

КРИТИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА СБОРКАХ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ПЛУТОНИЕМ, ВЫПОЛНЕННЫЕ В РФЯЦ-ВНИИЭФ

С. В. Воронцов, М. И. Кувшинов

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

Представлен краткий обзор методики проведения экспериментов в РФЯЦ-ВНИИЭФ по изучению характеристик размножения нейтронов и критических массборок, содержащих металлические делящиеся материалы. Приведены результаты измерений критических масс плутония в α - и δ -фазах с различным изотопным составом, выполненных в РФЯЦ-ВНИИЭФ М. И. Кувшиновым, А. А. Малинкиным, Б. Д. Сциборским, В. А. Давиденко, В. П. Егоровым в 1956–1965 гг.

Ключевые слова: металлические делящиеся материалы, коэффициент умножения нейтронов, реактивность, критическая масса, плутоний в α - и δ -фазах, обогащенный уран, изотопный состав, критический стенд ФКБН, ядерная безопасность, активная зона, отражатель, защищающий контейнер, верификации ядерных констант.

CRITICAL EXPERIMENTS ON ASSEMBLIES WITH METALLIC PLUTONIUM CARRIED OUT AT RFNC-VNIIEF / S. V. VORONTSOV, M. I. KUVSHINOV // We present a brief review of RFNC-VNIIEF experiment procedures dedicated to a study of neutron multiplication characteristics and critical masses of assemblies containing metallic fissile materials. Here are described results of measuring critical plutonium masses in α - and δ -phases with various isotopic composition carried out by M. I. Kuvshinov, A. A. Malinkin, B. D. Stsiborski, V. A. Davidenko, V. P. Yegorov in RFNC-VNIIEF in the years of 1956–1965.

Key words: metallic fissile materials, neutron multiplication factor, reactivity, critical mass, plutonium in α - and δ -phases, enriched uranium, isotopic composition, FKBN critical bench, nuclear safety, core, reflector, protective container, nuclear constant verification.

Введение

Знание критических масс и характеристик размножения нейтроновборок, содержащих металлический плутоний, необходимо для определения условий ядерной безопасности (ЯБ) при производстве, хранении и транспортировке как самих делящихся материалов (ДМ), так и изделий из них. Кроме того, экспериментальные данные об этих параметрах для размножающих систем (РС) простой геометрии весьма полезны для верификации используемых в расчетах ядерных данных.

Экспериментальные исследования характеристик РС, содержащих активную зону из металлического плутония, в РФЯЦ-ВНИИЭФ начали систематически проводиться в 50-х годах прошлого столетия [1]. При этом измерялись все основные ядерно-физические параметры РС: реактивность (подкритичность), распределение плотности раз-

личных ядерных реакций по объему активной зоны (АЗ), интегральное число делений во всем объеме АЗ, возмущение реактивности образцами из различных материалов, спектральные индексы $[\sigma(X)/\sigma(^{235}\text{U})]$, энергетические спектры нейтронов, спады плотности мгновенных нейтронов во времени, характеристики запаздывающих нейтронов. Основные нейтронные характеристики критической сборки из сплава ^{239}Pu (96,4 %) в δ -фазе без отражателя, полученные во ВНИИЭФ, представлены на XI международном семинаре по фундаментальным свойствам плутония [2].

В настоящей статье представлен краткий обзор экспериментов только по изучению характеристик размножения нейтронов и критических масс для большого числаборок, содержащих металлический плутоний. В экспериментах использовались детали из сплавов плутония в α - и δ -фазах с различным содержанием нуклида ^{239}Pu : ^{239}Pu

(96,4 %) в δ -фазе, ^{239}Pu (87,9 %) в δ -фазе, ^{239}Pu (88,3 %) в α -фазе. Изучались также РС, в состав которых одновременно входили детали из ^{239}Pu (96,4%) в δ -фазе и ^{235}U (89,6 %) [4]. Исследовались сборки из металлического плутония без отражателя и с отражающими оболочками различной толщины. В качестве отражателей в составе РС изучено более 30 материалов, наиболее широко используемых в технике. Эти эксперименты были выполнены в РФЯЦ-ВНИИЭФ М. И. Кувшиновым, А. А. Малинкиным, Б. Д. Сциборским, В. А. Давиденко, В. П. Егоровым в 1956–1965 гг. [1].

Методика экспериментов

Эксперименты проводились на созданном во ВНИИЭФ специальном стенде ФКБН (Физический котел на быстрых нейтронах). В последующие годы он неоднократно модернизировался и совершенствовался с целью повышения безопасности проводимых на нем работ [3]. Электромеханический стенд установки ФКБН-2М размещен в зале размером $12 \times 10 \times 8$ м, имеющем толстые (1–3 м) бетонные стены и потолок для защиты от нейтронного и гамма-излучений, а также от взрывного воздействия (рис. 1).

Критическая система собирается на стенде в виде двух заведомо подкритических блоков на безопасном расстоянии друг от друга. Конструкция стенда (рис. 2) и его система управления обеспечивают возможность дистанционного сближения этих блоков с целью образования критической конфигурации сборки.

Для реализации критических экспериментов установка ФКБН-2М укомплектована большим на-

бором деталей (в основном, полусферической формы) из делящихся и инертных конструкционных материалов (рис. 3). На рис. 4 приведена полномасштабная модель критической сборки из ^{239}Pu в α -фазе.

В качестве основного измеряемого в эксперименте параметра служил коэффициент умножения (Q). Он определялся по соотношению $Q = (N - N_{\Phi})/N_0$, где N – поток нейтронов утечки из сборки с плутонием, в центре которой размещен изотопный источник нейтронов; N_{Φ} – поток нейтронов утечки из сборки с плутонием без изотопного источника нейтронов (в этом случае поток нейтронов утечки обусловлен размножением в сборке нейтронов собственного фона плутония); N_0 – поток нейтронов утечки из макетной сборки, в которой плутоний заменен инертным материалом (свинцом или сталью), и в центре размещен тот же изотопный источник нейтронов.

Обратная величина коэффициента умножения $\Delta = 1/Q$, называемая подкритичностью, характеризует близость сборки к критическому состоянию, в критическом состоянии $\Delta = 0$.

В работе применялся источник нейтронов, имеющий состав ($\text{Po} + \text{V}_4\text{C} + \text{CaF}_2$), спектр которого близок к спектру нейтронов деления. Для регистрации потока нейтронов использовался «всеволновый» счетчик. Точность измерения коэффициента умножения составляла 1–2 %.

Критическое состояние определялось путем линейной экстраполяции к нулю зависимости подкритичности от изменяемого параметра сборки (радиуса активной зоны (АЗ), толщины отражателя, расстояния между двумя частями сборки, возмущения подкритичности малым образцом плутония и др.). В большинстве случаев экспериментально

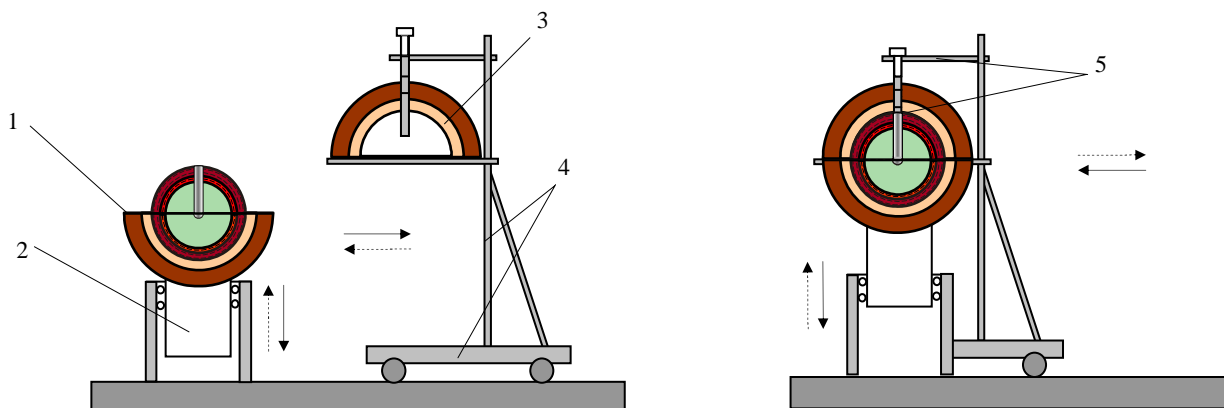


Рис. 1. Схематическое изображение современного электромеханического стенда установки ФКБН-2М: 1, 3 – нижний и верхний блоки РС; 2, 4 – опоры, перемещаемые в вертикальном и горизонтальном направлениях соответственно; 5 – устройство загрузки центрального канала



Рис. 2. Стенд ФКБН-2М с размножающей сборкой в экспериментальном зале



Рис. 3. Набор макетных деталей из делящихся и конструкционных материалов для сборки критических систем на установке ФКБН-2М

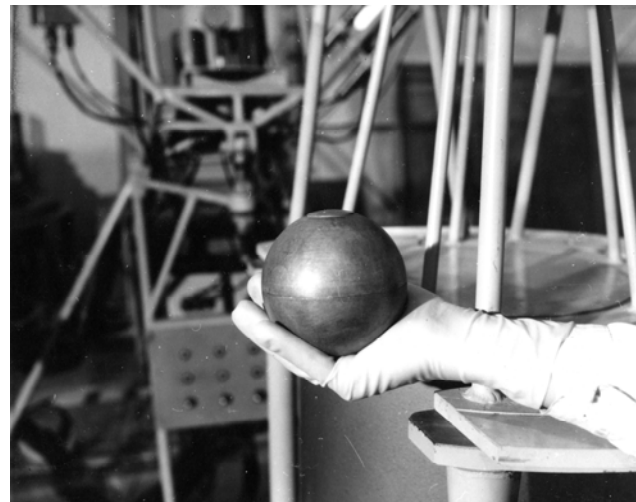


Рис. 4. Полномасштабная модель критической сборки из ^{239}Pu в α -фазе

подбирались сборки, близкие к критическим, для которых значения Δ были менее 0,01. При этом масса делящегося материала (ДМ) в сборке отличалась от критической менее чем на 1 %.

Сферические сборки собирались из деталей полусферической формы. Используемые в качестве отражателя жидкости заливались в тонкостенные медные конверты. Средние плотности материалов определялись путем деления массы материала на занимаемый объем, ограниченный наружным и внутренним радиусами АЗ и отражателя. Для удобства использования (например, для построения зависимости критической массы от толщины отражающей оболочки) прямые экспериментальные значения критических масс плутония в ряде случаев были пересчитаны к их значениям для сплошных шаров с нормальной плотностью металла. В случае сборок с отражающими оболочками при пересчете толщина оболочки оставалась той же самой, что и в опыте, а плотность принималась равной нормальной плотности материала оболочки. Пересчет производился в односкоростном приближении методом сферических гармоник. Проверка правильности расчета производилась путем сравнения экспериментальных и расчетных данных при небольших вариациях средней плотности материалов АЗ и отражателя и размеров центральной полости. Было показано, что пересчет не вносит сколько-нибудь существенной ошибки в значения критических масс.

Результаты экспериментов

Во ВНИИЭФ были изучены размножающие характеристики и критические параметры около 200 сборок, содержащих в активной зоне (АЗ) металлический плутоний. В качестве отражателя в критических сборках использовались вода, полиэтилен, плексиглас, медь, графит, сталь, дюралюминий, бериллий, окись бериллия, $U_{\text{ест}}$, ^{238}U , бетон, свинец, вольфрам, никель, V_4C , молибден, титан, V_4C + полиэтилен, диффузионное масло, цирконий, кадмий + полиэтилен, четыреххлористый углерод, гидрид лития и др. Отражающая оболочка содержала один или два из указанных материалов. Она вплотную прилегалась к АЗ или была отдалена от нее на некоторое расстояние. В большинстве сборок АЗ имела форму сплошного или полого шара. В некоторых сборках – форму полушария. Результаты экспериментов представлены в табл. 1–12.

Основные компоненты сплавов плутония [4]

Фазовое состояние	Принятые обозначения	Pu ²³⁹	Pu ²⁴⁰	Pu ²⁴¹	N1	Ga	Источник
		Массовая доля, %					
Плутоний в δ-фазе	Pu (δ)-I	96,42	1,77	–	1,2	1,69	([4]-022)
Плутоний в δ-фазе	Pu (δ)-II	87,87	9,06	1,02	0,9	1,68	([4]-027)
Плутоний в α-фазе	Pu(α)	88,25	9,90	1,60	–	–	([4]-029)

Таблица 2

Критические массы шаров из плутония без отражателя

Делящийся материал	Средняя плотность, г/см ³	Критическая масса, кг
Pu (δ)-I	15,7	16,9±0,1
Pu(α)	19,5	10,6±0,1

Таблица 3

Коэффициенты умножения сборок с активной зоной из Pu (δ)-I плотностью 15,3 г/см³ и сферическими оболочками из различных материалов

Материал отражателя и его плотность, г/см ³	Наружный радиус отражателя*, см	Коэффициент умножения для активной зоны с наружным радиусом, см			
		3,15	4,02	4,66	5,35
Уран естественный, ρ = 18,4	6,75	1,70	2,63	4,00	7,94
	9,15	1,82	3,12	5,88	87,6
	15,00	1,89	3,85	13,3	–
	25,00	2,00	4,35	30,3	–
Полиэтилен, ρ = 0,91	6,00	1,72	2,50	–	–
	7,55	–	–	4,76	9,43
	9,15	1,96	3,45	6,25	25,6
	23,0	2,00	3,57	7,69	–
Графит, ρ = 1,60	8,00	1,67	2,63	4,00	8,54
	15,0	1,79	2,94	5,55	50,0
	35,0	1,80	3,57	–	–
Дюралюминий, ρ = 2,55	7,55	1,58	2,35	3,34	6,06
	9,15	1,62	2,38	3,57	7,14
	15,00	1,67	2,57	4,17	10,4
	25,0	1,70	2,63	4,66	14,9
Железо, ρ = 7,50	7,55	1,67	2,53	3,75	8,00
	9,15	–	2,57	4,24	11,00
	15,0	1,70	2,78	5,27	32,3
	25,0	–	2,90	5,88	–

* Внутренний радиус активной зоны во всех сборках был равен 1,4 см. Внутренний радиус отражателя равен наружному радиусу активной зоны.

Таблица 4

Критические массы сплошных шаров из Pu (δ)-I плотностью 15,7 г/см³ в сферических отражателях

Материал отражателя и его плотность, г/см ³	Толщина отражателя, см	Критическая масса, кг	Материал отражателя и его плотность, г/см ³	Толщина отражателя, см	Критическая масса, кг
Бериллий, ρ = 1,84	1,5	11,5±0,1	Плексиглас, ρ = 1,20	3,4	10,4±0,3
	3,8	8,7±0,05			
	6,1	6,9±0,1			
	13,4	5,0±0,1			
	17,2	4,3±0,1			

Материал отражателя и его плотность, г/см ³	Толщина отражателя, см	Критическая масса, кг	Материал отражателя и его плотность, г/см ³	Толщина отражателя, см	Критическая масса, кг
Оксид бериллия, $\rho = 2,70$	4,0	8,2±0,4	Кадмий + плексиглас, $\rho_{Cd} = 8,6$; $\rho_{пл} = 1,20$	3,2	11,0±0,2
	6,4	6,8±0,3		5,5	9,9±0,3
				11,3	9,6±0,3
Уран естественный, $\rho = 18,8$	1,3	12,5±0,12	Карбид бора + плексиглас, $\rho_{B_4C} = 1,0$; $\rho_{пл} = 1,20$	3,2	12,6±0,3
	3,8	8,9±0,08		6,6	11,0±0,3
	8,3	7,2±0,1		12,3	11,0±0,3
	20,3	6,1±0,07			
Графит, $\rho = 1,70$	2,0	12,4±0,12	Диффузионное масло Д-1, $\rho = 0,91$	3,4	9,9±0,3
	9,2	8,6±0,1		8,2	8,5±0,2
	39,2	6,6±0,2		16,2	8,3±0,2
Медь, $\rho = 8,90$	1,5	12,3±0,12	Железо, $\rho = 7,80$	1,80	12,8±0,12
	4,9	9,1±0,1		6,7	9,3±0,2
	8,7	8,0±0,2		12,1	8,7±0,1
				19,5	8,5±0,1
Вода, $\rho = 1$	2,3	12,2±0,2	Цирконий, $\rho = 6,5$	1,2	13,0±0,2
	8,9	8,9±0,2		6,0	10,1±0,3
	16,2	8,3±0,2			
Вода тяжелая, $\rho = 1,1$	1,3	13,1±0,2	Бетон марки 200, $\rho = 2$	2,4	12,9±0,2
				10,2	9,4±0,2
				23,5	8,6±0,3
Полиэтилен, $\rho = 0,93$	1,6	12,8±0,12	Свинец, $\rho = 11,1$	3,0	13,1±0,3
	4,5	9,4±0,1		5,8	11,1±0,3
	9,8	7,7±0,1		12,3	9,6±0,3
	25,2	7,2±0,1			
Кадмий + полиэтилен*, $\rho_{Cd} = 8,6$; $\rho_{пол} = 0,93$	2,6	12,4±0,15	Дюралюминий, $\rho = 2,7$	3,2	12,9±0,13
	5,3	11,1±0,2		10,8	10,5±0,4
	12,3	10,9±0,2		19,5	10,0±0,3
Карбид бора + полиэтилен*, $\rho_{B_4C} = 1,0$; $\rho_{пол} = 0,93$	2,4	12,9±0,2	Гидрид лития естественного, $\rho = 0,77$	10,0	12,2±0,4
	3,1	12,4±0,2		14,0	12,2±0,4
	5,0	12,0±0,2		19,0	12,4±0,4
	9,2	12,0±0,2	Четыреххлористый углерод, $\rho = 1,59$	3,1	14,5±0,4
				7,1	13,9±0,4
			19,0	13,0±0,2	

* Слой Cd толщиной ~0,5 мм или В₄С с толщиной ~8 мм расположен между активной зоной и отражателем. Приведенная в таблице толщина отражателя – суммарная.

Таблица 5

Критическая масса сплошных шаров из Pu(δ)-II плотностью 15,7 г/см³ в сферическом отражателе из U_{ест} и полиэтилена

Материал отражателя, его плотность, г/см ³	Толщина отражателя, см	Критическая масса Pu(δ)-II, кг
Уран естественный, $\rho = 18,8$	3,8	9,4±0,1
Полиэтилен, $\rho = 0,93$	5,6	9,2±0,1

Отметим, что данные табл. 4 позволяют построить зависимости критической массы плутония от толщины отражателя. На рис. 5 в качестве примера, приведены такие зависимости для отражателей из ^{238}U , Fe, Al.

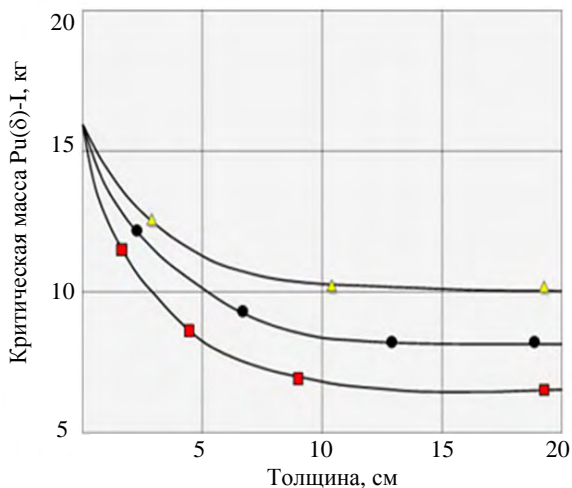


Рис. 5. Зависимость критической массы шара из Pu (δ)-I от толщины отражателя: ■ – ^{238}U , ● – Fe, Δ – Al

Таблица 6

Критическая масса сплошных шаров из Pu(α) плотностью 19,5 г/см³ в сферических отражателях

Материал отражателя, его плотность, г/см ³	Толщина отражателя, см	Критическая масса, кг
Бериллий, $\rho = 1,84$	2,1	6,94±0,07
	8,2	4,50±0,06
	9,2	4,31±0,05
	17,5	3,60±0,06
Полиэтилен, $\rho = 0,93$	3,7	6,73±0,07
	11,0	5,3±0,2
Железо, $\rho = 7,80$	4,5	7,02±0,07
Уран естественный, $\rho = 18,8$	2,1	7,18±0,07
	2,9	6,52±0,06
	11,0	4,74±0,05
	21,0	4,50±0,05
Графит, $\rho = 1,70$	4,5	7,0±0,1
	31,0	4,75±0,05

Таблица 7

Критические массы полых шаров из Pu (δ)-I в сферических отражателях

Отражатель		Активная зона		
Материал, его плотность, г/см ³	Толщина, см	Внутренний радиус, см	Плотность, г/см ³	Критическая масса, кг
Железо, $\rho = 7,50$	2,2	3,15	15,3	17,7±0,3
	34,5	3,15	15,2	11,8±0,3
	10,4	4,02	15,3	15,5±0,2
Графит, $\rho = 1,55$	2,6	3,15	15,3	17,7±0,3
	4,3	3,15	14,1	16,3±0,3
	15,9	3,15	15,2	11,8±0,2
	29,3	3,15	15,3	10,1±0,4
	46,6	3,15	15,3	9,8±0,5
	10,7	4,02	15,3	15,5±0,2
	28,5	4,02	14,9	12,4±0,3
	28,5	4,66	15,3	13,9±0,3
	37,7	4,66	15,3	13,2±0,3
Дюралюминий, $\rho = 2,55$	4,3	3,15	15,3	17,7±0,2
Полиэтилен, $\rho = 0,93$	5,0	3,15	15,8	12,3±0,2
	9,7	3,15	15,0	11,6±0,2
	4,4	4,02	15,3	15,5±0,2
	8,4	4,66	16,2	14,0±0,3
	15,7	4,66	15,3	13,2±0,2
Уран естественный, $\rho = 18,4$	5,0	3,15	15,2	11,8±0,1
	4,3	4,02	14,7	15,0±0,3
	6,8	4,02	15,1	12,9±0,3
	7,7	4,02	15,0	12,4±0,2
	8,3	4,66	15,6	13,5±0,2
	8,7	4,66	15,4	13,3±0,2

Критические параметры сборок из полых шаров Pu (δ)-I в сферических отражателях при заполнении центральной полости в активной зоне материалом отражателя

Внешний отражатель и наполнитель центральной полости		Активная зона Pu (δ)-I			Изменение критической массы при заполнении центральной полости*, %	Изменение подкритичности при заполнении центральной полости, в единицах $1000/Q^{**}$
Материал, его плотность, г/см ³	Толщина отражателя, см	Внутренний радиус, см	Плотность, г/см ³	Критическая масса, кг		
Железо, $\rho = 7,50$	11,3	4,02	15,3	15,2±0,2	+0,65	+9
Уран естественный, $\rho = 18,4$	7,7	4,02	15,0	12,3±0,2	-0,81	-14
Полиэтилен, $\rho = 0,90$	8,4	4,66	14,8	12,8±0,3	-21,0	-105

* Знаки «плюс» и «минус» при численных значениях означают соответственно увеличение и уменьшение критической массы при заполнении центральной полости неделяющимся материалом.

** Q – коэффициент умножения от центрального источника.

Таблица 9

Критическая масса сплошных шаров из Pu (δ)-I плотностью 15,7 г/см³ в сборках с отражателем, составленным из двух различных сферических слоев

Активная зона из Pu (δ)-I		Состав и размеры внутреннего слоя отражателя			Толщина наружного слоя из железа, $\rho = 7,5$ г/см ³
Наружный радиус, см	Критическая масса, кг	Материал	Плотность, г/см ³	Толщина слоя, см	
4,96	8,0±0,3	Полиэтилен	0,90	0,8	19,2
4,76	7,1±0,3	Полиэтилен	0,90	1,6	18,6
4,75	7,0±0,3	Полиэтилен	0,90	4,1	16,1
5,08	8,6±0,3	Графит	1,60	1,6	18,3
5,02	8,3±0,3	Графит	1,60	5,9	14,1
5,12	8,8±0,2	Свинец	10,8	2,4	17,5

Таблица 10

Параметры критических сборок с воздушным зазором между активной зоной и отражающей оболочкой

Активная зона в виде полого шара из Pu (δ)-I	Симметричный воздушный зазор между активной зоной и отражателем, см	Толщина сферической оболочки из U _{ест} , см ($\rho = 18,4$ г/см ³)
Внутренний радиус 3,15 см	1,6	12,6
Наружный радиус 6,00 см	1,8	13,8
Критическая масса 11,8±0,2 кг	2,4	20,4

Критическая масса полушаров из Pu (δ)-I, окруженных оболочками из графита, урана естественного и полиэтилена

Активная зона из Pu (δ)-I в виде полушара			Отражатель *			Отношение критических масс полушара и сплошного шара
Наружный радиус, см	Плотность, г/см ³	Критическая масса, кг	Материал	Плотность, г/см ³	Наружный радиус, см	
6,00	15,1	6,8±0,1	Уран естест.	18,4	32,5	1,10
6,75	14,2	9,2±0,2	Графит	1,60	35,0	1,15
6,75	15,1	9,6±0,1	Полиэтилен	0,90	22,0	1,20

* Отражатель состоял из полусферического слоя, прилегающего к внешней полусфере АЗ, и полушара, прилегающего к плоской поверхности АЗ.

Таблица 12

Критические сборки с шарами из Pu (δ)-I и Pu (δ)-II в сферических оболочках из обогащенного урана с содержанием изотопа ²³⁵U 89,6 %

Плутоний			Обогащенный уран		
Состав, плотность, г/см ³	Внутренний радиус, см	Масса, кг	Наружный радиус, см	Плотность, г/см ³	Масса, кг
Pu (δ)-I, $\rho = 15,3$	0	2,00±0,01	8,40	18,4	43,3±0,1
	0	4,15±0,02	7,73	18,4	30,7±0,2
	1,4	6,30±0,02	7,55	18,2	24,4±0,1
	0	9,80±0,03	6,85	18,5	13,0±0,1
	1,4	13,60±0,04	6,78	18,6	7,40±0,1
Pu (δ)-II, $\rho = 15,5$	1,4	6,40±0,03	7,55	18,4	25,5±0,1

Заключение

1. Представлен краткий обзор методики проведения экспериментов в РФЯЦ-ВНИИЭФ по изучению характеристик размножения нейтронов и критических массборок, содержащих металлические делящиеся материалы. Приведены результаты измерений критических масс плутония в α - и δ -фазах с различным изотопным составом, выполненных в РФЯЦ-ВНИИЭФ М. И. Кувшиновым, А. А. Малинкиным, Б. Д. Сциборским, В. А. Давиденко, В. П. Егоровым в 1956–1965 гг. [1].

2. Во ВНИИЭФ были изучены размножающие характеристики и критические параметры около 200борок, содержащих в активной зоне металлический плутоний. При этом использовались детали из сплава плутония в α - и δ -фазах с различным содержанием нуклида ²³⁹Pu: ²³⁹Pu (96,4 %) в δ -фазе, ²³⁹Pu (87,9 %) в δ -фазе, ²³⁹Pu (88,3 %) в α -фазе. Изучались также сборки, в состав которых одновременно входили детали из ²³⁹Pu (95,4 %) в δ -фазе и ²³⁵U (89,6 %).

3. Экспериментальные данные были необходимы для решения задач по ядерной критической безопасности при производстве, хранении и транспортировке деталей из металлического плутония. Многообразие технологических операций, выполняемых при изготовлении деталей, и обращение с этими деталями потребовали проведения многочисленных критических экспериментов.

4. Результаты критических экспериментов использованы для разработки правил по ядерной безопасности при обращении с металлическим плутонием.

5. На основании экспериментальных данных о размножающих характеристикахборок, содержащих делящийся материал (ДМ), были разработаны и внедрены в промышленность защищающие контейнеры. Упаковка ДМ в защищающие контейнеры обеспечивает ядерную безопасность при произвольном их размещении в любом количестве. Это радикально повысило ядерную безопасность при хранении и транспортировке металлического плутония.

6. Параметры критических сборок использовались также для верификации ядерных констант. Часть полученных данных о сравнении расчетов с экспериментами включена в Международный справочник по ядерной безопасности [4] и в информационный материал МАГАТЭ [5].

7. Проведенный недавно в РФЯЦ-ВНИИЭФ (с применением современных программ метода Монте-Карло и международных библиотек оцененных ядерных констант) анализ точности ядерно-физической информации для некоторых из упомянутых в настоящей статье критических сборок показал хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных [2]. Это свидетельствует о том, что содержащаяся в статье информация актуальна и в настоящее время.

Представляется целесообразным провести подобный расчетный анализ точности ядерно-физической информации для всех экспериментально изученных ранее во ВНИИЭФ критических сборок с целью возможности использования ее в качестве benchmark (тестовых) данных.

Список литературы

1. Kuvshinov M. I., Voinov A. M., Zagrafov V. G. The History of Works on Nuclear Criticality in RFNC-VNIIEF. Proceedings of the Fifth International Conference on Nuclear Criticality Safety. – Albuquerque, New Mexico, USA, 1995.

2. Кувшинов М. И., Колесов В. Ф. Нейтронные характеристики критической сборки из ^{239}Pu в δ -фазе без отражателя // *Фундаментальные свой-*

ства плутония. XI Международный семинар. Тезисы. – Снежинск. 2011 г. С. 224.

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 г., вып. 2/3, с. 142–149.

4. Nuclear Energy Agency, NEA Nuclear Science Committee, Organization for Economic Co-Operation and Development, International Handbook of Evaluated Critical Safety Benchmark Experiments, V. I–VII., Paris, France, 2006. M. V. Gorbatenko, V. P. Gorelov, V. P. Yegorov, V. G. Zagrafov, A. N. Zakharov, V. I. Il'yin, M. I. Kuvshinov, A. A. Malinkin, V. I. Yuferev. Volume I, PU-MET-FAST: 022-032;35-36:39-41; Volume VI, MIX MET-FAST:009-010.

5. Kuvshinov M. I., Gorelov V. P., Egorov V. P., Il'yin V. I. Measurements of Critical Parameters of ^{239}Pu and ^{235}U Spherical Assemblies, Which Contain Nickel as a Reflector and Filler of the Central Cavity, for the Purpose of Nuclear Data testing. Final Report Research Contract 10079. IAEA, INDC, VIENNA, December 1999.

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. 3–11.