

УДК 621.039

Критические эксперименты на сборках с металлическим плутонием, выполненные в РФЯЦ-ВНИИЭФ

С. В. Воронцов, М. И. Кувшинов

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 массборок из 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.

Введение

Знание критических масс и характеристик размножения нейтроновборок, содержащих металлический плутоний, необходимо для определения условий ядерной безопасности (ЯБ) при производстве, хранении и транспортировке как 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, начали систематически проводиться в РФЯЦ-ВНИИЭФ в 1950-х гг. [1]. При этом измерялись все основные ядерно-физические параметры РС: реактивность (подкритичность), распределение плотности различных 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 приведен 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 %) [3].

Исследовались сборки из металлического плутония без отражателя и с отражающими обочками 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.

Схематическое изображение современного электромеханического стенда установки ФКБН-2М представлено на рис. 1. Критическая система собирается на стенде в виде двух заведомо подкритических блоков на безопасном расстоянии друг от друга. Конструкция стенда и его система управления обеспечивают возможность дистанционного сближения этих блоков с целью образования критической конфигурации сборки.

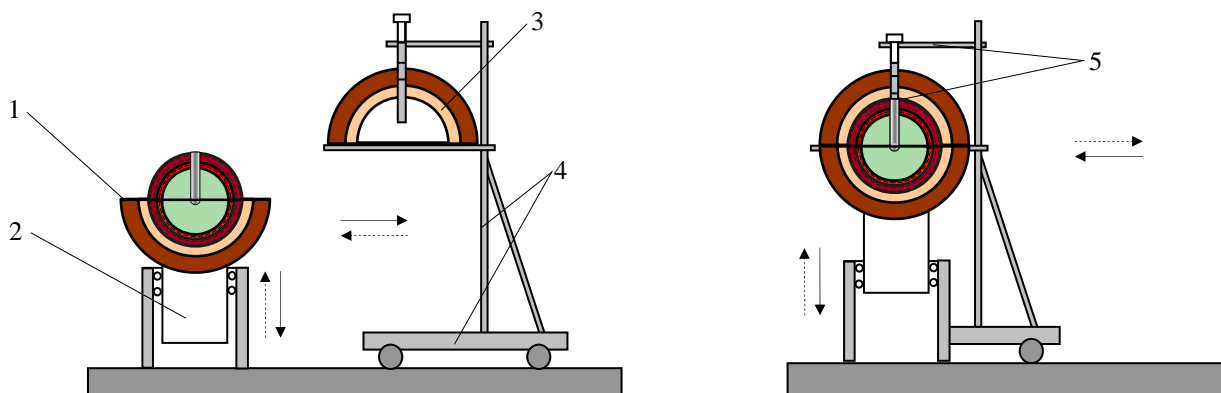


Рис. 1. Схематическое изображение электромеханического стенда установки ФКБН-2М: 1 – нижний блок РС; 2 – опора, перемещаемая в вертикальном направлении; 3 – верхний блок РС; 4 – опора, перемещаемая в горизонтальном направлении; 5 – устройство загрузки центрального канала

На рис. 2 показан стенд ФКБН-2М с размножающей сборкой в экспериментальном зале. Для реализации критических экспериментов установка ФКБН-2М укомплектована большим набором деталей (в основном полусферической формы) из делящихся и инертных конструкционных материалов (рис. 3). На рис. 4 изображена полномасштабная модель критической сборки из ^{239}Pu в α -фазе.



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

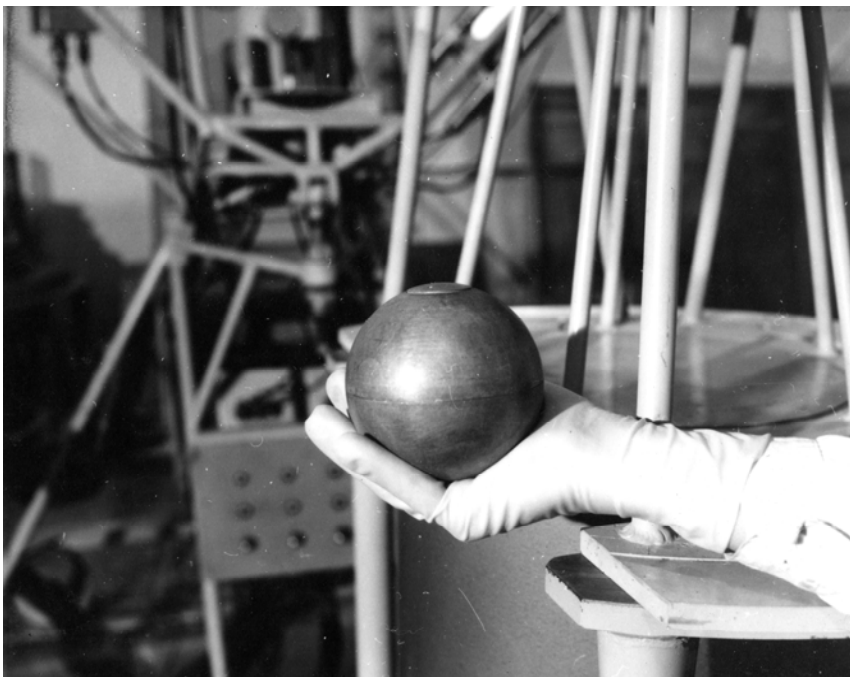


Рис. 4. Полномасштабная модель критической сборки из ^{239}Pu в α -фазе

Основным измеряемым в эксперименте параметром 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.

Величина, обратная коэффициенту умножения, $\Delta = 1/Q$ называется подкритичностью и характеризует близость сборки к критическому состоянию (в критическом состоянии $\Delta = 0$).

В работе применялся источник нейтронов, имеющий состав $\text{Po} + \text{B}_4\text{C} + \text{CaF}_2$, 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, толщины отражателя, расстояния между двумя частями сборки, возмущения подкритичности малым образцом плутония и др.). В большинстве случаев экспериментально подбирались сборки, близкие к критическим, для которых $\Delta < 0,01$. При этом масса делящегося материала 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 A_3 и отражателя. Для удобства использования (например, для построения зависимости критической массы от толщины отражающей оболочки) прямые экс-

периментальные 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 такой же, как и в опыте, а плотность принималась равной нормальной плотности материала оболочки. Пересчет производился в односкоростном приближении методом сферических гармоник. Проверка правильности расчета проводилась 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 металлический плутоний. В качестве отражателя в критических сборках использовались: вода, полиэтилен, плексиглас, медь, графит, сталь, дюралюминий, бериллий, окись бериллия, естественный уран, ^{238}U , бетон, свинец, вольфрам, никель, V_4C , молибден, титан, V_4C + полиэтилен, диффузионное масло, цирконий, кадмий + полиэтилен, четырехфтористый углерод, гидрид лития и др. Отражающая оболочка содержала один или два из указанных материалов и либо вплотную прилегала к АЗ, либо 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. 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.

Таблица 1

Основные компоненты сплавов плутония [4]

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

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, 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, $\rho = 18,4$	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, $\rho = 0,91$	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, $\rho = 1,60$	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, $\rho = 2,55$	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, $\rho = 7,50$	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	–

Примечание: * внутренний радиус АЗ во всех сборках был равен 1,4 см; внутренний радиус отражателя равен наружному радиусу АЗ.

Таблица 4

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

Материал отражателя, его плотность, г/см ³	Толщина отражателя, см	Критическая масса, кг	Материал отражателя, его плотность, г/см ³	Толщина отражателя, см	Критическая масса, кг
Бериллий, $\rho = 1,84$	1,5	11,5±0,1	Плексиглас, $\rho = 1,20$	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			
Окись 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

Материал отражателя, его плотность, г/см ³	Толщина отражателя, см	Критическая масса, кг	Материал отражателя, его плотность, г/см ³	Толщина отражателя, см	Критическая масса, кг
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	

Примечание: * слой Cd толщиной ~0,5 мм (или В₄С толщиной ~8 мм) расположен между АЗ 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 естественного урана 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

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

Окончание табл. 6

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

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	$17,7 \pm 0,3$
	34,5	3,15	15,2	$11,8 \pm 0,3$
	10,4	4,02	15,3	$15,5 \pm 0,2$
Графит, $\rho = 1,55$	2,6	3,15	15,3	$17,7 \pm 0,3$
	4,3	3,15	14,1	$16,3 \pm 0,3$
	15,9	3,15	15,2	$11,8 \pm 0,2$
	29,3	3,15	15,3	$10,1 \pm 0,4$
	46,6	3,15	15,3	$9,8 \pm 0,5$
	10,7	4,02	15,3	$15,5 \pm 0,2$
	28,5	4,02	14,9	$12,4 \pm 0,3$
	28,5	4,66	15,3	$13,9 \pm 0,3$
37,7	4,66	15,3	$13,2 \pm 0,3$	
Дюралюминий, $\rho = 2,55$	4,3	3,15	15,3	$17,7 \pm 0,2$
Полиэтилен, $\rho = 0,93$	5,0	3,15	15,8	$12,3 \pm 0,2$
	9,7	3,15	15,0	$11,6 \pm 0,2$
	4,4	4,02	15,3	$15,5 \pm 0,2$
	8,4	4,66	16,2	$14,0 \pm 0,3$
	15,7	4,66	15,3	$13,2 \pm 0,2$
Уран естественный, $\rho = 18,4$	5,0	3,15	15,2	$11,8 \pm 0,1$
	4,3	4,02	14,7	$15,0 \pm 0,3$
	6,8	4,02	15,1	$12,9 \pm 0,3$
	7,7	4,02	15,0	$12,4 \pm 0,2$
	8,3	4,66	15,6	$13,5 \pm 0,2$
	8,7	4,66	15,4	$13,3 \pm 0,2$

Таблица 8

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, 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 \pm 0,2	+0,65	+9
Уран естественный, $\rho = 18,4$	7,7	4,02	15,0	12,3 \pm 0,2	-0,81	-14
Полиэтилен, $\rho = 0,90$	8,4	4,66	14,8	12,8 \pm 0,3	-21,0	-105

Примечания: * «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 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 \pm 0,3	Полиэтилен	0,90	0,8	19,2
4,76	7,1 \pm 0,3	Полиэтилен	0,90	1,6	18,6
4,75	7,0 \pm 0,3	Полиэтилен	0,90	4,1	16,1
5,08	8,6 \pm 0,3	Графит	1,60	1,6	18,3
5,02	8,3 \pm 0,3	Графит	1,60	5,9	14,1
5,12	8,8 \pm 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 естественного урана, 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 \pm 0,2 кг	2,4	20,4

Таблица 11

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

Примечание: * 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 и плотность, г/см ³	Внутренний радиус, см	Масса, кг	Наружный радиус, см	Плотность, г/см ³	Масса, кг
Pu(δ)-I ρ = 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 ρ = 15,5	1,4	6,40±0,03	7,55	18,4	25,5±0,1

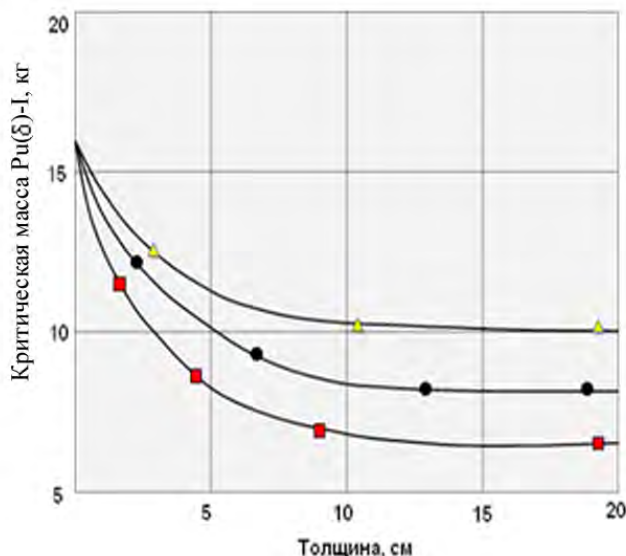


Рис. 5. Зависимость критической массы шара из Pu(δ)-I от толщины отражателя: ■ – U-238; ● – Fe; ▲ – Al

Заключение

Представлен краткий обзор методики проведения экспериментов в РФЯЦ-ВНИИЭФ по изучению характеристик размножения нейтронов и критических масс сборок, 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].

Во ВНИИЭФ были изучены размножающие характеристики и критические параметры около 200 сборок, содержащих в активной зоне металлический плутоний. При этом использовались детали из сплава 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 сборки, в состав которых одновременно входили детали из ^{239}Pu (95,4 %) в δ -фазе и ^{235}U (89,6 %). Экспериментальные данные были необходимы для решения задач ядерной критической безопасности при производстве, хранении и транспортировке деталей из металлического плутония.

Многообразие технологических операций, выполняемых при изготовлении деталей и обращении с ними, потребовало проведения многочисленных критических экспериментов, результаты которых использованы для разработки правил по ядерной безопасности при обращении с металлическим плутонием.

На основании экспериментальных данных о размножающих характеристиках сборок, содержащих ДМ, были разработаны и внедрены в промышленность защищающие контейнеры, обеспечивающие ядерную безопасность при хранении и транспортировке металлического плутония.

Параметры критических сборок использовались для верификации ядерных констант. Часть сравнительных расчетных и экспериментальных данных включена в Международный справочник по ядерной безопасности [4] и информационный материал МАГАТЭ [5].

Выполненный 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 данной статье критических сборок показал хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных [2], что свидетельствует об актуальности представленной информации.

Подобный расчетный анализ точности ядерно-физической информации был бы целесообразен для всех экспериментально изученных ранее во ВНИИЭФ критических сборок с целью возможности использования ее в качестве бенчмарк-данных.

Список литературы

1. Kuvshinov M. I., Voinov A. M., Zagrafov V. G. The history of works on nuclear criticality in RFNC-VNIIEF // Proc. of the 1st Int. conf. on nuclear criticality safety. Albuquerque, New Mexico, USA, September 17–21, 1995.
2. Кувшинов М. И., Колесов В. Ф. Нейтронные характеристики критической сборки из ^{239}Pu в δ -фазе без отражателя // Тез. докл. XI Межд. семинара «Фундаментальные свойства плутония». – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2011. С. 224.
3. Кувшинов М. И., Воронцов С. В., Горелов В. П. и др. Тестовые критические эксперименты на установке ФКБН-2М // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. 2000. Вып. 2/3. С. 142–149.

4. International Handbook of Evaluated Critical Safety Benchmark Experiments. Vol. I-VII. – Paris, 2006.
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.

Critical Experiments on the Assemblies with Plutonium Metal Carried out in RFNC-VNIIEF

S. V. Vorontsov, M. I. Kuvshinov

Reported is a brief review of a procedure for experiments on studying of neutron characteristics of neutron multiplication and critical masses of assemblies, containing metal fissile materials to be performed in RFNC-VNIIEF. Presented are measurement results of critical masses of assemblies made of plutonium in α - and δ -phases with different isotope composition, performed in RFNC-VNIIEF by M. I. Kuvshinov, A. A. Malinkin, B. D. Stsiborskii, V. A. Davidenko, V. P. Yegorov in 1956–1965.