

КРИТИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ, ВЫПОЛНЕННЫЕ В РФЯЦ-ВНИИЭФ НА СБОРКАХ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ УРАНОМ, ОБОГАЩЕННЫМ ИЗОТОПОМ ^{235}U

CRITICAL EXPERIMENTS ON ASSEMBLIES WITH METALLIC URANIUM ENRICHED OF ISOTOPE OF ^{235}U CARRIED OUT AT RFNC-VNIIEF

С. В. Воронцов, Э. А. Гуменных, М. И. Кувшинов
S. V. Vorontsov, E. A. Gumennykh, M. I. Kuvshinov

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров Нижегородской обл.

Federal Nuclear Center of Russia – All-Russian Research Institute of Experimental Physics

Представлен краткий обзор методики проведения экспериментов в РФЯЦ-ВНИИЭФ по изучению характеристик размножения нейтронов и критических масс сборок, содержащих металлический уран. Приведены результаты измерений критических масс урана с различным обогащением, выполненных в РФЯЦ-ВНИИЭФ.

It's presented 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 uranium masses with various isotopic composition carried out at RFNC-VNIIEF.

Знание критических масс и характеристик размножения нейтронов сборок, содержащий металлический уран, 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.

В докладе представлен краткий обзор экспериментов, выполненных в РФЯЦ-ВНИИЭФ, по изучению характеристик размножения нейтронов и критических масс для большого числа сборок, содержащих в активной зоне (АЗ) металлический уран с различным обогащением. Эти эксперименты были выполнены в РФЯЦ-ВНИИЭФ М. И. Кувшиновым, А. А. Малинкиным, Б. Д. Сциборским, В. А. Давиденко, В. П. Егоровым [1].

Методика экспериментов

Эксперименты на сборках с металлическими делящимися материалами проводились на специальном стенде ФКБН (физический котел на быстрых нейтронах) [2], [3]. На стенде реализовано пространственное разнесение частей РС по горизонтали и вертикали. Нижняя часть РС собирается на столе, который перемещается в вертикальном направлении. Верхняя часть РС собирается на каретке, которая перемещается в горизонтальной плоскости. В процессе дистанционного сведения частей РС каретка с верхней частью РС накатывается в положение над нижней частью РС, затем производится подъем стола до смыкания нижней и верхней частей.

В качестве основного измеряемого в эксперименте параметра служил коэффициент умножения (Q). Он определялся по соотношению $Q = N / N_0$, где N – поток нейтронов утечки из сборки с ураном, в центре которой (в полости, имеющейся в активных деталях) размещён изотопный источник нейтронов; N_0 – поток нейтронов утечки из макетной сборки в которой уран заменен «инертным» материалом (свинцом или сталью), и в центре размещён тот же изотопный источник нейтронов. Применялся так называемый «имитирующий» источник состава $(\text{Po} + \text{B}_4\text{C} + \text{CaF}_2)$, который приближенно воспроизводит спектр нейтронов деления.

Обратная величина коэффициента умножения $\Delta = 1000 / Q$, называемая подкритичностью, характеризует близость сборки к критическому состоянию, в критическом состоянии $\Delta = 0$.

Критическое состояние определялось путем линейной экстраполяции к нулю зависимости подкритичности от изменяемого параметра сборки (радиуса АЗ, толщины отражателя, расстояния между двумя частями сборки, возмущения подкритичности малым образцом урана и др.). В большинстве случаев экспериментально подбирались сборки, близкие к критическим, для которых значения Δ были такими, чтобы масса ДМ в сборке отличалась от критической массы ($M_{\text{кр}}$) менее чем на 1 %.

Результаты экспериментов

Были исследованы характеристики РС из деталей полусферической формы из урана с обогащением по ^{235}U , равным 89,6 %, 75 %, 36,5 %, 9,5 % и 89 % с молибденом. Далее по тексту обозначение, например, $^{235}\text{U}(36,5 \%)$ будет означать уран, содержащий 36,5 % изотопа уран-235. Некоторые комплекты АЗ имели медно-никелевое покрытие. Для удобства учета в расчетах балластные примеси объединены в три основные группы – С, Fe, W. Эти группы объединяют значительное число примесных изотопов со сравнительно малым, средним и большим атомным весом. В табл. 1 в качестве примера приведены составы комплектов АЗ из $^{235}\text{U}(36,5 \%)$, $^{235}\text{U}(89,6 \%)$, $^{235}\text{U}(89 \%)$ с молибденом.

Таблица 1

Состав комплектов АЗ

Используемый комплект АЗ	Массовая доля, %									
	^{234}U	^{235}U	^{236}U	^{238}U	Балластные примеси					
					С	Fe	W	Mo	Cu	Ni
$^{235}\text{U}(36,5\%)$	0,33	36,44	0,23	62,84	0,1	0,044	0,016	-	-	-
$^{235}\text{U}(89,6\%)$	1,07	89,4	0,25	8,97	0,11	0,1	0,1	-	-	-
$^{235}\text{U}(89\%)+\text{Mo}$	1,00	80,29	0,20	8,77	0,14	0,115	0,105	9,01	0,14	0,23

В данной работе представлены сферически-симметричные сборки в виде сплошного или полого шара (рис. 1А) и сферически-несимметричные сборки с АЗ в виде полусферического слоя (рис. 1Б).

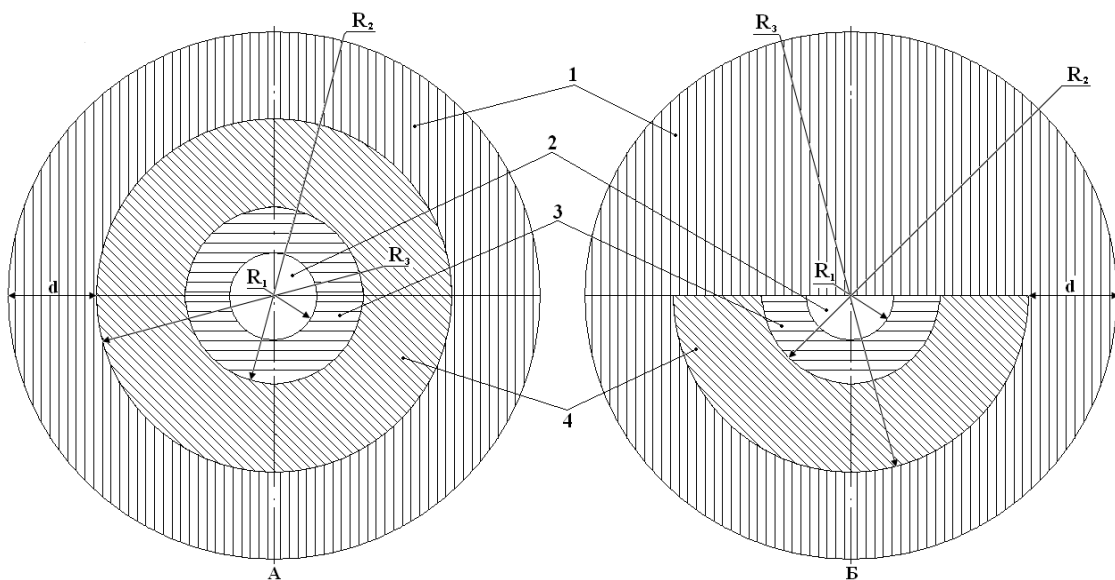


Рис. 1. Схематический разрез сборки: А – сферически-симметричная сборка; Б – сферически-несимметричная сборка. 1 – отражатель; 2 – воздушная полость; 3 – заполнитель; 4 – АЗ; R_1 – внутренний радиус заполнителя; R_2 – внутренний радиус АЗ; R_3 – внешний радиус АЗ; d – толщина отражателя

В сборках первого типа (рис. 1А) отражатель имел форму сферического слоя и вплотную прилегал к АЗ (внешний радиус АЗ равен внутреннему радиусу отражателя). В сборках второго типа (рис. 1Б) отражатель составлялся из полусферического слоя, плотно прилегавшего к полусферической поверхности АЗ, и полушария, прилегавшего своей плоскостью к экваториальной плоскости АЗ. Центральная полость (шаровая – в сборках первого типа и полушаровая – в сборках второго типа) либо ничем не заполнялась, либо заполнялась (частично или полностью) неделяющимся материалом. Обозначения размеров на рисунках и в таблицах – в соответствии с рис. 1.

Результаты, полученные в опытах для сферических РС без заполнителей и без отражателей

На рис. 2 приведена зависимость подкритичности от внешнего радиуса для «голых» шаров из урана с различным обогащением. Критические массы шаров, полученные экстраполяцией к 0 соответствующих зависимостей рис. 2 с последующим пересчетом к сплошным шарам и нормальной плотности ($18,8 \text{ г/см}^3$) материала, составляют 54,6 кг, 75 кг, 280 кг, 4800 кг для $^{235}\text{U}(89,6 \%)$, $^{235}\text{U}(75 \%)$, $^{235}\text{U}(36,5 \%)$, $^{235}\text{U}(9,5 \%)$, соответственно. На рис. 3 приведена зависимость подкритичности шаров с АЗ из $^{235}\text{U}(89,6 \%)$ без отражателя. Критические параметры «голых» сферических сборок с АЗ из урана представлены в табл. 2.

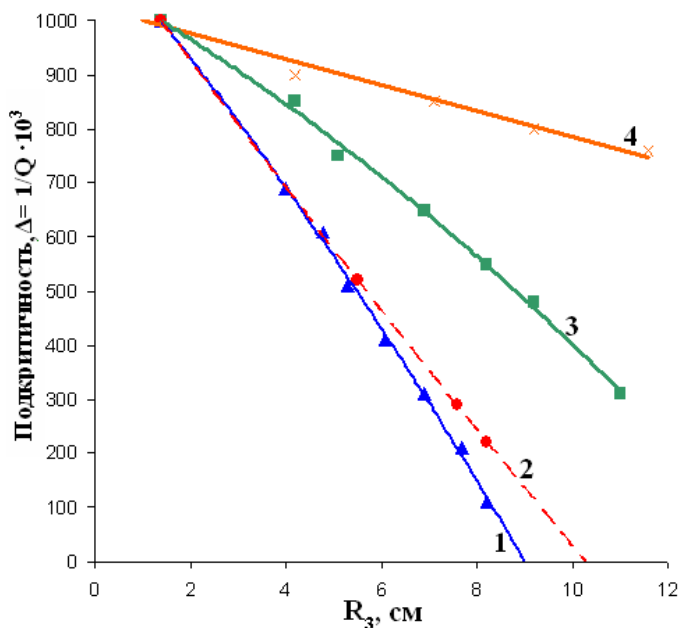


Рис. 2. Подкритичность полых шаров из обогащенного урана без отражателя: 1 – $^{235}\text{U}(89,6\%)$, $R_2 = 1,4 \text{ см}$; 2 – $^{235}\text{U}(75\%)$, $R_2 = 1,4 \text{ см}$; 3 – $^{235}\text{U}(36,5\%)$, $R_2 = 1,4 \text{ см}$; 4 – $^{235}\text{U}(9,5\%)$, $R_2 = 1 \text{ см}$

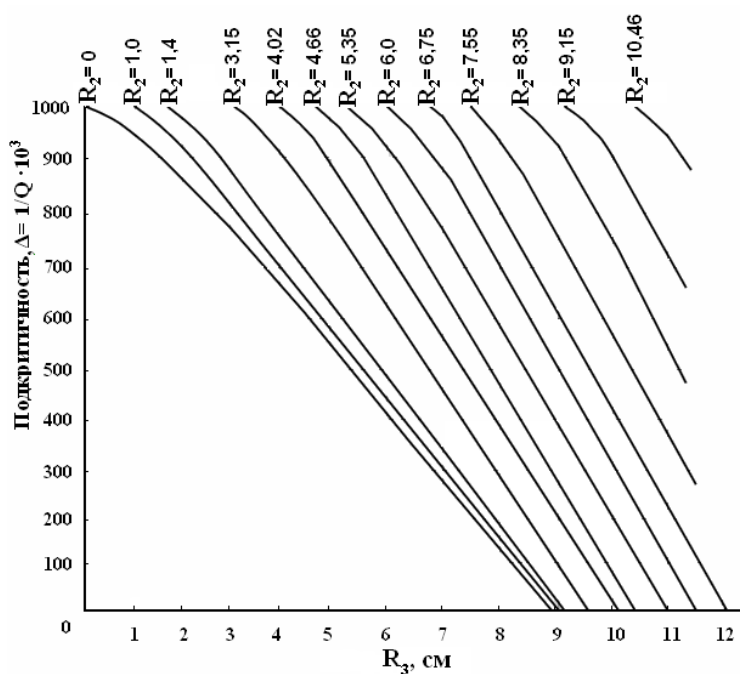


Рис. 3. Подкритичность шаров с АЗ из $^{235}\text{U}(89,6\%)$ без отражателя

Критические параметры сферических сборок из урана без отражателя

Используемый комплект АЗ	АЗ			
	Внутренний радиус, см	Внешний радиус, см	Средняя плотность, г/см ³	Масса, кг
²³⁵ U (36,5%)	0,0	15,071	18,608	266,83
²³⁵ U (36,5%)	1,4	15,101	18,608	268,62
²³⁵ U (36,5%)	2,0	15,195	18,610	272,87
²³⁵ U (36,5%)	6,0	16,30	18,586	320,0
²³⁵ U (89,6%)	0,00	9,277	18,091	60,502
²³⁵ U (89,6%)	1,00	9,153	18,397	59,015
²³⁵ U (89%)+Mo	1,70	11,80	14,80	101,000

Результаты, полученные в экспериментах для сферических сборок без заполнителей с отражающими оболочками

Была проведена большая серия экспериментов по подбору материала поглощающей оболочки, ее толщины, расположения относительно ДМ и других параметров для различных масс ДМ. На основании этих экспериментов были выданы рекомендации по параметрам «защитающих контейнеров», которые в начале 1960-х годов были разработаны во ВНИИЭФ и внедрены для хранения и транспортировки ДМ в атомной промышленности России [4].

В качестве отражателя в критических сборках использовались конструкционные материалы, широко используемые в технике: бериллий, графит, полиэтилен ((CH₂)_n), плексиглас, сталь, дюралюминий, окись бериллия, вода, тяжелая вода, медь, свинец, гидрид лития, природный ²³⁸U, диффузионное масло, бетон, четыреххлористый углерод и др. Для каждого материала отражателя измерены критические параметры сборок при трех-четыре толщинах отражателя. В качестве примера на рис. 4 представлены зависимости критических масс сплошных шаров с АЗ из ²³⁵U(89,6 %) от толщины отражателя.

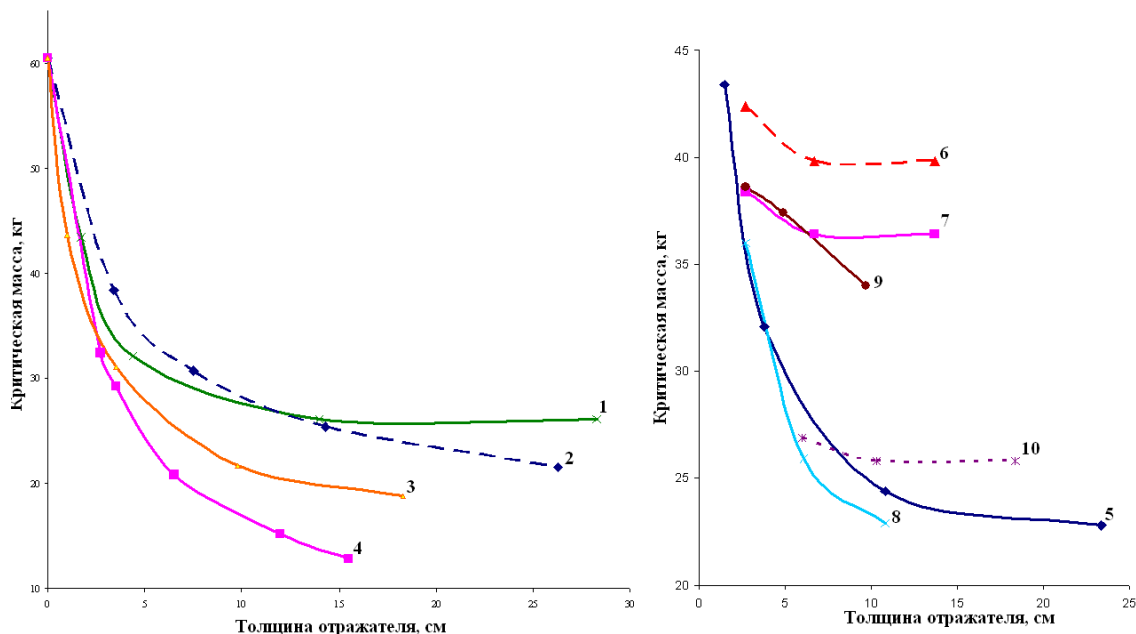


Рис. 4. Зависимость критических масс шаров с АЗ из ²³⁵U(89,6 %) от толщины отражателя: 1 – вода; 2 – графит; 3 – природный уран; 4 – бериллий; 5 – полиэтилен; 6 – В₄С (8 мм) + (CH₂)_n; 7 – Cd (0,5 мм) + (CH₂)_n; 8 – плексиглас; 9 – Cd (0,5 мм) + плексиглас; 10 – диффузионное масло

Из рис. 4 следует, что отражатель из воды и полиэтилена толщиной 14 см по действию на реактивность сборки практически соответствует бесконечному отражателю. Из других отражателей ближе всего подходят к бесконечным отражателям из кадмия или карбида бора с полиэтиленом

толщиной 6,7 см; диффузионного масла толщиной 10,3 см; графита толщиной 32,7 см. В сборках с кадмием использовался кадмий (плотность $8,6 \text{ г/см}^3$) толщиной $\sim 0,5 \text{ мм}$. В сборках с карбидом бора (плотность $1,0 \text{ г/см}^3$) использовался карбид бора толщиной $\sim 8 \text{ мм}$. Кадмий или карбид бора располагались между АЗ и отражателем

Результаты, полученные в опытах для сферическихборок с заполнителями с отражающими оболочками

Большое число измерений было проведено с целью изучения влияния заполнения центральной полости в АЗ различными неделяющимися материалами на критичность сборки. В качестве заполнителя в критических сборках использовались бериллий, графит, полиэтилен, сталь, дюралюминий, ^{238}U и др. Слой заполнителя всегда вплотную прилегал к внутренней поверхности АЗ (внешний радиус заполнителя равен внутреннему радиусу АЗ). По результатам экспериментов можно сделать вывод, что влияние заполнения центральной полости в АЗ неделящимися материалом на критическую массу зависит от размеров полости, материала заполнения и его геометрии. Сталь и дюралюминий, помещенные в центре АЗ, действуют в основном как слабые поглотители, увеличивающие значения критической массы. Бериллий и графит, замедляя нейтроны без существенного поглощения, уменьшают критическую массу. При полном заполнении центральной полости природным ураном критическая масса несколько уменьшается по сравнению с ее значением для полой сборки, если радиус полости не превышает $\sim 15 \text{ см}$, и имеет тенденцию к увеличению при больших размерах центральной полости в АЗ. Аналогичный характер носит изменение критической массы при полном заполнении центральной полости полиэтиленом: до радиуса полости $\sim 15 \text{ см}$ критическая масса уменьшается, при большем размере полости – увеличивается. Однако, в отличие от природного урана, полиэтилен, помещенный в центре АЗ, значительно изменяет критическую массу. Это изменение весьма существенно зависит от степени заполнения центральной полости. На рис. 5 приведены зависимости критической массы полых шаров из ^{235}U (89,6 %) с заданным внутренним радиусом АЗ от степени заполнения центральной полости полиэтиленом. На этом рисунке видно, что минимальная критическая масса соответствует толщине слоя полиэтилена, прилегающего к внутренней поверхности АЗ, равной $\sim 2,5\text{--}3 \text{ см}$.

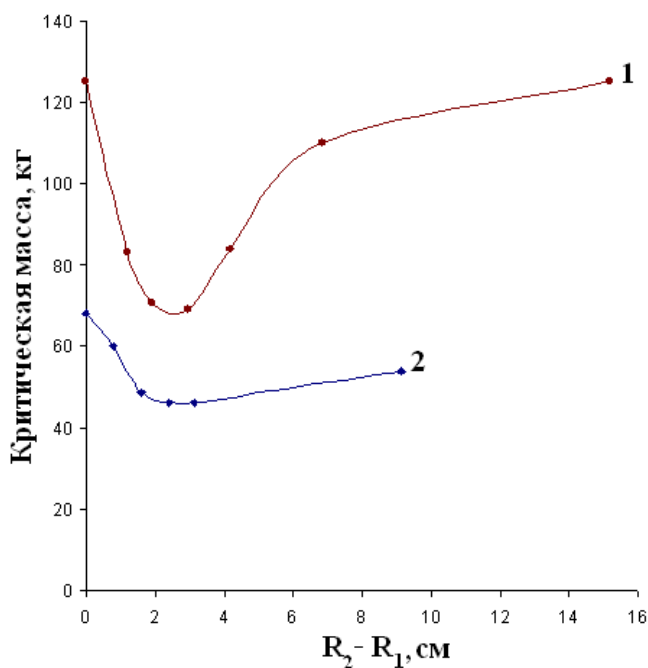


Рис. 5. Зависимости критической массы полых шаров из ^{235}U (89,6 %) в отражателе из полиэтилена от толщины сферического слоя заполнителя из полиэтилена ($R_2 - R_1$), прилегающего к внутренней поверхности АЗ: 1 – дляборок с внутренним радиусом АЗ 15,2 см и наружным радиусом отражателя – 30 см; 2 – дляборок с внутренним радиусом АЗ 9,15 см и наружным радиусом отражателя – 18 см

Результаты, полученные в опытах для сборок с заполнителем из полиэтилена, качественно легко объяснить. Уменьшение критической массы при заполнении центральной полости полиэтиленом связано с процессом замедления нейтронов и, как следствие этого, значительным увеличением эффективного сечения деления ^{235}U в АЗ. Увеличение критической массы очевидно связано с поглощением нейтронов заполнителем. Двойная толщина слоя полиэтилена, соответствующая минимальной критической массе, приблизительно равна длине замедления нейтронов спектра деления в полиэтилене (5–6 см). При больших размерах центральной полости и при толщине слоя заполнителя больше 3 см, существенную роль начинают играть процессы поглощения нейтронов, что и приводит к увеличению критической массы. Экспериментальные данные для сборок с различными отражателями позволяют также сделать вывод, что характер влияния на критическую массу заполнения центральной полости АЗ неделяющимся материалом практически не зависит от материала и толщины внешнего отражателя.

Результаты, полученные в опытах для сферически-несимметрических сборок с заполнителями и с отражающими оболочками

Для сборок с АЗ из ^{235}U (89,6 %) в виде полусферического слоя с отражателем из полиэтилена при заданном внутреннем радиусе активной зоны R_2 , равном или меньшем 9,15 см, минимальная критическая масса соответствует сборкам, в которых объем между внутренней поверхностью активного слоя и отражателем в виде полушара полностью заполнен полиэтиленом. Для сборки с внутренним радиусом активного слоя 15,2 см минимальное значение критической массы имеет место при частичном заполнении этого объема. Оптимальная, соответствующая минимальной критической массе, толщина полусферического слоя полиэтилена, прилегающего к внутренней поверхности АЗ, составляет 3–4 см.

Заключение

Представлен краткий обзор методики проведения экспериментов в РФЯЦ-ВНИИЭФ по изучению характеристик размножения нейтронов и критических масс сборок, содержащих металлический уран. Приведены результаты измерений критических масс урана с различным обогащением, выполненных в РФЯЦ-ВНИИЭФ М. И. Кувшиновым, А. А. Малинкиным, Б. Д. Сциборским, В. А. Давиденко, В. П. Егоровым [1].

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

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

На основании экспериментальных данных о размножающих характеристиках сборок, содержащих 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 урана.

Параметры критических сборок использовались также для верификации ядерных констант. Часть полученных данных о сравнении расчетов с экспериментами включена в Международный справочник по ядерной критической безопасности [5] и в Информационные материалы комитета по ядерным данным МАГАТЭ [6].

Представляется целесообразным провести подробный расчетный анализ точности ядерно-физической информации для всех экспериментально изученных ранее во ВНИИЭФ критических сборок с целью возможности использования их 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-VNIEEF. Proceedings of the Fifth International Conference on Nuclear Criticality Safety. Albuquerque, New Mexico, USA, 1995.

2. Воинов А. М., Егоров В. П., Запольский А. Е., Захаров А. Н., Кувшинов М. И., Пешехонов Д. П. Стенд для исследования нейтронно-физических характеристик простых критических сборок // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1992. Вып.2. С. 21–29.
3. Воинов А. М., Кувшинов М. И. Критмассовые стенды и исследовательские импульсные ядерные реакторы. Атом, № 19. 2002. С. 11–13.
4. Заграфов В. Г., Кувшинов М. И., Юфев В. И. Обеспечение ядерной безопасности при работах с делящимися материалами на предприятиях ядерно-оружейного комплекса Минатома. Теоретики ВНИИЭФ прошлое и настоящее. Саров. 2003. С. 60–64.
5. International Handbook of Evaluated Critical Safety Benchmark Experiments. – NEA/NSC/DOC(95)03/I-IX, Organization for Economic Cooperation and Development – Nuclear Energy Agency (OECD-NEA), September 2006.
6. 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.
7. Абрамов А. И., Казанский Ю. А., Матусевич Е. С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985.