

УДК 621.039.51

История развития критмассовых экспериментов в РФЯЦ-ВНИИЭФ

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

В историческом аспекте рассматривается создание установок для проведения экспериментальных исследований на критических сборках из металлических делящихся материалов. Кратко представлены работы, выполненные в РФЯЦ-ВНИИЭФ в интересах создания новых импульсных ядерных установок, получения информации для тестирования интегральных ядерных данных, обеспечения ядерной безопасности при производстве, хранении и транспортировке металлических делящихся материалов.

История создания стенов для проведения критмассовых экспериментов

Вопрос о принципиальной возможности осуществления самоподдерживающейся цепной реакции деления ядер урана и его кинетике впервые был рассмотрен 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. Флёрова в Челябинске-40 (ныне ПО «Маяк», г. Озерск) в 1949 г. [3]. Установка состояла из металлической подставки-станины для размещения нижней часть размножающей системы (РС), устройства для вертикального перемещения верхней части РС с помощью троса и ручной лебедки, всеволнового детектора нейтронов и регистрирующей аппаратуры, световой и звуковой сигнализации скорости счета нейтронов (рис. 1). Безопасность эксперимента при каждом перемещении верхней части РС относительно нижней части обеспечивалась с помощью разделительных прокладок необходимой толщины. По инициативе Ю. С. Замятнина установка получила название ФиКоБыН (физический котел на быстрых нейтронах), которое сократилось до аббревиатуры ФКБН и сохранилось для всех последующих вариантов стенов для критическихборок (СКС). Эти эксперименты 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. Флёрова при активном участии П. Д. Ширшова [4]. Стенд ФКБН начал эксплуатироваться на одной из производственных площадок ВНИИЭФ в 1950 г. и представлял собой устройство (рис. 2), обеспечивающее дистанционное перемещение нижней части РС вверх на 200 мм с помощью гидравлического механизма. Верхняя часть РС оставалась неподвижной. Точность и повторяемость позиционирования нижней части РС относительно верхней обеспечивались с помощью проставок. 9 апреля 1953 г. на стенде ФКБН произошла авария [5], основной причиной которой явилась ошибка оператора, установившего проставки меньшей толщины. Одновременно выяснилось, что привод стенов и алгоритм СУЗ имели

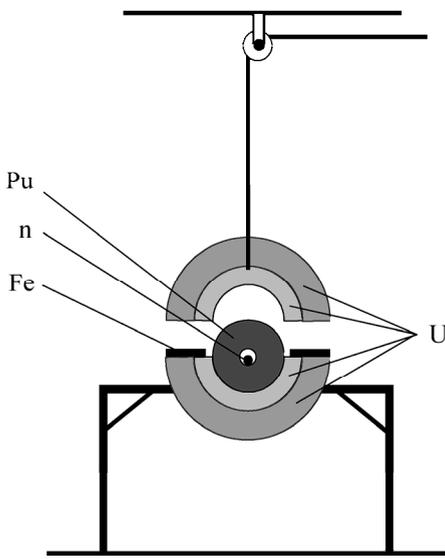


Рис. 1. Схема первого критмассового эксперимента (1949 г.)

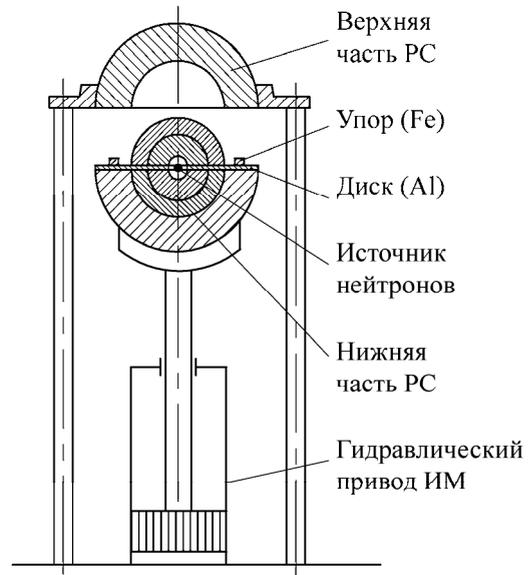


Рис. 2. Схема критического стенда ФКБН (1950 г.)

недостатки: во-первых, обеспечивалась защита только от медленных переходов через критическое состояние и, во-вторых, 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 перечисленные недостатки. Проектированию предшествовала выполненная Г. А. Гончаровым большая расчетно-теоретическая работа 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 сведение частей РС с необходимой скоростью, а аварийная защита осуществлялась путем 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 критических сборок), который предназначался для изучения кинетических процессов в РС с использованием нейтронного генератора. Конструкция стенда МСКС (рис. 4) была аналогична конструкции стенда ФКБН-1. В ходе 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 приводе 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.

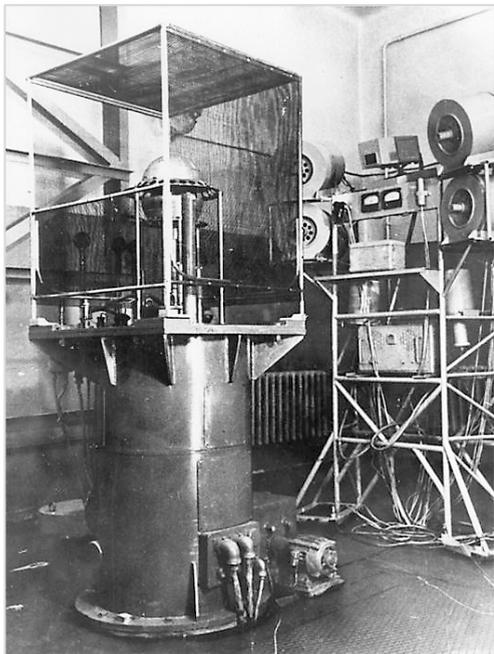


Рис. 3. Стенд ФКБН-1

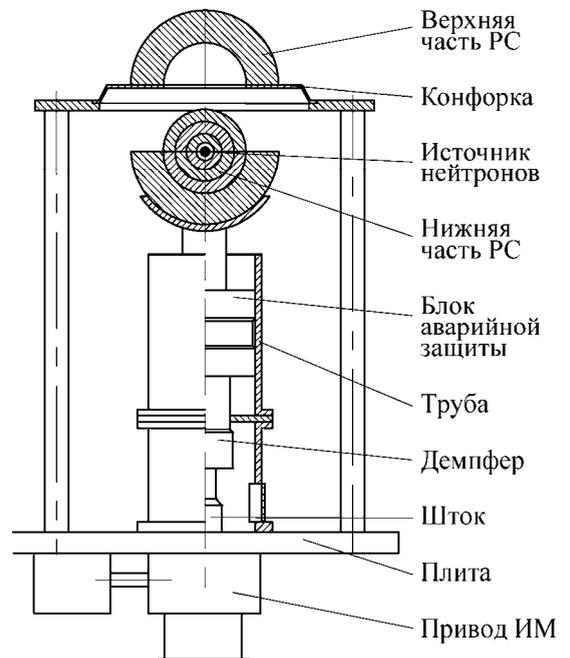


Рис. 4. Схема стенда МСКС

В 1963 г. введен в эксплуатацию стенд ФКБН-2 (рис. 5), расположенный в отдельном здании. Особенность конструкции стенда заключалась в разнесении нижней и верхней частей РС в горизонтальном направлении на 1 м и введении пробки для плавной регулировки реактивности вблизи критического состояния [6]. Такая схема значительно повысила безопасность проведения работ. Механизм подъема стола был оснащен дистанционно 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 сближении частей 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, 17.06.1997 г. на стенде ФКБН-2М произошла авария, повлекшая гибель старшего инженера по управлению [5]. После аварии и разборки аварийной РС работы на стенде были остановлены. В результате установления причин аварии и проведения вероятностного анализ безопасности выполняемых работ в конструкцию ФКБН-2М были внесены усовершенствования, направленные на повышение безопасности работ [7]: пневматическая система для перемещения источника нейтронов, механизм перемещения контейнера центрального канала и защитное ограждение нижней части РС. Также был пересмотрен регламент проведения экспериментов [7]. Теперь перед началом работ выполнялся предварительный расчет, описывающий изменение $k_{эф}$ в процессе сборки РС (так называемый компьютерный эксперимент), для выбора оптимальной конфигурации РС. Сначала в работу выдаются детали из делящегося материала (ДМ) только для сборки

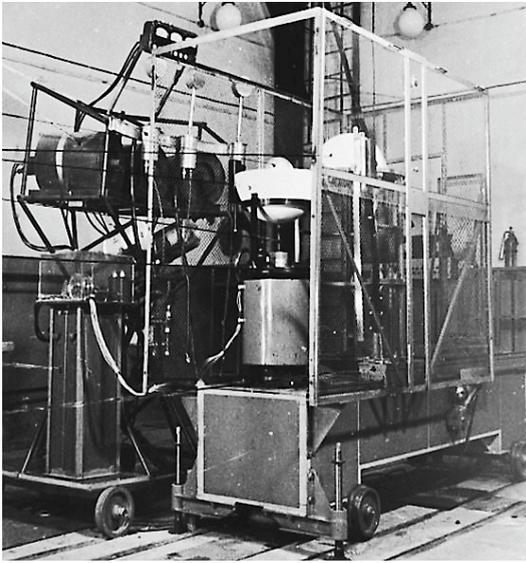


Рис. 5. SKS ФКБН-2

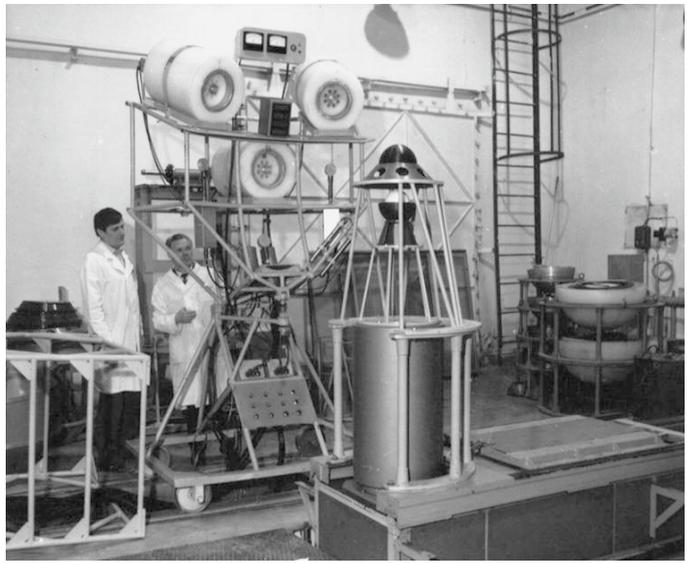


Рис. 6. SKS ФКБН-2М (1976 г.)

нижней части (нижнего блока) РС. СУЗ при этом обеспечивает автоматическую доставку нейтронного источника к месту сборки. После завершения сборки нижний блок закрывается сеткой, предотвращающей приближение к нему посторонних предметов. Затем нейтронный источник перемещается к месту сборки верхней части (верхнего блока), после этого выдаются детали из ДМ и производится сборка верхнего блока. Защитная сетка с нижнего блока удаляется автоматически при дистанционном перемещении каретки с верхнего блока в рабочее положение.

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

В 2008 г. началась разработка комплекса ФКБН-3 с новым электромеханическим стендом 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 уделялось выбору технических средств по контролю перемещения и точности позиционирования стола, что позволило:

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

В связи с созданием комплекса ФКБН-3 в 2013 г. SKS ФКБН-2М был выведен из эксплуатации и демонтирован. Физический пуск комплекса ФКБН-3 был осуществлен в ноябре 2014 г., ввод комплекса в эксплуатацию состоялся в сентябре 2015 г.

Создание полномасштабного тренажера на базе стенда ФКБН-2М

При подготовке любого критмассового эксперимента части РС собирают вручную. Эта стадия эксперимента связана с максимальным риском для персонала. Ошибка, влекущая за собой

преждевременное достижение критического состояния, грозит персоналу переоблучением и, возможно, гибелью. Одно из технических средств, способных повысить качество подготовки специалистов и сократить время освоения технологии работы с РС, – это тренажер, позволяющий моделировать сборку РС на комплексе ФКБН-2М [8]. Процесс сборки РС из полномасштабных макетов деталей в зале и работа за пультом полностью имитируют реальную ситуацию. Нейтронный поток утечки имитирует программное обеспечение тренажера.

Перед сборкой детали проходят идентификацию по внешним параметрам и по штрих-кодам. В процессе сборки учебного макета РС воспроизводятся действия персонала, соответствующие штатной ситуации, а также демонстрируется возможная реакция РС при ошибке оператора и возникновении аварийной ситуации. В банк данных тренажера занесена информация о материальных характеристиках систем (размерах, материалах, массе, нуклидном составе) и о нейтронно-физических параметрах компонентов этих систем на всех этапах сборки. Изготовлены полномасштабные макеты деталей из различных ДМ. Для имитации работы измерительных каналов нейтронного потока использовались значения из банка данных. Компьютерная модель пульта управления СКС достоверно имитировала работу оператора при сведении частей РС.

Состав СКС и алгоритм проведения крит.массового эксперимента

Рассмотрим кратко состав и конструкцию установки ФКБН-2М (ФКБН-2), так как большинство экспериментов выполнено именно на ней.

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

- электромеханический стенд, на котором осуществляется поэтапная сборка частей РС и последующее дистанционное их сведение для создания критической конфигурации РС;
- автоматизированная СУЗ, позволяющая оператору 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, имеющем толстые (1–3 м) бетонные стены и потолок для защиты персонала от нейтронного и гамма-излучения, а также от взрывного воздействия при гипотетической аварии. Стенд позволял собирать РС массой до 2000 кг и диаметром до 100 см и состоял из пяти основных блоков (рис. 8):

- подвижного стола с приспособлениями для крепления нижней части РС и ее перемещения в вертикальном направлении;
- каретки с подставкой для крепления верхней части РС, перемещаемой в горизонтальном направлении для установки верхней части РС над нижней, обеспечивающей их соосность;
- механизма дистанционной загрузки детекторов нейтронов в центр РС;
- регулирующей пробки с механизмом ее перемещения в вертикальном направлении относительно нижней части РС;
- устройства для пневматического перемещения источника нейтронов к собираемой части РС.

При монтаже РС разделяется на два подкритических блока: – нижний и верхний. Нижний блок (подвижный в вертикальном направлении) свободно лежит на специальной опоре. Верхний блок (подвижный в горизонтальном направлении) лежит на тонкой кольцевой диафрагме из стали.

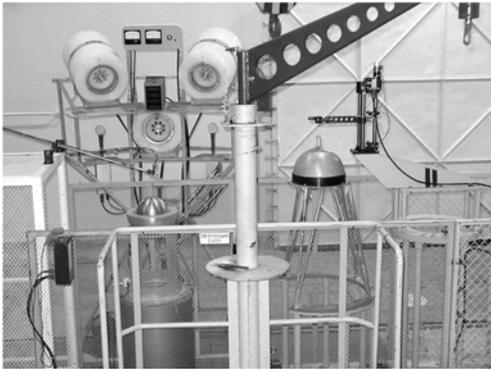


Рис. 7. Электромеханический
стенд ФКБН-2М

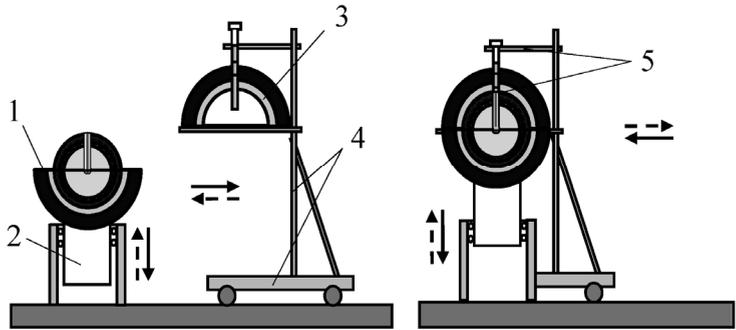


Рис. 8. Схема электромеханического стенда ФКБН-2М:
1 – нижний блок; 2 – стол, перемещаемый вертикально;
3 – верхний блок; 4 – каретка, перемещаемая горизонтально;
5 – устройство загрузки центрального канала

Для образования критической конфигурации блоки РС дистанционно сближаются: сначала верхний блок надвигается над нижним, затем нижний блок поднимается вверх. Изменение реактивности РС осуществляется путем дистанционно управляемого сближения (разведения) ее частей.

Подвижной стол перемещался со скоростью 0,01; 0,1 и 1 мм/с. Высота подъема стола от крайнего нижнего положения в верхнее – 200 мм. Скорость перемещения регулирующей пробки – 0,1 и 1 мм/с, высота подъема – 100 мм. Скорость движения каретки – 5 мм/с, длина пути – 1000 мм. Перемещение всех регулирующих органов стенда осуществлялось с помощью электродвигателей, управляемых с пульта, размещенного за биологической защитой, и контролировалось СУЗ. Механизм подъема подвижного стола был снабжен дистанционно управляемым упором и сменными механическими упорами, позволяющими ограничивать высоту его подъема. Стол являлся также основным исполнительным механизмом аварийной защиты: аварийный сигнал СУЗ вызывал разрыв цепи питания электромагнитов стола и его сброс вместе с регулирующей пробкой в нижнее положение под действием силы тяжести.

СУЗ контролировала и выдавала 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 предписывала оператору наиболее безопасный алгоритм управления стендом и технологическим оборудованием путем пропускания или блокирования его команд с пульта управления к исполнительным механизмам системы. СУЗ автоматически выдавала ряд сигналов для обеспечения радиационной и ядерной безопасности работ на установке ФКБН-2М.

Основные нейтронно-физические характеристики РС, измеряемые с помощью штатного оборудования установки ФКБН-2М:

- коэффициент умножения системой нейтронов источника;
- реактивность и возмущение реактивности различными образцами;
- 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. Металлических делящихся материалов было недостаточно для достижения критической массы, поэтому в основном измерялся коэффициент умножения (Q) нейтронов сборкой, содержащей ДМ [9].

Алгоритм экспериментов (он сохранился и в настоящее время) заключался в следующем [9]. Сначала на стенде установки ФКБН монтировалась «инертная» модельная сборка, отличающаяся от изучаемой РС только тем, что вместо деталей из ДМ в ней устанавливались свинцовые или медные детали. В центре модельной сборки, как и в РС, всегда имелась небольшая воздушная полость, в которой устанавливался изотопный источник нейтронов. Обычно это был Po- α -Be «имитирующий» источник, 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 начиналась сборка РС. Источник нейтронов все время (до размещения в центре 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 «шелкуном»), т. е. имелась звуковая сигнализация уровня нейтронного потока.

Сборку РС производили двое – ответственный руководитель работ и его помощник. Ответственными руководителями на установке ФКБН были немногие; 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.

Помощник брал деталь из ДМ и подавал ее находящемуся на сборочном стапеле ответственному руководителю, который добавлял деталь к сборке, поглядывая на показания «интенсиметра» и прислушиваясь к «шелкуну», чтобы при чрезмерно быстром нарастании потока нейтронов удалить деталь от сборки. Обычно перед тем как добавить очередную деталь, ответственный руководитель приближал свои руки к РС и смотрел по «интенсиметру», как это воздействует на реактивность системы.

При определенных положениях нижнего блока его подъем 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 источником нейтронов в центре, $J_{\text{Ф}}$ – поток нейтронов из РС без источника нейтронов (для РС с плутонием), J_0 – поток нейтронов из «инертной» модели РС с источником нейтронов.

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, поскольку 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 исключительное 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-бс. В то время методы расчета зарядов были приближенными, данных о ядерных константах было очень мало, а их точность была невысокой. Поэтому расчетные значения нейтронных характеристик изделий требовали проверки по результатам экспериментов, а измерения на установке ФКБН во ВНИИЭФ рассматривались и утверждались на самом высоком административном и научном уровне: А. П. Завенягиным, И. В. Курчатовым, Ю. Б. Харитоном, А. Д. Сахаровым [10].

На установке ФКБН-2(2М) проводились в основном тестовые эксперименты в интересах проверки нейтронных констант для делящихся и конструкционных материалов. Основным тестовым параметром для критическихборок является эффективный коэффициент размножения нейтронов, $k_{эф} = 1$. Процедура измерений и формирования расчетной критической модели, адекватной экспериментальной РС, заключается в следующем [11]:

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

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

3) определяется возмущение реактивности РС, обусловленное:

- опорами для частей РС (путем добавления к сборке аналогичных деталей) – $\rho_{оп}$;
- боковыми и центральными источниками нейтронов (попеременно удаляется один из них) – $\rho_{ин}$;
- малыми образцами (пробками) из делящихся и конструкционных материалов, входящих в состав РС (путем удаления или добавления их в центральный канал РС), – $\rho_{м}$;
- смыканием РС (путем экстраполяции зависимости реактивности от размера щели между нижним и верхним блоками h к значению ρ при $h = 0$) – $\rho_{н}$;
- приведением температуры РС к 20 °С (важно для РС, содержащих плутоний) – $\rho_{т}$;
- стенами помещения стенда установки – $\rho_{от}$.

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

$$\rho_{ст} = \rho_0 + \rho_{оп} + \rho_{м} + \rho_{от} + \rho_{ин} + \rho_{н} + \rho_{т}. \quad (2)$$

Реактивность стендовой модели $\rho_{ст}$ обычно не равна нулю (стендовая модель слегка подкритична или надкритична). Изменением 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 сферической модели, для которой приводятся окончательные характеристики: размеры, масса, нуклидный состав.

Заметим, что измерение реактивности реальной РС на стенде ФКБН-2М с высокой точностью – не самый трудный этап получения тестовых данных. Основная трудность заключается

в формулировании расчетной модели, адекватной реальной РС, и достоверной оценке погрешности тестового значения $k_{эф}$.

Сформированная модель экспериментальной критической сборки всегда является идеализированной системой, так как практически невозможно досконально описать ее конструкцию и нуклидный состав из-за наличия допусков при изготовлении каждой из деталей РС, сложности описания окружения РС (детали стенда, датчики нейтронов, технологическое оборудование и пр.) и т. д.

В экспериментах на установке ФКБН-2М использовались РС с близкой к сферической геометрии, состоящие из деталей с известным изотопным и химическим составом; при этом учитывалось влияние на реактивность различных факторов (см. (2)). Это позволило формировать расчетные критические модели РС, адекватные реальной сборке, с погрешностью значения $k_{эф}$, удовлетворяющей тестовым требованиям [12]. Данные для 32 критическихборок, полученные на ФКБН-2М, включены в международный справочник [12].

На установке ФКБН с разной степенью точности 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 шар или сферические слои. Изучены делящиеся материалы: ^{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 отражателей в составе РС изучено более 30 наиболее широко применяемых материалов: вода, полиэтилен, плексиглас, медь, графит, сталь, дюралюминий, бериллий, окись бериллия, естественный 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 ее центральной полости и между слоями из ДМ.

Естественно, СКС использовали для модельных экспериментов по определению ядерно-физических характеристик активных зон создаваемых во ВНИИЭФ импульсных ядерных реакторов. В табл. 1 в качестве примера приведены критические параметры шаров из различных ДМ без отражателя [12].

Таблица 1

Критические параметры 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	$1,0000 \pm 0,0021$
^{239}Pu (88 %) в α -фазе	0,80	5,350	12,051	$1,0000 \pm 0,0021$
^{235}U (90 %)	1,00	9,154	59,047	$1,0000 \pm 0,0014$
^{235}U (36 %)	0,00	15,324	277,312	$1,0000 \pm 0,0017$

Примечание: 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 и другие ядерно-физические исследования [9, 13–15].

На «голых» критических сборках из ^{235}U (90 %) и ^{239}Pu (98 %) и критических сборках 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; измерены 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}S (n, p), ^{238}U (n, 2n), ^{232}Th (n, 2n), ^{238}U (n, γ), ^{197}Au (n, γ), ^6Li (n, α), ^{10}B (n, α).

На критических сборках из ^{239}Pu (98 %), ^{235}U (90 %) и критических сборках с АЗ из ^{239}Pu (98 %) в отражателе из естественного урана измерены возмущения реактивности малыми образцами различных (более 25) материалов. Для этих измерений были изготовлены датчики нейтронов – ионизационные камеры 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 восстанавливались 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}Au (n, γ) ^{198}Au , ^{63}Cu (n, γ) ^{64}Cu , ^{115}In (n, n') $^{115\text{m}}\text{In}$, ^{58}Ni (n, p) ^{58}Co , ^{27}Al (n, α) ^{24}Na , ^{32}S (n, p) ^{32}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

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

где i – порядковый номер реакции; 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 осуществлялся с помощью программы КАСКАД [16]. Погрешность измерений зависит от энергетического интервала спектра и обычно находится в пределах 4–10 %.

Спектры нейтронов утечки из РС измерялись с помощью газового пропорционального счетчика ядер отдачи [17] цилиндрической формы (длина 100 см, внутренний диаметр 7,5 см). Рабочий газ – метан высокой чистоты 99,99 %. Основные достоинства выбранного устройства – 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 соотношениями:

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

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 [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].

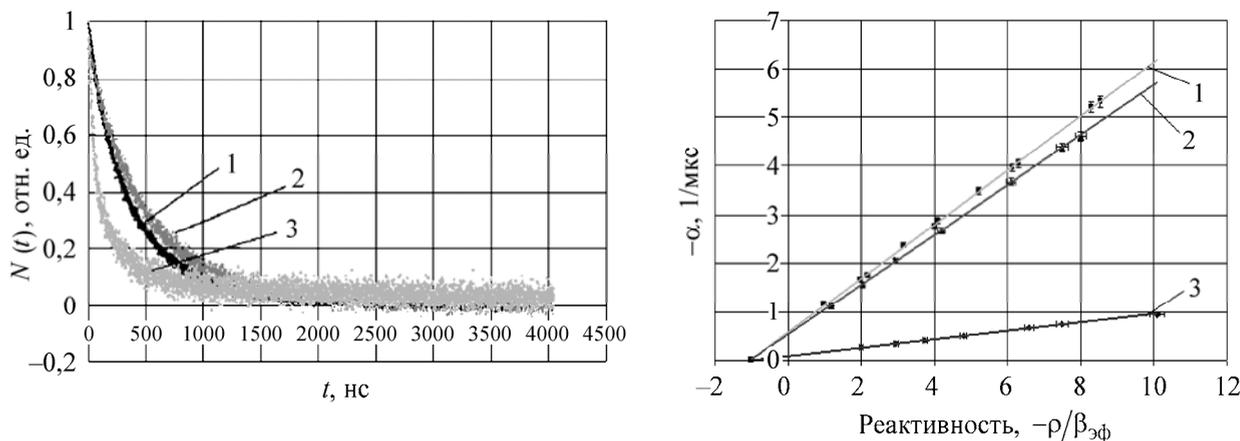


Рис. 9. Спады плотности мгновенных нейтронов во времени при $\rho/\beta_{эф} \approx -2$ (а)

и зависимости постоянной спада мгновенных нейтронов от реактивности (б):

1 – «голая» РС; 2 – РС с отражателями из железа; 3 – РС с отражателями из полиэтилена

Измерения временных спадов плотности мгновенных нейтронов в РС проводились с помощью 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 спада плотности потока мгновенных нейтронов α – это показатель основной гармоника спада плотности потока мгновенных нейтронов. Экстраполяцией функции $\alpha = f(\rho)$ в точку $\rho = +1\beta_{эф}$, соответствующую критическому состоянию РС без учета запаздывающих нейтронов, для каждой РС определены значения α_0 (точки пересечения функции $\alpha = f(\rho)$ с осью ординат). Время жизни мгновенных нейтронов

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

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

Интересно сравнить значения кинетических параметров ($\beta_{эф}$, α_0 , τ_0) для «голой» сборки из ^{239}Pu (98 %) [15] с результатами измерений, проведенных ранее на этой же сборке, но другими методами (табл. 2). Видно, что результаты измерений совпадают в пределах погрешности.

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/NMIS
	$0,57 \pm 0,01$	$3,44 \pm 0,08$	Росси- α
	$0,58 \pm 0,02$	$3,34 \pm 0,10$	Метод импульсного источника

Зачастую критические сборки использовались в качестве источника нейтронов заданного энергетического спектра. Необходимая в опыте плотность нейтронного потока обеспечивалась соответствующей мощностью делений в критической сборке. Экспериментальный спектр нейтронов утечки формировался в основном путем выбора материала и размеров инертных оболочек, а также материала АЗ. В экспериментах изучали 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, содержащей сферические слои 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 сборки без вкладыша.

Эксперименты носили комплексный характер. Измерялись следующие основные нейтронно-физические характеристики РС: коэффициент умножения («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 ионизационной камеры деления, трековых детекторов и др. либо по γ -активности осколков деления); спектры нейтронов утечки и в центре сборки (восстанавливались по активационным и делительным интегралам).

Критические эксперименты проводили с небольшим 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 молярного состава, а также дорогостоящих или редких материалов. Исключительно выгодна геометрия критической сборки с вкладышем для измерения энергетического спектра нейтронов, формируемого в центре сборки вследствие отсутствия фона рассеянных нейтронов.

Сборки, содержащие в центре шаровой вкладыш из свинца, смесей фторидов (так называемые модели солевого бланкета (МСБ)) и никеля, имели примерно одинаковую АЗ. В табл. 3 и на рис. 10 приведены параметры полой РС и РС с вкладышами из свинца и МСБ разного состава.

В последнее время в России и за рубежом отмечается значительный интерес к двухсекционным реакторам-бланкетам с односторонней нейтронной связью секций (бланкетам каскадного

типа). Эти устройства предназначены для работы в энергетических и трансмутационных электро-ядерных установках, они позволяют существенно снизить требуемую мощность ускорителя протонов [20].

Таблица 3

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

РС	$-\alpha_0, 1/\text{мкс}$	$\tau, \text{нс}$
РС с вкладышем из свинца	$0,509 \pm 0,013$	$13,9 \pm 0,4$
Полая РС	$0,535 \pm 0,012$	$13,3 \pm 0,4$
РС с вкладышем из фторидов (МСБ1)	$0,39 \pm 0,02$	$18,2 \pm 0,5$
РС с вкладышем из фторидов (МСБ2)	$0,45 \pm 0,02$	$15,8 \pm 0,5$

Примечание: в состав МСБ2, помимо NaF + ZrF₄, входил также ²³⁵UF₄.

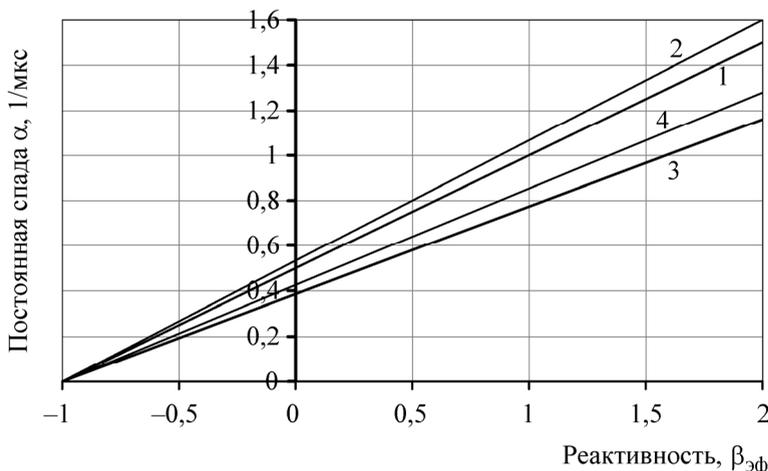


Рис. 10. Зависимости константы спада мгновенных нейтронов от реактивности, измеренные по методике БРИК/NMIS, для РС: 1 – с вкладышем из свинца; 2 – полая; 3 – с вкладышем из фторидов (МСБ1); 4 – с вкладышем из фторидов (МСБ2)

В 1979 г. в РФЯЦ-ВНИИЭФ был предложен способ осуществления односторонней нейтронной связи секций: в качестве активного материала одной из секций использовался ²³⁷Np – пороговое делящееся вещество, секции разделялись промежуточным слоем, снижающим энергию нейтронов ниже порога деления нептуния (вольфрам и др.) [21, 22]. Показателем эффективности принципа каскадности служил коэффициент каскадного усиления A , равный отношению чисел делений в каскадном ($P = P_1 + P_2$, P_1 и P_2 – числа делений в 1-й и 2-й секциях) и обычном (P_0) бланкетах, нормированных на один нейтрон источника, при условии равенства $k_{эф}$ того и другого бланкета:

$$A = P/P_0. \tag{6}$$

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 источника нейтронов использовался ²⁵²Cf-источник.

Целью экспериментов было подтверждение действенности ^{237}Np в качестве средства обеспечения односторонней связи секций, проверка преимуществ каскадного blankets в части понижения требований к мощности ускорителя и проверка расчетных методик. В экспериментах измеряли (диэлектрическими трековыми детекторами осколков деления) распределение чисел делений по радиусу слоев из ^{237}Np (рис. 11) и ^{235}U (90 %), входящих в состав моделей каскадного и односекционного blankets, и коэффициенты умножения нейтронов ^{252}Cf -источника, размещенного в центре сборок.

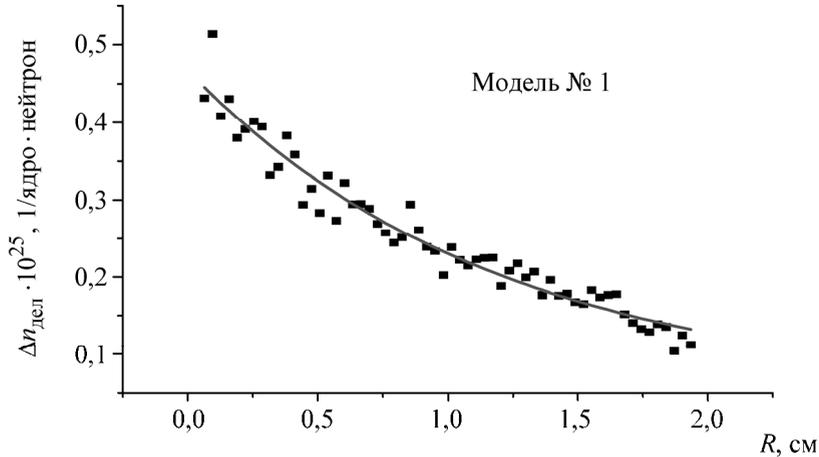


Рис. 11. Распределение плотности делений по радиусу нептуниевого слоя модельной сборки

Результаты экспериментов, представленные в табл. 4, свидетельствуют об удовлетворительном согласии экспериментальных и расчетных значений чисел делений в сборках и коэффициентов каскадного усиления A . В полном соответствии с данными расчетов и теоретическими представлениями каждая экспериментальная каскадная сборка характеризовалась значительным каскадным усилением чисел делений, нормированных на один нейтрон источника. Наиболее высокое каскадное усиление продемонстрировала сборка $\text{Np}-\text{CH}_2-\text{U}$.

Таким образом, теоретические заключения о свойствах каскадных blankets и эффективности ^{237}Np в качестве средства достижения односторонней связи секций подтверждены экспериментально.

Таблица 4

Экспериментальные и расчетные ядерно-физические характеристики однокаскадных и двухкаскадных моделей blankets

Состав РС	$k_{эф}$	Коэффициент каскадного усиления A	
		эксперимент	расчет
$\text{Np}, \text{CH}_2, \text{U}$	0,617	$1,71 \pm 0,07$	1,82
$\text{Np}, \text{воздух}, \text{U}$	0,651	$1,16 \pm 0,05$	1,32
$\text{U}, \text{Cd}+\text{CH}_2, \text{U}$	0,611	$1,45 \pm 0,08$	1,50
$\text{U}, \text{воздух}, \text{U}$	0,601	$1,05 \pm 0,05$	0,98
U	0,584	$0,61 \pm 0,03$	0,62
CH_2, U	0,575	$0,61 \pm 0,03$	0,62

Исследования по ядерной критической безопасности

При работах с делящимися материалами огромное значение имеет обеспечение ядерной критической безопасности (ЯКБ), т. е. создание условий, исключающих несанкционированное возникновение самоподдерживающейся цепной реакции. 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 защитного контейнера [24], в конструкцию которого входит поглощающее вещество 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 числе контейнеров независимо от плотности их размещения.

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 слоем поглотителя, помещался источник нейтронов 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 получаем

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

где D – коэффициент отражения (альбеда) 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 таким образом, чтобы выполнялось условие $J_2 < J_1$.

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, выполненная путем сравнения с расчетом по методу Монте-Карло, показала, что эксперименты будут завышать (на ~20%) необходимую толщину слоя поглотителя в контейнере, а это благоприятный фактор с точки зрения ядерной безопасности [24].

В качестве замедлителя в защищающем контейнере может применяться любой материал, содержащий водород (полиэтилен, парафин, дерево и т. п.), в качестве поглотителя замедлившихся нейтронов – бор, кадмий и др. Дополнительной оболочкой в опытах служила оболочка из графита толщиной около 7 см, поскольку 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 защитной оболочки, ее толщины, способа расположения относительно ДМ

и других параметров для различных масс плутония (в α - и δ -фазах) и для урана 90 %-го обогащения. На основании результатов этих экспериментов были выданы необходимые рекомендации по параметрам защищающих контейнеров, созданных и успешно применяемых для хранения и транспортировки металлических делящихся материалов в атомной промышленности России.

Заключение

Проведение критмассовых экспериментов в РФЯЦ-ВНИИЭФ имеет долгую историю. За время существования института на СКС типа ФКБН с разной степенью точности были изучены свыше 1000 размножающих систем. Результаты этих исследований имеют большую научную ценность. Более 30 тестовых критических сборок включены в международный справочник [12] и информационные материалы комитета по ядерным данным МАГАТЭ. Все экспериментальные исследования на установках ФКБН проводились в тесном сотрудничестве с теоретическим подразделением ВНИИЭФ, и в будущем необходимо сохранить эту традицию.

Авторы убеждены, что возможность проведения критических экспериментов должна сохраняться до тех пор, пока существуют делящиеся материалы. Главной задачей будущих экспериментов станет получение данных для совершенствования систем эффективных ядерных констант и обеспечения ядерной безопасности при работах с ДМ. Необходимость комплексного характера исследований (измерение максимально возможного количества параметров для каждой сборки) подтверждается началом издания нового Международного справочника эталонных экспериментов по физике ядерных реакторов [25]. Особое внимание при проведении критических экспериментов должно уделяться повышению точности результатов и безопасности.

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

Список литературы

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. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006.
5. McLaughlin T.P., Monahan S. P., Pruvost N. L. et al. A review of criticality accidents. 2000 Revision. Report of LANL LA-13638, 2000 [Electronic resource]. – <http://orau.org/ptp/Library/accidents/la-13638.pdf>.

6. Воинов А. М., Егоров В. П., Запольский А. Е. и др. Стенд для исследования нейтронно-физических характеристик простых критических сборок // 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–VNIIEF // Proc. of the 8th Int. conf. on Nuclear Criticality Safety. St. Petersburg, Russia, May 28 – June 1, 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 // Ibid. P. 319–323.

9. Kuvshinov M. I., Voinov A. M., Zagrafov V. G. The history of works on nuclear criticality in RFNC–VNIIEF // Proc. of the 5th Int. conf. 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 // Сб. материалов науч.-техн. конф. «Охрана труда и безопасность ядерного оружия». – 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. – Paris: NEA Nuclear Science Committee, OECD, 2000.

13. Zakharov A. N., Kuvshinov M. I., Smirnov I. G. The modern problems and research program on nuclear criticality safety in VNIIEF // Proc. of the 5th Int. Conf. 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 end curium isotopes // Proc. of the Int. conf. on Nuclear Data for Science and Technology. Tsukuba, Ibaraki, Japan, October 7–12, 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 ²³⁵U (90 %), ²³⁵U (36 %), ²³⁹Pu (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 // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. 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. 2010. Вып. 15. С. 190–203.
20. Колесов В. Ф. Электроядерные установки и проблемы ядерной энергетики. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013.
21. А. с. 786619 СССР, МКИ 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. 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 // Proc. of the 5th Int. conf. on Nuclear Criticality Safety. Albuquerque, New Mexico, USA, September 17–21, 1995.
25. International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments. – Nuclear Energy Agency, 2009.

The History of Criticality Experiments Progress at RFNC-VNIIEF

A. V. Panin, S. V. Vorontsov, A. A. Devyatkin, N. V. Zavyalov, M. I. Kuvshinov

Historically, we create facilities for experimental studies on the critical assemblies of metallic fissionable materials. 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 fissionable materials.