

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ КРИТМАССОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В РФЯЦ-ВНИИЭФ

А. В. Панин, С. В. Воронцов, А. А. Девяткин, Н. В. Завьялов, М. И. Кувшинов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Настоящая статья является краткой презентацией одного из важных научных направлений тематики РФЯЦ-ВНИИЭФ. В историческом аспекте рассмотрено создание установок для проведения экспериментальных исследований на критических сборках из металлических делящихся материалов (ДМ). Кратко представлены работы, выполненные в РФЯЦ-ВНИИЭФ в интересах создания новых ИЯУ, получения информации для тестирования интегральных ядерных данных; обеспечения ядерной безопасности при производстве, хранении и транспортировке металлических ДМ.

Ключевые слова: критмассовый эксперимент, критическая сборка, делящийся материал, ядерная безопасность, критический стенд, история критмассовых экспериментов.

THE HISTORY OF CRITICALITY EXPERIMENTS PROGRESS AT RFNC-VNIIEF / A. V. PANIN, S. V. VORONTSOV, A. A. DEVIATKIN, N. V. ZAVYALOV, M. I. KUVSHINOV // This report is a brief presentation of one of the important research topics of RFNC-VNIIEF. Historically, we create facilities for experimental studies on the critical assemblies of metallic fissionable materials (FM). Summarized the work carried out in the RFNC-VNIIEF in order to create new RNF, information for testing integrated nuclear data; nuclear safety in the production, storage and transportation of metallic FM.

Key words: criticality experiment, critical assembly, fissionable material, nuclear safety, critical stand, history of criticality experiments.

История создания стендов для проведения критмассовых экспериментов

Вопросы о принципиальной возможности осуществления самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР) деления ядер урана и его кинетике впервые были рассмотрены в известных работах Я. Б. Зельдовича и Ю. Б. Харитона, опубликованных в 1939–1940 гг. [1, 2].

Первый критмассовый эксперимент был проведен группой Г. Н. Флерова в ФГУП ПО «Маяк» (г. Озерск, бывший Челябинск-40) в 1949 г. [3]. Установка (рис. 1) состояла из металлической подставки-станины для размещения нижней часть размножающей системы (РС); устройства для вертикального переме-

щения верхней части РС с помощью троса и ручной авиационной лебедки; всеволнового детектора нейтронов и регистрирующей аппаратуры; световой и звуковой сигнализации скорости счета нейтронов. Безопасность эксперимента при каждом перемещении верхней части РС относительно нижней обеспечивалась с помощью разделительных прокладок необходимой толщины. На заключительной стадии исследований был осуществлен разгон системы на запаздывающих нейтронах. По инициативе Ю. С. Замятина установка получила название «физического котла на быстрых нейтронах» (ФиКоБыН), которое сохранилось (с аббревиатурой ФКБН) для всех последующих вариантов стендов для критических сбо-

рок (СКС). Эти эксперименты фактически определили алгоритм сборки РС и структурную схему системы управления и защиты (СУЗ) на последующих СКС.

Первые критмассовые эксперименты во ВНИИЭФ были проведены на критическом стенде ФКБН, разработанном в нейтронно-физической лаборатории Г. Н. Флерова при активном участии П. Д. Ширшова [4]. Стенд ФКБН начал эксплуатироваться на «реакторной» площадке ВНИИЭФ в 1950 г. и представлял собой устройство (рис. 2), обеспечивающее дистанционное перемещение нижней части РС вертикально вверх на 200 мм с помощью гидравлического механизма. Верхняя часть РС при этом оставалась неподвижной. Точность и повторяемость позиционирования нижней части РС относительно верхней обеспечивались с помощью проставок.

Конструкция данного стенда увеличивала безопасность проведения работ по сборке РС. Тем не менее 9 апреля 1953 г. на стенде ФКБН произошла авария [5]. Основной ее причиной стала ошибка оператора, установившего проставки меньшей толщины, в то же время выяснилось, что привод стенда и алгоритм СУЗ имели недостатки:

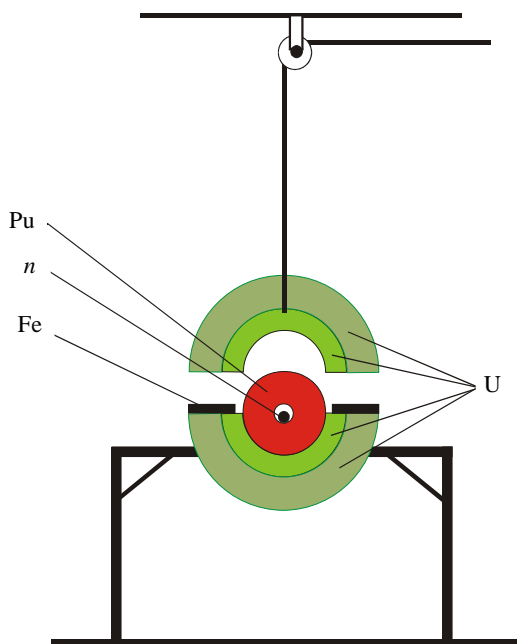


Рис. 1. Схема первого критмассового эксперимента. 1949 г.

- защита обеспечивалась только от медленных переходов через критическое состояние;
- скорость вывода реактивности по сигналу аварийной защиты с помощью гидравлического привода могла быть недостаточной.

В 1953 г. началась разработка стенда ФКБН-1, в конструкции которого были устранены недостатки стенда ФКБН. Проектированию предшествовала большая расчетно-теоретическая работа, выполненная Г. А. Гончаровым, по исследованию динамики изменения потока нейтронов из различных типов РС в зависимости от скорости изменения их реактивности [6], послужившая основой для ограничения скорости сближения частей РС. В СКС ФКБН-1 (рис. 3), введенном в эксплуатацию в 1955 г., для подъема нижней части РС использовался электромеханический подъемник, обеспечивающий сближение частей РС с необходимой скоростью, а аварийная защита осуществлялась за счет отключения питания электромагнита, после чего стол с нижней частью РС перемещался вниз под действием силы тяжести.

В 1959 г. был создан и введен в эксплуатацию стенд МСКС (малый стенд критическихборок) для изучения динамических процессов в РС с использованием нейтронного

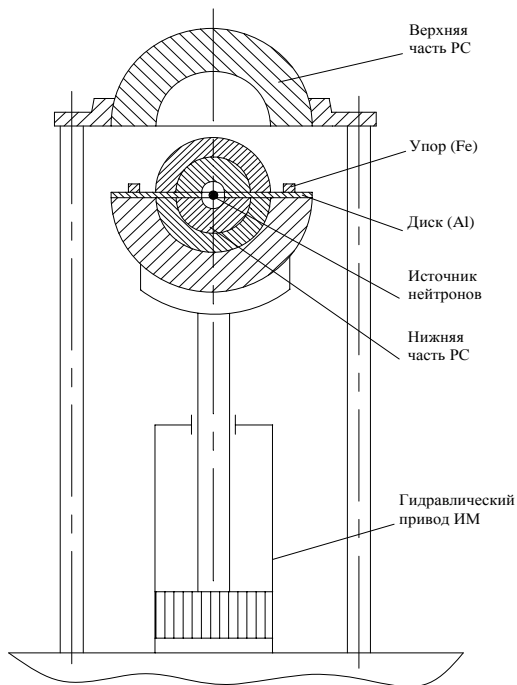


Рис. 2. Схема критического стенда ФКБН. 1950 г.

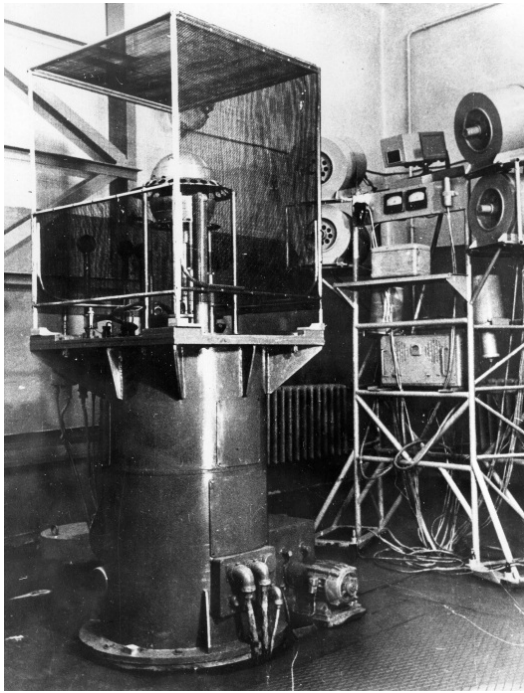


Рис. 3. Стенд ФКБН-1

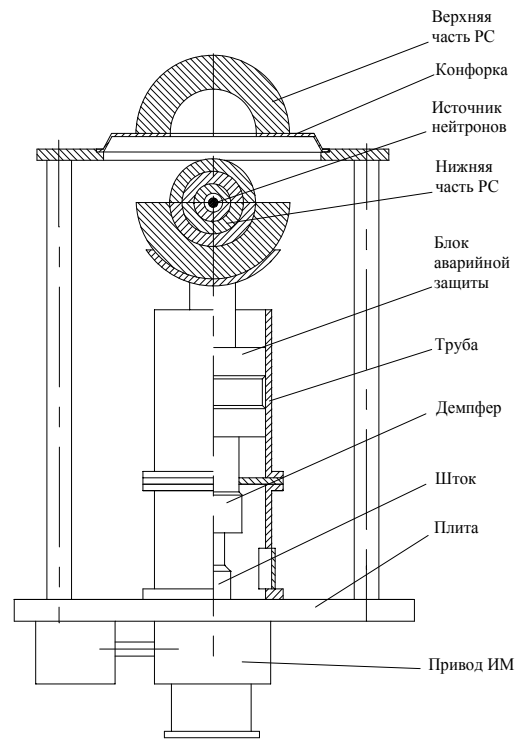


Рис. 4. Схема стенда МСКС

генератора. Конструкция стенда МСКС (рис. 4) была аналогична стенду ФКБН-1. В процессе проведения одного из экспериментов в марте 1963 г. на стенде МСКС произошел аварийный импульс делений с облучением персонала [5]. Причиной аварии была попытка экспериментаторов внести изменения в привод подъема при использовании нестандартных приспособлений, при этом состояние РС не контролировалось.

После анализа аварийного случая на МСКС алгоритм сборки РС и конструкция СКС были существенно изменены. Основная роль в выборе более безопасного алгоритма сборки РС принадлежит Б. Д. Сциборскому, А. М. Воинову и А. А. Малинкину.

В 1963 г. введен в эксплуатацию стенд ФКБН-2 (рис. 5), который располагался в отдельном здании на «реакторной» площадке. Особенность конструкции стенда заключалась в разнесении нижней и верхней частей РС в горизонтальном направлении на 1 м и введении регулирующей пробки для плавной регулировки реактивности вблизи критического состояния [6]. Такая схема значительно повышала безопасность проведения работ. Механизм подъема стола был оснащен дистанци-

онно управляемым упором и сменными, дискретными «жесткими» упорами, ограничивающими высоту перемещения нижней части РС. Позиционирование верхней части РС (остановка каретки) относительно нижней также проводилось на «жесткий» упор. Последовательность действий при сборке РС, заложенная в конструкции СКС ФКБН-2, сохранилась и в настоящее время. Все работы по сборке частей РС проводятся вручную.

В начале 1970-х гг. была проведена модернизация стенда ФКБН-2 в части СУЗ и конструкции механизма подъема стола. В конструкцию механизма были введены две независимые системы аварийного сброса. После модернизации стенд был введен в эксплуатацию в 1976 г. под названием ФКБН-2М (рис. 6).

К сожалению, 17.06.97 на стенде ФКБН-2М произошла авария, повлекшая гибель старшего инженера по управлению [5]. После аварии и разборки аварийной РС работы на стенде были остановлены. Проанализированы причины аварии и проведен вероятностный анализ безопасности выполняемых работ. В конструкцию ФКБН-2М внесены усовершенствования, направленные на повышение

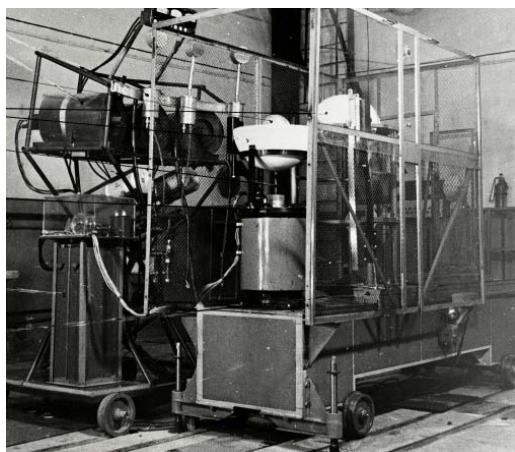


Рис. 5. СКС ФКБН-2

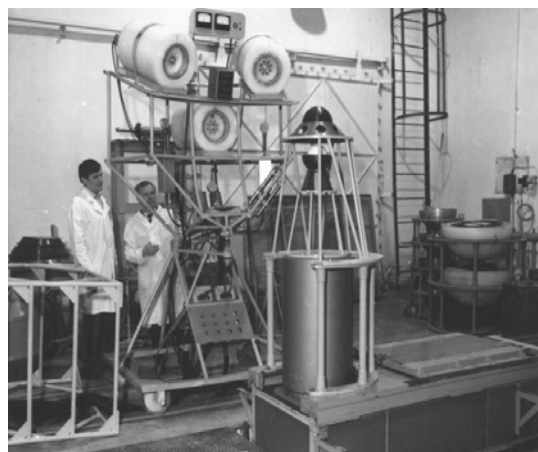


Рис. 6. СКС ФКБН-2М

безопасности работ [7]: введены пневматическая система для перемещения источника нейтронов (ИН), механизм перемещения контейнера центрального канала и защитное ограждение нижней части РС.

Был также пересмотрен регламент проведения экспериментов [7]. Теперь перед началом работ проводится предварительный расчет, описывающий изменение $k_{эф}$ в процессе сборки РС («компьютерный эксперимент»). Это позволяет выбрать оптимальную конфигурацию РС. Сначала в работу выдаются детали из делящегося материала (ДМ) только для сборки нижней части (нижнего блока, НБ) РС. СУЗ при этом обеспечивает автоматическую доставку нейтронного источника к месту сборки. После завершения сборки НБ закрывается сеткой, предотвращающей приближение к нему посторонних предметов. Нейтронный источник при этом перемещается к месту сборки верхней части (верхнего блока, ВБ). После этого выдаются детали из ДМ и производится сборка ВБ. Защитная сетка с НБ удаляется автоматически при дистанционном перемещении каретки с ВБ в рабочее положение.

Физический пуск комплекса ФКБН-2М после аварии проведен в 2001 г. (дата ввода в эксплуатацию – 15.05.2001), причем в работе комиссии Росатома по физическому пуску впервые принимали участие сотрудники УГН ЯРБ МО РФ.

Накопленный опыт был использован при разработке комплекса ФКБН-3, которая началась в 2008 г. Целью работы являлось создание нового электромеханического стенда и

СУЗ. С учетом опыта эксплуатации стенда ФКБН-2М были сохранены алгоритм сборки частей РС, а также назначение и состав комплектующих узлов. При разработке электромеханического стенда основное внимание было уделено выбору технических средств по контролю перемещения и точности позиционирования стола. Реализация новых технических решений позволила:

- улучшить воспроизводимость результатов критических экспериментов за счет увеличения на порядок точности положения электромеханического упора стола (с 0,1 мм до 0,01 мм) и уменьшения отклонения центра РС в горизонтальной плоскости (с 2 мм до 0,2 мм);
- достичь точности определения геометрии РС, необходимой для тестовых (benchmark) экспериментов, без многочисленных юстировок и переборок частей сборок;
- снизить дозовую нагрузку на персонал за счет уменьшения переборок частей РС в экспериментах.

В связи с созданием комплекса ФКБН-3 в 2013 г. СКС ФКБН-2М выведен из эксплуатации. Стенд и пульта управления были демонтированы. Физический пуск комплекса ФКБН-3 был проведен в ноябре 2014 г., а его ввод в эксплуатацию – в сентябре 2015 г.

Создание полномасштабного тренажера на базе стенда ФКБН-2М

При подготовке любого критмассового эксперимента производится ручная сборка частей РС. Эта стадия эксперимента связана с

максимальным профессиональным риском для персонала. Ошибка, приводящая к преждевременному достижению критического состояния, грозит персоналу переоблучением и, возможно, гибелью. Одним из технических средств, способных повысить качество подготовки специалистов и сократить время освоения технологии работы с РС, явился тренажер, позволяющий моделировать сборку РС на комплексе ФКБН-2М [8].

Процесс сборки РС (из полномасштабных макетов деталей) в зале и работа за пультом полностью совпадали с реальной сборкой. Нейтронный поток утечки имитировался программным обеспечением (ПО) тренажера.

Перед сборкой детали проходили идентификацию как по внешним параметрам, так и по штрих-кодам. При этом в процессе сборки учебного макета РС воспроизводятся действия персонала, соответствующие штатной работе, а также демонстрируется возможная реакция РС при ошибке оператора и возникновении аварийной ситуации. Для обеспечения работы в банк данных тренажера занесена информация как о материальных характеристиках систем (размеры, материал, масса, нуклидный состав), так и о нейтронно-физических параметрах компонентов этих систем на всех этапах сборки. Были изготовлены полномасштабные макеты деталей из различных ДМ. Для имитации работы измерительных каналов нейтронного потока использовались расчетные значения, которые брались из банка данных. Компьютерная модель пульта управления СКС достоверно имитировала работу оператора при сведении частей РС.

Работа была выполнена при финансовой поддержке МНТЦ.

Состав СКС и алгоритм проведения критмассового эксперимента

Так как большинство проведенных экспериментов выполнено на установке ФКБН-2М (ФКБН-2), то рассмотрим кратко состав и конструкцию этой установки.

В состав установки ФКБН-2М [6] входили:

– электромеханический стенд (ЭМС), на котором производится поэтапная сборка частей РС и последующее дистанционное их сведение для создания критической конфигурации РС;

– автоматизированная СУЗ, обеспечивающая оператору возможность дистанционно управлять работой стенда и технологическим оборудованием (защитные двери, подъемные устройства и др.) по наиболее безопасному алгоритму выполнения операций;

– оборудование для измерения физических характеристик РС и обработки получаемой информации, в том числе с использованием компьютерных программ.

Электромеханический стенд установки ФКБН-2М (рис. 7) был размещен в зале размером 12×10×8 м, имеющим толстые (1–3 м) бетонные стены и потолок для защиты персонала от нейтронного и гамма-излучений, а также от взрывного воздействия при гипотетической аварии. Стенд позволял собирать РС массой до 2000 кг и диаметром до 100 см.



Рис. 7. ЭМС ФКБН-2М

Стенд содержал пять основных блоков (рис. 8):

– подвижный стол с приспособлениями для крепления нижней части РС и ее перемещения в вертикальном направлении;

– каретку с подставкой для крепления верхней части РС, перемещаемую в горизонтальном направлении для надвигания верхней части РС над нижней, с обеспечением их соосности;

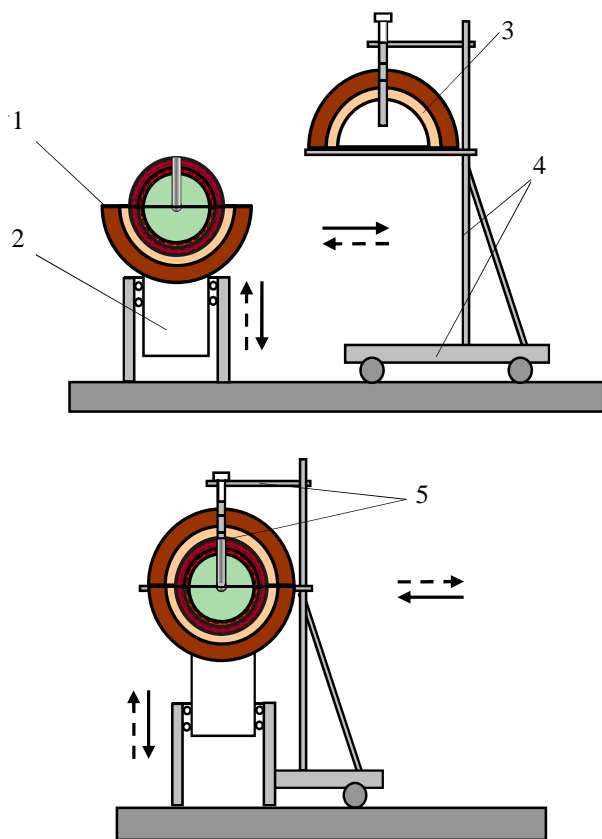


Рис. 8. Схематическое изображение ЭМС ФКБН-2М: 1 – НБ; 2 – стол, перемещаемый вертикально; 3 – ВБ; 4 – каретка, перемещаемая горизонтально; 5 – устройство загрузки центрального канала

– регулируемую пробку с механизмом ее перемещения в вертикальном направлении относительно нижней части РС;

– устройство для пневматического перемещения ИН к собираемой части РС;

– механизм дистанционной загрузки детекторов нейтронов в центр РС.

При монтаже РС на стенде она разделяется на два заведомо подкритических блока: НБ и ВБ. Подвижный в вертикальном направлении НБ свободно лежит на специальной опоре. ВБ (подвижный в горизонтальном направлении) лежит на тонкой кольцевой диафрагме из стали. Для образования критической конфигурации блоки РС дистанционно сближаются. Сначала ВБ надвигается на нижний, затем НБ поднимается вверх. Изменение реактивности собранной РС осуществляется путем дистанционно управляемого сближения (разведения) ее частей.

Скорости перемещения стола следующие: 0,01; 0,1 и 1 мм/с. Высота подъема стола от

нижнего крайнего положения в верхнее – 200 мм. Скорость перемещения регулирующей пробки – 0,1 и 1 мм/с, высота ее подъема 100 мм. Скорость движения каретки – 5 мм/с, длина пути – 1000 мм. Перемещение всех регулирующих органов стенда происходит с помощью электродвигателей, управление которыми осуществляется с пульта, размещенного за биологической защитой, и контролируется СУЗ. Механизм подъема стола снабжен как дистанционно управляемым упором, так и сменными механическими упорами, позволяющими ограничивать высоту подъема стола. Стол является также основным исполнительным механизмом аварийной защиты. Аварийный сигнал СУЗ вызывает разрыв цепи питания электромагнитов стола и его сброс вместе с регулирующей пробкой в нижнее положение под действием силы тяжести.

СУЗ контролирует и выдает информацию на пульт управления о плотности потока нейтронов утечки из РС (или от источника); температуре РС; расположении перемещаемых блоков стенда, а также технологического оборудования. СУЗ предписывает оператору наиболее безопасный алгоритм управления стендом и технологическим оборудованием путем пропускания или блокирования его команд с пульта управления к исполнительным механизмам системы.

СУЗ автоматически выдает ряд сигналов для обеспечения радиационной и ядерной безопасности работ на установке ФКБН-2М.

Основными нейтронно-физическими характеристиками РС, измеряемыми с помощью штатного оборудования установки ФКБН-2М, являются:

– коэффициент умножения системой нейтронов источника;

– реактивность и возмущение реактивности различными микро- и макрообразцами;

– константа спада и время жизни мгновенных нейтронов;

– скорости реакций деления и активации образцов;

– спектры нейтронов утечки и др.

Первые опыты с РС во ВНИИЭФ проводились в 1948–1951 гг. Характерной особенностью первых экспериментов с металличе-

скими ДМ являлось их малое количество, недостаточное для достижения критической массы. Поэтому на этом этапе исследований, в основном, измерялся коэффициент умножения (Q) нейтронов сборкой, содержащей ДМ [9].

Процедура экспериментов (алгоритм сохранился по настоящее время) заключалась в следующем [9]. Сначала на стенде установки ФКБН монтировалась «инертная» модельная сборка, отличающаяся от изучаемой РС только тем, что вместо ДМ в ней устанавливались детали из свинца или меди. В центре модельной сборки (как и в РС) всегда имелась небольшая воздушная полость, в которую устанавливался изотопный ИН. Обычно это был $\text{Po-}\alpha\text{-Be}$, «имитирующий» источник состава ($\text{Po} + \text{V}_4\text{C} + \text{CaF}_4$), который приближенно воспроизводил энергетический спектр нейтронов деления (в настоящее время для этой цели используется ^{252}Cf источник нейтронов). Измерялся поток нейтронов утечки из инертной модели (J_0) заполненным газом BF_3 «всеволновым» счетчиком, имеющим примерно одинаковую эффективность регистрации нейтронов с различной энергией. Эта процедура измерений на модели РС называлась «измерением нулей».

Затем инертная модель разбиралась, и приступали к сборке РС. ИН все время (до помещения в центр РС) находился вблизи сборки, поток нейтронов непрерывно контролировался. Перед сборщиком находился стрелочный прибор («интенсиметр»), показывающий уровень нейтронного потока. Кроме того, сигнал с электронного блока, регистрирующего скорость счета нейтронов, подавался на громкоговоритель, это устройство называлось «щелкуном». Тем самым осуществлялась звуковая сигнализация об уровне нейтронного потока.

Сборку РС производили вдвоем, так называемый ответственный руководитель работ и его ассистент. Ответственных руководителей на установке ФКБН было немного, систематически ручную сборку частей РС за прошедшее время выполняли В. Ю. Гаврилов, Д. П. Ширшов, Б. Д. Сциборский, А. А. Малинкин, А. М. Воинов, М. И. Кувшинов, Ю. В. Стрельников, В. П. Егоров, А. Н. Захаров, Д. П. Пешехонов, А. А. Девяткин, А. А. Кайгородов.

Ассистент брал деталь из ДМ и подавал ее стоящему на сборочном стапеле ответственному руководителю, который добавлял деталь к сборке, следя за показаниями «интенсиметра» и прислушиваясь к «щелкуну», чтобы при чрезмерно быстром нарастании потока нейтронов удалить деталь от сборки. Обычно перед тем как добавлять очередную деталь ответственный руководитель приближал к РС свои руки и смотрел по «интенсиметру», как воздействуют они на реактивность системы, определяя, следует ли добавлять деталь к РС.

При определенных положениях НБ подъем его прекращался, измерялся установившийся во времени поток нейтронов утечки и вычислялся коэффициент умножения нейтронов Q ,

$$Q = (J_{\text{PC}} - J_{\text{Ф}}) / J_0, \quad (1)$$

здесь J_{PC} – поток нейтронов утечки из РС с ИН в центре, $J_{\text{Ф}}$ – поток нейтронов из РС без источника (для РС с плутонием), J_0 – поток нейтронов из «инертной» модели РС с источником.

Критическая геометрия сборки определялась линейной экстраполяцией к нулю зависимости $\Delta = 1000/Q$. Единица измерения подкритичности $\Delta = 1$ (при $Q = 1000$) называлась «ширшом» в честь Д. П. Ширшова – одного из пионеров критмассовых экспериментов во ВНИИЭФ. Эта единица очень удобна в практической работе с РС и, наряду с единицей измерения реактивности $\beta_{\text{эф}} = 1$ «доллар» ($\beta_{\text{эф}}$ – эффективная доля запаздывающих нейтронов для данной РС), используется во ВНИИЭФ до сих пор. Следует отметить, что коэффициент умножения нейтронов является очень важным параметром, характеризующим степень подкритичности РС: физически наглядным, легко измеряемым с высокой (порядка 1 %) точностью, так как является относительной величиной. Однако вблизи критического состояния ($Q > 1000$) его измерение затруднено вследствие длительного времени установления стационарного значения. Для надкритического состояния РС этот параметр теряет смысл, и реактивность измеряется в единицах $\beta_{\text{эф}}$.

Критмассовые измерения на установках ФКБН

Эксперименты по измерению коэффициента умножения сборок имели исключительно важное значение в начальный период работы с РС в интересах создания первых образцов ядерных зарядов типа РДС-1, а также зарядов с термоядерным усилением типа РДС-6с. В то время методы расчета зарядов были приближенными, данных о ядерных константах было очень мало, а их точность была невысокой. Поэтому расчетные значения характеристик размножения нейтронов в РС требовали проверки по результатам экспериментов, и измерения на установке ФКБН во ВНИИЭФ рассматривались и утверждались на самом высоком административном и научном уровнях (А. П. Завенягин, И. В. Курчатов, Ю. Б. Харитон, А. Д. Сахаров) [10].

На установке ФКБН-2(2М), в основном, проводились тестовые (benchmark) эксперименты в интересах проверки нейтронных констант для делящихся и конструкционных материалов.

Основным тестовым параметром для критическихборок (КС) является эффективный коэффициент размножения нейтронов, $k_{эф} = 1$. Процедура критмассовых измерений на установке ФКБН-2М и формулирования (формирования) расчетной критической модели, адекватной экспериментальной РС, заключается в следующем [11]:

– путем изменения состава деталей в РС подбирается конфигурация, близкая к критической, и фиксируется с помощью жестких упоров в механизме подъема нижней части РС;

– тщательно измеряется реактивность $\rho_0 = (k_{эф} - 1)/(k_{эф}\beta_{эф})$ подобранной РС и ее повторяемость при переборках РС;

– определяется возмущение реактивности РС, обусловленное опорами для частей РС, $\rho_{оп}$ (путем добавления к сборке аналогичных деталей); боковым и центральным ИН, $\rho_{ИН}$ (попеременно удаляя один из них); малыми образцами (пробками) из делящихся и конструкционных материалов, входящих в состав РС, $\rho_м$ (путем удаления или добавления их в цен-

тральный канал РС); смыканием РС, ρ_h (путем экстраполяции зависимости реактивности РС от размера щели между НБ и ВБ h к значению ρ при $h = 0$); приведением температуры сборки к 20°C , ρ_T (эта поправка существенна для РС, содержащих плутоний); стенами помещения стенда установки, $\rho_{от}$.

На основании данных, полученных при выполнении указанных процедур, формируется стендовая модель экспериментальной сборки в виде сферы, свободной от опорных конструкций и других отражателей, включая стены помещения, реактивность которой определяется как

$$\rho_{ст} = \rho_0 + \rho_{оп} + \rho_м + \rho_{от} + \rho_{ИН} + \rho_h + \rho_T. \quad (2)$$

Реактивность стендовой модели $\rho_{ст}$ обычно не равна нулю (стендовая модель слегка подкритическая или надкритическая). Путем изменения одной из характеристик (как правило, массы, добавляемой или удаляемой с поверхности или из центра РС) она доводится до критического состояния ($\rho = 0$) и переходит в разряд расчетной критической ($k_{эф} = 1$) сферической модели, для которой приводятся окончательные характеристики: размеры, масса, нуклидный состав.

Заметим, что измерение реактивности реальной РС на стенде ФКБН-2М с необходимой высокой точностью не является самым трудным этапом при получении тестовых данных. Основная трудность в достижении конечной цели заключается в формулировании расчетной модели, адекватной реальной РС, и в достоверной оценке погрешности тестового значения $k_{эф}$.

Расчетная модель экспериментальной критической сборки всегда является идеализированной системой, так как практически невозможно описать до мельчайших подробностей (с высокой точностью) ее конструкцию и нуклидный состав. В частности, это связано с наличием допусков при изготовлении каждой из деталей РС, со сложностью описания окружения РС (детали стенда, датчики нейтронов, технологическое оборудование и др.).

В экспериментах на установке ФКБН-2М использовались РС с близкой к сферической

геометрией, состоящие из деталей с известным изотопным и химическим составом, при этом обеспечивалась возможность учесть влияние на реактивность различных факторов (см. соотношение (2)). Это позволило формировать расчетные критические модели РС, адекватные реальной сборке, с погрешностью значения $k_{эф}$, удовлетворяющей тестовым требованиям [12]. Данные для 32 критических сборок, полученные на ФКБН-2М, включены в международный справочник [12].

Во ВНИИЭФ на установке ФКБН с разной степенью подробности были изучены свыше 1000 размножающих систем [9]. Из них более половины доводились до критического состояния. По предварительным оценкам около 200борок могут быть отобраны в качестве эталонных, для которых критические параметры определены с высокой точностью. Геометрия исследованныхборок обычно представляла собой шар или сферические слои.

В числе делящихся материалов изучены ^{233}U (90%), ^{239}Pu (98%) в δ -фазе, ^{239}Pu (88%) в α - и δ -фазах, ^{235}U (90%), ^{235}U (75%), ^{235}U (36%), ^{235}U (10%), [^{235}U (90%) + Mo (9%)], а также твердые имитаторы водных растворов ^{235}U (90%). В ряде систем активная зона (АЗ) содержала два из указанных ДМ. В качестве материалов отражателей в составе РС изучено более 30 материалов, наиболее широко используемых в технике: вода, полиэтилен, плексиглас, медь, графит, сталь, дюралюминий, бериллий, окись бериллия, ^{ест}U , ^{238}U , бетон, свинец, вольфрам, никель, V_4C , молибден, титан, (V_4C + полиэтилен), диффузионное масло, цирконий и др. Инертные материалы размещались снаружи АЗ, в центральной полости АЗ и между слоями из ДМ. Естественно,

КС использовались для модельных экспериментов по определению ядерно-физических характеристик активных зон создаваемых во ВНИИЭФ импульсных ядерных реакторов.

В табл. 1 в качестве примера приведены параметры критических шаров из различных ДМ без отражателя [12]. Обозначения в таблице: R_1 и R_2 – внутренний и внешний радиусы РС, $M_{кр}$ – критическая масса.

Ядерно-физические исследования

Помимо измерения критических масс ДМ на стенде ФКБН-2М систематически проводились различные ядерно-физические исследования [9, 13–15].

На «голых» критических сборках из ^{235}U (90%) и ^{239}Pu (98%) и КС с толстым отражателем из естественного урана с АЗ из ^{239}Pu (98%), ^{235}U (90%), ^{233}U , ^{235}U (36%) исследованы пространственно-энергетические распределения нейтронов и полных чисел реакций. При этом были измерены плотности и эффективные сечения различных энергочувствительных реакций, для которых с хорошей точностью известен ход сечения в зависимости от энергии нейтронов. Использовались реакции деления (n, f) изотопов ^{235}U , ^{233}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{237}Np , ^{232}Th , а также реакции $^{32}\text{S}(n, p)$, $^{238}\text{U}(n, 2n)$, $^{232}\text{Th}(n, 2n)$, $^{238}\text{U}(n, \gamma)$, $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$, $^6\text{Li}(n, \alpha)$, $^{10}\text{B}(n, \alpha)$.

На «голых» КС из ^{239}Pu (98%), ^{235}U (90%) и КС с АЗ из Pu (98%) в отражателе из естественного урана измерены возмущения реактивности малыми образцами различных (более 25) материалов. Для чего были изготовлены датчики нейтронов: ионизационные камеры

Таблица 1

Параметры критических шаров без отражателя

ДМ	R_1 , см	R_2 , см	$M_{кр}$, кг	$k_{эф}$
^{239}Pu (98%) в δ -фазе	1,40	6,670	18,792	1,0000±0,0021
^{239}Pu (88%) в α -фазе	0,80	5,350	12,051	1,0000±0,0021
^{235}U (90%)	1,00	9,154	59,047	1,0000 ±0,0014
^{235}U (36%)	0,00	15,324	277,312	1,0000 ±0,0017

с чувствительными слоями из многих нуклидов, литиевые и гелиевые счетчики, а также созданы многоканальные амплитудные и временные анализаторы электрических сигналов.

Спектры нейтронов в центре РС восставались по результатам измерений активационных и делительных интегралов. При этом измерялись делительные интегралы нуклидов: ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu – и активационные интегралы реакций $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$, $^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$, $^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$, $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$, $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$, $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$. Делительные интегралы измерялись с помощью малогабаритных ионизационных камер деления (ИКД) с метрологически аттестованными слоями делящегося нуклида. Измерения активационных интегралов проводились по радиоактивности продуктов реакции на эталонных радиометрических установках КРОНА-II-3 и ОСУ-II-10, входящих в состав отраслевой базы нейтронных измерений ВНИИЭФ.

Основой для восстановления спектра по измеренным значениям делительных и активационных интегралов является система интегральных уравнений вида

$$A_i = \int_{E_{Cd}^0}^{18\text{МэВ}} \sigma_i(E) f(E) dE, \quad (3)$$

где i – порядковый номер реакций; A_i – делительный или активационный интеграл; E – энергия нейтронов; $\sigma_i(E)$ – нейтронное сечение реакций; $f(E)$ – дифференциальный спектр нейтронов.

Эта система уравнений может иметь множество решений. Выбор конкретного решения осуществляется с помощью программы КАСКАД [16]. Погрешность измерений зависит от энергетического интервала спектра и обычно лежит в пределах 4–10 %.

Спектры нейтронов утечки из РС измеряются с помощью газового пропорционального счетчика ядер отдачи [17], имеющего цилиндрическую форму, длину 100 см, внутренний диаметр 7,5 см. В качестве рабочего газа используют метан высокой (99,99 %) чистоты. Основными достоинствами выбранного детектора являются относительно широкий диапазон измеряемой энергии нейтронов, хорошее

энергетическое разрешение, простота конструкции.

Экспериментальное изучение кинетики нейтронов в РС необходимо как для решения вопросов управления ядерными реакторами, так и для оценок энерговыделения в аварийных ситуациях. Экспериментальные значения кинетических параметров используются для тестирования нейтронных расчетов ядерно-физических характеристик РС. Важнейшими параметрами, определяющими кинетику нейтронов в РС, являются постоянная размножения (спада плотности) мгновенных нейтронов (α), время жизни (τ_0) и время генерации (τ_f) мгновенных нейтронов и эффективная доля запаздывающих нейтронов ($\beta_{эф}$). В критическом состоянии с учетом запаздывающих нейтронов эти параметры связаны между собой соотношением

$$\alpha_0 = \beta_{эф}/\tau_0; \quad \tau_0 = \tau_f. \quad (4)$$

В качестве примера ниже приведены результаты экспериментального определения кинетических характеристик (α , τ_0 , $\beta_{эф}$) для трех РС с АЗ из ^{239}Pu (98 %) в δ -фазе: «голой», с отражателями из железа и полиэтилена (обозначены на рис. 9 РС-1, РС-2, РС-3, соответственно) [15]. Спады плотности мгновенных нейтронов во времени и зависимости постоянной спада для этих сборок представлены на рис. 9. Критические параметры сборок (геометрия, нуклидный состав и др.) содержатся в международном справочнике [12].

Измерения временных спадов плотности мгновенных нейтронов в РС проводились при помощи методики БРИК [15], использующей программно-аппаратный комплекс NMIS [18]. Реактивность определялась методом обращенного решения уравнений кинетики (ОРУК) [6].

В размножающей системе, находящейся в подкритическом состоянии, плотность потока нейтронов в зависимости от времени описывается суммой экспонент, которые постепенно затухают. Константа α спада плотности потока мгновенных нейтронов – это показатель основной гармоники спада плотности потока мгновенных нейтронов. Экстраполяцией функции $\alpha = f(\rho)$ в точку $\rho = +1\beta_{эф}$ (соответ-

ствующую критическому состоянию РС без учета запаздывающих нейтронов) для каждой РС определены значения α_0 (точка пересечения функции $\alpha = f(\rho)$ с осью ординат). Время жизни мгновенных нейтронов вычислялось как

$$\tau_0 = \beta_{эф} / \alpha_0. \quad (5)$$

Эффективная доля запаздывающих нейтронов принята равной $\beta_{эф} = 0,00196 \pm 0,00003$.

Полученные значения кинетических параметров ($\beta_{эф}$, α_0 , τ_0) для «голой» сборки из ^{239}Pu (98 %) [15] представляется интересным сравнить с результатами измерений, проведенных ранее на этой же сборке другими методами. Такие данные представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что значения, полученные в разное время с использованием различной измерительной аппаратуры, совпадают между собой в пределах погрешности измерений.

Отметим, что критические сборки зачастую использовались в качестве источника нейтронов заданного энергетического спектра. Необходимая для эксперимента плотность нейтронного потока обеспечивалась соответствующей мощностью делений в КС. Экспериментальный спектр нейтронов утечки формировался, в основном, путем выбора материала и размеров инертных оболочек, а также материалом АЗ. В этих экспериментах изучались прохождение нейтронов через слои различных конструкционных материалов и плотность ряда ядерных реакций, регистрируемых датчиками, размещенными по объему облучаемого узла. Результаты экспериментов использовались для проверки нейтронных расчетов моделируемых систем.

На установке ФКБН-2М проводились работы [19] со сферическими сборками с большой (до 245 мм) центральной полостью в активной зоне, содержащей сферические слои

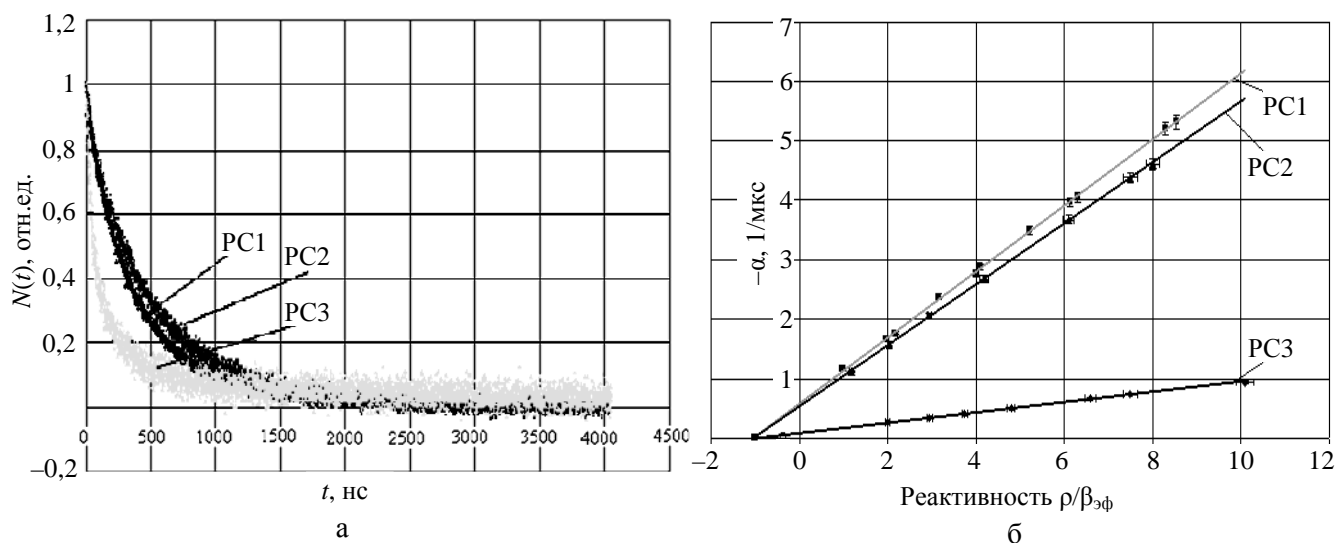


Рис. 9. Спады плотности мгновенных нейтронов во времени при $\rho/\beta_{эф} \approx -2$ (а) и зависимости постоянной спада мгновенных нейтронов от реактивности (б)

Таблица 2

Значения $\beta_{эф}$, α_0 , τ_0 для «голой» РС из ^{239}Pu в δ -фазе

Состав РС	$-\alpha_0$, мкс^{-1}	τ_0 , нс	Метод измерений
^{239}Pu (98 %) в δ -фазе, без отражателя ($\beta_{эф} = 0,00196 \pm 0,00003$)	$0,573 \pm 0,012$	$3,42 \pm 0,08$	БРИК/NWIS
	$0,57 \pm 0,01$	$3,44 \pm 0,08$	Росси- α
	$0,58 \pm 0,02$	$3,34 \pm 0,10$	Метод импульсного источника

из ^{235}U (90 %) и ^{235}U (36 %). Полость заполнялась сферическими вкладышами из перспективных материалов для ядерных и термоядерных энергетических установок: свинца (охлаждающий реагент), смеси фторидов $\text{NaF} + \text{ZrF}_4$ (охлаждающий реагент) и $\text{NaF} + \text{ZrF}_4 + ^{235}\text{UF}_4$ (топливо), ванадия и никеля (конструкционные материалы). Значения ядерно-физических параметров сборки с вкладышем в центре сравнивались с таковыми, полученными для той же сборки без вкладыша.

Эксперименты носили комплексный характер. Измерялись следующие основные нейтронно-физические характеристики РС:

- коэффициент умножения системой нейтронов источника («всеволновым» детектором);

- реактивность РС и ее возмущение различными макрообразцами (методом ОРУК);

- характеристики спада плотности мгновенных нейтронов, время жизни мгновенных нейтронов (двумя методами: Росси- α и БРИК/NMIS);

- скорости реакций деления и активации образцов (по осколкам деления с помощью ИКД, трековых детекторов и др., либо по γ -активности осколков деления (обычно ^{140}La , ^{143}Ce и др.));

- спектры нейтронов утечки и в центре сборки (восстанавливались по активационным и делительным интегралам).

Критические эксперименты проводились с относительно малым количеством исследуемого материала, размещаемого в центральной полости. Но эффективная толщина вкладыша при этом составляла несколько длин свободного пробега для быстрых нейтронов, что важно при изучении ядерно-физических характеристик материала вкладыша. Это достоинство эксперимента особенно существенно при изучении характеристик большого числа вкладышей сложного мольного состава, а также для дорогостоящих или редких материалов. Исключительно выгодна геометрия КС с вкладышем для измерения энергетического спектра нейтронов, формируемого в центре сборки, вследствие отсутствия фона рассеянных в помещении нейтронов.

Сборки, содержащие в центре шаровой вкладыш из свинца, смесей фторидов (так называемые модели солевого бланкета, МСБ) и никеля, имели примерно одинаковую активную зону.

В табл. 3 и на рис. 10 приведены параметры полой РС и РС с вкладышами из свинца и МСБ разного состава – МСБ1 и МСБ2 (обозначены на рис. 10 и в табл. 3 как РС2, РС1, РС3 и РС4, соответственно). В состав МСБ2 помимо $\text{NaF} + \text{ZrF}_4$ входил также и $^{235}\text{UF}_4$.

Таблица 3

Значения α_0 и τ_0 для полой РС и РС с вкладышами из свинца и МСБ

РС	$-\alpha_0$, 1/мкс	τ , нс
РС с вкладышем из свинца (РС1)	0,509±0,013	13,9±0,4
Полая РС (РС2)	0,535±0,012	13,3±0,4
РС с вкладышем из фторидов – МСБ1 (РС3)	0,39±0,02	18,2±0,5
РС с вкладышем из фторидов – МСБ2 (РС4)	0,45±0,02	15,8±0,5

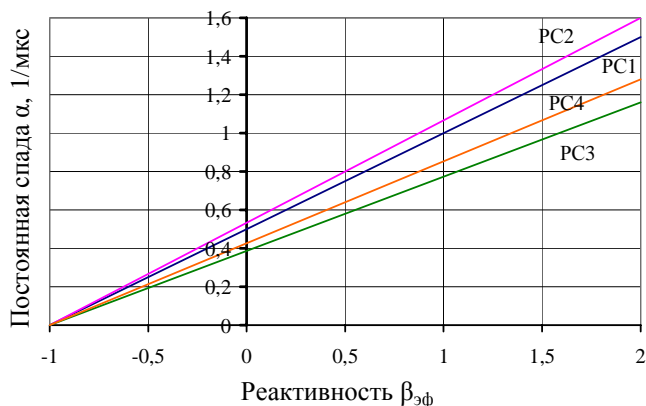


Рис. 10. Зависимость константы спада мгновенных нейтронов от реактивности для РС1 (РС со свинцом), РС2 (полая РС), РС3 (РС с МСБ1), РС4 (РС с МСБ2), измеренные при помощи БРИК/NMIS методики

В последнее время в России и за рубежом проявляется значительный интерес к двухсекционным реакторам-бланкетам с односторонней нейтронной связью секций (бланкетам каскадного типа). Эти устройства предназначены для работы в энергетических и трансмутационных электроядерных установках,

применительно к которым они позволяют существенно снизить требуемую мощность ускорителя протонов [20].

В 1979 г. в РФЯЦ-ВНИИЭФ был предложен способ осуществления односторонней нейтронной связи секций, заключающийся в использовании в качестве активного материала одной из секций ^{237}Np – порогово делящегося вещества, а также в разделении секций промежуточным слоем, снижающим энергию нейтронов до и ниже порога деления для нептуния (вольфрам и др.) [21–22].

В качестве показателя эффективности принципа каскадности применительно к бланкетам электроядерных установок принимается коэффициент каскадного усиления A , равный отношению чисел делений в каскадном (P , $P = P_1 + P_2$; P_1 , P_2 – числа делений в 1-й и 2-й секциях) и обычном (P_0) бланкетах, нормированных на один нейтрон первичного источника, при условии равенства $k_{\text{эф}}$ того и другого бланкета,

$$A = P/P_0. \quad (6)$$

Ниже приведены результаты первых экспериментов с двухсекционными системами каскадного типа, выполненных на стенде ФКБН-2М на компактных, глубоко подкритических уран-нептуниевых сборках [23]. В качестве первичного ИН использован ^{252}Cf -источник.

Эксперименты направлены, прежде всего, на подтверждение действенности ^{237}Np в качестве средства обеспечения односторонней связи секций и на проверку преимуществ каскадного бланкета в части понижения требований к мощности ускорителя, а также на проверку расчетных методик. В экспериментах измеряли (диэлектрическими трековыми детекторами (ДТД) осколков деления) распределения чисел делений по радиусу слоев из ^{237}Np (рис. 11) и ^{235}U (90 %), входящих в состав моделей каскадного и односекционного бланкетов, и коэффициенты умножения нейтронов ^{252}Cf -источника, размещенного в центре сборок.

Полученные результаты, представленные в табл. 4, свидетельствуют об удовлетворительном согласии экспериментальных и рас-

четных значений чисел делений в сборках и коэффициентов каскадного усиления A . Из эксперимента следует, что в полном соответствии с данными расчетов и теоретическими представлениями каждая из рассмотренных каскадных сборок характеризуется значительным каскадным усилением чисел делений, нормированных на один нейтрон источника, наиболее высоким каскадным усилением отличается сборка состава $\text{Np} - \text{CH}_2 - \text{U}$. Таким образом, можно констатировать, что представленный здесь эксперимент подтвердил теоретические заключения о свойствах каскадных бланкетов и эффективности ^{237}Np в качестве средства достижения односторонней связи секций.

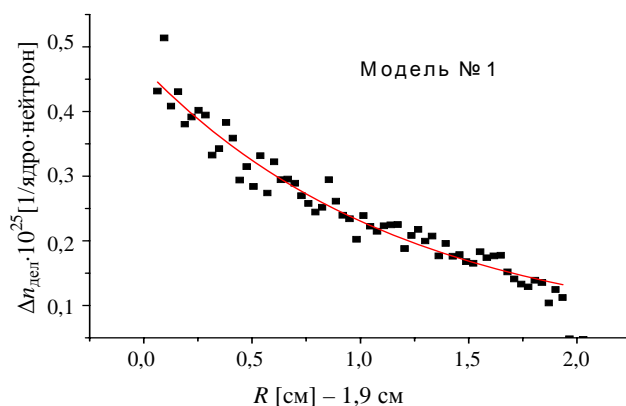


Рис. 11. Распределение плотности делений по радиусу нептуниевого слоя модельной сборки

Таблица 4

Результаты экспериментальных и расчетных исследований ядерно-физических характеристик двухкаскадных и однокаскадных моделей бланкетов

№ РС	Состав РС	$k_{\text{эф}}$	Коэффициент каскадного усиления A	
			Эксперимент	Расчет
1	Np, CH ₂ , U	0,617	1,71±0,07	1,82
2	Np, воздух, U	0,651	1,16±0,05	1,32
3	U, Cd+CH ₂ , U	0,611	1,45±0,08	1,50
4	U, воздух, U	0,601	1,05±0,05	0,98
5	U	0,584	0,61±0,03	0,62
6	CH ₂ , U	0,575	0,61±0,03	0,62

Исследования по ядерной критической безопасности

При работах с делящимися материалами важное значение имеет обеспечение ядерной критической безопасности (ЯКБ), т. е. создание условий, исключающих несанкционированное возникновение СЦР. Проблема обеспечения ядерной безопасности на предприятиях ядерно-оружейного комплекса возникла в начале 1950-х гг. Научно-методическое обеспечение ядерной безопасности при работах с металлическими ДМ (начиная с плавки и отливки заготовок) было поручено ВНИИЭФ.

Одна из задач – обеспечение ЯКБ при хранении и транспортировке металлических ДМ – была решена во ВНИИЭФ путем создания защищающего контейнера [24]. При его использовании не требуется соблюдать расстояние между контейнерами с ДМ и ограничения общего их количества. Это достигается включением в конструкцию контейнера поглощающего вещества в количестве, необходимом для компенсации размножения нейтронов ДМ таким образом, чтобы коэффициент умножения нейтронов, падающих на поверхность контейнера, не превышал единицы. В этом случае критическая масса не достигается при любом конечном числе контейнеров независимо от плотности их размещения.

Для этого был предложен и реализован способ экспериментальной оценки коэффициента умножения падающего на контейнер с ДМ потока нейтронов, сделавший возможным экспериментальный подбор требуемого количества поглотителя в контейнере.

Суть способа заключается в следующем. В центр сферически-симметричной модели защищающего контейнера, состоящей из ДМ, окруженного поглощающим нейтроны слоем, помещался ИН и измерялась интенсивность выходящего потока (счетность детектора нейтронов – J_1). Затем модель окружалась сферическим отражателем и снова измерялась интенсивность выходящего потока – J_2 . Из соотношений баланса потока нейтронов на внутренней и внешней поверхности отражателя можно получить

$$J_2/J_1 = (1 - D)/(1 - QD), \quad (7)$$

где D – коэффициент отражения (альbedo) потока нейтронов, падающего на внутреннюю поверхность отражателя; Q – коэффициент умножения нейтронов, падающих на внешнюю поверхность исследуемой модели. Из соотношения (7) видно, что при $Q < 1$ $J_2 < J_1$; при $Q = 1$ $J_2 = J_1$; при $Q > 1$ $J_2 > J_1$. Параметры слоя поглотителя (состав, геометрия, толщина) подбирались так, чтобы выполнялось неравенство $J_2 < J_1$.

В реальных условиях отражающая оболочка искажает энергетическое и угловое распределение падающего на нее потока нейтронов, что вносит погрешность в результаты эксперимента. Однако количественная оценка этой погрешности, произведенная путем сравнения с расчетом по методу Монте-Карло, показала, что эксперименты будут завышать (на ~20 %) необходимую толщину слоя поглотителя в контейнере, что по знаку погрешности является благоприятным фактором с точки зрения ядерной безопасности [24].

В качестве замедлителя в защищающем контейнере может быть использован любой содержащий водород материал (полиэтилен, парафин, плексиглас, дерево и т. п.). В качестве поглотителя замедлившихся нейтронов – бор, кадмий и др. В качестве дополнительной оболочки в опытах использовалась оболочка из графита толщиной около 7 см, поскольку она практически не поглощала нейтроны и сравнительно слабо их замедляла (т. е. была наиболее близка к «идеальной»). Детектором нейтронов служил пропорциональный счетчик с BF_3 в парафине.

С использованием описанной выше методики была проведена большая серия экспериментов по подбору материалов защищающей оболочки, ее толщины, способа расположения относительно ДМ и других параметров для различных масс плутония (в α - и δ -фазах) и для урана 90 % обогащения. На основании результатов этих экспериментов были выданы необходимые рекомендации по параметрам защищающих контейнеров, которые затем были разработаны во ВНИИЭФ и внедрены для хранения и транспортировки металлических делящихся материалов в атомной промышленности России.

Проведения критмассовых экспериментов во ВНИИЭФ имеет 65-летнюю историю. За это время на СКС типа ФКБН с разной степенью подробности были изучены свыше 1000 размножающих систем. Полученные результаты имеют большую научную ценность. Более 30 наших тестовых критических сборок включены в международный справочник [12] и информационные материалы комитета по ядерным данным МАГАТЭ. Важно отметить, что все экспериментальные исследования на установках ФКБН проводились в тесном сотрудничестве с теоретическим подразделением ВНИИЭФ, и в будущем необходимо сохранить эту традицию.

По нашему глубокому убеждению, возможность проведения критических экспериментов должна сохраняться до тех пор, пока на Земле существуют делящиеся материалы. Главными задачами будущих экспериментов являются получение данных для совершенствования систем эффективных ядерных констант и обеспечение ядерной безопасности при работах с ДМ. При этом исследования должны иметь комплексный характер (для каждой сборки измеряться максимально возможное число параметров). Необходимость такого подхода к экспериментам подтверждается началом издания нового международного справочника эталонных экспериментов по физике ядерных реакторов [25]. Особое внимание должно уделяться повышению точности получаемых результатов и безопасности проведения работ.

Введенная в сентябре 2015 г. в эксплуатацию установка ФКБН-3, укомплектованная уникальным набором деталей из делящихся и конструкционных материалов, а также оснащенная современными методиками ядерно-физических измерений, является ценным инструментом для экспериментального изучения размножающих систем в интересах создания банка данных по тестовым (benchmark) критическим сборкам для проверки нейтронных констант.

В заключение авторы выражают свою признательность всем коллегам по совместным работам, использованным в обзорном докладе.

1. Зельдович Я. Б., Харитон Ю. Б. К вопросу о цепном распаде основного изотопа урана // ЖЭТФ. 1939. Т. 9, вып. 12. С. 1425–1427.
2. Зельдович Я. Б., Харитон Ю. Б. Деление и цепной распад урана // УФН. 1940. Т. 23, вып. 4. С. 329–357.
3. Замятнин Ю. С. Воспоминания об участии в Атомном проекте // Вестник истории естествознания и техники. 1996. № 2. С. 140–150.
4. Достояние РОССИИ. РФЯЦ-ВНИИЭФ 60 лет. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2006.
5. McLaughlin T. P., Monahan S. P., Pruvost N. L. et al. A Review of Criticality Accidents. 2000 Revision. LA-13638 (2000).
6. Воинов А. М., Егоров В. П., Запольский А. Е. и др. Стенд для исследования нейтронно-физических характеристик простых критическихборок // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 1992. Вып. 2. С. 21–29.
7. Voinov A. M., Voinov M. A., Vorontsov S. V. et al. Nuclear safety in pulse reactor and critical assembly operations at RFNC-VNIEF // Proceedings of the 8th International Conference on Nuclear Criticality Safety. – St. Petersburg, 2007. Vol. II. P. 348–353.
8. Narozhnyi A. T., Vorontsov S. V., Golubeva O. A. et al. Development of training simulator based on critical assemblies test bench // Proceedings of the 8th International Conference on Nuclear Criticality Safety. St. Petersburg, 2007. Vol. II. P. 319–323.
9. Kuvshinov M. I., Voinov A. M., Zagorov V. G. The History of Works on Nuclear Criticality in RFNC-VNIEF // Proceedings of the Fifth International Conference on Nuclear Criticality Safety. – Albuquerque, New Mexico, USA, September 17–21. 1995.
10. Воинов А. М., Воронцов С. В., Смирнов И. Г. Организация работы и методы обеспечения безопасности ядерно-физических исследований критических систем на быстрых нейтронах // Охрана труда и безопасность ядерного оружия. Сборник материалов научно-технической конференции. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2000. С. 68–80.

11. 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 ядерных реакторов. 2000. Вып. 2/3. С. 142–149.
12. International Handbook of Evaluated Critical Safety Benchmark Experiments. NEA Nuclear Science Committee. OECD. Paris. France. 2000 Edition.
13. Zakharov A. N., Kuvshinov M. I., Smirnov I. G. The Modern Problems and Research Program on Nuclear Criticality Safety in VNIIEF // Proceedings of the Fifth International Conference on Nuclear Criticality Safety. Albuquerque, New Mexico, USA. September 17–21. 1995.
14. Fomushkin E., Novoselov G., Kuvshinov M. et al. Investigations of Neutron Characteristics for Salt Blanket Models, Integral Fission Cross Section Measurements of Neptunium, Plutonium, Americium and Curium Isotopes // Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology. Tsukuba, Ibaraki, Japan. 2001. Vol. 2. P. 1213–1216.
15. Кайгородов А. А., Кувшинов М. И., Пешехонов Д. П. Экспериментальные исследования кинетики мгновенных нейтронов в критических сборках на установке ФКБН-2М в РФЯЦ-ВНИИЭФ // Атом. 2009. № 44. С. 40–41.
16. Маслов Г. Н., Севастьянов В. Д., Кошелев А. С. Метод расчета спектров нейтронов по результатам измерений с интегральными детекторами, реализованный в новой версии программы КАСКАД // Измерительная техника. 2003. № 5. С. 58–62.
17. Швецов А. М., Егоров В. П., Захаров А. Н. и др. Измерение спектров нейтронов утечки сферических критическихборок из U-235(90%), U-235(36%), Pu-239(98%) // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2000. Вып. 2/3. С. 142–149.
18. Mihalcz J. T., Mullens J. A., Mattingly J. K. et al. Physical description of nuclear materials identification system (NMIS) signatures // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. 2000. Vol. 450. P. 531.
19. Тестовые критические эксперименты на установке ФКБН-2М в интересах ядерной критической безопасности. (Сферические сборки с большой центральной полостью в активной зоне) // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2010. Вып. 15. С. 190–203.
20. Колесов В. Ф. Электроядерные установки и проблемы ядерной энергетики. Монография. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2013.
21. А.с. 786619. МПК G21C1/28. Двухкаскадный умножитель нейтронов / В. Ф. Колесов, А. А. Малинкин // Открытия. Изобретения. 1991. № 30.
22. Завьялов Н. В., Колесов В. Ф., Пунин В. Т. Разработка во ВНИИЭФ концепции каскадных реакторов // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2012. Вып. 17. С. 132–141.
23. Завьялов Н. В., Колесов В. Ф., Кувшинов М. И. и др. Экспериментальное подтверждение концепции двухсекционных бланкетов каскадного типа // Атомная энергия. 2003. Т. 95, вып. 6. С. 414–422.
24. Voinov A. M., Zagrafov V. G., Kuvshinov M. I., Yuferev V. I. The Overview of VNIIEF Nuclear Criticality Safety Research Proceedings of the Fifth International Conference on Nuclear Criticality Safety. Albuquerque, New Mexico, USA, September 17–21. 1995.
25. Nuclear Energy Agency. International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments. 2009 Edition.

Контактная информация –

Воронцов Сергей Владимирович,
первый заместитель директора ИЯРФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ,
e-mail: vorontsov@expd.vniief.ru

Статья поступила в редакцию 10.06.2016.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2016, вып. 4, с. 24–39.