

АПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИМПУЛЬСНЫЕ РЕАКТОРЫ ГИР И ГИР-2

А. В. Дорохин, М. А. Воинов, В. В. Воронин, В. Ф. Колесов, М. И. Кувшинов

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

Приведено описание аperiodических импульсных реакторов ГИР и ГИР-2, разработанных во ВНИИЭФ и действовавших в составе облучательных комплексов ЛИУ-10–ГИР и ЛИУ-10М–ГИР-2. Дана краткая информация о составе активных зон реакторов, приведены общий вид реакторов и схема размещения основанных на их базе комплексов. Сформулированы общие результаты выполненных на комплексах ЛИУ-10–ГИР и ЛИУ-10М–ГИР-2 исследований.

Ключевые слова: аperiodический импульсный реактор, активная зона, гамма-источник реакторный, облучательный комплекс, (n, γ) -конвертор.

APERIODIC PULSED REACTORS GIR AND GIR-2/ A. V. DOROKHIN, M. A. VOINOV, V. V. VORONIN, V. F. KOLESOV, M. I. KUVSHINOV // The description of aperiodic pulsed reactors GIR and GIR-2 developed in VNIIEF and included to irradiation complexes LIA-10–GIR and LIA-10M–GIR-2 is given. The brief information on the configuration of reactor cores as well as the overall view of reactors and the arrangement of reactor-based complexes are presented. General results of the researches carried out on LIA-10–GIR and LIA-10M–GIR-2 are stated.

Key words: aperiodic pulsed reactor, reactor core, reactor gamma-ray source, irradiation complex, (n, γ) -converter.

Введение

Импульсные источники нейтронов и гамма-излучения высокой интенсивности, к которым относятся импульсные реакторы самогасящего действия, являются мощным инструментом исследований в физике ядерных реакторов и изучении радиационного воздействия излучений на материалы и радиоэлектронную аппаратуру. Одним из направлений расширения возможностей аperiodических импульсных реакторов (АИР) во ВНИИЭФ стало включение их в состав комплексов с мощными сильноточными ускорителями электронов [1 – 4].

Ядерный реактор ГИР

Ядерный реактор ГИР (гамма-источник реакторный) начал свою работу в 1984 году

в составе первого созданного во ВНИИЭФ облучательного комплекса ЛИУ-10–ГИР [5]. Схема размещения установок комплекса показана на рис. 1.

К помещению 1 сильноточного ускорителя электронов ЛИУ-10 (линейный индукционный ускоритель), введенного в эксплуатацию в 1977 году, пристроен экспериментальный зал 4 для реактора ГИР [6]. Для транспортировки сильноточного пучка электронов ускорителя ЛИУ-10 в облучательный зал 4 был создан вакуумный магнитный канал 2 с выводным устройством 3 общей длиной 6,5 м. Магнитный канал внешним диаметром 0,6 м проходит в зал 4 через проем в стене 9, разделяющей помещения двух установок. В облучательном зале 4 электронный пучок выводится либо в область зала за выводным устройством

вдоль центральной оси ускорителя, либо его энергия преобразуется в импульс тормозного излучения с использованием мишени из материала с большим атомным номером.

Реактор ГИР [7] выполнен транспортабельным и перемещающимся по рельсовой колее 8 на расстояние 7 м от стенда биологической защиты – двух полуцилиндров из стали и свинца толщиной 150 мм, закрывающих активную зону (АЗ), – до рабочего положения вблизи выводного устройства магнитного канала. После каждого импульса ГИР откаты-

вался к стенду защиты, обеспечивавшему снижение остаточного гамма-излучения АЗ ГИР до фоновых значений в облучательном зале. Стенд реактора был оборудован системой воздушного охлаждения. Реактор обеспечивал два пуска с максимальным энерговыделением в сутки и примерно 200 пусков в год.

Установка ГИР [7] представляла собой аperiодический импульсный реактор самогасящего действия на быстрых нейтронах (рис. 2). Реактор разрабатывался специально для функционирования в составе облучательного комплекса.

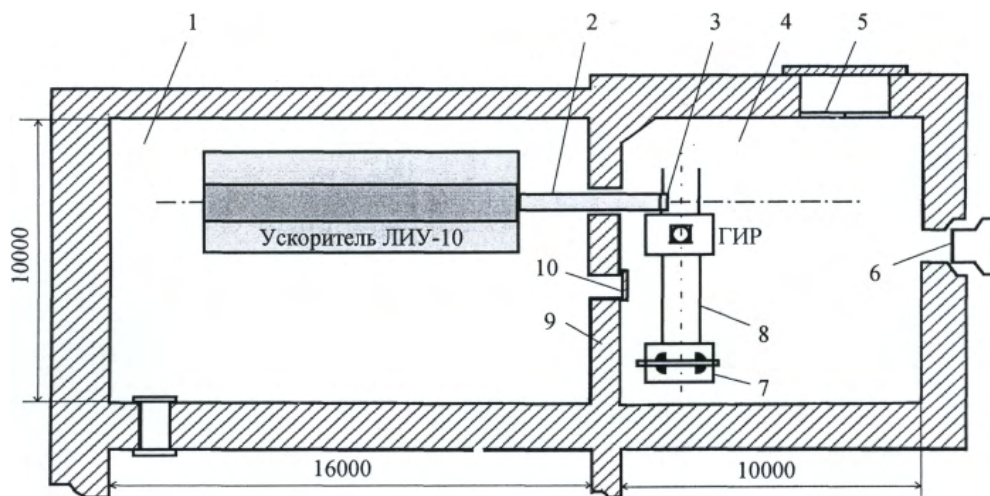


Рис. 1. Схема размещения установок комплекса ЛИУ-10–ГИР: 1, 4 – ускорительный и облучательный залы; 2 – тракт транспортировки пучка; 3 – выводное устройство ЛИУ-10; 5 – проем ворот; 6 – откатная пробка; 7 – биологическая защита АЗ; 8 – рельсовая колера реактора; 9 – защитная стена; 10 – шибер

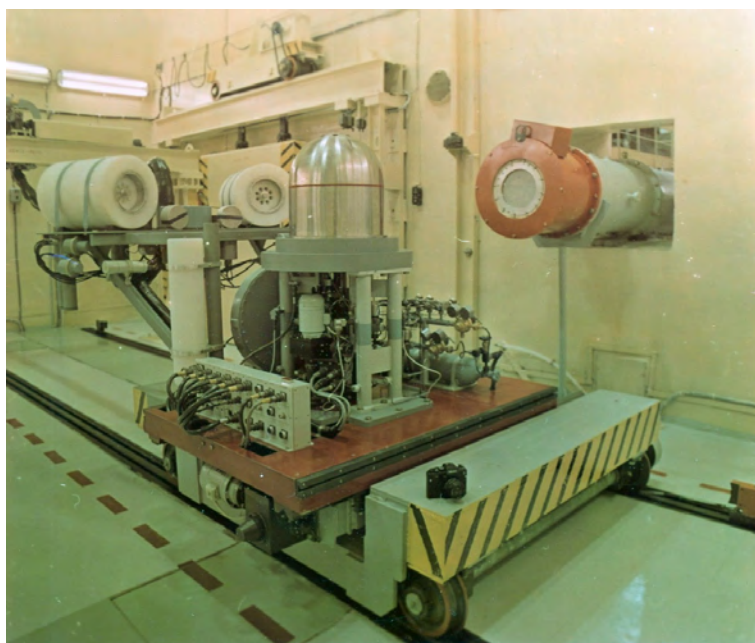


Рис. 2. Установка ГИР

В связи с этим особое внимание уделялось вопросам повышения ядерной безопасности, устойчивости систем управления и регистрации параметров ГИР к электромагнитным помехам, возникающим от срабатывания систем удержания и ускорения пучка ускорителя ЛИУ-10 или возбуждаемым в облучаемом объеме при прохождении мощного импульса гамма-излучения или потока ускоренных электронов, иногда и непосредственно воздействующих на электромеханический стенд и АЗ реактора.

Выходные параметры ГИР оптимизировались с точки зрения совместимости их с мощностью дозы короткого импульса излучения ускорителя для моделирования наиболее типичных радиационных ситуаций, возникающих при ядерном взрыве.

Большое влияние на конструкцию активной зоны установки и ее физические параметры оказало также использование имевшихся в наличии деталей из металлического урана (обогащение по изотопу урана-235 – 90 %). При создании реактора не преследовалась цель получения форсированных, труднодостижимых выходных параметров импульса. Элементы активной зоны реактора, ввиду отсутствия в ней динамического теплового удара и сравнительно невысокого прироста температуры в импульсе, не подвергались заметным нагрузкам и не требовали специальных мер для их крепления.

Одной из отличительных особенностей реактора ГИР является введение в его конструкцию водородсодержащего отражателя, служащего одновременно конвертором части нейтронов утечки, ~65 %, в гамма-излучение. Материалом конвертора служит гомогенная спрессованная смесь полипропилена с окисью кадмия (массовая доля 10 %). Использование стационарно установленного (n, γ)-конвертора в составе активной зоны позволяет значительно, в 3–5 раз, увеличить удельный выход гамма-излучения по сравнению с АИР, имеющими чисто металлическую активную зону. Одновременно экранировка конвертирующим устройством топливных блоков АЗ ГИР от внешних, отраженных облучаемыми объектами

нейтронов существенно уменьшает влияние этих объектов на реактивность реактора. Тем самым повышается ядерная безопасность работы комплекса. Также значительно повышает ядерную безопасность при эксплуатации ГИР, несмотря на некоторое снижение возможностей устройства, отсутствие внутренних полостей для облучения в активной зоне.

Активная зона ГИР (рис. 3) представляет собой два полушария, разделенные диафрагмой из нержавеющей стали толщиной 6 мм. Полушария имеют центральный осевой канал для перемещения импульсного стержня (ИС). Критическая конфигурация достигается путем приближения подвижного нижнего полушария диаметром 212 мм – блок грубой регулировки (БГР) – к неподвижному верхнему блоку (БВ) диаметром 183 мм. Топливом в обоих блоках являются девять урановых полусферических слоев, последовательно вложенных друг в друга и окруженных оболочкой из нержавеющей стали. Блок БГР, кроме того, имеет

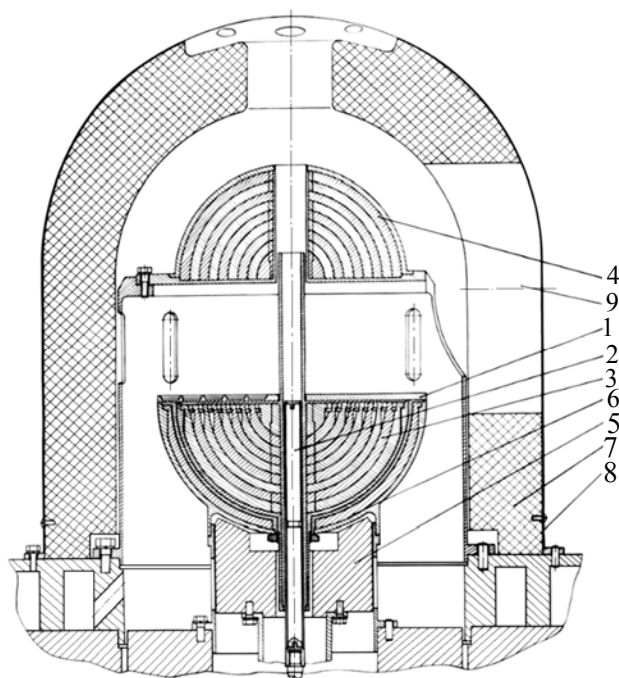


Рис. 3. Вид АЗ и конвертора ГИР в осевом сечении: 1 – диафрагма, 2 – импульсный стержень, 3 – блок грубой регулировки реактивности, 4 – верхний блок, 5 – блок точной регулировки реактивности (внутренняя часть), 6 – блок точной регулировки реактивности (наружная часть), 7 – конвертор, 8 – чехол, 9 – «окно» конвертора

еще один зачехлованный отдельно полусферический слой, $\varnothing 197-212$ мм, – блок БГР(Н). Способ крепления топливных слоев обеспечивает преимущественное тепловое расширение массы урана только в направлении от центра АЗ, тем самым гарантирует отрицательность теплового коэффициента реактивности.

Блоком точной регулировки (БТР) реактивности ГИР служит подвижный отражатель из латуни в виде цилиндра диаметром 129 мм и высотой 78 мм с осевым каналом для перемещения импульсного стержня. Крайнее верхнее положение БТР соответствует полному смыканию поверхности отражателя с нижней частью чехла блока грубой регулировки.

Импульсный стержень (ИС) представляет собой урановый цилиндр диаметром 12 мм и длиной 200 мм, подвешенный на середине его длины в герметичном вакуумированном чехле из нержавеющей стали толщиной 1 мм. Масса урана (90 % обогащения по урану-235) в ИС и суммарная масса топлива в АЗ равны соответственно 0,414 кг и 64,324 кг.

Конвертирующее устройство в виде колпака наружным диаметром 410 мм и толщиной стенок 60 мм окружает топливные блоки АЗ. С целью увеличения выхода быстрых нейтронов в одном из направлений относительно центра активной зоны, а также в целях проведения экспериментов совместно с ускорителем в боковой поверхности конвертора предусмотрено сквозное окно диаметром 210 мм. Поверх конвертора вплотную к нему крепится декоративный экран из нержавеющей стали толщиной 1 мм без бокового окна. Экран ограничивает минимальное расстояние, на котором могут размещаться объекты облучения, дистанцией 100 мм до чехлов топливных блоков АЗ, в том числе и со стороны бокового «нейтронного» окна конвертора.

Конструкция стенда и АЗ реактора разрабатывалась с учетом необходимости пространственного совмещения полей излучения двух базовых установок комплекса.

Активная зона с блоками регулирования реактивности размещается в верхней части механического стенда ГИР. Центр АЗ находится на одной высоте с осью ускорительного тракта ЛИУ-10 – 155 см от уровня пола экспе-

риментального зала. Блок ВБ с конвертором установлен на неподвижной защитной плите толщиной 80 мм. Конструкция предусматривает возможность поворота (n, γ)-конвертора относительно вертикальной оси, проходящей через центр АЗ.

Механизмы управления БТР и ИС размещаются в средней части стенда на подвижном столе, жестко связанном с блоком грубой регулировки. В низу стенда закреплены редуктор привода БГР, гидравлические демпферы подвижного стола и защитный блок источника нейтронов. Импульсный стержень жестко закреплен на штоке поршня, перемещающегося в пневмоцилиндре на длине 200 мм. В верхнем положении поршень удерживается электромагнитом, обесточивание которого приводит к сбросу ИС. Падение ускоряется подачей воздуха в пространство над поршнем.

Генерирование на реакторе ГИР максимального импульса делений с энерговыделением 2 МДж ($6,6 \cdot 10^{16}$ делений) обеспечивается при переходе $0,3 \beta_{эф}$ ($\beta_{эф} = 0,0067$ – эффективная доля запаздывающих нейтронов деления) выше мгновенного критического состояния (МКС). Длительность импульса на половине высоты максимума мощности составляет ~ 260 мкс. Величины возмущений реактивности реактора ГИР блоками управления представлены в табл. 1.

Таблица 1

Величины возмущений реактивности ГИР блоками управления

Операция	Изменение реактивности, $\beta_{эф}$
Сброс БГР и БТР из крайнего верхнего положения (ИС – внизу) – аварийный сброс	-19 ± 2
Подъем БГР (ИС – внизу, БТР – внизу), высота подъема 99 мм	$+18 \pm 1$
Подъем БТР (БГР – вверху, ИС – внизу), высота подъема 77 мм	$+0,927 \pm 0,005$
Нижнее положение БГР и БТР при расположении АЗ под биологической защитой (хранение)	-17 ± 1
Подъем ИС (200 мм)	$+1,010 \pm 0,002$

Флюенс нейтронов за импульс при энерговыделении 2 МДж на расстоянии 100 см от центра АЗ составлял $6 \cdot 10^{11}$ $1/\text{см}^2$ за конвертором и $1,5 \cdot 10^{12}$ $1/\text{см}^2$ напротив бокового окна. Доза гамма-излучения в тех же позициях составляла, соответственно, 10,8 и 9,2 Гр. Средняя энергия спектра γ -квантов за конвертором равнялась 1,5 МэВ.

Значения ширины импульса при других энерговыделениях представляются следующей зависимостью.

Энерговыделение за импульс, МДж	Ширина на половине высоты, мкс
0,27	2800
0,6	1000
1,0	570
1,5	370
1,85	290
2,0	256

Выделение энергии приводит к разогреву топливного материала до максимальной температуры ~ 500 °С.

Среди экспериментов, выполненных на комплексе ЛИУ-10–ГИР, осуществлены опыты по инициированию устойчивой цепной реакции делений в АЗ ГИР нейтронами от фото-ядерных реакций, возбуждаемых в ядрах мишени или АЗ самого реактора тормозным излучением. Реализовано два варианта этих опытов. В первом варианте пучок электронов от ускорителя падал на внешнюю мишень, генерируя в ней тормозное излучение и фотонейтроны. Под влиянием этого тормозного излучения фотонейтроны возникали и в самом реакторе. Во втором варианте пучок электронов падал на внешнюю поверхность АЗ ГИР, и фотонейтроны генерировались лишь в АЗ.

Типичная форма импульса делений, зарегистрированная в указанных экспериментах, представлена на рис. 4. Характерной особенностью всех этих импульсов является начальный узкий всплеск интенсивности делений с регистрируемой длительностью ~ 10 мкс. За этим всплеском следует переходная область с минимальной интенсивностью и второй широкий всплеск интенсивности делений, аналогичный импульсу ГИР в автономном режиме работы.

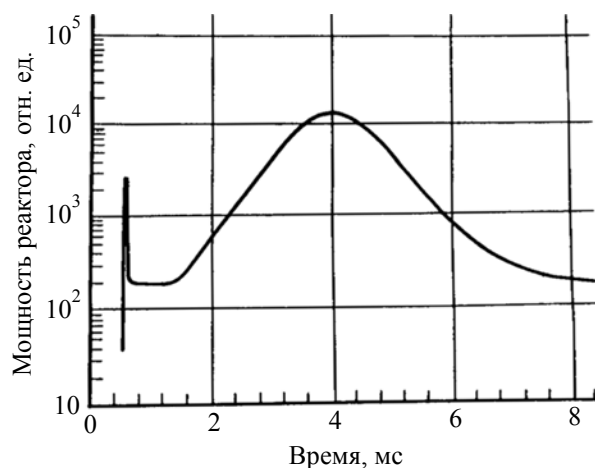


Рис. 4. Регистрируемая форма импульсов делений ГИР при инициировании вспышки фотонейтронами. Мишень: 2 мм Та + 15 мм Рb; энерговыделение в импульсе равно 0,5 МДж

Уровень мощности, с которого начинается широкий пик, пропорционален выходу нейтронов из мишени и значению начальной реактивности, устанавливаемой при генерировании импульса. Переход от тантало-бериллиевой к тантало-свинцовой мишени и к непосредственному облучению АЗ реактора электронным пучком приводит к небольшому увеличению этой мощности. Анализ экспериментальных импульсов делений, выполненный в рамках кинетики реакторной системы с отражателем [2], позволил сделать заключение об интенсивности и длительности «эквивалентного» начального источника нейтронов в АЗ. Показано, что этот порождаемый электронным пучком источник составляет $(1-4) \cdot 10^{10}$ нейтронов за импульс при длительности 15 нс.

Система управления комплексом позволяет осуществлять как совместную, так и автономную эксплуатацию установок в импульсных режимах. Для ГИР предусматривается также работа на стационарном или изменяющемся до 30 Вт уровне мощности — калибровочный режим. Он необходим для проведения калибровки стартового состояния реактора и реактивности отдельных регулирующих блоков.

За период эксплуатации комплекса ЛИУ-10–ГИР отработаны режимы устойчивого совместного функционирования двух различных по принципам действия физических установок. Освоены режимы, при которых цепную

реакцию в реакторе инициируют нейтроны, генерированные либо во внешней (по отношению к АЗ) фотонейтронной мишени, либо в самой АЗ, облучаемой пучком электронов от ускорителя. Общее число импульсов составило ~350.

Общие результаты выполненных на комплексе ЛИУ-10–ГИР исследований можно сформулировать в виде следующих тезисов:

– осуществлены режимы работы АИР с инициированием цепной реакции фотонейтронами, возникающими при взаимодействии тормозного излучения ускорителя с мишенями, а также фотонейтронами, возникающими в самой АЗ при ее облучении электронным пучком;

– установлено, что на процесс формирования импульса делений в АИР оказывают влияние выход фотонейтронов от ускорителя, уровень подкритичности реактора и степень воздействия мишени на его реактивность;

– показано, что наиболее эффективным способом инициирования импульса является непосредственное облучение электронным пучком АЗ реактора.

временной корреляции импульсов ускорителя и реактора;

– наличие (n, γ)-конвертора;

– отсутствие в АЗ внутренних полостей для облучения;

– реализация режимов генерирования импульсов делений с пролетом импульсного блока (ИБ) через АЗ при наличии в ней сильного источника нейтронов (или при работе реактора на статической мощности ~4 Вт).

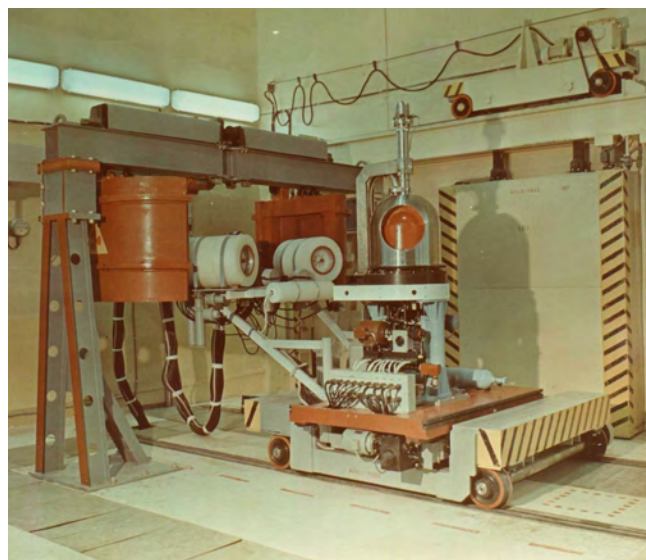


Рис. 5. Общий вид реактора ГИР-2

Ядерный реактор ГИР-2

В 1993 г. реактор ГИР в комплексе ЛИУ-10–ГИР заменен более совершенным реактором ГИР-2 (рис. 5), обеспечивающим примерно в 3 раза более высокие флюенсы нейтронов за импульс, дозы и интенсивности дозы γ -излучения [1, 2]. Реактор создавался специально для работы совместно с ускорителем ЛИУ-10М [8, 9] в составе комплекса ЛИУ-10М–ГИР-2, введенного в эксплуатацию в 1994 г. В конструкции ГИР-2 по сравнению с реактором ГИР сохранены и получили дальнейшее развитие физические принципы, увеличивающие безопасность установки:

– активная зона из прочного уран-молибденового сплава;

– почти 20 %-й запас по энерговыделению для рабочих импульсов;

– использование с необходимой доработкой проверенной СУЗ реактора ГИР и схем

Активная зона установлена на стенде реактора. На нем расположены механизмы управления и детекторы контроля и измерения уровня мощности реактора. Стенд реактора может перемещаться по рельсовой колее внутри зала 4 (рис. 1), где располагается установка. После генерирования импульса, в нерабочем состоянии, активная зона ГИР-2 закрывается биологической защитой, снижающей мощность остаточного излучения активной зоны до уровня фона в реакторном зале.

Активная зона реактора ГИР-2 (рис. 6) состоит из двух разделенных горизонтальной диафрагмой полусфер с вертикальным осевым отверстием, предназначенным для импульсного блока. Верхний блок – неподвижная полусфера, состоящая из семи топливных полусферических оболочек различной толщины, вложенных одна в другую. В качестве топлива используется уран-молибденовый сплав (массовая доля молибдена – 9 %). Нижний блок –

подвижная полусфера (может перемещаться в вертикальном направлении) – состоит из блока грубой регулировки реактивности (БГР) и блока точной регулировки реактивности (БТР). БГР, по аналогии с верхней полусферой, собран из шести топливных полусферических оболочек, вложенных одна в другую. БТР является седьмой топливной оболочкой нижнего блока активной зоны, которая имеет возможность собственного перемещения относительно БГР. Верхняя полусфера, БТР и БГР заключены в стальные оболочки (марка стали – 12Х18Н10Т). Вертикальное осевое отверстие предназначено для центрального канала, по которому перемещается импульсный блок (ИБ).

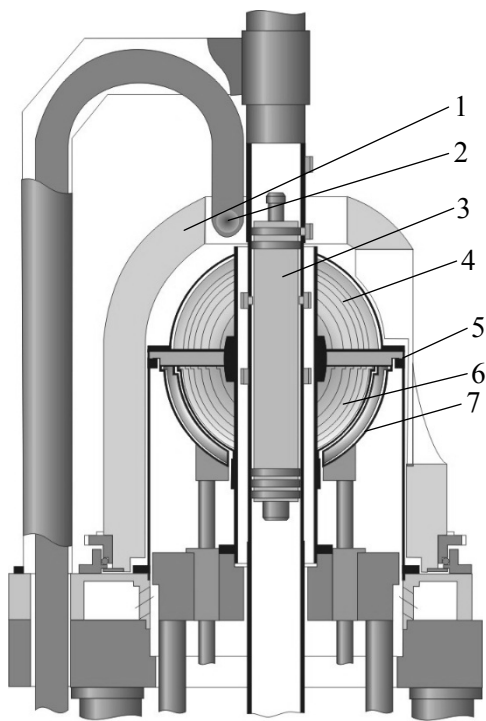


Рис. 6. Схематический вид АЗ реактора ГИР-2: 1 – отражатель; 2 – источник нейтронов; 3 – импульсный блок; 4 – верхний блок (90 % ^{235}U + 9 % Мо); 5 – диафрагма; 6 – блок грубой регулировки (90 % ^{235}U + 9 % Мо); 7 – блок точной регулировки (36 % ^{235}U)

Для усиления гамма-составляющей излучения в реакторе предусмотрен конвертор, который полностью окружает активную зону. Конвертирующий материал – гомогенизированная смесь полипропилена с окисью кадмия (массовая доля окиси кадмия – 6 %). С целью увеличения нейтронного выхода в одном из направ-

лений, в конверторе предусмотрено сквозное боковое окно диаметром 30 см, центр которого находится на уровне опорной диафрагмы.

Топливо – металлический обогащенный уран, легированный молибденом. Обогащение по урану-235 в первых шести топливных оболочках верхнего блока и топливных оболочках БГР составляет 90 %. Обогащение по урану-235 в седьмой (внешней) оболочке верхнего блока и БТР – 36 %. Применение наружных урановых деталей с меньшим обогащением позволяет избежать перегрева поверхности активной зоны за счет замедленных нейтронов из отражателя. Реактивность устройства при крайнем верхнем положении блоков регулирования составляет $\approx 0,25 \beta_{эф}$ над МКС.

Зазоры между топливными оболочками (толщина – 0,5 мм) заполнены гелием.

Импульсный блок представляет собой полый цилиндр высотой 400 мм, закрытый с торцов, с внутренним и внешним диаметрами 44 и 65 мм соответственно. Высота и диаметр концевых заглушек равны 30 и 40 мм соответственно, скорость перемещения – до 15 м/с, эффективность – $1 \beta_{эф}$. ИБ выполнен из алюминия.

Конвертор имеет внутренний и наружный диаметры 380 и 500 мм соответственно, и состоит из двух частей: полусферической оболочки, окружающей верхний блок, и цилиндрической оболочки, окружающей нижний блок. Части конвертора соприкасаются на уровне середины опорной диафрагмы. Высота нижней части конвертора равна 310 мм. В верхней полусфере предусмотрено сквозное отверстие диаметром 210 мм для центрального канала.

Технические характеристики импульсного реактора ГИР-2:

- энерговыделение за импульс ~ 7 МДж ($2,4 \cdot 10^{17}$ делений);

- длительность импульса на полувысоте ~ 300 мкс;

- начальный период разгона ~ 90 мкс;

- максимальная температура АЗ ~ 440 °С;

- максимальный флюенс нейтронов в «окне» конвертора $\sim 10^{14}$ $1/\text{см}^2$;

– максимальная доза γ -излучения за время импульса на внешней поверхности отражателя ~ 600 Гр;

– масса ДМ в узле АЗ ~ 178 кг;

– периодичность генерирования импульсов на установке – 1 импульс в день.

Возмущения реактивности реактора ГИР-2 блоками управления и технологическим оборудованием представлены в табл. 2.

Таблица 2

Величины возмущений реактивности ГИР-2 блоками управления и технологическим оборудованием

Операция	Изменение реактивности, $\beta_{эф}$
Сброс БГР и БТР из крайнего верхнего положения (ИБ – внизу) – аварийный сброс	-18 ± 2
Подъем БГР (ИБ – внизу, БТР – внизу), высота подъема 95 мм	$+13 \pm 1$
Подъем БТР (БГР – вверху, ИБ – внизу), высота подъема 60 мм	$+5,1 \pm 0,005$
Сведение блоков биологической защиты (АЗ – внутри, БГР – вверху, БТР – внизу, ИБ – внизу)	$+5 \pm 0,5$
Нижнее положение БГР и БТР при расположении АЗ под биологической защитой (хранение)	-14 ± 1
Перемещение источника нейтронов от АЗ в защитный контейнер	$-0,013 \pm 0,003$
Подъем ИБ	$+1,000 \pm 0,005$
Изменение реактивности при спуске БТР на 10 мм в зоне действия его дистанционного упора	$-1,244 \pm 0,005$

Средняя энергия нейтронов, испускаемых с поверхности АЗ, равна 1,3 МэВ, с учетом замедления в конверторе их средняя энергия понижается приблизительно до 0,7–1,0 МэВ.

Генерирование импульса делений в ГИР-2 может производиться в режимах:

– с высвечиванием предшественников запаздывающих нейтронов, остановкой импульсного блока в АЗ и иницированием цепной реакции делений от внешнего импульсного нейтронного генератора;

– с высвечиванием предшественников запаздывающих нейтронов, пролетом импульсного блока через АЗ и иницированием цепной реакции делений от внешнего импульсного генератора;

– с иницированием цепной реакции делений от сильного (больше 10^{10} 1/с) внутреннего источника нейтронов при пролете импульсного блока через АЗ.

Максимальный разрешенный для эксплуатации импульс в ГИР-2 имеет энерговыделение 7 МДж ($2,4 \cdot 10^{17}$ делений) и ширину на половине высоты 300 мкс. Наибольшее приращение температуры топлива в этом импульсе составляет 420 °С, а средней по всей АЗ температуры – 290 °С. Флюенс быстрых нейтронов на расстоянии 1 м от центра АЗ равен $3 \cdot 10^{12}$ 1/см² напротив бокового окна в конверторе и $1 \cdot 10^{12}$ 1/см² – за конвертором. Доза γ -излучения на этом расстоянии составляет ~ 30 Гр. Флюенс быстрых нейтронов в нише у поверхности АЗ равен $\sim 1 \cdot 10^{14}$ 1/см². Нейтронный флюенс в зазоре центрального канала реактора составляет $\sim 6 \cdot 10^{14}$ 1/см². Доза γ -излучения на поверхности конвертора ~ 600 Гр.

Конструкция реактора ГИР-2 позволяет обеспечить проведение одного пуска с максимальным энерговыделением за рабочий день и до 100 пусков в год.

Определенные на основе измерений зависимости энерговыделения за импульс и ширины импульса на половине высоты от начальной реактивности показаны на рис. 7. Как видно из рис. 7, энерговыделение за импульс зависит линейно от начальной реактивности по мгновенным нейтронам. Этот факт означает отсутствие в термическом расширении топлива явлений инерционного запаздывания и теплового удара. Энерговыделение в импульсах с начальной реактивностью $\leq 0,08 \beta_{эф}$ и $\geq 0,22 \beta_{эф}$ зависит от режима генерирования вспышки. Энерговыделение за импульс в режиме генерирования при сильном источнике нейтронов в этих областях имеет заметно меньшие, чем в двух других режимах, значения.

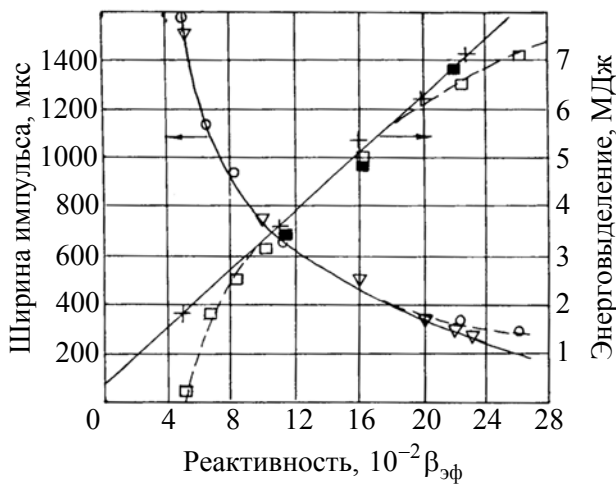


Рис. 7. Энерговыделение за импульс и ширина импульса в ГИР-2 в зависимости от начальной реактивности: + — энерговыделение в режиме с остановкой импульсного блока и инициированием от импульсного нейтронного генератора; ■ — энерговыделение в режиме пролета импульсного блока и инициирования от импульсного нейтронного генератора; □, ○ — энерговыделение и ширина импульса в режиме пролета импульсного блока и инициирования от сильного внутреннего источника нейтронов; ∇ — ширина импульса в режимах с остановкой и пролетом импульсного блока при инициировании от импульсного нейтронного генератора

Последовательность генерирования импульса на ГИР-2 следующая. После завершения процесса подбора и измерения стартового состояния реактора производится спуск блока точной регулировки реактивности в крайнее нижнее положение $\rho \approx -5 \beta_{эф}$. Источник нейтронов удаляется из АЗ. В этом положении в течение 25 минут происходит снижение фона нейтронов в активной зоне за счет распада ядер предшественников запаздывающих нейтронов до уровня $\sim 10^5$ н/с. Затем на максимальной скорости происходят подъем БТР в определенное ранее положение и вслед за этим пневматический ввод импульсного блока. При этом возможна остановка ИБ в АЗ в положении максимального возмущения реактивности (режим 1) и пролет ИБ через АЗ (режим 2). Положительной особенностью режима 1 является то обстоятельство, что возможно прямое измерение периода нарастания мощности, возмущения реактивности ИБ

и параметров импульсов деления при фиксированной реактивности ГИР-2.

Инициирование реакции делений в этих режимах осуществляется с помощью импульсного нейтронного генератора (ИНГ), обеспечивающего выход $\sim 10^6$ нейтронов в импульсе длительностью $\sim 10^{-6}$ с. Задержка пуска ИНГ относительно срабатывания второго путевого выключателя в канале ИБ для режима 1 выбрана равной 100 мс. Для режима 2 оптимальное значение указанной задержки составляет 2,5 мс, при генерировании импульсов с энерговыделением 3,5–7 МДж.

Режим 2 использовался для коррелированного во времени пуска ускорителя ЛИУ-10М и реактора ГИР-2 в начале эксплуатации реактора. Более безопасным является третий режим генерирования импульсов, так называемый режим генерирования импульсов с мощности.

После завершения процесса измерения стартового состояния путем спуска БТР реактор на короткое время (~ 1 мин) переводится в подкритическое состояние. Затем БТР вновь поднимается до упора. При этом реактор является надкритическим с учетом запаздывающих нейтронов ($\rho = 0,08 - 0,24 \beta_{эф}$), и его мощность возрастает по экспоненциальному закону ($T \leq 30$ с). При достижении мощности 2–10 Вт (это значение не является критическим) производится спуск источника нейтронов и пневматический ввод ИБ в АЗ. Режим 3 всегда используется при автономной работе реактора ГИР-2.

Значения параметров импульсов делений представлены в табл. 3. Данные показывают, что энерговыделение в импульсах, генерируемых с мощности (режим 3) в интервале значений $\rho \leq 1,08 \beta_{эф}$ и $\rho \geq 1,22 \beta_{эф}$ меньше, чем в импульсах, проведенных в режимах 1 и 2. При малых значениях перехода выше мгновенного критического состояния это объясняется тем, что из-за большой скорости ИБ уменьшение реактивности за счет вылета импульсного блока из АЗ происходит раньше, чем успевает развиваться полномасштабный импульс, соответствующий максимальному значению вводимой реактивности.

Параметры импульсов делений реактора ГИР-2

Режим генерирования	Избыточная реактивность, $\beta_{эф}$ $\pm 0,005 \beta_{эф}$	Период, мкс ($\sigma = 5 \%$)	Ширина импульса, мкс ($\sigma = 5 \%$)	Приращение температуры чехлов, °С		Энерговыведение, МДж ($\sigma = 5 \%$)
				ГР	ВБ	
1. Остановка ИБ в АЗ, инициирование от ИНГ	0,05	470	1524	64	50	1,82
	0,11	210	671	130	102	3,5
	0,16	130	451	180	140	5,3
	0,20	102	341	219	172	6,2
	0,23	88	288	250	196	7,0
2. Пролет ИБ через АЗ, инициирование от ИНГ	0,11	187	672	120	93	3,2
	0,16	133	467	168	133	4,7
	0,22	92	301	240	189	6,9
3. Пролет ИБ через АЗ при мощности ~ 4 Вт	0,07	320	1132	65	51	1,9
	0,08	262	930	86	66	2,5
	0,10	210	747	110	87	3,3
	0,16	135	460	170	133	4,7
	0,22	105	327	229	178	6,5
	0,26	90	287	256	199	7,2

При генерировании импульсов с мощностью сказывается тепловое гашение реактора в процессе развития импульса, что приводит к автоматическому уменьшению величины вводимой реактивности и, соответственно, энергосвободы.

Параметры импульсов деления, полученные в режимах 1 и 2 в пределах погрешности измерений совпадают между собой.

Полное число импульсов делений за срок эксплуатации реактора ГИР-2 составило ~565. Число совместных с ускорителем ЛИУ-10М импульсов – около 40. Преимущественный способ генерирования импульсов – прострел импульсного блока через активную зону реактора при мощности устройства около 4 Вт. Энергия генерированных импульсов, в основном, составляет от 6,5 до 6,8 МДж при реализации реактивности от 0,22 до 0,23 $\beta_{эф}$ выше состояния критичности на мгновенных нейтронах. При этом период развития импульса и его длительность оставались стабильными и составляли ~100 и ~320 мкс, соответственно.

Заключение

Приведено описание аperiodических импульсных реакторов ГИР и ГИР-2. Показана схема размещения установок облучательного комплекса ЛИУ-10–ГИР. Приведен внешний вид установок и схематический вид АЗ реакторов ГИР и ГИР-2. Дано описание выходных параметров (технических характеристик) реакторов ГИР и ГИР-2. Приведены величины возмущений реактивности реакторов ГИР и ГИР-2 блоками управления. Обосновано преимущество использования стационарно установленного (n, γ)-конвертора в составе активной зоны. Приведена последовательность генерирования импульсов на реакторах ГИР и ГИР-2.

Показаны изменения в конструкции ГИР-2 по сравнению с реактором ГИР.

Сформулированы общие результаты выполненных на комплексах ЛИУ-10–ГИР и ЛИУ-10М–ГИР-2 исследований. Приведено полное число импульсов делений за срок эксплуатации реакторов ГИР и ГИР-2, а также число совместных с ускорителем ЛИУ-10М импульсов реактора ГИР-2.

Список литературы

1. Харитон Ю. Б., Воинов А. М., Колесов В. Ф. и др. Импульсные реакторы ВНИИЭФ (обзор) // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1996. Вып. 2. С. 3–12.

2. Босамыкин В. С., Воинов М. А., Гордеев В. С. и др. Исследование возможности создания импульсного источника нейтронов на основе мощного электронного ускорителя и импульсного ядерного реактора // *Advanced pulsed neutron sources: Physics of/at advanced pulsed neutron sources*, PANS-2, 14–17 June 1994; Dubna, Russia. – Дубна: Изд-во ОИЯИ, 1995. С. 122–131.

3. Пунин В. Т., Савченко В. А., Завьялов Н. В. и др. Мощные линейные индукционные ускорители электронов и облучательные комплексы на их основе для радиационных исследований // *Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001. Вып. 1. С. 356–363.*

4. Пунин В. Т., Савченко В. А., Завьялов Н. В. и др. Мощные линейные индукционные ускорители электронов и облучательные комплексы на их основе для радиационных исследований // ВАНТ. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2000. Вып. 3/4. С. 95–99.

5. Павловский А. И., Босамыкин В. С., Селемир В. Д. и др. Облучательный комплекс

ЛИУ-10–ГИР // ВАНТ. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки. 1985. Вып. 1. С. 20–26.

6. Павловский А. И., Босамыкин В. С., Савченко В. А. и др. Мощный электронный ускоритель ЛИУ-10 // Доклады АН СССР. 1980. Т. 250, № 5. С. 1118–1122.

7. Voinov M. A., Gordeev V. S., Savchenko V. A. et al. Complexes on the basis of high-current linear induction accelerators and pulse nuclear reactors // ВАНТ. Сер. Ядерно-физические исследования. 1999. Вып. 3. С. 82–84.

8. Bostamykin V. S., Gordeev V. S., Pavlovskii A. I. et al. Linear induction accelerator LIA-10M // Proc. 9th IEEE Pulse Power Conf. Albuquerque, USA. 1993. P. 905–907.

9. Гордеев В. С., Мысков Г. А., Филиппов В. О., Викторов И. В. Результаты исследований ускорителя ЛИУ-10М // *Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. – Саров, 2003. Вып. 5. С. 176–181.*

Контактная информация –

Дорохин Алексей Владимирович,
начальник группы эксплуатации
установок (комплексов) ИЯРФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ,
e-mail: otd4@expd.vniief.ru

Статья поступила в редакцию 16.06.2017.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2017, вып. 4, с. 32–42.