РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ И ИХ ПОГРЕШНОСТИ ДЛЯ КРИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ, СОБИРАЕМЫХ НА СТЕНДЕ ФКБН-2

THE CALCULATION MODELS AND THEIR DEVIATIONS FOR CRITICAL SYSTEMS RESEARCHED ON CRITICAL FACILITY FKBN-2

A. A. Вайвод, Л. С. Ершова, Л. Ю. Самойлова, Ю. А. Соколов, Д. В. Хмельницкий A. Vaivod, L. Ershova, L. Samoilova, Yu. Sokolov, D. Khmelnitskiy

ФГУП "РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина" Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics

В докладе рассмотрены приемы, используемые при построении расчетных прецизионных моделей критических систем, собираемых на СКС ФКБН-2. В качестве иллюстрации представлены расчетные модели некоторых критических систем из урана и плутония с отражателем, исследованных в последние годы. На примере этих сборок продемонстрирована процедура расчета погрешности $K_{3\phi}$ для расчетной модели

In this paper the precise calculation models of critical configurations assembled using the VNIITF Criticality Test Facility FKBN-2 construction methods are described. As an illustration the calculation models of spherical assemblies of high enriched uranium and plutonium with reflector which were assembled in last years are presented. With this assemblies the procedure of $K_{9\varphi\varphi}$ uncertainty calculation is demonstrated.

Критические эксперименты относятся к числу основных направлений исследований в отделении экспериментальной физики РФЯЦ-ВНИИТФ и связаны в первую очередь с обоснованием ядерной безопасности (ЯБ) проводимых в институте работ с делящимися материалами. В большинстве случаев обоснование ЯБ осуществляется расчётным путем по методу Монте-Карло, точность которого зависит от точности моделирования реальных размножающих систем (PC), расчётной методики и погрешности используемой системы ядерно-физических констант. Тестирование расчётов, как правило, проводится по экспериментам типа benchmark на критических сборках с простой, точно передаваемой в расчетах геометрией и известным составом, приближающимся по составу к системе, для которой производятся расчеты ЯБ.

Для использования результатов критического эксперимента на практике для целей верификации необходимо разработать упрощённую схему (расчётную модель) системы. Для экспериментальной размножающей системы при зазоре между нижней и верхней частями, равном критическому, эффективный коэффициент размножения $K_{3\phi}$ по определению равен 1. Но коэффициент

размножения расчетной модели PC может отличаться от 1 так как в реактивность PC вносят вклад некоторые элементы оснастки, стены, пол, потолок экспериментального зала, аппаратура вблизи сборки и пр., которые не приводятся в расчётной модели. Для нахождения данного смещения задают систему, наиболее приближенную к реальной, включающую выше указанные составляющие. Вычисляются коэффициенты размножения для данной системы и для упрощенной модели. Смещение находится как разность коэффициентов размножения модели и системы, наиболее близкой к реальной. Смещение определяется с некоторой погрешностью, величина которой определяется методикой расчета. Также смещение может быть оценено из анализа уже сделанных ранее оценок смещений для критических систем, близким по геометрии и составу к данной системе.

Погрешность определения коэффициента размножения $K_{9\phi}$ модели связана с погрешностями определения параметров PC, описываемой данной расчетной моделью. Для определения погрешности $K_{9\phi}$ определяются наиболее существенные источники погрешностей. При оценке результирующей погрешности $K_{9\phi}$ все учитываемые погрешности считаются независимыми между собой случайными величинами. Коэффициенты чувствительности $K_{9\phi}$ к неопределенности

параметра *P* размножающей системы $\frac{\partial K_{3\phi}}{\partial P}$ оцениваются путем расчетов методом Монте-Карло значений $K_{3\phi}$ для исходного состояния PC и состояния с возмущенным параметром $P + \delta P$.

2. Прнципы построения расчётных моделей

Расчётные модели PC построены при использовании ряда упрощений: в модели не передаются дополнительные объекты находящиеся в зале, отражающие нейтроны: стены, пол, потолок зала, стойка с нейтронными детекторами; не передаются некоторые детали оснастки для установки частей PC; усреднены плотности и составы областей, состоящих из нескольких деталей из делящегося материала одного комплекта; принято, что между некоторыми деталями отсутствуют зазоры; передается упрощенный состав делящегося материала; в расчетной модели PC не передаются бурты и проточки деталей, необходимые для фиксации их в сборке и пр.

Как показывают проведенные в [1] оценки для сборок ФКБН, погрешность определения смещения, связанного с подобными упрощениями, не увеличивает значительно суммарную погрешность определения $K_{3\phi}$, которая остается в пределах ~0,1..0,2 % (1 σ). Таким образом, задание уточненной модели (с наименьшим числом упрощений) уменьшило бы погрешность определения смещения, но не привело бы к существенному уменьшению суммарной погрешности определения $K_{3\phi}$. При этом значительно снизилось бы удобство использования информации о критических экспериментах.

Порядок построения расчётной модели следующий:

– выбор упрощений, принимаемых для расчётной модели по сравнению с реальной моделью PC. Это делается на основании накопленного опыта и данных [1].

– расчет средней плотности областей модели, размеров, усредненных составов;

– оценка вклада каждого из упрощений расчетным путем или путем анализа уже оцененных сборок [1], либо оценка суммарного вклада ∆ всех упрощений;

– определение экспериментального значения K_{ab} модели (1– Δ);

- определение погрешности *К*_{эф} модели.

Как уже было сказано, для определения погрешности $K_{3\phi}$ определяются наиболее существенные источники погрешностей. Данные оценок, приведенные, например, в [1], показывают, что наиболее существенные источники погрешностей следующие:

- геометрические размеры частей РС;

- величина критического зазора PC;

- содержание основного изотопа ДМ.

3. Пример построения расчётной модели и оценки погрешностей

В качестве примера приведём процедуру построения расчётной модели PC по результатам экспериментальных данных на примере сферической КС из δ -плутония в полиэтиленовом отражателе. Данная PC собиралась в 2012 г. с целью восполнения недостатка данных о критичности систем близких к тем, с которыми имеют дело специалисты по ЯБ. Подробная схема данного критического эксперимента приведена на рис. 1. Сборка собиралась в экспериментальном зале с размерами $18 \times 12 \times 8$ м³ на высоте ~1,7 м от уровня пола в соответствии с установленным технологической инструкцией порядком. PC представляет собой сферическую систему, разбитую на две части (нижнюю НЧ и верхнюю ВЧ), разделённые зазором.

Нижняя часть установлена на стакане из стали с толщиной стенок 0,4 см, закрепленном на подвижном штоке. Нижнюю часть PC составляет сфера из плутония в δ-фазе наружным диаметром 10,7 см, внутренним 2,0 см, находящаяся в полусферическом отражателе из полиэтилена, состоящем из четырех полиэтиленовых полусфер суммарной толщиной ~12,65 см. Плутониевая сфера собрана из полусферических оболочек. Полюсные каналы верхних полусфер заполнены пробками из того же материала. ВЧ PC установлена на стальной диафрагме толщиной 0,3 см. Верхнюю часть PC составляет ответная часть полиэтиленового отражателя, состоящая из четырех полиэтиленовых полусфер суммарной толщиной 12,65 см. Диафрагма установлена на кольце подставки. Подставка установлена на опорной трубе.

Для контроля за нейтронным потоком в центральную область сборки помещался плутоний-бериллиевый нейтронный источник с выходом ~1,66 \cdot 10⁶ н/с, который не вносит заметного вклада в критичность РС. Критический зазор $H_{\rm kp}$ системы (зазор между НЧ и ВЧ, при котором $K_{\rm 3\phi}$ сборки равен единице) был определен путем экстраполяции обратного умножения 1/Q(H) к нулю



Рис. 1. Схема критэксперимента с РС из плутония с «толстым» полиэтиленовым отражателем (РС 1)

по точкам с Q > 100. Общая погрешность определения критического зазора составила не более 0,1 мм (1 σ).

С целью уменьшения общей экспериментальной погрешности $K_{3\phi}$ большое внимание уделялось качеству сборки PC, а именно:

 – с помощью калиброванных щупов определялись зазоры между частями PC и диафрагмой и делались соответствующие поправки на величину критического зазора;

 между деталями PC устанавливались небольшие алюминиевые крестообразные и кольцеобразные прокладки, в результате чего торцы деталей нижней части находились в одной плоскости;

- массы деталей определялись на весах с погрешностью не хуже 0,8 г;

 – калибровка указателя перемещений в точке *H* = 0 проводилась при сближении НЧ и ВЧ (нижней поверхности диафрагмы) до момента касания, который фиксировался с помощью индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм.

В результате общая экспериментальная погрешность $K_{3\phi}$ для данных PC не превышает ~0,16 % (2 σ).

Как уже было сказано, измеренный критический зазор – есть характеристика всей системы, включающей не только PC с оснасткой на стенде, но и стены, пол, потолок зала, аппаратуру в зале. Ясно, что точное описание такой системы не представляется возможным, для описания эксперимента необходимо построить расчётную модель.

3.1. Расчётная модель

Данная расчетная модель (рис. 1) построена при использовании ряда упрощений (см. табл. 1) по отношению к реальной размножающей системе.

Оценим величину отклонения K_{ab} модели от 1 на основе анализа оценок сборок ФКБН

(ВНИИТФ) данного типа – сферических сборок из плутония с отражателем, приведенных в [1] (PU-MET-FAST-019, PU-MET-FAST-020) ввиду того, что в данных сборках используются полусферические оболочки из плутония того же комплекта, используется та же оснастка: опорная труба, тренога, шток и пр.

Сборка PU-MET-FAST-019 – сферическая сборка из плутония наружным диаметром 10,7 см, внутренним диаметром 2,8 см с отражателем из бериллия толщиной 5,65 см. Сборка

PU-MET-FAST-020 – сферическая сборка из плутония наружным диаметром 10,7 см, внутренним диаметром 2,8 см с отражателем из обедненного урана толщиной 7,65 см.

Как видно из табл. 1, значения вкладов упрощений для двух сборок из плутония с отражателями из разных материалов близки. Принято следующее значение суммарного отклонения от 1 $K_{3\phi}$ модели КС из плутония в толстом полиэтиленовом отражателе: Δ_{K} = -0,0008±0,0003. Таким

образом, расчётная модель имеет простую геометрию в виде сферы из Pu наружным D = 12,65 см, внутренним диаметром d = 2,0 см, без покрытия (введением несколько другого состава), без зазоров между оболочками (с несколько меньшей плотностью), из оснастки представлена только диафрагма, аппаратура и стены зала не включены в модель (см. рис. 3).

Таблица 1

вклады в $K_{3\phi}$ упрощений для сферических сборок из плутония с Ве и U_{00} - отражателем и принятые значения для PC.

Параметр	PU-MET-FAST-019	PU-MET-FAST-020	PC 2.1
Гомогенизация покрытия Ри- деталей	-0,0003±0,0001	-0,0003±0,0001	-0,0003±0,0001
Усреднение плотности для Ри- деталей	-0,0003±0,0001	-0,0003±0,0001	-0,0003±0,0001
Не учитывается распад ²⁴¹ Ри	$+0,0006\pm0,0001$	$+0,0006\pm0,0001$	$+0,0006\pm0,0001$
Усреднение плотности отражателя	-0,0002±0,0001	-0,0001±0,0001	-0,0002±0,0002
Не передаются стены, пола, пото- лок зала, часть оснастки	-0,0006±0,0002	-0,0006±0,0002	-0,0006±0,0002
Суммарное изменение в К _{эф} , свя- занное с данными упрощениями	-0,0008±0,0003	-0,0007±0,0003	-0,0008±0,0003



Рис. 2. Расчетная модель PC 1. Критический зазор PC 1 составляет 0,43 \pm 0,01 см (1 σ).

3.2. Оценка погрешности К_{эф} модели

Для оценки результирующей погрешности $K_{3\phi}$ модели КС определяются коэффициенты чувствительности коэффициента размножения модели к изменению каждого из ее параметров (расчеты проводились в лаб. 58). Значения варьируемых параметров для исходного состояния расчетной модели приведены в таблице 2. Коэффициенты чувствительности $K_{3\phi}$ к неопределенности

Секция 2

параметра Р размножающей системы $\frac{\partial K_{3\phi}}{\partial P}$ оценивались путем расчетов по программе ПРИЗМА-Д с нейтронными константами БАС значений $K_{3\phi}$ для исходного состояния PC и состояния с возмущенным параметром $P + \delta P$:

$$\frac{\partial K_{3\phi}}{\partial P} \approx \frac{K_{3\phi}(P) - K_{3\phi}(P + \delta P)}{\Delta P} \tag{1}$$

При варьировании размеров области с ДМ ее масса принималась неизменной (соответствующим образом корректировалась плотность ДМ), уменьшение процентного содержания 235 U в ДМ компенсировалось изотопом 238 U; уменьшение процентного содержания 239 Pu в ДМ компенсировалось изотопом 240 Pu.

Погрешности определения параметра P (критического зазора, содержания ²³⁵U) соответствует погрешность в K_{90} :

$$\delta_K(P) = \left| \frac{\partial K_{3\Phi}}{\partial P} \cdot \delta_P \right| \tag{2}$$

Погрешности определения параметра Р (радиуса полусферы из ДМ или полусферы отражателя) соответствует погрешность в $K_{2\Phi}$:

$$\delta_K(P) = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\partial K_{3\Phi}}{\partial P} \cdot \delta_P \right|,\tag{3}$$

где N = 2 -число полусфер.

При оценке результирующей погрешности $K_{3\phi}$ все учитываемые погрешности считаются независимыми между собой случайными величинами:

$$\delta_{K \text{pe3}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \delta_{K_i}^2} \tag{4}$$

Суммарная погрешность определения коэффициента размножения для расчетной модели определяется по следующей формуле:

$$\delta_{Kcym} = \sqrt{\delta_{Kpe3}^2 + \delta_{\Delta}^2} , \qquad (5)$$

где δ_{Δ} – погрешность определения отклонения $K_{2\Phi}$ модели от 1

(для данной модели КС составляет 0,0003)

Таблица 2

Значения варьируемых параметров для исходного состояния расчетной модели PC 1 и соответствующие погрешности в $K_{3\Phi}$

Величина Р	Значение	Погрешность δ _P (1σ)	ΔP	$\Delta K_{\Im \Phi}$	$\delta_K(P)$
Критический зазор	0,43 см	0,01 см	0,2 см	0,00366	$1,83 \cdot 10^{-4}$
Наружный радиус полиэтиленового отражателя (поз. 1; 2 рис. 1)	17,97 см	0,002 см	2,0 см	-0,037067	2,62.10-4
Наружный радиус области из плу- тония	5,348 см	0,001 см	-0,5 см	+0,11258	1,59.10-4
Содержание ²³⁹ Ри, в % по весу	-	0,12	-4	-0,007865	2,36.10-4
Результирующая погрешность $\delta_{K pe3}$ (1 σ)					0,0004

По формуле (5) найдем суммарную погрешность определения коэффициента размножения для расчетной модели:

$$\delta_{K\text{cym}} = \sqrt{\delta_{K\text{pe3}}^2 + \delta_{\Delta}^2} = \sqrt{0,0004^2 + 0,0003^2} \approx 0,0005 \ (1\sigma)$$

Окончательно, значение $K_{2\Phi}$ для расчетной модели:

 $K_{\rm 200} = 0.9992 \pm 0.0010 \ (2\sigma).$

4. Другие расчётные модели данной серии экспериментов

Результаты расчетов $K_{3\phi}$ для четырех критических систем PC1..PC4 методом Монте-Карло по программе ПРИЗМА-Д с двумя библиотеками нейтронных констант БАС и ENDF-BVI приведены в табл. 3. Для ENDF-BVI использовалась модель термализации с учетом химических связей при T = 0,0253 эВ. Расчётные модели PC2...PC4 приведены на рис. 3..5.

Значения $K_{3\phi}$, определенные по программе ПРИЗМА-Д с библиотекой констант БАС, отличаются от экспериментальных значений $K_{3\phi}$ не более чем на ~1 %, что согласуется с данными полученными ранее, согласно которым максимальное значение указанного расхождения составляет 2 %.

Таблица 3

Система	Эксперимент $K_{ m bb}{\pm}2\sigma$	K _{3φ} (1σ, %)		
		БАС	ENDF-BVI	
PC 1	0,9992±0,0010	1,0026 (0,01)	1,0097 (0,01)	
PC 2	0,9992±0,0012	0,9945 (0,01)	1,0010 (0,01)	
PC 3	0,9993±0,0014	0,9982 (0,01)	1,0045 (0,003)	
PC 4	0,9993±0,0016	0,9902 (0,004)	0,9972 (0,002)	



Рис. 3. Расчетная модель PC 2. Критический зазор составляет $0,19 \pm 0,01$ см (1 σ). Значение $K_{3\phi}$ для расчетной модели (определенное аналогично $K_{3\phi}$ PC 1): $K_{3\phi} = 0,9992 \pm 0,0012$ (2 σ).

Результаты расчетов К_{эф}



Рис. 4. Расчетная модель РС 3. Критический зазор составляет 0,84 \pm 0,01 см (1 σ). Значение $K_{3\varphi}$ для расчетной модели: $K_{3\varphi} = 0,9993 \pm 0,0014$ (2 σ).



Рис. 5. Расчетная модель РС 4. Критический зазор составляет 1,25 ± 0,01 см (1 σ). Значение $K_{9\phi}$ для расчетной модели: $K_{9\phi} = 0,9993 \pm 0,0016$ (2 σ)

Заключение

В докладе представлены четыре расчётные модели сферических размножающих систем из урана и плутония с полиэтиленом, критические эксперименты с которыми проводились в 2011–2012 гг. На примере данных моделей проиллюстрирована процедура построения расчётных моделей, оценки $K_{3\phi}$ моделей, оценки погрешности их определения. Приведен метод оценки отличия $K_{3\phi}$ расчётной модели от $K_{3\phi}$ реальной размножающей системы на основе анализа ранее проведенных оценок критических экспериментов, проведенных на СКС ФКБН-2.

Литература

1. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA NCS, September 2012 edition.