

## РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ КРИТМАССОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В РФЯЦ-ВНИИТФ

Ю. А. Соколов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», г. Снежинск Челябинской обл.

Обобщен и систематизирован опыт работы РФЯЦ-ВНИИТФ за период с 1970 г. в области критмассовых измерений. Рассмотрены особенности постановки на стенде для критическихборок РФЯЦ-ВНИИТФ ФКБН (ФКБН-М, ФКБН-2) критмассовых экспериментов benchmark типа. Приводится краткое описание ряда критических экспериментов, выполненных в разное время на стенде ФКБН со сферическими и цилиндрическими сборками из металлических урана и плутония. Обсуждаются вопросы необходимости и путей сохранения первичной экспериментальной информации по критсборкам.

**Ключевые слова:** критическая сборка, металлический уран, металлический плутоний, отражатель, метод Монте-Карло, эффективный коэффициент размножения, библиотеки ядерных данных.

**DEVELOPMENT OF CRITICAL MASS MEASUREMENT TECHNIQUES IN RFNC-VNIITF / YU. A. SOKOLOV** // The RFNC-VNIITF experience in the field of critical mass measurements since 1970 was summarized and systematized. The features of critical mass benchmark experiments which were assembled on the critical mass facility RFNC-VNIITF FKBN (FKBN-M, FKBN-2) are discussed. A brief description of the number of critical mass experiments which were done at different times is given. These experiments were hold on the FKBN facility with spherical and cylindrical assemblies from metallic uranium and plutonium. The questions of necessity and the ways of primary experimental critical mass assemblies information conservation are discussed.

**Key words:** critical assembly, metallic uranium, metallic plutonium, reflector, Monte-Carlo method, efficient multiplication factor, nuclear data libraries.

Со времени образования института и до настоящего времени критмассовые измерения являются важным направлением экспериментальных исследований в отделении экспериментальной физики РФЯЦ-ВНИИТФ. Первый стенд для критмассовых измерений РФЯЦ-ВНИИТФ – физический котел быстрых нейтронов (ФКБН) был введен в эксплуатацию в марте 1958 г. По принципу работы этот стенд в значительной степени был похож на свой прототип – стенд для критическихборок ФКБН из Арзамаса-16 (РФЯЦ-ВНИИЭФ), созданный в 1955 г. ФКБН создавался под непосредственным руководством начальника физического сектора В. Ю. Гаври-

лова коллективом во главе с Л. Б. Порецким. ФКБН представляет собой дистанционно управляемый механический стенд и предназначен для медленного сближения до критического состояния двух частей содержащей делящийся материал исследуемой размножающей системы (РС).

В первые годы после ввода стенда ФКБН в эксплуатацию экспериментальные исследования на стенде проводились, в основном, с макетами ядерных зарядов или их фрагментов и были направлены на повышение точности расчетов характеристик ядерного оружия. Большой объем работ был также связан с экспериментальным обоснованием ядерной без-

опасности в ходе работ, связанных с разработкой и испытаниями ядерного оружия.

Позднее в связи с развитием вычислительной техники появилась потребность в точных критических экспериментах типа benchmark. Простая геометрия и хорошо известный состав сборок позволяют выделить в расчетах погрешность, обусловленную неточностью используемых в расчетах библиотек ядерно-физических констант.

В 1974 г. группой под руководством сотрудника теоретического отделения А. П. Васильева были начаты работы по усовершенствованию использовавшейся в расчетах методом Монте-Карло библиотеки нейтронных констант БАС [1]. В ходе этой работы проводилось тестирование библиотеки БАС по опубликованным на тот момент времени экспериментальным данным. Сравнение расчетов для различных интегральных экспериментов с экспериментальными результатами позволило выявить те реакции и интервалы нейтронного спектра, для которых требовалась коррекция нейтронных данных. Так как опубликованных экспериментальных данных было недостаточно или они были неполными, в институте была разработана специальная программа экспериментальных исследований, включавшая измерения на генераторе 14 МэВ нейтронов спектров нейтронов утечки из сферических образцов делящихся и конструкционных материалов, а также проведение критмассовых измерений на стенде для критическихборок

(СКС) ФКБН с различными по составу и геометрии системами.

Существовавшая на тот момент технология сборки критических систем не обеспечивала требуемой точности измерений: использование массивного поворотного стола для сборки верхней части размножающей системы (РС) (внешний вид стенда показан на рис. 1) создавало трудности при учете его вклада в реактивность исследуемой РС и не позволяло с необходимой точностью осуществлять центрирование верхней части РС относительно нижней.

Для систем без отражателей или с тонкими (~1 см) отражателями заметный, требующий учета вклад в реактивность РС вносили элементы конструкции стенда: опорная труба, на которой крепился поворотный стол, и чашка, в которой собиралась нижняя часть РС.

По этим причинам в 1973 г. было оформлено решение, разрешавшее сборку РС без поворотного стола. Для сборки компактных, небольшого веса систем была разработана ажурная подставка из дюралюминия (рис. 2), практически не вносящая вклад в реактивность собираемой РС. С помощью этой подставки, используя имеющиеся на ней регулировочные винты, можно обеспечивать центрирование верхней части РС относительно нижней и параллельность плоскостей верхней и нижней частей РС с точностью ~ 0,1 мм. Использование для сборки ажурной подставки позволило также уменьшить вклад в реактивность от опорной трубы.

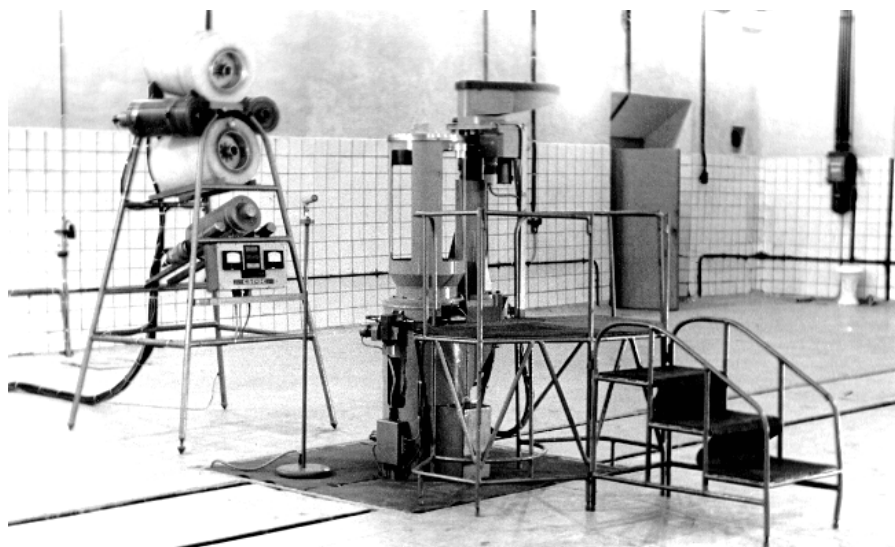


Рис. 1. Стенд ФКБН-М с поворотным столом

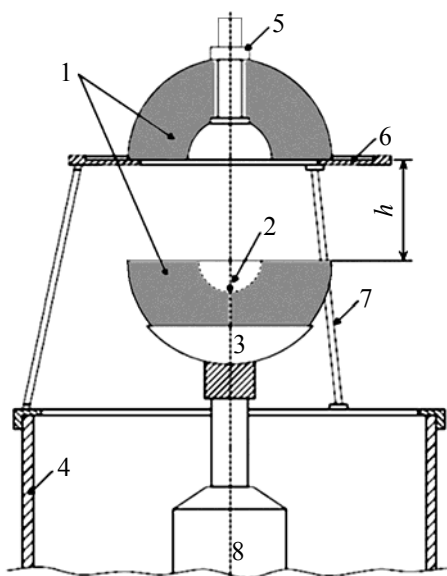


Рис. 2. Схема сферической сборки на подставке из дюралюминия: 1 – активная зона, 2 – источник нейтронов, 3 – медная чашка, 4 – опорная труба, 5 – стяжка, 6 – стальная диафрагма, 7 – подставка из дюралюминия, 8 – подвижный шток

Одной из проблем была сложность учета вклада в реактивность РС, в первую очередь, РС без отражателя, нейтронов, отраженных от стен помещения, в котором располагался критстенд. С целью снижения влияния отраженных нейтронов на результаты измерений при модернизации ФКБН в 1969–1970 гг., сопровождавшейся переносом установки на другую рабочую площадку, были существенно увеличены размеры экспериментального зала (18×12×8 м), в центре которого располагался механический стенд. Стены, пол и потолок зала были покрыты слоем боросодержащего бетона (содержание естественного бора в бетоне – не менее 3 %, толщина слоя – 10 см).

Для проведения критмассовых измерений на СКС ФКБН в 1974 г. имелось два комплекта сферических сборок из металлических высокообогащенного урана и плутония в  $\delta$ -фазе, состоящих из набора полусферических оболочек. Первоначально при сборке РС системы разбивались на две примерно равные части. Верхняя часть РС собиралась на тонкой диафрагме толщиной 2 мм. Анализ результатов критических экспериментов со сборкой из урана показал, что наиболее сложным при описании в расчетах экспериментальной системы являлся учет серповидных зазоров между по-

лусферическими деталями в верхней части РС, возникающих из-за прогиба диафрагмы. Неучет серповидных зазоров в расчетах, по оценкам, приводит к погрешности  $\delta K_{эф} \approx 0,1 \%$ .

В связи с этим при последующих сборках, если это позволяли условия обеспечения безопасности работы, предпочтение отдавалось варианту несимметричного разбиения собираемой РС (рис. 3), когда часть делящегося материала (ДМ) перемещалась из верхней части РС в нижнюю. При этом верхняя часть РС собиралась на кольцевой диафрагме.

В сферической сборке из урана без отражателя серповидные зазоры в верхней части РС устранялись за счет использования стяжки из алюминиевого сплава (рис. 2).

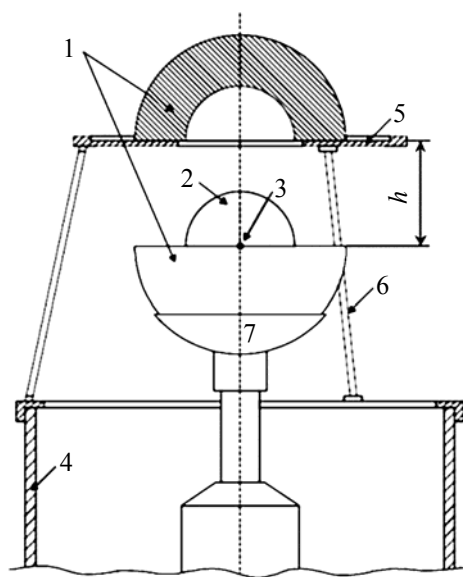


Рис. 3. Схема сферической сборки из урана с отражателем из полиэтилена при несимметричном разбиении РС: 1 – отражатель, 2 – активная зона, 3 – источник нейтронов, 4 – опорная труба, 5 – стальная диафрагма, 6 – подставка из дюралюминия, 7 – медная чашка

В период с 1973 по 1980 гг. на стенде для критических сборок ФКБН-М было собрано около 100 сферических критических систем типа benchmark с активными зонами (АЗ) из высокообогащенных металлических урана и плутония в  $\delta$ -фазе, включая комбинированные АЗ с различным соотношением урана и плутония, без отражателя, с отражателями из бериллия, окиси бериллия, стали, обеднен-

ного урана, алюминия, меди, полиэтилена, боросодержащего полиэтилена, а также с комбинированными отражателями из бериллия, окиси бериллия, стали, обедненного урана в сочетании с полиэтиленом.

Дальнейшее развитие критмассовые эксперименты в РФЯЦ-ВНИИТФ получили при переходе к цилиндрической геометрии измерений.

В начале 1980-х гг. рассматривалась возможность участия института в проекте создания термоядерного реактора. Одним из направлений такой работы могло быть проведение нейтронно-физических расчетов blankets гибридного термоядерного реактора с использованием разработанных в институте программ КЛАН и ПРИЗМА [2].

В 1981 г. по инициативе Е. Н. Аврорина, А. П. Васильева, Л. Б. Порецкого и И. С. Погребова для проведения исследований в целях корректировки констант взаимодействия нейтронов с веществом при энергиях до 14 МэВ была разработана и изготовлена экспериментальная модель blankets гибридного термоядерного реактора – Разборная опытная модель blankets (РОМБ) [3]. Эта модель представляет собой разборный цилиндр из обедненного урана (рис. 4) диаметром 70 см, высотой 90 см, общим весом 6,5 т со средней плотностью 18,75 г/см<sup>3</sup>, состоящий из трех независимых областей: внешней, средней и центральной.

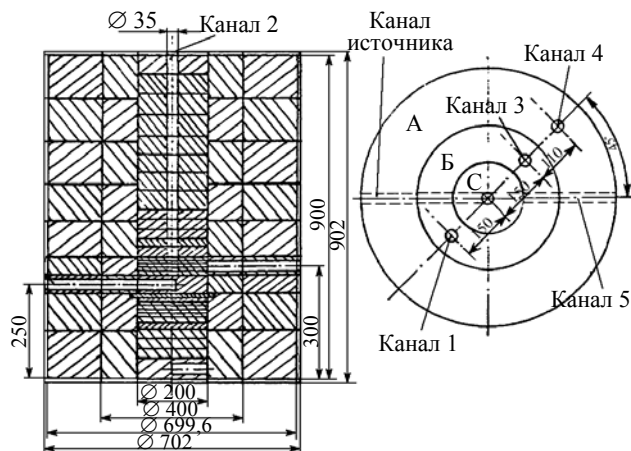


Рис. 4. Разборная опытная модель blankets (РОМБ): А, Б и С – внешняя, средняя и центральная области, каналы 1, 3, 4 – сквозные, канал 2 имеет глубину 625 мм

В сборке РОМБ имеются горизонтальный и вертикальные экспериментальные каналы, канал для мишенного узла генератора 14 МэВ нейтронов. Состав центральной области, формируемый в ней спектр нейтронов, может меняться в широких пределах за счет использования дополнительных сборочных комплектов из различных конструкционных материалов и полиэтилена. Конструкция сборки РОМБ позволяет использовать ее для проведения экспериментов на СКС ФКБН-2 с системами, в состав которых входят делящиеся материалы. Для этого предусмотрена возможность разбиения центральной области сборки РОМБ на две части: неподвижную верхнюю и подвижную нижнюю, которая крепится к штоку поршня критстенда.

В первой серии экспериментов со сборкой РОМБ был выполнен большой объем измерений распределений в сборке реакций деления U-238, U-235, Np-237, Pu-239, а также реакций <sup>19</sup>F(n, 2n) и <sup>56</sup>Fe(n, p) с источником 14 МэВ. Экспериментальные данные сравнивались с расчетами.

После завершения этой работы эксперименты со сборкой РОМБ как с моделью blankets гибридного термоядерного реактора продолжения не получили, а основным направлением экспериментальных исследований со сборкой РОМБ стало проведение критических экспериментов.

Переход к цилиндрической геометрии позволил значительно расширить типы собираемых на СКС ФКБН систем. Появилась возможность собирать гетерогенные системы, структуру которых можно было менять в ходе экспериментов, используя уже имеющиеся сборочные единицы. Комбинируя делящиеся и конструкционные материалы с замедлителем различной толщины, можно менять среднюю энергию нейтронов в активной зоне, увеличивая при этом долю нейтронов в области промежуточных энергий, где проявляется резонансная структура нейтронных сечений. Цилиндрическая геометрия сборок позволяет собирать системы, состоящие из повторяющихся ячеистых структур, что невозможно сделать в сферической геометрии. Намного проще и дешевле изготовление деталей цилиндриче-

ской формы, чем комплектов полусферических деталей, особенно в случае труднообрабатываемых и дорогостоящих материалов. По существу, сборка РОМБ, являясь двухмерной, занимает промежуточное положение между сферическими (одномерными) сборками и системами типа БФС [4], которые позволяют моделировать трехмерные структуры. Тем самым в сборке РОМБ удалось совместить простоту, присущую сферическим одномерным структурам, с богатыми возможностями, присущими сложным системам типа БФС.

В настоящее время в состав сборки РОМБ входит совокупность геометрически совместимых между собой деталей в виде колец внешней зоны с диаметрами: внешним – 70 см и внутренним – 40 см из обедненного урана и полиэтилена; колец средней зоны с диаметрами: внешним – 40 см и внутренним – 20 см из обедненного урана, свинца, стали, полиэтилена, боросодержащего полиэтилена; дисков центральной зоны диаметром 20 см из обедненного урана, высокообогащенного урана, свинца, полиэтилена, боросодержащего полиэтилена, бериллия, окиси бериллия, алюминия, титана, железа, меди, молибдена, никеля, ниобия, вольфрама, а также дисков из плутония диаметром 12 см. Общая масса U-235 примерно вдвое больше критической массы цилиндра диаметром 20 см, что позволяет собирать критические системы со значительным разбавлением делящихся материалов неделяющимися материалами.

За период с 1984 г. на СКС ФКБН собрано около 500 цилиндрических критических систем разного состава. Для большей части систем были составлены расчетные модели и проведены расчеты  $K_{эф}$ . Результаты расчетов использовались для аттестации программы ПРИЗМА-Д применительно к расчетам параметров ядерной безопасности. Часть экспериментов была выполнена для решения конкретных прикладных задач. Более подробная информация об экспериментах на СКС ФКБН приводится в обзоре «Критмассовые измерения в РФЯЦ-ВНИИТФ» [5] и в книге под редакцией А. В. Лукина «Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ-ВНИИТФ» [6].

Ниже приводится краткое описание некоторых экспериментов, выполненных в разное время на СКС ФКБН, которые дают представление о характере проводившихся исследований.

### 1. Измерение критических параметров цилиндрической сборки из высокообогащенного урана без отражателя

Эксперименты с цилиндрической сборкой из высокообогащенного урана без отражателя были выполнены на СКС ФКБН в 1984 г. сразу после изготовления цилиндрической активной зоны (АЗ РОМБ), состоящей из 20 дисков из высокообогащенного металлического урана. Конфигурация и геометрические размеры дисков с пробками приведены на рис. 5

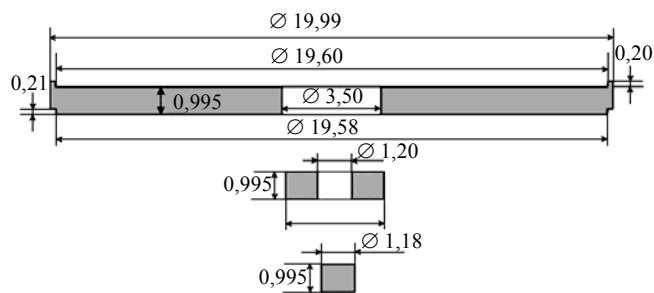


Рис. 5. Конструкция и геометрия дисков АЗ сборки РОМБ

Фиксация дисков в сборке осуществляется с помощью имеющихся на краях дисков буртиков и проточек. Для обеспечения смыкания плоскостями смежных дисков высота буртиков на 0,1 мм меньше глубины проточек.

При подготовке эксперимента была поставлена задача свести к минимуму влияние на реактивность сборки используемой оснастки. Поэтому для крепления верхней неподвижной части собираемой РС использовалась применявшаяся ранее для сборки сферических РС ажурная подставка из дюралюминия, а для крепления нижней части РС – тарельчатая подставка из стали толщиной 2 мм. Измерения показали, что вклад в критический зазор от этой подставки значителен и составляет ~2 мм.

В связи с этим для крепления нижней части РС было предложено использовать конусную подставку (рис. 6) из дюралюминия, вклад в критический зазор для сборки без отражателя от которой – около 0,2 мм, что сопоставимо с точностью измерения критического зазора.

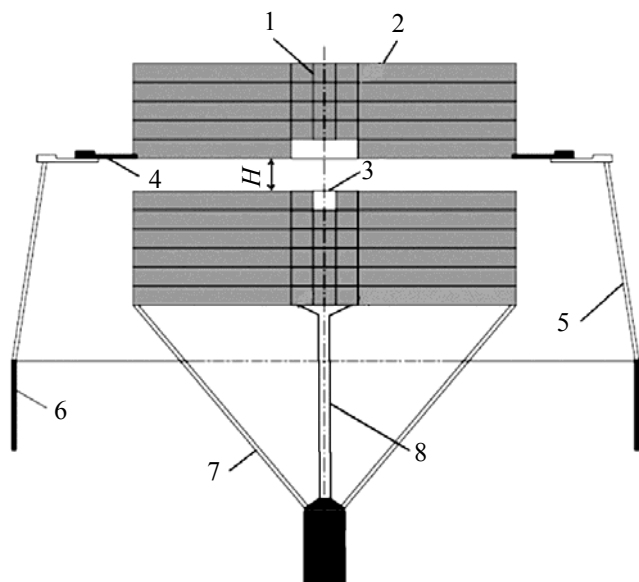


Рис. 6. Цилиндрическая сборка из урана без отражателя (нижняя часть сборки установлена на конусной подставке из дюралюминия): 1 – пробки, 2 – диски, 3 – источник нейтронов, 4 – стальная диафрагма, 5 – дюралюминиевая подставка, 6 – опорная труба, 7 – конусная подставка из дюралюминия, 8 – шток

Конструкция сборки позволила практически полностью исключить вклад в реактивность от диафрагмы, на которой крепится верхняя часть сборки. При этом прогиб диафрагмы под нагрузкой при сборке верхней части РС не влияет на точность измерения критического зазора, так как критический зазор измеряется непосредственно между смежными дисками верхней и нижней частей РС.

Данная критическая сборка после оценки экспертами была включена в международный справочник оцененных benchmark данных в области ядерной безопасности [7] под идентификационным номером HEU-MET-FAST-015. В справочнике приведены подробные данные о геометрии и составе сборки, ее критические параметры, а также расчетная модель сборки.

## 2. Критмассовые эксперименты для оценки константной погрешности расчетов критичности решеток из контейнеров с ДМ [8]

Используемая в настоящее время в расчетах по обоснованию ядерной безопасности система нейтронных констант БАС прошла тестирование с помощью сравнения расчетных и экспериментальных значений  $K_{эф}$  большого числа одиночных критическихборок, содержащих металлические ДМ с различными поглотителями и отражателями нейтронов. Однако одиночные сборки не отражают в полной мере особенности распространения нейтронов в бесконечных системах взаимодействующихборок, к каким относятся решетки из защищающих контейнеров.

Для оценки константной погрешности расчетов  $K_{эф}$  бесконечной решетки из типичных защищающих контейнеров были проведены эксперименты с цилиндрическими системами, состоящими из одинаковых ячеек (рис. 7), моделирующих структуру контейнера с ДМ.

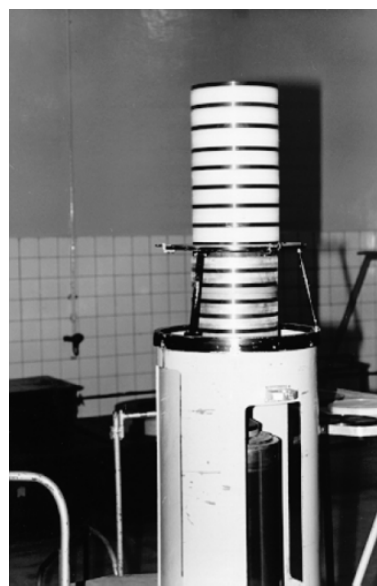


Рис. 7. Критическая сборка из ячеек, моделирующих структуру контейнера с ДМ

Ячейка диаметром 20 см включала в себя входящие в состав сборки РОМБ диски из металлических урана и плутония со слоями из кадмия, полиэтилена, железа на торцах дисков.

Параметры ячеек подбирались таким образом, чтобы критическое состояние достигалось при числе ячеек  $\sim 10-20$ .

В результате проведенных экспериментов было показано, что для всех сборок константная погрешность расчета  $K_{эф}$  имеет неблагоприятный с точки зрения ядерной безопасности знак. Оценка константной погрешности расчета  $K_{эф}$  трехмерных решеток из типичных защищающих контейнеров с металлическими ДМ, сделанная на момент проведения экспериментов (1990 г.) на основе полученных экспериментальных данных, дает значение  $\delta K_{эф} \sim 0,015$ .

### 3. Исследования аномалий критичности сборок из урана с композиционными $Be-CH_2$ , $BeO-CH_2$ отражателями

Исследования критических параметров систем, содержащих делящиеся материалы, показали, что в ряде случаев наблюдаются, на первый взгляд, парадоксальные эффекты, которые получили название аномалий критичности. Так, например, в работе [9] показано, что сфера из гидрида высокообогащенного урана с составным отражателем из никеля и природного урана имеет критическую массу, меньшую, чем с каждым из этих отражателей той же толщины в отдельности. В 1995 г. Ю. И. Чернухиным расчетным путем было найдено, что подобный эффект может наблюдаться и для систем из высокообогащенного металлического урана с двухслойным отражателем из полиэтилена и бериллия.

Экспериментально этот эффект был подтвержден в 2003 г. К тому времени были изготовлены совместимые по геометрии с деталями сборки РОМБ комплекты отражателей из  $Be$  и  $BeO$ . В ходе экспериментов было исследовано десять цилиндрических критических сборок (рис. 8) из урана с двухслойными отражателями фиксированной толщины (15 см) на торцах сборок из полиэтилена и  $Be$  или  $BeO$ .

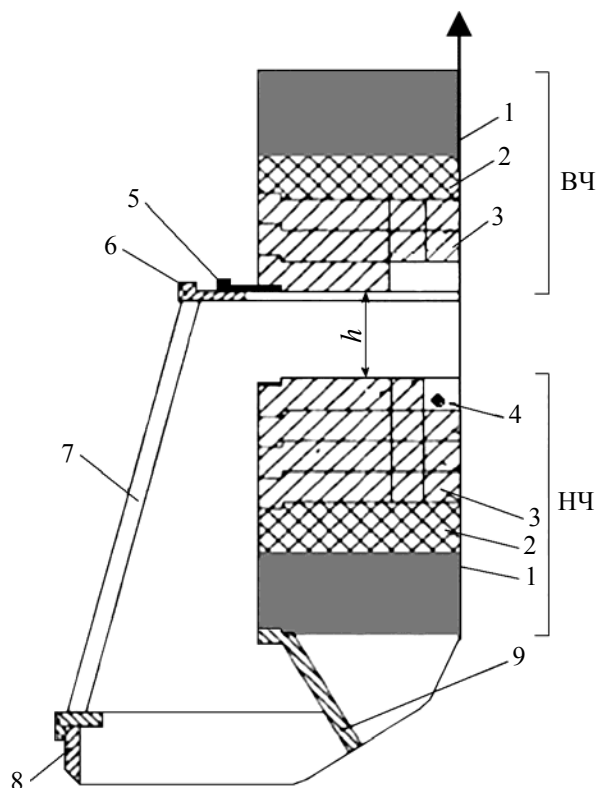


Рис. 8. Схема критической сборки из урана с двухслойным отражателем из полиэтилена и  $Be$  или  $BeO$ : 1 –  $Be$  ( $BeO$ ), 2 – полиэтилен, 3 – диски из урана, 4 – источник нейтронов, 5 – диафрагма, 6 – кольцо из дюроалюминия, 7 – подставка, 8 – опорная труба, 9 – конусная подставка

В этих сборках слой полиэтилена примыкал к ДМ, а боковой отражатель отсутствовал. Все исследовавшиеся РС имели одинаковую активную зону. В процессе экспериментов измерялась зависимость критического зазора от толщины полиэтиленовой прослойки между верхней и нижней частями (ВЧ и НЧ) сборок. Результаты измерений приведены на рис. 9.

Как видно из рис. 9, результаты экспериментов подтвердили наличие аномалий критичности для сборок такого типа. При этом показано, что отражатель из  $BeO$  более эффективен, чем из  $Be$ , а максимальный вклад композиционного отражателя  $Be-CH_2$  или  $BeO-CH_2$  в реактивность сборки достигается при толщине полиэтилена 1–1,5 см.

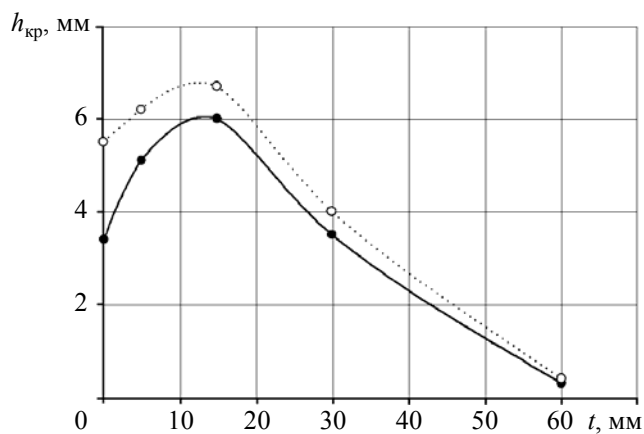


Рис. 9. Зависимость критического зазора от толщины полиэтиленовой прослойки в двухслойном отражателе: ● – Be-CH<sub>2</sub>, ..○.. – BeO-CH<sub>2</sub>

#### 4. Критические эксперименты с урановыми сборками, содержащими ванадий, молибден, вольфрам

Проведение критических экспериментов с целью удовлетворения потребностей в ядерных данных, а также для тестирования расчетов ядерной безопасности (ЯБ), является одним из возможных направлений международного научно-технического сотрудничества. Ранее в РФЯЦ-ВНИИТФ по проекту МНТЦ № 3110 был выполнен большой объем критических benchmark экспериментов, в том числе критических экспериментов с цилиндрическими сборками из металлического высокообогащенного урана, содержащими ванадий, молибден, вольфрам. Интерес к этим материалам связан с широким использованием их в составе сплавов в реакторостроении.

Для проведения экспериментов были изготовлены геометрически совместимые с деталями сборки РОМБ комплекты дисков из металлических ванадия, молибдена, вольфрама. В ходе экспериментов на СКС ФКБН были собраны цилиндрические критические системы с АЗ из металлического высокообогащенного урана, типичные при проведении подобных экспериментов:

- цилиндрические сборки с отражателями на торцах толщиной до 20 см;

- гетерогенные цилиндрические сборки с разбавлением урана ванадием, молибденом, вольфрамом;

- гетерогенные цилиндрические сборки с боковым отражателем из обедненного урана и замедлителем в АЗ из полиэтилена, Be, BeO;

- гетерогенные цилиндрические сборки с боковым отражателем из полиэтилена и замедлителем в АЗ из полиэтилена.

Все исследовавшиеся критические системы прошли оценку экспертами и были включены в международный справочник оцененных benchmark данных [7].

На рис. 10 в качестве примера приведена схема сборки HEU-MET-MIXED-016.

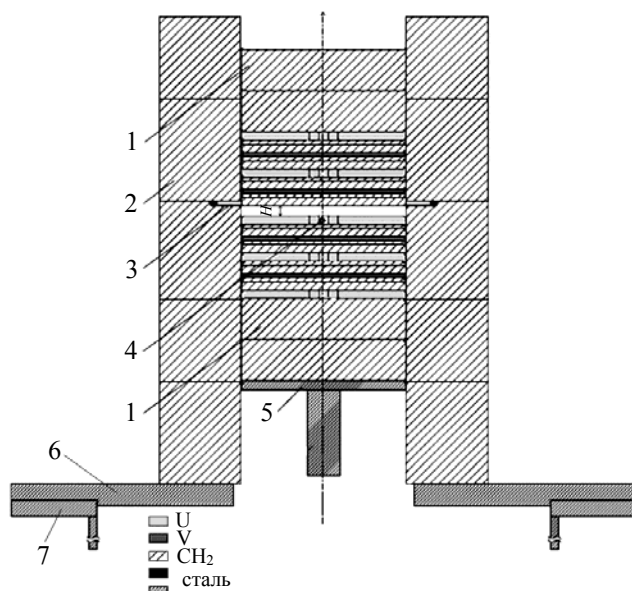


Рис. 10. Схема гетерогенной сборки из урана, ванадия и полиэтилена с боковым отражателем из полиэтилена: 1 – торцевые отражатели, 2 – боковой отражатель, 3 – диафрагма, 4 – источник нейтронов, 5 – тарельчатая подставка, 6 – плита, 7 – опорная труба

#### 4. Критическая сборка из высокообогащенного металлического урана с односторонним отражателем из полиэтилена с имитацией активной зоны большого диаметра

Целью данной работы, выполненной по проекту МНТЦ № 3110, было уточнение результатов критических экспериментов с цилиндрической сборкой из металлического урана





Рис. 11. Критическая сборка из урана с односторонним отражателем из полиэтилена с имитацией АЗ большого диаметра

с отражателем из полиэтилена, проведенных в одной из лабораторий. Так как диски из урана в этих экспериментах имели большой диаметр, для их имитации была предложена геометрия измерений с АЗ в виде слоя из трех стопок дисков из комплекта РОМБ (рис. 11). При этом отражатель из полиэтилена диаметром  $\sim 1$  м, толщиной 15 см устанавливался сверху на регулируемых по высоте опорах. Критическое состояние системы достигалось за счет подъема нижнего блока из урана, собранного на подвижном поршне стенда ФКБН. Конструкция сборки позволяла регулировать в ходе экспериментов зазор между АЗ и отражателем. По результатам экспериментов была построена benchmark модель сборки.

### 5. Критические эксперименты типа benchmark для тестирования расчетов нейтронно-физических характеристик реакторов со свинцовым теплоносителем

При обсуждении в 1990 г. возможных направлений сотрудничества со специалистами НИКИЭТ, где в то время велась разработка удовлетворяющего современным требованиям безопасности быстрого реактора со свинцовым теплоносителем БРС [10], было поддержано предложение РФЯЦ-ВНИИТФ о проведении критических benchmark экспериментов

со сборкой РОМБ в дополнение к экспериментам на стенде БФС-61 с критсборкой, моделирующей быстрый реактор со свинцовым теплоносителем, а также предложение о проведении в РФЯЦ-ВНИИТФ нейтронно-физических расчетов характеристик критической сборки БФС-61.

Для проведения экспериментов был изготовлен дополнительный комплект колец и дисков из свинца, повторяющих по форме кольца средней области и диски центральной области сборки РОМБ. В процессе подготовки экспериментов были проведены предварительные расчеты возможных вариантов критсборок с целью выбора систем, для которых спектр нейтронов в сборке приближается к спектру нейтронов в АЗ реактора со свинцовым теплоносителем. Предполагалось, что для выбранных критических систем будут проведены измерения пространственных распределений в АЗ чисел делений и спектральных индексов, измерения в «разностных» экспериментах вкладов в реактивность относительно небольших образцов, измерения нейтронных спектров с помощью имеющейся методики активационных индикаторов.

В первой серии экспериментов для проверки нейтронных констант свинца было собрано пять критическихборок из урана: сборка с отражателем из свинца толщиной 20 см на торцах; гетерогенная сборка, в которой слои урана чередовались со слоями из свинца

толщиной 1,3 см; три варианта сборки с боковым отражателем из свинца с различной степенью разбавления урана свинцом. По результатам экспериментов были построены benchmark модели и проведены сравнительные расчеты. Все эти сборки в настоящее время включены в международный справочник [7]. К сожалению, из-за отсутствия финансирования продолжения работ не последовало.

## **6. Критмассовые benchmark эксперименты с цилиндрическими системами из урана, плутония и полиэтилена на стенде ФКБН для тестирования нейтронно-физических расчетов характеристик реакторов типа ВВЭР**

В 1999 г. в рамках работ, выполнявшихся при поддержке МНТЦ по проекту № 116-96, ставилась задача создания методически замкнутого алгоритма верификации баз ядерных данных, используемых при расчетах нейтронно-физических характеристик реакторов типа ВВЭР, по результатам экспериментов типа benchmark.

Частью проекта было проведение большого объема экспериментов со сборкой РОМБ. Было проведено шесть серий экспериментов с боковыми отражателями из обедненного урана и полиэтилена. При этом состав центральной области варьировался как по составу делящихся материалов (уран, плутоний и их комбинация), так и по степени разбавления делящихся материалов полиэтиленом. В зависимости от этого менялся спектр нейтронов в сборке. Всего было исследовано 65 критических систем. Для восьми критических систем в шести сериях экспериментов проводились измерения чисел реакций наборами активационных и делительных детекторов (36 детекторов). По результатам измерений была сделана оценка спектрального состава флюенса нейтронов. На настоящий момент в работе [11] приводятся лишь общие данные о характере проводившихся экспериментов. Точные данные о составеборок, benchmark моделиборок в МНТЦ не передавались.

## **К вопросу о сохранении данных критических экспериментов**

К настоящему времени в РФЯЦ-ВНИИТФ и РФЯЦ-ВНИИЭФ выполнен большой объем критмассовых измерений с различными по конфигурации и составу сборками. Полученные экспериментальные данные являются уникальными и, по мнению автора, должны быть сохранены. Возможный путь для сохранения данных критических экспериментов – это создание отраслевого справочника по критическим экспериментам, по структуре близкого к справочнику [7]. При создании такого справочника важно сохранить систему экспертных оценок входящих в справочник материалов, обеспечивая тем самым включение в справочник наиболее надежных и достоверных экспериментальных данных.

## **Список литературы**

1. Vasilyev A. P., Kandiev Ya. Z., Chitai-kin V. I. Calculations of some Experiments of U-235 and U-238 Using Spectral Neutron Data BAS // Neutron Physics, 1981, vol. 2, p. 119–123.
2. Kandiev Ya. Z., Kuropatenko E. S. et al. The 3d All-Union Scientific Conference on the Shielding from Ionizing Irradiations of Nuclear Technical Installations // Theses of reports. – Tbilisi, 1981, 24.
3. Аврорин Е. Н., Васильев А. П., Терехин В. А. и др. Применение сборки РОМБ и цилиндрическихборок для тестирования нейтронных констант // Труды Международной конференции по ядерным данным. – Германия, Юлих, 1991, с. 247.
4. Лейпунский А. И., Орлов В. В., Казанский Ю. А. и др. Комплекс БФС-1 микротрон для изучения спектров нейтронов быстрых реакторов // Атомная энергия. 1974. Т. 36, вып. 1. С. 3.
5. Терехин В. А., Соколов Ю. А., Магда Э. П., Чернухин Ю. И., Лукин А. В. Критмассовые измерения в РФЯЦ-ВНИИТФ. Обзор // Известия Челябинского научного центра. 2000. Вып. 4.

6. Леваков Б. Г., Лукин А. В., Погребов И. С. и др. // Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ-ВНИИТФ. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ. 2002.

7. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. Volume I, II, VI. Nuclear Energy Agency. Nuclear Science Committee. (NEA/NSC/DOC (95)03/II), September 2009.

8. Васильев А. П., Крепкий А. С., Лукин А. В. и др. Оценка константной погрешности расчета критичности решеток из защищающих контейнеров с металлическими делящимися материалами // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1991. Вып. 4 с. 41–43.

9. Clayton E. D. Anomalies of Criticality // Nucl. Techn. 1974. Vol. 23. P. 14.

10. Алексеев П. Н., Ефименко В. Ф., Матвеев И. П. и др. Обоснование характеристик свинцовоохлаждаемых быстрых реакторов на критической сборке БФС-1 // Тезисы докладов 7-го Всесоюзного семинара по проблемам физики реакторов. – М.: ЦНИИАтоминформ. 1991. С. 68–69.

11. Кравченко В. Г., Литвин В. И., Лукин А. В., и др. Критмассовые BENCHMARK эксперименты и измерения чисел реакций с цилиндрическими системами из урана, плутония и полиэтилена на стенде ФКБН-2 // Препринт № 159. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ. 1999.

Контактная информация –

Соколов Юрий Александрович,  
ведущий научный сотрудник  
экспериментального отделения  
РФЯЦ-ВНИИТФ,  
e-mail: dep5@vniitf.ru

Статья поступила в редакцию 20.06.18.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2018, вып. 4, с. 129–139.