\delta\Delta$ ) РС, обусловленные:

- опорами для ее блоков РС на стенде (при их удалении),  $\delta\Delta_{оп}$ ;

- приведением температуры сборки к  $20^\circ\text{C}$  ( $\delta\Delta_T$ );

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

### 3.3. 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. 2. Эти данные необходимы для формирования критической модели упрощенной экспериментальной сборки (см. раздел 3.4).

### 3.4. Формирование упрощенной критической модели экспериментальной сборки № 1

На основании данных, приведенных в табл. 2, была сформирована стендовая модель экспериментальной сборки со сферической внешней по-

верхностью, 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. 2.

Т а б л и ц а 2

*Результаты измерений и расчётных 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 10 мм нижнем и верхнем блоках, $\Delta_{ст}$                                   | $7,51 \pm 0,05$                                |
| 2. Возмущение подкритичности РС, обусловленное удалением диафрагмы и последующим приближением ее нижнего блока к верхнему до их смыкания, $\delta\Delta_h$ | $-0,36 \pm 0,03$                               |
| 3. Возмущение подкритичности РС, обусловленное добавлением 1 г плутония в центральную полость АЗ, $\delta\Delta_m$   | $-0,100 \text{ ш.ед./1г} \pm 0,002$            |
| 4. Возмущение подкритичности РС, обусловленное опорами для ее блоков на стенде (при их удалении), $\delta\Delta_{оп}$                                      | $0,30 \pm 0,02$                                |
| 5. Возмущение подкритичности РС, обусловленное стенами помещения, в котором расположен стенд установки (при их удалении), $\delta\Delta_{от}$              | $0,1 \pm 0,05$                                 |
| 6. Возмущение подкритичности РС, обусловленное приведением температуры сборки к 20 °С, $\delta\Delta_T$  | $-0,1 \pm 0,05$                                |
| 7. Суммарное значение подкритичности сферической модели стендовой сборки, $\Delta_m$   | $7,45 \pm 0,05$                                |

\* Значения  $\Delta$  и  $\delta\Delta$  для параметров 1–3 таблицы измерялись в эксперименте, значения  $\delta\Delta$  для параметров 4–6 оценивались расчетным путем. При этом соотношение между  $\delta k_{эф}$  и  $\delta\Delta_m$  определялось путем сравнения экспериментального ( $\delta\Delta_m$ ) и расчетного ( $\delta k_{эф}$ ) значений возмущения базовой стендовой сборки, обусловленного добавлением 1 г плутония в центральную полость АЗ,  $\delta\Delta_m$ .

Значение подкритичности сферической модели стендовой сборки № 1 (отклонение стендовой модели от критического по запаздывающим ней-

тронам состояния)  $\Delta_m$  определялось по соотношению

$$\Delta_m = \Delta_{ст} + \Delta_{оп} + \Delta_h + \Delta_{от} + \Delta_T = 7,51 + 0,30 - 0,35 + 0,1 - 0,1 = 7,45. \quad (2)$$

Стендовая модель оказалась подкритической ( $\Delta_m = 7,45$ ).

Из данных табл. 2 следует, что для достижения критичности в центральную полость АЗ стендовой сборки надо добавить массу Pu ( $\delta$ , 98 %), равную  $M = \Delta_m / \delta\Delta_m = 7,45 / 0,100 = 74,5$  г. При формировании расчетной критической модели сборки № 1 это было учтено путем соответствующего уменьшения радиуса воздушной полости в центре АЗ. Внутренний радиус АЗ критической сборки № 1 был принят равным 1,14 см. Таким способом была сформирована упрощенная сферическая критическая ( $k_{эф} = 1$ ) модель экспериментальной сборки № 1. Особо отметим, что при формировании этой модели характеристики отражателя (размеры, масса и нуклидный состав) не изменялись. Их значения соответствовали данным, приведенным в табл. 1. Важно отметить, что при формировании критической модели сборки № 1 была незначительно (0,93 %) изменена только масса Pu ( $\delta$ , 98 %) в АЗ. Характеристики (размеры, масса и нуклидный состав) сферических слоев из  $^{239}\text{Pu}$  (98 %) в критической модели сборки № 1 приведены в табл. 3. Схематическое изображение критической ( $k_{эф} = 1$ ) модели сборки № 1 представлено на рис. 2.

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

Представленные в табл. 1 и 3 материальные параметры сборки № 1 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

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

где  $(\delta k / k)_{экс}$  – относительная погрешность, обусловленная ошибкой определения значения под-

Размеры, масса и нуклидный состав сферических слоев из  $^{239}\text{Pu}$  (98 %) в критической модели сборки № 1

| Размер слоя, см |       | Форма слоя | Масса слоя, г | Состав слоя, (массовая доля, %) |                   |                   |                 |                  |
|-----------------|-------|------------|---------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|------------------|
| $r_1$           | $r_2$ |            |               | $^{239}\text{Pu}$               | $^{240}\text{Pu}$ | $^{241}\text{Pu}$ | $^{12}\text{C}$ | $^{59}\text{Ni}$ |
| 1,14            | 3,15  | сфера      | 1900,844      | 95,42                           | 1,75              | 1,76              | 0,04            | 1,03             |
| 3,15            | 4,02  | сфера      | 2153,238      | 95,19                           | 1,75              | 1,77              | 0,04            | 1,25             |
| 4,02            | 4,66  | сфера      | 2314,811      | 94,98                           | 1,74              | 1,75              | 0,03            | 1,50             |
| 4,66            | 5,35  | полусфера  | 1658,250      | 95,22                           | 1,75              | 1,78              | 0,04            | 1,21             |

Таблица 4

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

| Библиотека | BAS-78 | ENDF/B71 | JENDL-4 | JEF-3  | CENDL2 |
|------------|--------|----------|---------|--------|--------|
| $k_{эф}$   | 0,9942 | 1,0083   | 1,0066  | 1,0049 | 1,0114 |

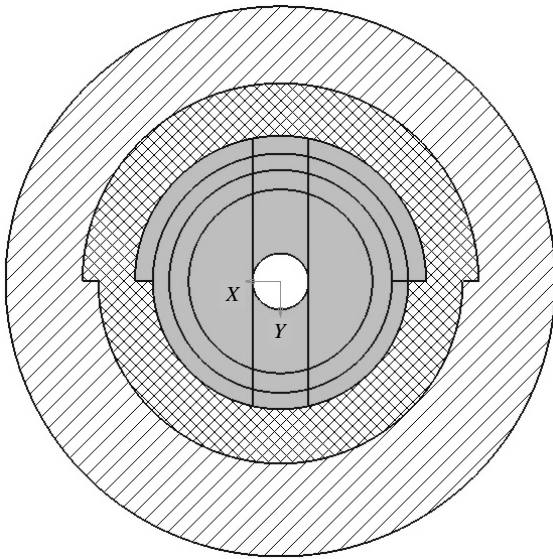


Рис. 2. Схематическое изображение критической модели сборки № 1:  — Pu;  —  $(\text{CH}_2)_n$ ;  — Fe

критичности РС (а также процедурой приведения результатов измерений к условиям критической сферической модели);  $(\delta k/k)_M$ ,  $(\delta k/k)_R$ ,  $(\delta k/k)_\alpha$ ,  $(\delta k/k)_\beta$  — 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. Численное значение погрешности  $\Delta k_{эф} = \pm 0,0016$  принималось таким же, как

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

### 3.6. Результаты расчетов

Результаты расчетов значения  $k_{эф}$  для сборки № 1, выполненных согласно разделу 2, приведены в табл. 4. Из нее следует, что наилучшее согласие расчетных значений  $k_{эф}$  с экспериментом достигается при использовании первой и четвертой библиотек ядерных данных.

## 4. Сборка с составным отражателем, содержащая слои из полиэтилена толщиной 1,37 см и стали (сборка № 2)

### 4.1. Описание стендовой сборки № 2

Стендовая сборка № 2 по конструкции, используемым деталям в АЗ и отражателе размещением на критическом стенде ФКБН мало отличается от стендовой сборки № 1, рассмотренной в разделе 2. Важнейшим различием между ними является тот факт, что толщина слоя отражателя из полиэтилена в сборке № 2 в 2,7 раза меньше,

чем в сборке № 1. Важно отметить, что толщина слоя из полиэтилена в «слоистом» отражателе существенно влияет на критичность размножающих нейтроны сборок. Задачей настоящих экспериментов является определение характера этой зависимости.

Материальные характеристики стендовой подкритической сборки № 2 (размеры, массы, плотности слоев) приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

*Размеры и массы слоев стендовой подкритической сборки № 2 (составленной из полусферических деталей и полюсных пробок) с АЗ из  $^{239}\text{Pu}$  ( $\delta$ , 98 %) и составным отражателем, содержащим полиэтилен + сталь*

| Радиус полусферы, см                                  |            | Масса полусферы (с пробкой), г |
|---|------------|--------------------------------|
| Внешний   | Внутренний |                                |
| Нижний блок КС  |            |                                |
| Отражатель из стали                                   |            |                                |
| 25,0  | 6,0        | 241921,5                       |
| Отражатель из полиэтилена                             |            |                                |
| 6,0   | 4,66       | 192,3                          |
| Активная зона из $^{239}\text{Pu}$ ( $\delta$ , 98 %) |            |                                |
| 4,660   | 4,020      | 1156,225                       |
| 4,020   | 3,150      | 1075,848                       |
| 3,150   | 1,12       | 955,332                        |
| Верхний блок КС                                       |            |                                |
| Активная зона из $^{239}\text{Pu}$ ( $\delta$ , 98 %) |            |                                |
| 1,12  | 3,150      | 955,332                        |
| 3,150   | 4,020      | 1077,39                        |
| 4,020   | 4,660      | 1158,586                       |
| 4,660   | 5,350      | 1658,250                       |
| Отражатель из полиэтилена                             |            |                                |
| 5,35  | 6,750      | 293,4                          |
| Отражатель из стали                                   |            |                                |
| 6,75  | 25,0       | 240484                         |

## 4.2. Процедуры критмассовых измерений

Процедуры критмассовых измерений на сборке № 2 практически не отличались от таковых для сборки № 1, рассмотренных в разделе 3.2.

## 4.3. Результаты измерений подкритичности стендовой сборки № 2 и оценка ее возмущений образцами из делящегося материала и экспериментальным оборудованием

Результаты измерений подкритичности стендовой сборки № 2, а также оценка ее возмущений

образцами из делящегося материала и экспериментальным оборудованием представлены в табл. 6. На основании этих данных 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  $\Delta_{ст}$  для реальной стендовой сборки. Эти поправки приведены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

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

| Параметр *  | Значения подкритичности и ее возмущения, ш.ед. |
|---|--|
| 1. Подкритичность стендовой РС при сомкнутых (без диафрагмы) нижнем и верхнем блоках, $\Delta_{ст}$   | 9,05   |
| 2. Возмущение подкритичности РС, обусловленное добавлением 1 г плутония в центральную полость АЗ, $\delta\Delta_m$                            | -0,109 ш.ед./1г                                |
| 3. Возмущение подкритичности РС, обусловленное опорами для ее блоков на стенде (при их удалении), $\delta\Delta_{оп}$                         | 0,30 ± 0,02                                    |
| 4. Возмущение подкритичности РС, обусловленное стенами помещения, в котором расположен стенд установки (при их удалении), $\delta\Delta_{от}$ | 0,1 ± 0,05                                     |
| 5. Возмущение подкритичности РС, обусловленное приведением температуры сборки к 20 °С, $\delta\Delta_T$                                       | -0,1 ± 0,05                                    |
| 6. Суммарное значение подкритичности сферической модели стендовой сборки, $\Delta_m$  | 9,35 ± 0,05                                    |

\* Значения  $\Delta$  и  $\delta\Delta$  для параметров 1–3 таблицы измерялись в эксперименте, значения  $\delta\Delta$  для параметров 4 и 5 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 добавлением 1 г плутония в центральную полость АЗ,  $\delta\Delta_m$ .

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

$$\Delta_m = \Delta_{ст} + \Delta_{оп} + \delta\Delta_{от} + \delta\Delta_T = 9,05 + 0,30 + 0,1 - 0,1 = 9,35 \text{ ш.ед.} \quad (4)$$

Стендовая модель оказалась подкритической ( $\Delta_m = 9,35$  ш.ед.).

Из данных табл. 6 следует, что для достижения критичности в центральную полость АЗ стендовой сборки надо добавить массу Pu ( $\delta$ , 98 %), равную

$$M = \Delta_m / \delta\Delta_m = 9,35 / 0,109 = 85,78 \text{ г.}$$

При формировании расчетной критической модели сборки № 2 это было учтено путем соответствующего уменьшения радиуса воздушной полости в центре АЗ. Внутренний радиус АЗ критической сборки № 2 был принят равным 1,12 см. Таким способом была сформирована упрощенная сферическая критическая ( $k_{эф} = 1$ ) модель экспериментальной сборки.

Характеристики АЗ (размеры, масса и нуклидный состав) для критической модели сборки № 2 приведены в табл. 7. Отметим, что при формировании критической модели сборки № 2 характеристики отражателя (размеры, масса и нуклидный состав) не изменялись. Их значения соответствовали данным, приведенным в табл. 5. Схематическое изображение критической модели сборки № 2 аналогично представленной на рис. 2 модели для сборки № 1.

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

Представленные в табл. 5 и 7 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 [1]. Правомерность такого решения была обоснована в разделе 3.5.

## 4.5. Результаты расчетов

Результаты расчетов значения  $k_{эф}$  для сборки № 2, выполненных согласно разделу 2, приведены в табл. 8. Из нее следует, что наилучшее согласие расчетных значений  $k_{эф}$  с экспериментом достигается при использовании первой и четвертой библиотек ядерных данных.

## 5. Сборка, содержащая слои из полиэтилена толщиной 0,65 см и стали (сборка № 3)

### 5.1. Описание стендовой сборки № 3

Сборка № 3 по конструкции и составу входящих в нее материалов близка к рассмотренным выше сборкам № 1 и № 2. Главное различие между ними состоит в том, что толщина слоя из полиэтилена в сборке № 3 в 5,8 и 2,1 раза меньше, чем в сборках № 1 и № 2, соответственно. Этот факт может привести к изменению критической массы плутония в сборке. Задача исследований состоит в определении этого эффекта в зависимости от толщины слоя из полиэтилена в сборке. Схематический вид сборки № 3 на критическом стенде ФКБН представлен на рис. 3.

Активная зона из плутония в виде сферы составлена из полусферических деталей. Важно отметить, что полусферы из плутония имеют полусферические отверстия, которые могут закрываться пробками из того же материала. Путем удаления или добавления пробок в плутониевые полусферы

Таблица 7

*Характеристики (форма, размеры, масса и нуклидный состав) компонентов АЗ из  $^{239}\text{Pu}$  ( $\delta$ , 98 %) для критической модели сборки № 2*

| № слоя | Форма детали | $R_1$ , см | $R_2$ , см | Масса, г | Нуклидный состав детали (массовая доля, %) |                   |                  |                 |                  |
|--------|--------------|------------|------------|----------|--|-------------------|------------------|-----------------|------------------|
|        |              |            |            |          | $^{239}\text{Pu}$                          | $^{240}\text{Pu}$ | $^{70}\text{Ga}$ | $^{12}\text{C}$ | $^{59}\text{Ni}$ |
| 1      | сфера        | 1,12       | 3,15       | 1912,805 | 95,42                                      | 1,75              | 1,76             | 0,04            | 1,03             |
| 2      | сфера        | 3,15       | 4,02       | 2153,2   | 95,19                                      | 1,75              | 1,77             | 0,04            | 1,25             |
| 3      | сфера        | 4,02       | 4,66       | 2315,1   | 94,98                                      | 1,74              | 1,75             | 0,03            | 1,50             |
| 4      | полусфера    | 4,66       | 5,35       | 1658,250 | 95,22                                      | 1,75              | 1,78             | 0,04            | 1,21             |

Таблица 8

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

| Библиотека | БАС    | ENDF/B7 | JENDL-4 | JEF3   | CENDL-2 |
|------------|--------|---------|---------|--------|---------|
| $k_{эф}$   | 0,9995 | 1,0066  | 1,0048  | 1,0023 | 1,0109  |



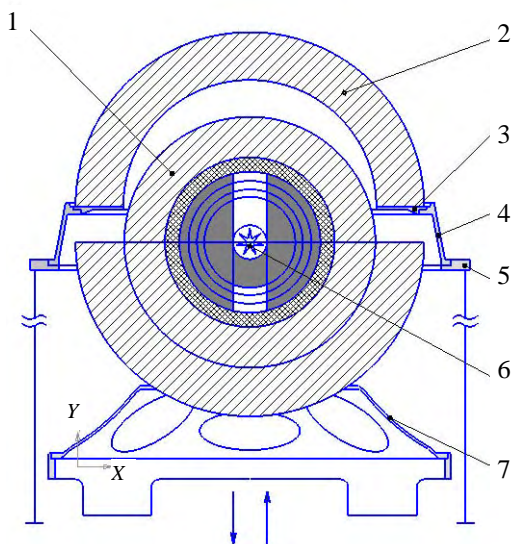





Рис. 3. Схематический вид размножающей сборки № 3 на стенде ФКБН: 1 – нижний (подвижный) блок сборки; 2 – верхний (неподвижный) блок; 3 – стальная диафрагма; 4, 5 – опоры для верхнего блока; 6 – источник нейтронов; 7 – опора для нижнего блока;  – Pu;  –  $(\text{CH}_2)_n$ ;  – Fe

изменялась реактивность сборки при подборе ее критической конфигурации. Для этой же цели использовались полусферические детали из  $^{239}\text{Pu}$  (98 %) в  $\delta$ -фазе с диаметром 20–28 мм. В критической сборке № 3 полюсная пробка из плутония вставлена только во внешний слой нижней полусферы АЗ. Отражатель из полиэтилена состоит из двух полусфер (нижней и верхней), вплотную прилегающих к деталям из плутония. Внешний отражатель нижнего блока из стали также имеет полусферическую форму. Его внутренний радиус вплотную прилегает к нижней полусфере из полиэтилена.

В сомкнутом состоянии блоков стендовая сборка имеет внешнюю форму, близкую к сферической. Однако важно отметить, что внутренняя структура стендовой сборки не является сферически симметричной. Она обладает только осевой симметрией. Это обстоятельство приводит к необходимости использовать двумерные программы расчета  $k_{эф}$ .

Материальные характеристики стендовой размножающей сборки № 3, наиболее близкой к критическому состоянию, представлены в табл. 9.

Таблица 9

Размеры и массы полусферических деталей АЗ из  $^{239}\text{Pu}$  (98 %) и составного отражателя (содержащего полиэтилен + сталь) для стендовой (подкритической) сборки № 3

| Радиус полусферы и осевой полости в ней, см           |            |                | Масса полусферы (с пробкой или без нее), г |
|---|------------|----------------|--|
| внешний   | внутренний | осевой полости |  |
| Нижний блок КС  |            |                |  |
| Отражатель из стали                                   |            |                |  |
| 25,0  | 6,0        | нет            | 241941                                     |
| Отражатель из полиэтилена                             |            |                |  |
| 6,0   | 5,35       | нет            | 119,775                                    |
| Активная зона из $^{239}\text{Pu}$ ( $\delta$ , 98 %) |            |                |  |
| 5,350   | 4,660      | 1,10           | 1617,06                                    |
| 4,660   | 4,020      | 1,10           | 1118,62                                    |
| 4,020   | 3,150      | 1,10           | 1023,70                                    |
| 3,150   | 1,4        | нет            | 915,06                                     |
| Верхний блок КС                                       |            |                |  |
| Активная зона из $^{239}\text{Pu}$ ( $\delta$ , 98 %) |            |                |  |
| 1,40  | 3,150      | 1,10           | 804,8                                      |
| 3,15  | 4,020      | 1,10           | 1024,73                                    |
| 4,02  | 4,660      | 1,10           | 1120,96                                    |
| 4,66  | 5,350      | 1,10           | 1817,32                                    |
| Отражатель из полиэтилена                             |            |                |  |
| 5,35  | 6,750      | нет            | 119,775                                    |
| Отражатель из стали                                   |            |                |  |
| 6,75  | 25,0       | нет            | 241941                                     |

## 5.2. Процедура критмассовых измерений

Процедура критмассовых измерений на сборке № 3 ничем не отличалась от процедуры, использованной при изучении характеристик сборки № 1, изложенной в разделе 3.2.

## 5.3. Результаты измерений подкритичности стендовой сборки № 3 и оценка ее возмущений образцами из делящегося материала и экспериментальным оборудованием

Результаты измерений подкритичности стендовой сборки № 3, а также оценка ее возмущений образцами из делящегося материала экспериментальным оборудованием и стенами помещения представлены в табл. 10. Эти данные необходимы для формирования критической модели упрощенной экспериментальной сборки.

## 5.4. Формирование упрощенной критической модели экспериментальной сборки № 3

На основании данных, приведенных в табл. 10, была сформулирована 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  $\Delta_{ст}$  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)  $\Delta_m$  определялось по соотношению

$$\Delta_m = \Delta_{ст} + \delta\Delta_h + \Delta_{оп} + \delta\Delta_{от} + \delta\Delta_T = 2,99 - 0,36 + 0,30 + 0,1 - 0,1 = 2,93 \text{ ш.ед.} \quad (5)$$

Стендовая модель оказалась подкритической ( $\Delta_m = 2,93$  ш.ед.). Из данных табл. 10 следует, что для достижения критичности в центральную полость АЗ стендовой сборки надо добавить массу Pu ( $\delta$ , 98 %), равную  $M = \Delta_m / \delta\Delta_m = 2,93 / 0,103 = 28,44$  г. При формировании расчетной критической модели сборки № 3 это было учтено путем добавления в центральную полость АЗ сферического слоя из Pu ( $\delta$ , 98 %), имеющего наружный радиус 1,4 см, внутренний – 1,32 см, массу – 28,44 г. Таким способом была сформирована упрощенная сферическая критическая ( $k_{эф} = 1$ ) модель экспериментальной сборки № 3. Отметим, что при

формировании критической модели сборки № 3 характеристики отражателя (размеры, масса и нуклидный состав) не изменялись. Размеры и масса деталей, входящих в состав АЗ критической модели сборки № 3, приведены в табл. 11. Нуклидный состав этих деталей представлен в табл. 12.

Схематическое изображение критической модели сборки № 3 представлено на рис. 4.

Таблица 10

*Результаты измерений и расчетных оценок параметров сборки с полиэтиленом № 3, 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 10 мм нижнем и верхнем блоках, $\Delta_{ст}$                                   | $2,99 \pm 0,05$                                |
| 2. Возмущение подкритичности РС, обусловленное удалением диафрагмы и последующим приближением ее нижнего блока к верхнему до их смыкания, $\delta\Delta_h$ | $-0,36 \pm 0,03$                               |
| 3. Возмущение подкритичности РС, обусловленное опорами для ее блоков на стенде (при их удалении), $\delta\Delta_{оп}$                                      | $0,30 \pm 0,02$                                |
| 4. Возмущение подкритичности РС, обусловленное стенами помещения, в котором расположен стенд установки (при их удалении), $\delta\Delta_{от}$              | $0,1 \pm 0,05$                                 |
| 5. Возмущение подкритичности РС, обусловленное приведением температуры сборки к 20 °С, $\delta\Delta_T$  | $-0,1 \pm 0,05$                                |
| 6. Возмущение подкритичности РС, обусловленное добавлением 1 г плутония к внутренней поверхности слоя АЗ ( $\varnothing 28-63$ ), $\delta\Delta_m$         | $-0,103 \text{ ш.ед./1г}$                      |
| 7. Суммарное значение подкритичности сферической модели стендовой сборки, $\Delta_m$   | $2,93 \pm 0,05$                                |

\* Значения  $\Delta$  и  $\delta\Delta$  для параметров 1–3 и 6 таблицы измерялись в эксперименте, значения  $\delta\Delta$  для параметров 4 и 5 оценивались расчетным путем. При этом соотношение между  $\delta k_{эф}$  и  $\delta\Delta$  определялось путем сравнения экспериментального ( $\delta\Delta_m$ ) и расчетного ( $\delta k_{эф}$ ) значений возмущения базовой стендовой сборки.

Размеры и массы деталей АЗ из  $^{239}\text{Pu}$  (98 %) для критической сборки № 3

| Радиус полусферы и осевой полости в ней, см           |            |                | Масса полусферы<br>(с пробкой или без нее), г |
|---|------------|----------------|---|
| внешний   | внутренний | осевой полости |   |
| Активная зона из $^{239}\text{Pu}$ ( $\delta$ , 98 %) |            |                |   |
| Нижний блок КС  |            |                |   |
| 5,35  | 4,66       | 1,10           | 1617,06                                       |
| 4,66  | 4,02       | 1,10           | 1118,62                                       |
| 4,02  | 3,15       | 1,10           | 1023,70                                       |
| 3,15  | 1,40       | нет            | 915,06  |
| 1,40  | 1,32       | нет            | 14,22   |
| Верхний блок КС                                       |            |                |   |
| 1,32  | 1,40       | нет            | 14,2  |
| 1,40  | 3,15       | 1,10           | 804,8   |
| 3,15  | 4,02       | 1,10           | 1024,73                                       |
| 4,02  | 4,66       | 1,10           | 1120,96                                       |
| 4,66  | 5,35       | 1,10           | 1817,32                                       |

Таблица 12

Нуклидный состав плутониевых деталей, входящих в состав критической сборки № 3

| Размер слоя, см |       | Состав слоя (массовая доля, %) |                   |                  |                 |                  |
|-----------------|-------|--------------------------------|-------------------|------------------|-----------------|------------------|
| $r_1$           | $r_2$ | $^{239}\text{Pu}$              | $^{240}\text{Pu}$ | $^{70}\text{Ga}$ | $^{12}\text{C}$ | $^{59}\text{Ni}$ |
| 1,32            | 1,40  | 95,42                          | 1,75              | 1,76             | 0,04            | 1,03             |
| 1,40            | 3,15  | 95,42                          | 1,75              | 1,76             | 0,04            | 1,03             |
| 3,15            | 4,02  | 95,19                          | 1,75              | 1,77             | 0,04            | 1,25             |
| 4,02            | 4,66  | 94,98                          | 1,74              | 1,75             | 0,03            | 1,50             |
| 4,66            | 5,35  | 95,22                          | 1,75              | 1,78             | 0,04            | 1,21             |

## 5.5. Результаты расчетов

Результаты расчетов значения  $k_{эф}$  для сборки № 3, выполненных согласно разделу 2, приведены в табл. 13. Из нее следует, что наилучшее согласие расчетных значений  $k_{эф}$  с экспериментом достигается при использовании библиотек ядерных данных JENDL-4 и JEF-3.

## 6. Зависимость $k_{эф}$ размножающихборок со «слоистым» отражателем от толщины слоя из полиэтилена

Исходя из того факта, что результаты расчета  $k_{эф}$  для всех исследованных в настоящей работе критическихборок с высокой точностью совпадают с экспериментальными данными, представляется весьма интересным с помощью расчетов

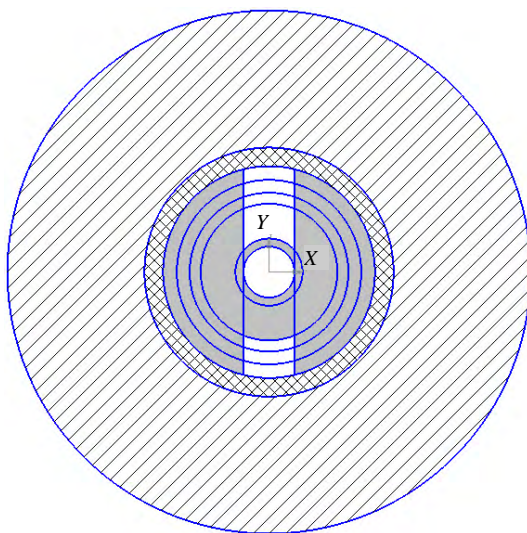


Рис. 4. Схематическое изображение критической модели сборки № 3:  – Pu;  –  $(\text{CH}_2)_n$ ;  – Fe

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

| Библиотека | BAS-78 | ENDF/B7 | JENDL-4 | JEF3   | CENDL-2 |
|------------|--------|---------|---------|--------|---------|
| $k_{эф}$   | 1,0040 | 1,0051  | 1,0029  | 1,0008 | 1,0102  |

получить зависимость  $k_{эф}$  от толщины слоя полиэтилена в слоистом отражателе. Такие расчеты были выполнены методом Монте-Карло с использованием данных библиотеки ENDF/B-7.1.

Алгоритм расчетных исследований содержал следующие этапы. Сначала был подобран близкий к критическому радиус АЗ из металлического плутония (98 %  $^{239}\text{Pu}$ ) в  $\delta$ -фазе для сборки с отражателем из  $(\text{CH}_2)_n$ , имеющим внешний радиус 25 см и вплотную прилегающим к АЗ. Затем был вычислен  $k_{эф}$  для сборки, содержащей эту АЗ и вплотную прилегающую к ней сферическую оболочку из стали с внешним радиусом 25 см. Далее вычислялся  $k_{эф}$  для ряда сборок с той же АЗ и «слоистым» отражателем из  $(\text{CH}_2)_n + \text{Fe}$ . При этом вплотную к внешней поверхности АЗ добавлялся слой из полиэтилена, толщина которого увеличивалась и, соответственно, уменьшалась толщина слоя из стали. Внешний радиус РС всегда был равен 25 см. Результаты расчетов приведены в табл. 14 и на рис. 5.

Таблица 14

Расчетные значения  $k_{эф}$  для РС с активной зоной из  $^{239}\text{Pu}$  ( $\delta$ , 98 %) и «слоистым» отражателем из  $[(\text{CH}_2)_n + \text{Fe}]$

| №  | Радиус, см | $k_{эф}$ |
|----|------------|----------|
| 1  | 4,98       | 0,9775   |
| 2  | 5,48       | 1,001    |
| 3  | 5,98       | 1,0228   |
| 4  | 6,98       | 1,0399   |
| 5  | 7,98       | 1,0378   |
| 6  | 8,48       | 1,0341   |
| 7  | 8,98       | 1,0302   |
| 8  | 9,48       | 1,0264   |
| 9  | 9,98       | 1,0229   |
| 10 | 11,98      | 1,0137   |
| 11 | 14,98      | 1,0089   |
| 12 | 19,98      | 1,0077   |
| 13 | 25         | 1,0075   |

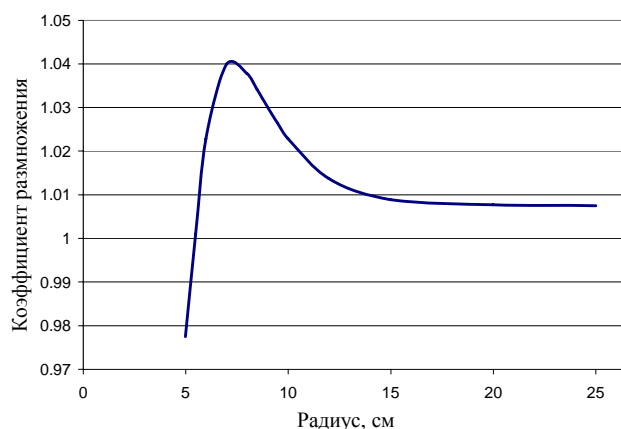


Рис. 5. Зависимость  $k_{эф}$  размножающих сборок со «слоистым» отражателем от толщины слоя из полиэтилена

Анализируя данные, представленные в табл. 14 и на рис. 5, можно отметить следующее. Значение  $k_{эф}$  для РС с отражателем из стали толщиной примерно 20 см резко возрастает (от  $k_{эф} \approx 0,977$  до  $k_{эф} \approx 1,040$ ) при замене внутреннего слоя из стали толщиной  $\approx 2$  см на такой же слой из полиэтилена. При этом значение  $k_{эф}$  для сборки с составным отражателем превышает значение  $k_{эф} = 1$  для сборки с той же АЗ и отражателем, содержащим только полиэтилен практически бесконечной толщины. Сборка со «слоистым» отражателем становится надкритической.

При дальнейшем увеличении слоя полиэтилена в составном отражателе  $k_{эф}$  уменьшается до значения, соответствующего сборке с отражателем, состоящим только из полиэтилена.

Основной вывод из результатов исследований, изложенных в настоящем разделе, заключается в том, что размножающая сборка с отражателем, содержащим только полиэтилен или только сталь, подкритическая при любой толщине каждого из рассмотренных гомогенных отражателей, может стать надкритической при слоистой структуре отражателя.

1. Представлены результаты анализа критических экспериментов, выполненных ранее в РФЯЦ-ВНИИЭФ на установке ФКБН [3]. Рассмотрены три сборки, имеющие активную зону (АЗ) из металлического плутония 98 %  $^{239}\text{Pu}$  в  $\delta$ -фазе и отражатели, содержащие чередующиеся сферические слои из  $[(\text{CH}_2)_n + \text{Fe}]$ .

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

3. Сравнение экспериментальных значений  $k_{\text{эф}}$  с расчетными, полученными с использованием различных библиотек ядерных данных (BAS-78, ENDF/B-7.1, JENDL-4, JEF-3, CENDL-2), показало, что наилучшее согласие обеспечивают константы библиотек ENDF/B-7.1 и JEF-3.

4. С помощью расчетов установлено, что значение  $k_{\text{эф}}$  для РС с толстым отражателем из стали резко возрастает (от  $k_{\text{эф}} \approx 0,977$  до  $k_{\text{эф}} \approx 1,040$ ) при замене внутреннего слоя из Fe толщиной  $\approx 2$  см на такой же слой из полиэтилена. При этом  $k_{\text{эф}}$  для сборки с составным отражателем превышает значение  $k_{\text{эф}} = 1$  для отражателя из полиэтилена практически бесконечной толщины. Сборка со «слоистым» отражателем становится надкритической.

5. Представленные данные удовлетворяют требованиям для тестовых (Benchmark) критическихборок и могут быть рекомендованы для включения их в международный справочник ICSBER (International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiment) [1].

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

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

3. 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.

4. 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.

Контактная информация –

Воронцов Сергей Владимирович,  
первый заместитель директора ИЯРФ,  
факс:(83130)4-55-69,  
e-mail: vorontsov@expd.vniief.ru

Статья поступила в редакцию 11.07.2014.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, вып. 4, с. 12–24.