

Создание и развитие импульсных ядерных реакторов в РФЯЦ-ВНИИЭФ

С. В. ВОРОНЦОВ, А. А. ДЕВЯТКИН, В. Ф. КОЛЕСОВ, М. И. КУВШИНОВ

Более 50 лет во ВНИИЭФ работают импульсные ядерные реакторы (ИЯР), которые являются разновидностью исследовательских реакторов и представляют собой устройства, обеспечивающие получение контролируемых и повторяемых вспышек деления атомных ядер. Общей чертой всех импульсных реакторов является создание на короткое время условий для развития цепной реакции деления на мгновенных нейтронах.

Первыми были реактор с растворной активной зоной ВИР-1 и реактор с металлической активной зоной БИР-1. В настоящее время во ВНИИЭФ эксплуатируются 5 реакторов: ВИР-2М, БИГР, БР-1М, БР-К1 и ГИР-2. Накопленный опыт и постоянно проводимые работы по техническому совершенствованию действующих и разработке проектов новых установок позволяют обеспечивать безаварийную эксплуатацию уникального парка ИЯР и проводить разнообразные научные исследования.

Исследование размножающих систем.

В 1948 г. во ВНИИЭФ (тогда КБ-11) создана возглавляемая Г. Н. Флёровым нейтронно-физическая лаборатория для подготовки и проведения экспериментов по определению критической массы первых атомных зарядов. Первый крит-массовый эксперимент с плутониевой активной зоной в урановом отражателе проведен в Челябинске-40. В заключение работ был осуществлен разгон системы на запаздывающих нейтронах. Это стало, по существу, пуском первого в СССР физического реактора («котла», как тогда называли) на быстрых нейтронах нулевой мощности. Установка по инициативе Ю. С. Замятина получила сокращенное название ФиКоБыН, которое в последующем сократилось до ФКБН (фи-

зический котел на быстрых нейтронах). В дальнейшем во ВНИИЭФ для проведения опытов с размножающими системами были разработаны специальные стенды для критических сборок: ФКБН (1950 г.), ФКБН-1 (1955 г.), МСКС (1959 г.), ФКБН-2 (1965 г.), ФКБН-2М (1976 г.), ФКБН-3 (2014 г.). За прошедшее время были изучены параметры ~1000 различных размножающих систем, в том числе моделей активных ядерных реакторов.

В 2006 г. был завершен физический пуск стенда ИКАР-С, созданного для экспериментального исследования ядерно-физических характеристик, размножающих систем моделирующих АЗ реактора-лазера непрерывного действия (А. М. Воинов, А. А. Синянский, В. Н. Кривоносов и др.). В 2013 г. проведен физический пуск критического стенда ИКАР-С (В. Ф. Колесов, А. А. Девяткин, А. А. Пикулев и др.) с уран-графитовым топливом (Л. Д. Данилин), изготовленном по отработанной в радиохимическом отделе ВНИИЭФ технологии.

Разработка и усовершенствование ИЯР.

История реакторов во ВНИИЭФ открывается установкой ВР-1 – реактором бассейнового типа, работающим на статической мощности, с АЗ, набранной из отдельных стержневых твэлов (Н. А. Протопопов)

С начала 1960-х гг. во ВНИИЭФ начались работы по созданию мощных лабораторных импульсных источников нейтронов, способных моделировать проникающее излучение ядерного взрыва.

Эксплуатация импульсных реакторов была начата в 1965 г. запуском растворного реактора ВИР-1 и реактора с металлической активной



Г. Н. Флёров



Ю. С. Замятин



А. А. Малинкин



Б. Д. Сциборский



М. И. Кувшинов



А. М. Воинов

зоной – ВИР-1. Обе установки постоянно совершенствовались. Кроме них, во ВНИИЭФ были созданы реакторы: БИГР, ТИБР, РИР, БР-1, БР-К1, ГИР.

Разработанные во ВНИИЭФ ИЯР имеют свои специфические особенности. Это – «нулевое» энерговыделение (выгорание топлива за время эксплуатации не превышает нескольких грамм, либо даже долей грамма). Отсутствует теплоноситель (охлаждение за счет естественной конвекции). Активная зона имеет высокое обогащение топлива (~90 % по изотопу ^{235}U). Имеется малое количество органов регулирования реактивности, которые выполняют одновременно и функцию органов аварийной защиты. Основной механизм отрицательной обратной связи «температура – реактивность» для реакторов с металлической и керамической активной зоной – тепловое расширение, для растворных реакторов – радиолитическое кипение. Параметры импульса прогнозируются с высокой точностью (погрешность $\pm 10\%$). Каждый импульс реактора является специально подготовленным экспериментом.

Помимо генерирования импульсов все реакторы могут работать в статическом режиме, а также в режиме генерирования импульсов на запаздывающих нейтронах (квазиимпульсов).

ВИР-2М (водный импульсный реактор) – импульсный реактор с растворной активной зоной, в котором в качестве топлива используется раствор соли (уранилсульфата) высокообогащенного урана в воде (объем топливного раствора 104,6 л, концентрация урана в растворе 67,9 г/л, масса урана 7,1 кг). Топливный раствор залит в прочный цилиндрический герметичный корпус (рис. 1) из нержавеющей стали (высота 2 м, диаметр 0,68 м, толщина стенок 65 мм). В днище корпуса выполнен полусферический канал внутренним диаметром 300 мм.

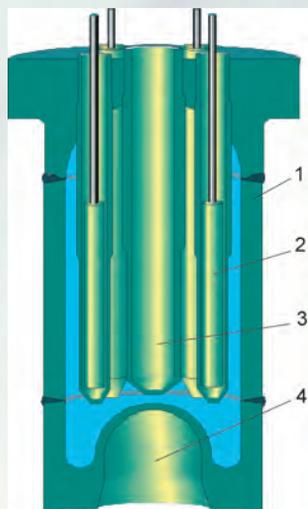


Рис. 1. Вертикальный разрез активной зоны реактора ВИР-2М: 1 – корпус активной зоны; 2 – стержень управления реактивностью (СУР), 6 шт.; 3 – центральный экспериментальный канал (ЦК); 4 – полусферический экспериментальный канал (ПСК)

Рис. 1. Вертикальный разрез активной зоны реактора ВИР-2М: 1 – корпус активной зоны; 2 – стержень управления реактивностью (СУР), 6 шт.; 3 – центральный экспериментальный канал (ЦК); 4 – полусферический экспериментальный канал (ПСК)

К крышке корпуса приварен центральный канал с внутренним диаметром 142 мм и шесть каналов для «стержней управления реактивностью» из гидрида лития, расположенных равномерно по окружности диаметром 360 мм и служащих для управления реактором. Два стержня (регулирующие стержни РС-1 и РС-2 с электромагнитами аварийного сброса) перемещаются только электромеханическими приводами, а две пары стержней (импульсные стержни ИС) – как электромеханическим, так и пневмоприводом.

Корпус АЗ реактора размещен в перекрытии между двумя находящимися друг над другом реакторными залами (рис. 2, 3) так, что нижний торец корпуса находится на уровне потолка нижнего зала. Со всех сторон, кроме нижнего торца, реактор окружен блоком биологической защиты с минимальной толщиной по бетону 1,5 м. В защитном блоке вблизи поверхности корпуса имеется еще 3 экспериментальных канала: боковой и пролетный каналы диаметром по 100 мм, и «шахта» сечением 560×620 мм².



Рис. 2. Нижний зал ВИР-2М (под ПСК – двухканальная лазерная установка ЛУНА)



Рис. 3. Верхний зал ВИР-2М

После вывода реактора в стартовое (как правило, критическое) состояние импульс генерируется за счет пневматического вывода из активной зоны импульсных поглощающих стержней. Гашение импульса происходит за счет радиолитического вскипания и разлета топливного раствора, после чего поглощающие стержни вводятся в активную зону, переводя реактор в глубоко подкритическое состояние.

Модернизация реактора была связана с усовершенствованием конструкции корпуса активной зоны. Реакторы ВИР-1 (1965 г.) и ВИР-1М (1967 г.) имели одинаковые габаритные размеры корпуса. Корпус реактора ВИР-2 (1971 г.) в основном соответствовал используемому в настоящее время. На трех модификациях реактора ВИР было произведено 2407 импульсов.

Реактор ВИР-2М эксплуатируется с 1979 г. Максимальное энерговыделение в импульсе вначале было ограничено до 80 МДж, а затем в связи с возникновением пластических деформаций корпуса активной зоны снижено до 60 МДж. В 1996 г. ВИР-2М остановлен для плановой замены корпуса. К тому времени на реакторе было генерировано более 2600 импульсов. Эксплуатация реактора с новым корпусом возобновлена в 2001 г., и на нем проведено еще 798 импульсов. В 2011–2013 гг. проведены работы по оснащению реактора новой системой управления и защиты. Реактор вновь введен в эксплуатацию в конце 2013 г. на срок 7 лет с ограничением числа импульсов на мгновенных нейтронах (не более 750). Реактор ВИР-2М может также работать в статическом режиме на мощности до 80 кВт. На 01.07.2015 г. на реакторе произведен 61 импульс.

Разработка реактора ВИР проводилась под руководством А. М. Воинова. Эксплуатацией реактора руководили В. М. Кульгавчук, Л. А. Самодуров, С. Ф. Мельников, Л. Ю. Глухов.

БИР-2М (быстрый импульсный реактор) является типичным представителем импульсных реакторов с металлической активной зоной, эле-

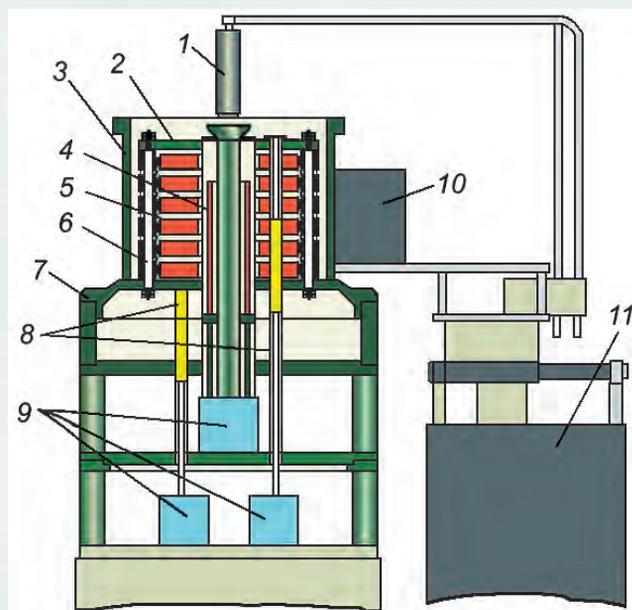


Рис. 4. Схема реактора БИР: 1 – контейнер для загрузки образцов; 2 – АЗ; 3 – кадмиевая защита; 4 – блок безопасности (ББ); 5 – герметизирующий чехол на топливном диске; 6 – болты креплений топливных дисков; 7 – опора; 8 – регулирующие стержни; 9 – приводы органов управления; 10 – облучаемый образец; 11 – стенд для образцов, облучаемых вне АЗ

менты которой изготовлены из сплава высокообогащенного урана с молибденом. Общая масса топлива 121 кг. Изначально реактор (БИР-1) введен в эксплуатацию в 1965 г. В 1970 г. реактор перебазируется в специализированное здание, при этом был модернизирован и получил название БИР-2. В 1986 г. реактор остановлен для модернизации системы управления и информационно-измерительной системы с использованием мини-ЭВМ. Реактор БИР-2М был введен в эксплуатацию 12.07.91 г.

Схема реактора приведена на рис. 4. Основная часть активной зоны собрана из шести дисков с наружным диаметром 220 мм и высотой 31 мм. Масса каждого диска ~ 17 кг. Диски имеют центральное отверстие и 4 отверстия, равно-



В. М. Кульгавчук



Л. А. Самодуров



С. Ф. Мельников



Л. Ю. Глухов



Г. П. Рудаков



А. С. Кошелев

мерно расположенные на окружности диаметром 148 мм. В центральное отверстие дисков вводится блок безопасности (ББ), имеющий форму полого цилиндра. В боковые отверстия дисков вводятся два импульсных (ИП, ИО) и два регулирующих стержня. Каждый диск, ББ и стержни заключены в индивидуальные герметичные чехлы из нержавеющей стали, заполненные гелием. Между каждой деталью и чехлом имеется гарантированный зазор, что обеспечивает безударное расширение деталей при генерировании импульса. Чехлы с дисками закреплены на стенде реактора болтами. Между чехлами имеется воздушный зазор ~3 мм. В чехлах дисков установлены термпары для измерения температуры активной зоны.

Генерирование импульса производилось из подкритического состояния, подбираемого с помощью регулирующих стержней, за счет пневматического ввода одного из импульсных стержней: ИО (с остановкой в активной зоне) либо ИП (с пролетом через зону). Самогашение импульса происходило за счет теплового расширения уран-молибденового сплава. Заглушение реактора обеспечивалось сбросом всех органов регулирования в нижнее положение.

Облучение проводилось в центральном контейнере диаметром 4 см, снаружи активной зоны на специальном столе для образцов и в зале размером 11×10×8 м. Максимальное энерговыделение в импульсе $E_{\text{MAX}} = 3$ МДж; полуширина импульса $T_{1/2} = 60$ мкс. Возможно, было генерирование «затянутого» импульса с параметрами $E_{\text{MAX}} = 5$ МДж; $T_{1/2} = 450$ мкс при использовании полиэтиленового отражателя. Реактор мог также работать на статической мощности до 20 кВт. В 2005 г. работа реактора была прекращена. Всего на реакторе генерировано ~2800 импульсов.

Разработка реактора БИР проводилась под руководством В. Д. Сциборского. Эксплуатацией реактора бесценно руководил Г. П. Рудаков. Следует отметить, что отправной точкой развития ИЯР с металлической АЗ является написанный в 1959 г. М. И. Кувшиновым реферат «Импульсные реакторы на быстрых нейтронах», в заключительном разделе которого автор подчеркивал: «...Представляется необходимым развивать импульсную методику в нашей лаборатории, имеющей опыт работы с размножающими системами на быстрых нейтронах. Наличие этой методики не только даст новые экспериментальные возможности в основных исследованиях лаборатории, но и будет содействовать применению ее в других областях исследований...».

ТИБР (транспортальный импульсный быстрый реактор) – импульсный реактор с металлической активной зоной (сплав урана с молибденом), в состав которой для устранения теплового удара за счет затягивания импульса введен слой гидрида циркония ($ZrH_{1,9}$). Общая масса топлива 124 кг. Реактор введен в эксплуатацию в 1970 г., после чего был передан в НИИП (г. Лыткарино), где в 2000 г. выведен из эксплуатации.

Активная зона состоит из двух блоков – неподвижного верхнего (ВБ) и подвижного нижнего (НБ), которые в сомкнутом состоянии образуют полый шар с внешним и внутренним диаметрами по активному материалу 275 и 108 мм. В полюсные отверстия ВБ и НБ вводятся соответственно регулирующий (РС) и импульсный (ИС) стержни. В активной зоне имеется горизонтальный сквозной канал для облучения образцов (рис. 5).

На реакторе ТИБР генерирование импульса (путем пневматического ввода импульсного стержня) производилась как из подкритического состояния, так и при критическом состоянии реактора на заданном уровне мощности (~1 Вт). Самогашение обеспечивалось за счет теплового

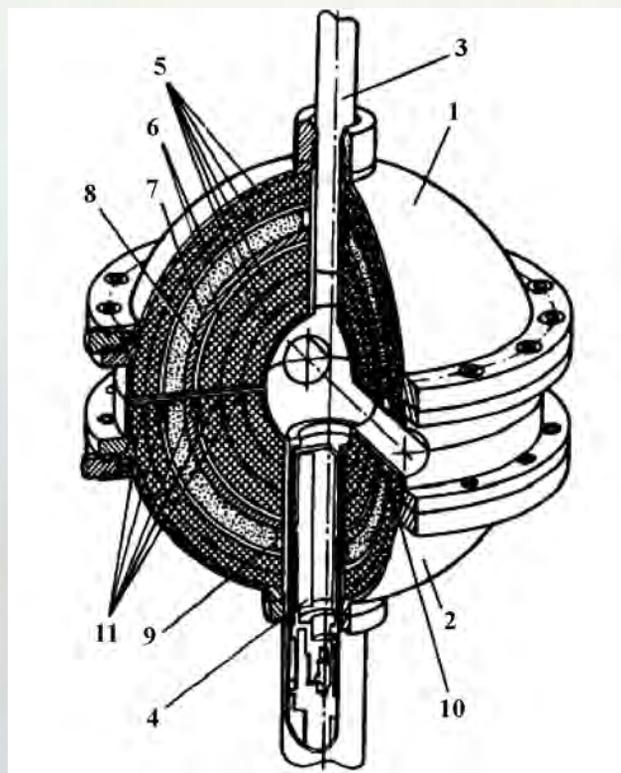


Рис. 5. Схема активной зоны реактора ТИБР: 1 – НБ; 2 – ВБ; 3 – РС; 4 – ИС; 5 – оболочки (топливо); 6, 9, 10 – прокладки (топливо); 7 – оболочка ($ZrH_{1,9}$); 8 – оболочка (сталь); 11 – полукольца подвески

расширения активной зоны, а заглушение реактора – сбросом в нижнее положение ИС и НБ, выполняющего функцию блока безопасности.

ВБ и НБ включают пять полусферических топливных слоев с высокообогащенным ураном, слой гидрида циркония $ZrH_{1,9}$ (толщиной 1,4 см) и два прилегающих к нему тонких топливных слоя с относительно низким обогащением урана, введенных для сглаживания скачка температуры на границах между топливом и гидридом циркония.

В результате размещения слоя гидрида циркония внутри массива урана спектр нейтронов в горизонтальном канале и на внешней границе активной зоны, т. е. в местах облучения образцов, сохраняется практически таким же, как и в зоне без замедлителя. С целью обеспечения антикоррозионной защиты верхний и нижний блоки в сборе, а также регулирующий и импульсный стержни заключены в герметичные чехлы из нержавеющей стали, заполненные гелием.

Отличительные особенности реактора ТИБР позволили при сохранении жесткого спектра нейтронного излучения существенно увеличить допустимое удельное энерговыделение в импульсе в сравнении с реакторами типа БИР, упростить конструкцию и систему управления реактора и повысить уровень безопасности работы на нем. В частности, был полностью снят динамический тепловой удар в активной зоне; стало возможным генерирование импульса делений с заметного уровня начальной мощности (~1 Вт) и сведена к минимуму зависимость формы импульса делений от загрузки образцов. Максимальное энерговыделение в импульсе 7 МДж; полуширина импульса 480 мкс.

Разработка реактора ТИБР проводилась под руководством А. А. Малинкина и А. С. Кошелева.

БИГР (быстрый импульсный графитовый реактор) является самым мощным в мире импульсным реактором на быстрых нейтронах. Материал активной зоны – однородная спрессованная смесь высокообогащенного диоксида

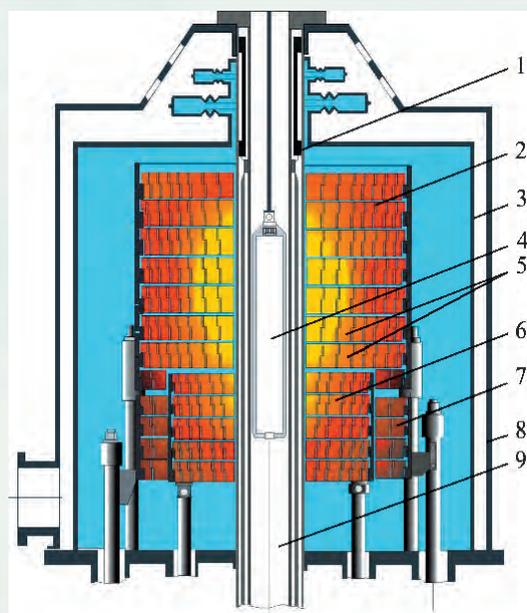


Рис. 6. Схема активной зоны реактора БИГР: 1 – ИС; 2 – НБ; 3 – корпус АЗ; 4 – контейнер ЦК; 5 – топливные кольца; 6 – БГР; 7 – БТР; 8 – кожух охлаждения; 9 – осевая полость

урана с графитом. Отношение числа ядер углерода и урана равно 16, что позволяет получить значительное энерговыделение за импульс и сохранить достаточно жесткий спектр нейтронов. Масса топлива 833 кг. Реактор введен в эксплуатацию в 1977 г. и на 01.07.2015 г. выдал 1161 импульсов и квазиимпульсов.

Активная зона (рис. 6) имеет форму полого цилиндра с размерами по топливу: высота 67 см, внешний диаметр 76 см, внутренний диаметр 18 см. Она состоит из отдельных слоев, которые складываются из кольцевых элементов. Каждое кольцо имеет уступы на середине высоты по всей окружности, с помощью которых опирается на соседнее кольцо или на внешний чехол. Между кольцами предусмотрены зазоры для радиальных и осевых смещений при увеличении температуры. Такая конструкция, впервые реализованная на реакторе БИГР, является оптимальной для дисперсионного топливного



С. П. Мельников



В. В. Иванов



В. Н. Богданов



А. М. Пичугин



В. Ф. Колесов



И. Г. Смирнов



Рис. 7. Реактор БИГР

материала. Активная зона разбита на 3 блока: неподвижный блок (НБ), блок грубой регулировки реактивности (БГР) и блок тонкой регулировки (БТР). В качестве импульсного стержня используется стальная труба, работающая при генерировании импульса в качестве «внутреннего» отражателя активной зоны. Активная зона целиком заключена в герметичный кожух, заполненный гелием.

Генерирование импульсов производится с мощности (т. е. при критическом состоянии реактора) при пневматическом вводе импульсного стержня, который может как останавливаться в центре активной зоны, так и вылетать из нее, обрывая «хвост» импульса. Механизмом самогашения является тепловое расширение активной зоны. Заглушение реактора обеспечивается за счет сброса в нижнее положение БГР и БТР.

Облучение возможно в контейнере ЦК (диаметр 10 см, высота 550 см) и снаружи активной зоны в зале размером 11,5×10×8 м (рис. 7). Облучаемые объекты доставляются к АЗ (с противоположных сторон) дистанционно на двух специальных тележках. Максимальное энерговыделение в импульсе 280 МДж; полуширина импульса 2 мс. Система управления установки обеспечивает возможность генерации в автоматизированном режиме импульсов на запаздывающих нейтронах различной формы, в том числе и прямоугольной. Мощность при этом может меняться от 0,5 до 500 МВт, длительность – от 0,5 до 100 с, $E_{\text{MAX}} = 300$ МДж. Реактор может работать также на статической мощности до 0,5 МВт.

Разработка реактора БИГР началась по предложению В. Ф. Колесова. Руководил разработкой и созданием реактора М. И. Кувшинов. Эксплуатацией реактора руководили И. Г. Смирнов, В. Н. Богданов, А. М. Пичугин.

БР-1М (бустер-реактор) – импульсный реактор с металлической АЗ. Введен в эксплуатацию

в 1978 г. (БР-1). После генерирования 608 импульсов было обнаружено, что часть топливных элементов реактора разрушилась. С новым комплектом топлива реактор введен в эксплуатацию в 1990 г. и выдал 275 импульсов, с зоной усовершенствованной конструкции (БР-1М) – в 2009 г. На 01.07.2015 г. на реакторе БР-1М генерирован 171 импульс.

Материал активной зоны – сплав высокообогащенного урана с молибденом. Зона имеет форму полого цилиндра с размерами по топливу: высота 26,6 см, внешний диаметр 26,8 см, диаметр осевой полости 11,6 см. Масса топлива 176 кг. Топливо в активной зоне разбито на 4 блока: верхний, нижний, регулирующий и импульсный, заключенные в заполненные гелием чехлы из нержавеющей стали.

Генерирование импульса производилось из подкритического состояния, подбираемого с помощью регулирующего блока, путем пневматического ввода импульсного блока. Самогашение импульса происходило за счет теплового расширения материала активной зоны, а заглушение реактора – за счет сброса нижнего, регулирующего и импульсного блоков в нижнее положение.

Для снижения механических напряжений, обусловленных тепловым ударом, активная зона БР-1 (верхний и нижний блоки) была разбита на 4 ряда коаксиальных, свободно подвешенных, незакрепленных колец. Толщина колец по радиусу составляет 1,5 см. Каждое из колец своим уступом опирается на соседнее кольцо, или на наружный чехол. Такая конструкция, аналогичная зоне БИГР, позволила получить на БР-1 импульсы с параметрами, рекордными для реакторов с металлической зоной из высокообогащенного урана: $E_{\text{MAX}} = 4 \cdot 10^{17}$ делений, $T_{1/2} = 53$ мкс. Но это привело к повреждению или разрушению 14 из 17 топливных элементов (рис. 8). Следует отметить, что реактор, несмотря на повреждения зоны, выдавал нормальные по энерговыделению и форме «колокола» импульсы.

Для обоснования оптимальной конфигурации активной зоны реактора были проведены расчетные исследования динамического поведения



Рис. 8. Разрушенные топливные элементы реактора БР-1

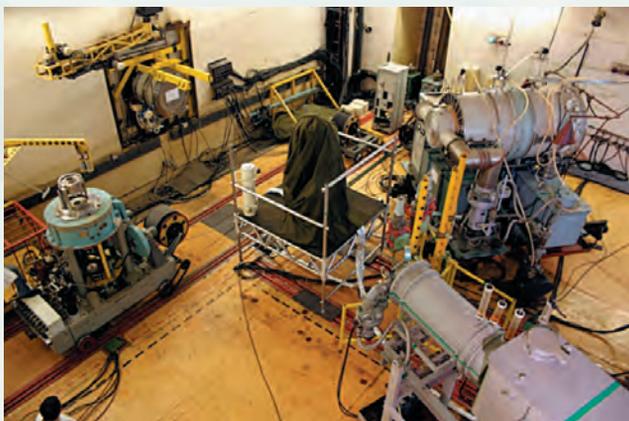


Рис. 9. Реактор БР-1М в зале комплекса «Пульсар»

топливных элементов при различных энерговыделениях. Показано, что до величины энерговыделения $E = 3,0 \cdot 10^{17}$ делений деформирование колец происходит практически упруго, а при больших энерговыделениях – упругопластически. По результатам исследований выбрана конструкция активной зоны БР-1М, которая позволяет при сохранении геометрических размеров существенно увеличить ресурс топливных элементов. Верхний блок состоит из 4 рядов колец, уменьшенных вдвое по высоте (30,4 мм), а нижний – из 2 рядов колец высотой 30,4 мм и 1 ряда из 2 элементов высотой 62 мм. Радиальные зазоры между кольцами, а также радиусы закругления в зонах уступов и торцов всех элементов увеличены.

В настоящее время БР-1М входит в состав облучательного комплекса «Пульсар» и может работать как совместно с ускорителем ЛИУ-30 и другими установками комплекса (рис. 9), так и в автономном режиме в каземате размером $14 \times 10 \times 8$ м. Объект может находиться в любом месте зала, а также в центральном канале в контейнере с размерами: диаметр 9,4 см, высота 30 см.

Разработка и создание реактора БР-1 проводилась под руководством А. А. Малинкина и А. С. Кошелева. Эксплуатацией реактора

руководили А. С. Кошелев, В. Н. Терпелов, В. В. Иванов, А. А. Девяткин, М. В. Мочкаев.

РИР (разрушающийся импульсный реактор) – импульсный реактор, в котором удельное энерговыделение настолько велико, что происходит сублимация делящегося материала и взрывное разрушение активной зоны, которая представляет собой шар из высокообогащенного урана, окруженный бериллиевым отражателем. Зона имеет центральный канал для импульсного стержня и боковые каналы для вкладышей, с помощью которых производится предварительная калибровка реактивности (рис. 10, 11). Специалистами ВНИИЭФ проведены 2 опыта с реактором РИР, энерговыделение в которых составило $\sim 1,5 \cdot 10^{19}$ делений, а полуширина импульса $T_{1/2} \sim 2,5$ мкс.

При подготовке экспериментов был разработан расчетно-экспериментальный способ калибровки реактивности, позволяющий получить запланированные параметры импульса при значительном переходе выше мгновенной критичности, в 30 раз превышающим переход, реализуемый в лабораторных реакторах с металлической зоной. Для расчетов была создана простая аналитическая модель, описываемая системой дифференциальных уравнений и включающая два типа параметров: кинетические, характеризующие процесс размножения нейтронов, и газодинамические, характеризующие влияние разлета активной зоны на реактивность системы. В лабораторных условиях с помощью специального калибровочного стенда исследованы характеристики устройства РИР как в подкритическом состоянии, так и в режиме «обычного» импульсного реактора. Используя кинетические параметры, подобранные в лабораторных опытах, были рассчитаны характеристики импульса РИР в режимах, соответствующих разрушению зоны. Прогноз хорошо совпадал с экспериментальными результатами.

При проведении экспериментов с ядерными устройствами типа РИР одной из основных за-



М. А. Воинов



А. Т. Нарожный



М. В. Мочкаев



В. И. Турутов



А. А. Пикулев



А. А. Девяткин

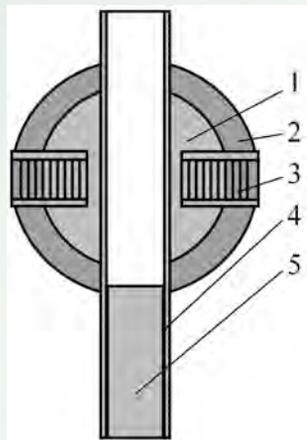


Рис. 10. Схема реактора РИР: 1 – активная зона; 2 – отражатель; 3 – вкладыши; 4 – канал для импульсного стержня; 5 – импульсный стержень

дач является обеспечение защиты при взрывном разрушении активной зоны. В первом эксперименте защитное сооружение было стационарным и представляло со-

бой цилиндрическую стальную ампулу диаметром 3 м, длиной 6 м, с толщиной стенки 20 мм (рис. 12), засыпанную слоем грунта. Результаты эксперимента позволили начать разработку транспортабельной защитной камеры, макет которой был испытан во втором опыте с РИР (рис. 13). Камера представляла собой отрезок рулонированной газопроводной трубы с внешним диаметром 1420 мм и толщиной стенки 21,6 мм с полуэллиптическими днищами, усиленный в центральной зоне двумя обечайками. Длина камеры ~7 м, масса 12,5 тонн. В дальнейшем, с использованием технологии рулонированных сосудов высокого давления, была создана многофункциональная взрывозащитная камера (рис. 14), которая, помимо проведения опытов с реактором типа РИР, может быть использована для обезвреживания аварийных ядерных зарядов, а также для обеспечения безопасности при проведении взрывных опытов, гидростатических испытаний и т. д.

Проведенные эксперименты с реактором РИР позволили оценить последствия гипотетических аварий на импульсных ядерных реакторах с металлической активной зоной и обосновать пределы их безопасной эксплуатации.

Разработка и создание реактора РИР велась под руководством А. М. Воинова. Эксплу-



Рис. 11. Внешний вид реактора РИР

атацией реактора руководили В. И. Турутов и А. Т. Нарожный.

ГИР (гамма-источник реакторный) – импульсный реактор с металлической активной зоной и отражателем нейтронов, выполняющим функцию n - γ -конвертора. Материал зоны – сплав обогащенного урана с молибденом, общая масса топлива 178 кг. Реактор ГИР-1 введен в эксплуатацию в 1984 г. На нем было генерировано ~350 импульсов. Усовершенствованный (в части материала и конструкции активной зоны) реактор ГИР-2 (рис. 15) введен в эксплуатацию в 1993 г. На нем генерировано 588 импульсов. В 2014 г. эксплуатация установки приостановлена.

Активная зона имеет сферическую форму (рис. 15) и состоит из двух полушарий, разделенных диафрагмой из нержавеющей стали. Неподвижная верхняя часть включает семь полусферических слоев, причем внутренние слои содержат уран 90 %, а внешний – 36 % обогащения. Нижняя часть состоит из двух подвижных блоков: грубой (БГР) и точной регулировки (БТР). БГР включает шесть слоев с ураном 90 %, БТР – 1 слой с ураном 36 % обогащения. Для генерирования импульса используется импульсный блок в виде алюминиевой трубы. Отличительной особенностью ГИР-2 является



Рис. 12. Ампула для опыта РИР-1



Рис. 13. Ампула для опыта РИР-1М



Рис. 14. Многофункциональная камера

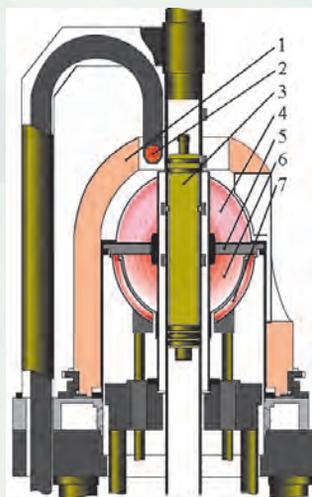


Рис. 15. Схема АЗ реактора ГИР-2: 1 - конвертор; 2 - источник нейтронов; 3 - ИБ; 4 - ВБ; 5 - диафрагма; 6 - БГР; 7 - БТР

использование в конструкции отражателя нейтронов из гомогенной смеси полипропилена с окисью кадмия толщиной 60 мм, что повышает выход гамма-излучения и снижает возмущения от внешних устройств. В отражателе имеется

отверстие («нейтронное окно»), предназначенное для облучений с максимальным нейтронным флюенсом.

Генерирование импульсов при автономной работе производится с мощности при пневматическом простреле импульсного стержня через зону. Самогашение импульса происходит за счет теплового расширения топлива. Заглушение реактора обеспечивается за счет сброса в нижнее положение БГР и БТР.

ГИР-2 входит в состав комплекса ЛИУ-10М – ГИР-2. Реактор также работает в автономном режиме. Облучение на реакторе проводится только снаружи зоны в зале размером 10×10×8 м. Максимальное энерговыделение 7 МДж; полуширина импульса 300 мкс.

Разработка и создание реактора ГИР велась под руководством М. И. Кувшинова и М. А. Воинова, который был бессменным руководителем группы эксплуатации реактора.

БР-К1 (бустер-реактор «Каскад», вариант 1) – импульсный реактор с металлической активной зоной. Материал зоны – сплав обогащенного урана с молибденом. Общая масса уран-молибденового сплава 1511 кг. Реактор введен в эксплуатацию в 1995 г. и предназначался как для



Рис. 16. Реактор ГИР-2 у выводного окна ускорителя ЛИУ-10М

апробации элементов концептуального проекта двухсекционного бустер-реактора «Каскад» (БР-К), так и для проведения различных облучательных экспериментов.

Активная зона имеет форму полого цилиндра с габаритными размерами: длина 75 см, внешний диаметр 62 см, размер внутренней полости: длина 36 см, диаметр 30,8 см. По аналогии с реактором БР-1 зона БР-К1 имеет кольцевую структуру: она разбита на диски (блоки), а диски – на коаксиальные кольца. Блоки заключены в герметичные чехлы из нержавеющей стали, заполненные гелием. Для генерирования импульса используются импульсный и стоп-блок, изготовленные из бериллия. Отличительными особенностями реактора БР-К1 являются горизонтальная ориентация АЗ, что обеспечивает удобство загрузки образцов в центральную полость, и значительный размер полости для облучения. Исследуемые объекты могут также размещаться снаружи активной зоны в зале размером 14×10×8 м (рис. 16).

Проектом предусматривалось максимальное энерговыделение ~100 МДж. Однако при проведении физического пуска было обнаружено затирание аварийного блока из-за коробления



В. М. Фералонтов



И. Л. Сумкин



И. А. Никитин



А. Н. Сизов



А. А. Синянский



С. В. Воронцов

чехлов структурных блоков, обусловленного их большими размерами и высокой температурой разогрева. В результате максимальное энерговыделение в импульсе было ограничено величиной 30 МДж (полуширина 1,2 мс). В настоящее время реактор работает лишь в режиме генерирования квазиимпульсов с $E_{\text{MAX}} = 30$ МДж, а также на статической мощности до 10 кВт.

Ведутся исследования по модернизации реактора с целью реализации импульсного режима с близким к проектному энерговыделением ($E_{\text{MAX}} \sim 75$ МДж). Это предполагается достичь за счет замены материала чехлов на титановый сплав и использования графитового отражателя, затягивающего мощный импульс и снижающего напряжения в топливных элементах до приемлемой величины.

Разработка и создание реактора БР-К1 проводилась под руководством А. А. Малинкина и А. С. Кошелева. Следует подчеркнуть, что на протяжении всех лет расчетно-теоретические исследования по ИЯР обеспечивались теоретическим отделом под руководством В. Ф. Колесова, а проектирование установок выполнялось конструкторским отделом под руководством В. М. Ферапонтова, И. Л. Сумкина и И. А. Никитина.

Обеспечение безопасной эксплуатации импульсных реакторов. Важным для обеспечения безопасности импульсных реакторов является использование режима генерирования импульса, когда реактор находится в надкритическом состоянии («стрельба с мощности»); такой режим применяется на реакторах БИГР и ГИР-2, а также отработан для реактора ВИР-2М.

На реакторе БР-1 (БР-1М), конструкция которого не позволяет использовать указанный режим, наибольшую опасность представляет разрушение тепловыделяющих элементов с возможным неконтролируемым смещением их частей. Для контроля целостности топливных элементов разработана методика, позволяющая на основании анализа колебаний мощности на «хвосте» импульса определить момент образования дефектов. Методика основана на том, что спектр колебаний мощности реактора на «хвосте» импульса делений непосредственно связан со спектром механических колебаний топливных элементов, который, в свою очередь, изменяется при появлении дефектов (трещин) в элементах. С целью экспериментальной проверки методики на реакторе БР-1 был проведен уникальный эксперимент с установкой в активную зону дефектного элемента, имеющего сквозную

трещину. На реакторе ВИР-2М были проведены аналогичные эксперименты с зоной, содержащей разное количество дисковых элементов с дефектами. Полученные усредненные по времени спектрограммы зарегистрированных колебаний мощности в медленной части импульсов БР-1 и ВИР-2М наглядно демонстрируют отличие «дефектной» активной зоны.

При генерации импульса в реакторе ВИР-2М происходит вскипание и разлет топливного раствора, что приводит к возникновению в корпусе активной зоны механических напряжений, сравнимых с пределом текучести. Поэтому для обеспечения безопасной эксплуатации реактора проводится контроль состояния корпуса и его периодическая замена. Совместно со специалистами ИТМФ (А. И. Абакумов, В. Ю. Мельцас и др.) проведены работы по уточнению модели вскипания топливного раствора (А. Н. Сизов) и расчетному определению механических нагрузок на защитный корпус. Показано, что наиболее слабым элементом конструкции является центральный канал (его средняя часть). Материал канала работает в области упругих деформаций ($\leq 0,1\%$), если энерговыделение за импульс не превышает значения 70 МДж при объеме топливного раствора 105 л и 74 МДж при объеме 120 л. При больших энерговыделениях материал ЦК переходит в область пластических деформаций, рост которых находится в квадратичной зависимости от изменения величины энерговыделения.

Проведенные расчеты циклической прочности корпуса реактора ВИР-2М показали, что допустимый ресурс, выраженный в количестве импульсов, составит 1750, 7500 и 125000 импульсов для энерговыделения 65, 60 и 56 МДж соответственно. Полученные данные позволяют прогнозировать ресурс работы и сроки эксплуатации реактора ВИР-2М.

Анализ аварий, имевших место на реакторах и критических сборках, показывает, что из 38 аварий 23 обусловлены теми или иными ошибками персонала. 8 аварий привели к гибели людей, при этом 7 произошли по вине персонала. В ряде случаев (по крайней мере, в 11 из 38) к аварии могло привести неадекватное психоэмоциональное состояние исполнителей, являющихся, в большинстве своем, высококвалифицированными специалистами. Поэтому во ВНИИЭФ совместно с Санкт-Петербургским государственным университетом (СПбГУ) разработана методика предметного контроля персонала. За основу была принята автоматизиро-

ванная система динамического контроля психоэмоционального состояния и профессиональной работоспособности специалистов операторского профиля (АСДК), разработанная в СПбГУ и представляющая собой аппаратно-программный комплекс, сконструированный по модульному принципу и включающий модуль оценки физиологических резервов, модуль оценки психоэмоционального состояния и модуль оценки профессиональной работоспособности. Проведенные исследования методики подтверждают ее работоспособность и высокую эффективность.

Использование ИЯР для проведения исследований. Импульсные реакторы являются уникальными установками, позволяющими проводить различные физические исследования.

На реакторе БИГР были проведены (совместно с ОИЯИ) эксперименты по получению ультрахолодных нейтронов. На базе реактора создан комплекс для испытания образцов твэлов энергетических реакторов в условиях реактивной аварии (аварии типа RIA).

На реакторах ВИР, БИР, БР-1, ТИБР, БИГР, ГИР-2 выполнен большой объем исследований по проблеме ЛЯН – лазеров с ядерной накачкой и ядерно-оптических преобразователей (С. П. Мельников, А. Н. Сизов, А. А. Сиянский. Лазеры с ядерной накачкой. Саров. ВНИИЭФ. 2008).

На реакторах БИР и БИГР проведены уникальные эксперименты, направленные на обоснование пределов безопасной эксплуатации импульсных реакторов: исследовано долговременное поведение реакторов в режиме саморегулирования мощности, отработана быстродействующая аварийная защита, позволяющая прервать развитие импульса с опасными параметрами. На реакторе ГИР-2 был подготовлен и проведен для студентов СарФТИ цикл лабораторных работ



Коллектив теоретического отдела

по физике реакторов. На реакторе БИР-2М совместно с ВНИИФТРИ созданы эталонные источники нейтронов, затем комплексы моделирующих опорных полей созданы на реакторах БР-1М, ГИР-2 и БР-К1 (рис. 17), на котором также создан эталонный источник реакторных гамма-квантов.

Специалистами ВНИИЭФ постоянно проводятся расчетно-экспериментальные исследования по разработке проектов новых реакторных установок: импульсно-статического реактора бассейнового типа; импульсного реактора с большой внутренней полостью и коротким импульсом с топливом на основе уран-молибденового или нептуний-галлиевого сплава, комплекса «БИГР + УФН-П» и др.

Накопленный опыт и постоянно проводимые работы, направленные на техническое усовершенствование действующих и на разработку проектов новых установок, позволяют обеспечивать безаварийную эксплуатацию уникального парка импульсных ядерных реакторов и проводить разнообразные научные исследования.



Рис. 17. Реактор БР-К1 в зале автономной работы

ВОРОНЦОВ Сергей Владимирович – зам. директора ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ, кандидат физ.-мат. наук

ДЕВЯТКИН Андрей Александрович – начальник отделения ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ, кандидат физ.-мат. наук

КОЛЕСОВ Владимир Федорович – главный научный сотрудник ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктор физ.-мат. наук, профессор, лауреат премии Правительства РФ, заслуженный деятель науки РФ

КУВШИНОВ Михаил Иванович – главный научный сотрудник ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктор физ.-мат. наук, заслуженный деятель науки РФ