

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ИМПУЛЬСНЫХ РЕАКТОРАХ БИР-2М И БИГР

NEUTRON-PHYSICAL EXPERIMENTS AT PULSED REACTORS BIR-2M AND BIGR

С. В. Воронцов, М. И. Кувшинов, И. З. Сибгатуллин
S. V. Vorontsov, M. I. Kuvshinov, I. Z. Sibgatullin

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,
пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия
Federal Nuclear Center of Russia – All-Russia Research Institute of Experimental
Physics

В течение длительной эксплуатации реакторы БИР и БИГР помимо основного их назначения (генерирования импульсов n - γ -излучений для целей облучения) систематически использовались для проведения экспериментов по изучению возможности улучшения параметров излучений импульсных реакторов, повышения их ядерной безопасности, изучения вопросов нейтронной физики. В докладе рассмотрены: долгосрочное поведение реакторов БИР и БИГР в режиме саморегулирования мощности; генерирование импульса делений в этих реакторах при пролете стержня через АЗ; связанные системы: (реактор БИР + подкритическая сборка); эксперименты с ультрахолодными нейтронами на реакторе БИГР; быстродействующая аварийная защита и время задержки развития импульса в реакторе БИР при слабом источнике нейтронов в АЗ.

In the course of their long-term operation BIR and BIGR reactors, besides their primary function (generation of n - γ irradiation pulses for irradiation purposes), were regularly used for performing experiments, which aimed at studying the possibility of improvement of pulsed reactor n - γ irradiation parameters, at increasing their nuclear safety, as well as at studying neutron physics issues. The present review considers the following things: long-term behavior of BIR and BIGR reactors in the mode of power self-regulation; generation of pulse while the rod is passing through the core of the reactors; bound systems: (BIR reactor + subcritical assembly); experiments with ultracold neutrons at BIGR reactor; fast-response scram system and fission pulse delay time in BIR reactor in case of weak neutron source in the core.

Введение

Быстрый импульсный реактор БИР имеет металлическую активную зону (АЗ) из сплава высокообогащенного (85% по ^{235}U) урана с молибденом (6 масс. %). Реактор был создан в РФЯЦ-ВНИИЭФ в 1965 г. Максимальные значения параметров импульса: энерговыделение – 3 МДж, длительность на полувысоте – 60 мкс, максимальная температура АЗ – 300°С [1, 2].

Быстрый импульсный графитовый реактор БИГР имеет АЗ из спрессованной смеси высокообогащенного (90% по ^{235}U) диоксида урана с графитом. Отношение числа ядер C/U –16. Реактор был создан в РФЯЦ-ВНИИЭФ в 1977 г. Максимальные значения параметров импульса: энерговыделение – 280 МДж, длительность на

полувысоте – 2 мс, максимальная температура АЗ – 900°С [3, 4].

В течение длительной эксплуатации реакторы БИР и БИГР помимо основного их назначения (генерирования импульсов n - γ -излучений для облучательных целей) систематически использовались для проведения экспериментов, цель которых заключалась в изучении возможности улучшения параметров нейтронного и гамма-излучений импульсных реакторов, повышения их ядерной безопасности, а также для изучения вопросов нейтронной физики. В настоящем докладе представлены, на наш взгляд, наиболее интересные из них.

1. Безопасные периоды разгона на запаздывающих нейтронах реакторов БИР и БИГР и долговременное их поведение [5, 6]

При генерировании импульса на запаздывающих нейтронах допустимое энерговыделение в АЗ реактора определяется максимальной температурой топливного материала. При достаточно быстром периоде нарастания мощности ($T_0 \leq 1$ мин.) момент заглушения реактора должен быть заранее определен оператором и введен в программу блока системы управления и защиты (СУЗ), выдающего сигнал на аварийное заглушение путем сброса блока безопасности. Однако, если энерговыделение за импульс, сформировавшийся за счет самогашения реактивности, не превышает предельно допустимого значения, то максимальная температура топлива также будет меньше допустимого значения и аварийного заглушения реактора в этом случае не требуется. Так как энерговыделение в самогасящемся импульсе однозначно определяется начальным периодом нарастания мощности, то в рассматриваемом аспекте можно говорить о безопасном периоде разгона мощности.

Для определения безопасных условий эксплуатации реактора необходимо знать интервал безопасных значений T_0 , а также долговременное поведение реактора в условиях фиксированного положения органов регулирования реактивности (ОРР): изменение во времени мощности, реактивности, энерговыделения и температуры АЗ. Эксперименты проводились следующим образом. При начальной (комнатной) температуре АЗ реактор выводился на заданный период разгона, значение которого измерялось. В течение всего последующего цикла измерений, длившегося ~ 60 часов на БИГР и ~ 22 часа на БИР, положение ОРР и экспериментальных устройств не изменялось. Охлаждение АЗ происходило за счет свободной конвекции (за исключением одного опыта на БИГР, в котором штатная система принудительного воздушного охлаждения была включена после формирования первого пика мощности). Контроль долговременного поведения реактора осуществлялся путем регистрации временного хода мощности, реактивности, энерговыделения и температуры АЗ.

Опыты проведены для 4-х значений начального периода разгона: 21,6; 45,5; 100 и 150 с – для реактора БИР; 34,7; 75,2; 102,2 с (без принудительного охлаждения) и 34,4 с (при наличии охлаждения) – на реакторе БИГР. Часть полученных результатов представлена на рис. 1 и 2.

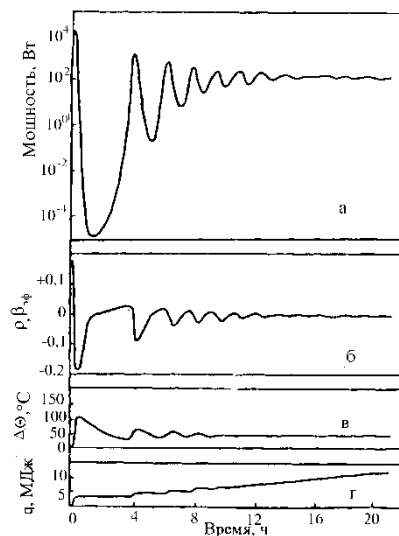


Рис. 1. Временная зависимость мощности (а), реактивности (б), температуры (в) и энерговыделения в АЗ (г) после вывода реактора БИР в надкритическое состояние с периодом разгона 45,5 с (начальная реактивность $\rho = 0,170\beta_{эф}$) без принудительного изменения реактивности в последующее время (с помощью ОРР или принудительного охлаждения)

Отметим, что наблюдаемые в опытах колебания мощности, реактивности и температуры являются качественно различными для изучаемых реакторов. В реакторе БИР колебания затухающие, в реакторе БИГР – незатухающие (и невозрастающие). При наличии принудительного охлаждения АЗ амплитуда и частота колебаний заметно возрастают. Результаты других опытов (не представленных на рис. 1 и 2) для каждого из реакторов аналогичны приведенным, но различаются значениями параметров колебаний. Размах колебаний мощности, реактивности и температуры АЗ возрастает по мере уменьшения начального периода разгона мощности.

Рассмотрим полученные экспериментальные данные с точки зрения безопасности эксплуатации реакторов. Как следует из рис. 1 и 2, максимальные значения мощности и температуры АЗ достигаются в процессе формирования первого импульса из цикла, поэтому энерговыделение в первом импульсе может служить в качестве ограничивающего критерия безопасности.

На основании результатов, полученных в представленных опытах, было установлено, что энерговыделение в АЗ за первый импульс не будет превышать допустимое значение, если начальный асимптотический период разгона реакторов БИР и БИГР будет больше 15 с ($\rho < 0,33\beta_{эф}$) и 35 с ($\rho < 0,20\beta_{эф}$) соответственно. В этом случае без-

опасность реакторов БИР и БИГР обеспечивается автоматически, без использования регулирующих и аварийных устройств, только за счет внутреннего гашения реактивности.

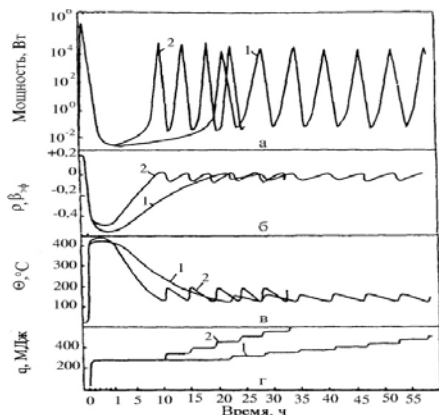


Рис. 2. Временная зависимость мощности (а), реактивности (б), температуры (в) и энерговыделения в АЗ (г) после вывода реактора БИГР надкритическое состояние: 1 – период разгона 34,7 с (начальная реактивность $\rho = 0,203 \beta_{эф}$) без принудительного изменения реактивности в последующее время с помощью ОРР и без принудительного охлаждения; 2 – период разгона 34,4 с (начальная реактивность $\rho = 0,204 \beta_{эф}$) без принудительного изменения реактивности в последующее время с помощью ОРР, но с принудительным воздушным охлаждением АЗ после первого пика мощности

2. Связанные системы: импульсный реактор БИР + подкритическая сборка [7, 8]

Связанная система – (импульсный реактор БИР + подкритическая сборка (ПС)) являются разновидностью связанных импульсных реакторов. Целесообразность использования таких систем, в частности, основана на возможности получать интенсивные потоки нейтронов в больших объемах для облучений и изменять в широких пределах длительность импульса делений при максимальном энерговыделении в АЗ. Кроме того, связанной системой можно управлять, имея ОРР лишь в одном компоненте, что иногда представляется желательным. Характерной чертой связанной системы является наличие делений в каждом из компонентов, производимых нейтронами, прилетевшими из противоположного компонента. Особенностью импульсной связанной системы является изменение в течение развития импульса реактивности,

доли нейтронов, попадающих из одного компонента в другой, и мощности в каждом из компонентов.

Свойства связанной системы зависят от целого ряда параметров каждого из компонентов и системы в целом. К таким параметрам относятся: реактивность, геометрия и состав каждого компонента, время жизни и спектр нейтронов в них, а также расстояние между ними.

Теоретические исследования связанных систем, содержащих импульсный реактор и ПС, выполнены В. Ф. Колесовым и его сотрудниками в 1970 г. [7]. Экспериментальные работы на связанных системах, содержащих импульсный реактор БИР и ряд ПС, различающихся материальными и физическими параметрами, были впервые проведены в РФЯЦ-ВНИИЭФ в 1974 г. М. И. Кувшиновым и сотрудниками [8]. Настоящий доклад содержит краткое сообщение об этих экспериментах.

Экспериментальное оборудование. Для проведения экспериментов в дополнение к штатному оборудованию реактора БИР было создано устройство УДС, обеспечивающее дистанционное сближение ПС и АЗ реактора. Общий вид связанной системы схематически изображен на рис. 3.

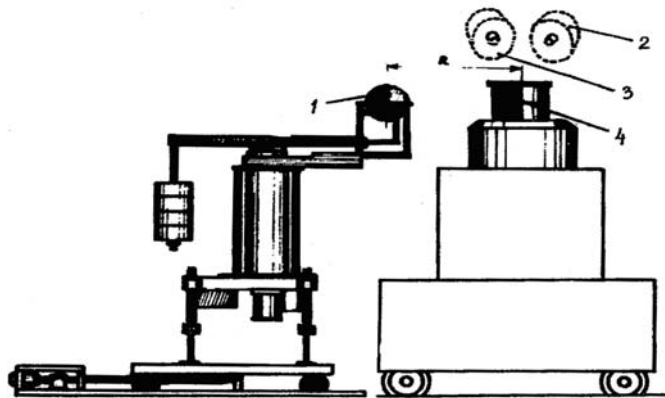


Рис. 3. Схема эксперимента: 1 – ПС, 2 и 3 – счетчики нейтронов, 4 – АЗ БИР

УДС помимо перемещения ПС по горизонтали позволяет также дистанционно производить сближение и разведение составных ее частей (нижнего и верхнего блока) в вертикальном направлении. Ход подвижной части ПС по вертикали составляет 90 мм, перемещение ПС по горизонтали – 500 мм. Для изучения были выбраны четыре ПС (табл. 1) с резко различающимися физическими характеристиками (прежде всего реактивностью).

В первую группу (ПС-1 и ПС-4) входили две металлические сборки из высокообогащенного урана сферической формы с большой центральной полостью (без отражателя), различающиеся значением реактивности: $-12,3 \beta_{эф}$ и $-1,1 \beta_{эф}$. Во вторую группу (ПС-2 и ПС-3) – две сферические металлические сборки из высокообогащенного урана с водородосодержащим отражателем, сильно увеличивающим среднее время жизни мгновенных нейтронов. Значения реактивности этихборок также значительно различались между собой: $-12,6 \beta_{эф}$ и $-0,83 \beta_{эф}$. Центры ПС и АЗ БИР находились на одном горизонтальном уровне. ПС-1 и ПС-4 имели оболочку из кадмия толщиной 1 мм.

В экспериментах измерялся целый ряд ядерно-физических характеристик, как для изолированныхборок, так и для связанных систем: реактивность, временные параметры, форма импульса, пространственное распределение флюенса нейтронов. Здесь приведем только график (см. рис. 4) пространственного распределения флюенса нейтронов в связанных системах (БИР+ПС-1) и (БИР+ПС-4).

В качестве заключения этого раздела доклада отметим следующее. Впервые экспериментально отработана методика управления системой связанных импульсных реакторов, которая позволяет осуществлять работу импульсного реактора с РС различного типа. Эта методика, в частности, дает возможность с достаточной точностью прогнозировать энерговыделение в каждой АЗ при импульсном режиме работы связанной системы. Особый интерес вызывает тот факт, что в связанной системе между РС и АЗ реактора имеет место обширная область пространства (≈ 500 мм) с плотностью потока нейтронов, близкой к равномерной.

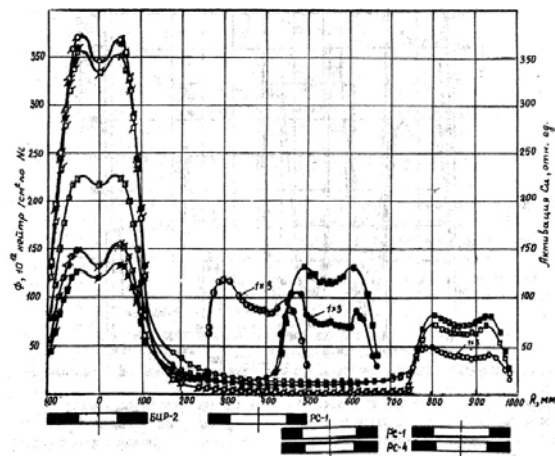


Рис. 4. Пространственные распределения флюенса нейтронов

3. Генерирование импульса делений в реакторах БИР и БИГР при пролете стержня через АЗ [5, 9]

Повысить безопасность быстрого импульсного реактора можно путем применения пролетного режима, при котором импульсный стержень (ИС) не останавливается в АЗ, а пролетает через неё. При этом инициирование импульса может производиться как с помощью импульсного нейтронного генератора (ИНГ), так и от запаздывающих нейтронов АЗ. На реакторах БИР и БИГР экспериментально изучены оба этих способа. При инициировании от ИНГ момент его срабатывания должен быть коррелирован с моментом достижения реактором критического по мгновенным нейтронам состояния. Это осуществляется путем подбора времени задержки пуска ИНГ относительно сигнала «базового» датчика, расположенного на пути пролета ИС через АЗ. Требование корреляции значений избыточной реактивности,

Таблица 1

Состав и геометрия подкритическихборок (D_H , D_B – внешний и внутренний диаметр)

ПС	АЗ (сфера)				Отражатель (сфера)	
	U^{235} (90%)		U^{235} (15%)		$ZrH_{1,6}$	
	D_B-D_H , см	масса, кг	D_B-D_H , см	масса, кг	D_B-D_H , см	масса, кг
ПС-1	135-230	91,2				
ПС-2	151-210	52,24	210-217	9,38	217-275	29,71
ПС-3	135-210	61,41	210-217	9,38	217-275	29,71
ПС-4	120-230	97,6				

скорости ИС и момента пуска ИНГ для реализации максимального импульса делений, а также заглушение реактора за счет вылета ИС из АЗ повышает безопасность эксплуатации реактора.

Процедура генерирования импульса при иницировании от сильного источника запаздывающих нейтронов в АЗ является наиболее простой, если стартовое состояние реактора – надкритическое. На реакторах БИР и БИГР она сводится к следующим операциям:

- с помощью регулирующих блоков подбирается стартовая реактивность, при которой реактор разгоняется с заданным периодом;
- по достижении необходимого уровня мощности (≈ 1 Вт) срабатывает пневмопривод ИС, перемещая последний через АЗ.

Исследование режима генерирования импульса при пролете ИС через АЗ с иницированием от сильного источника запаздывающих нейтронов производилось на реакторах БИР и БИГР при различных скоростях ИС, избыточной реактивности и мощности источника. На каждом из реакторов наиболее полные исследования рассматриваемого режима работы проведены для двух скоростей ввода избыточной реактивности: 12 и 27 β/c – на реакторе БИР, 8,7 и 4,8 β/c – на реакторе БИГР. В опытах определялись основные характеристики импульса делений.

На рис. 5 приведена зависимость амплитуды импульса делений от вводимой избыточной реактивности для реактора БИР с иницированием от сильного источника нейтронов. Там же для сравнения представлена аналогичная зависимость, полученная в режиме с остановкой ИС в АЗ при иницировании от ИНГ.

Из рис. 5 видно, что в пролетном режиме БИР при заданном значении избыточной реактивности амплитуда импульса может достигнуть значения, получаемого в режиме с остановкой ИС в АЗ, только при вполне определенной скорости ИС. Если скорость ИС меньше оптимальной, то максимальное (расчетное) значение избыточной реактивности не достигается в АЗ из-за «преждевременного» температурного гашения реактивности; если скорость ИС больше оптимальной, то полномасштабный импульс не успевает развиваться из-за «преждевременного» вылета ИС из АЗ.

Основные результаты исследований по генерированию импульса делений при пролете ИС через АЗ с иницированием от сильного источника запаздывающих нейтронов на реакторе БИГР представлены на рис. 6 и 7. Заметим, что скорость ввода избыточной реактивности с помощью ИС

при генерировании импульса в реакторе БИГР определяется начальным (до пневматического ввода) положением ИС относительно центра АЗ (Нис). Чем меньше исходное значение Нис, тем выше скорость возрастания реактивности при пневматическом вводе ИС в АЗ.

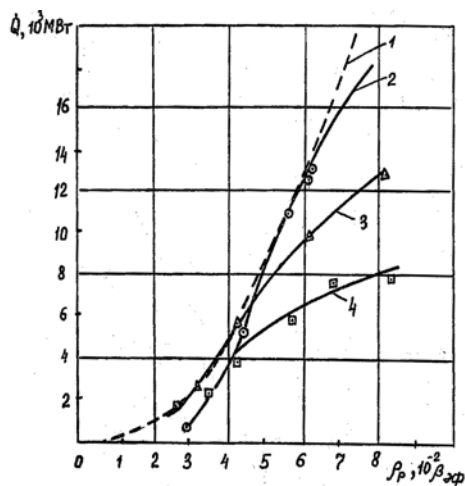


Рис. 5. Зависимость амплитуды импульса делений от реактивности для реактора БИР: 1 – иницирование от ИНГ при остановке ИС в АЗ; 2, 3, 4 – иницирование при начальной мощности в АЗ ≈ 1 Вт и скорости пролета ИС через АЗ 28,8, 20,3 и 11,9 м/с, соответственно

Из рис. 6 следует, что при Нис = 100 мм импульс практически не имеет хвоста; рис. 7 показывает, что для получения оптимальных импульсов в рассматриваемом режиме работы реактора БИГР необходима корреляция скорости ИС, вводимой реактивности и мощности в АЗ.

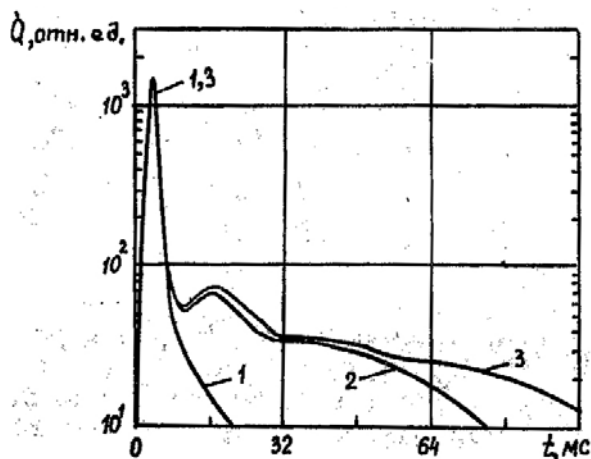


Рис. 6. Форма импульса делений в реакторе БИГР при различных режимах его работы: 1 – пролетный ($Q_0 = 10$ Вт; $\rho_0 = 0,083 \beta_{эф}$; Нис = 100 мм); 2 – пролетный ($Q_0 = 10$ Вт; $\rho_0 = 0,083 \beta_{эф}$; Нис = 400 мм); 3 – с остановкой ИС в АЗ при иницировании от ИНГ

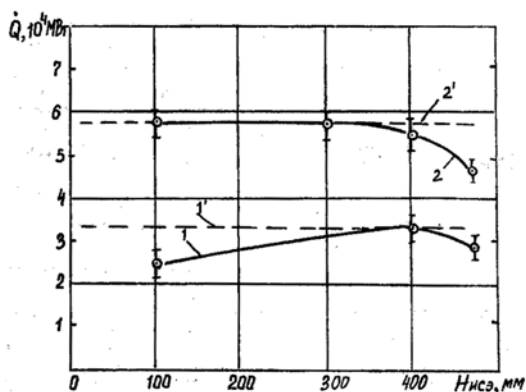


Рис. 7. Зависимость максимальной мощности в импульсе реактора БИГР от начального положения ИС в АЗ ($H_{ис}$): 1, 2 – пролетный режим ($Q_0 = 10 Вт$; $\rho_0 = 0,06 \beta_{эф}$ и $\rho_0 = 0,083 \beta_{эф}$); 1', 2' – режима с остановкой ИС в АЗ при инициировании от ИНГ

4. Экспериментальная проверка динамического конвертора ультрахолодных нейтронов на импульсном реакторе БИГР [10, 11]

Ультрахолодные нейтроны (УХН) – нейтроны, которые испытывают полное отражение от границы вещество – вакуум при любых углах падения. Это может происходить только если скорость нейтрона составляет $\leq 5 м/с$. Относительная доля таких нейтронов в полном спектре от ядерного реактора очень мала $\approx 10^{-12}$. На высокопоточном стационарном исследовательском ядерном реакторе ILL во Франции получена плотность УХН $\approx 10^2 см^{-3}$. Увеличение плотности УХН дало бы возможность улучшить точность в уже поставленных экспериментах, а также открыло бы возможность для постановки новых в методическом плане экспериментов с УХН.

С целью повышения плотности УХН в экспериментальных исследованиях сотрудниками ОИЯИ (г. Дубна) был предложен проект импульсного источника УХН с движущимся контейнером. Этот проект был реализован на импульсном реакторе БИГР [10].

Конструкция установки. Схематически установка для получения высокой плотности УХН на реакторе БИГР изображена на рис.8, 9. Она обеспечивает выполнение следующих основных требований для реализации исследований: высокую плотность потока нейтронов утечки из АЗ; замедление части быстрых нейтронов до скоростей, соответствующих УХН, и их сбор в специальный контейнер; транспортировку контейнера с УХН в безфоновое в отношении нейтронов поме-

щение; регистрацию нейтронов, вылетевших из контейнера.

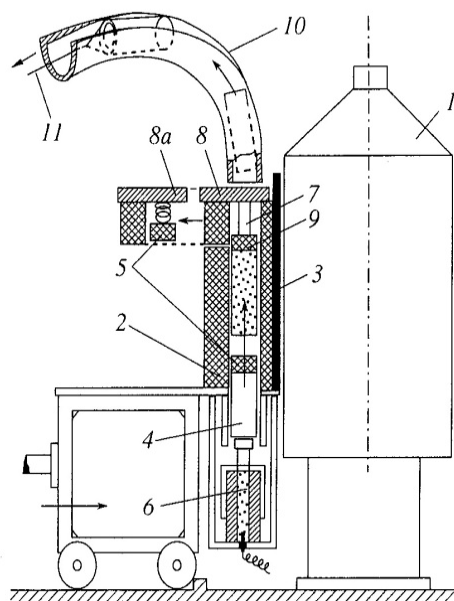


Рис. 8. Схема подвижной части установки: 1 – АЗ; 2 – блок замедлителя; 3 – экран из $ВС_4$ и Cd ; 4 – контейнер УХН; 5, 9 – охлаждаемый конвертор; 6 – система разгона; 7 – система торможения; 8, 8а – массивная подвижная плита; 10 – транспортный желоб; 11 – трос

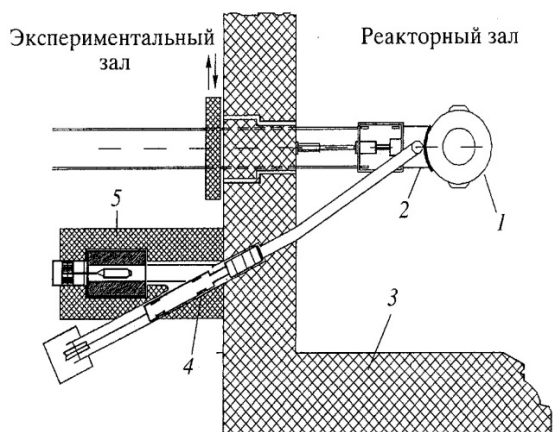


Рис. 9. Общий вид установки: 1 – реактор; 2 – подвижная платформа; 3 – стена зала; 4 – шибер; 5 – детектор

Контейнер УХН располагается в канале (внутри замедлителя из полиэтилена) и представляет из себя вакуумированный сосуд из нержавеющей стали, с напыленным изнутри тонким слоем из Ве. Верхний торец контейнера (входное окно для УХН) – фольга из нержавеющей стали толщиной 100 мкм. Конвертор – полиэтиленовый цилиндр – размещается перед входным торцом контейнера.

Таблица 2

Параметры полномасштабного и «оборванного» БАЗ импульсов реактора БИР–2М

Параметр	Полномасштабный импульс	«Оборванный» БАЗ импульс
Избыточная реактивность, $\rho/\beta_{эф}$	0,05	0,05
Период разгона реактора, мкс	54,2	54,2
Максимальная мощность, Вт	$3,8 \cdot 10^9$	~400
Энерговыведение в АЗ, Дж	$1,65 \cdot 10^6$	~0,1

Контейнер вместе с конвертором разогнался до скорости ≈ 75 м/с за время $\approx 1,5$ мс с помощью специальной взрывной камеры. Контейнер заполняется во время полета УХН, вышедшими из конвертора через фольгу. Чтобы УХН остались в контейнере его надо быстро остановить. Это реализуется с помощью демпфера, укрепленного на упорной плите. После останова контейнер с УХН транспортируется за бетонную стену в измерительный зал. Детектором нейтронов является сборка из BF₃-пропорциональных счетчиков. Они регистрируют нейтроны, нагревающиеся из УХН на стенках контейнера до около тепловых энергий ($\approx 10^{-2}$ эВ).

Результаты экспериментов. Исходя из результатов измерений вылетающих из контейнера нагретых нейтронов, было получено значение плотности нейтронов в контейнере на момент импульса реактора с энерговыведением 125 МДж: (26 ± 5) см⁻³. Это более чем на три порядка меньше расчетного значения ($\approx 10^5$ см⁻³). Проведенный авторами работы [10] анализ показал, что это значение может быть повышено в 30–50 раз путем оптимизации условий проведения экспериментов на реакторе БИР: изменения конструкции блока замедлителя на стенде, приближения контейнера для УХН к поверхности корпуса реактора, охлаждения полиэтиленового конвертора до 80 К, использования импульсов реактора максимальной мощности.

5. Быстродействующая аварийная защита импульсного реактора [12]

В импульсных реакторах избыточная реактивность, вводимая для генерирования импульса на мгновенных нейтронах, не должна превышать предельно-допустимого значения (т.е. период разгона реактора должен быть не менее допустимого значения). Это условие обеспечивается только квалификацией и внимательностью оператора, и поэтому на безопасность реактора оказывает влия-

ние «человеческий фактор». Задача исследований заключалась в том, чтобы на программно-аппаратном уровне определять период нарастания мощности в АЗ, сравнивать его с априори допустимым значением и выдавать команду в СУЗ на аварийное заглушение реактора, если период меньше допустимого. Для решения поставленной задачи были разработаны:

- система измерения и анализа периода разгона реактора с выдачей сигнала на срабатывание быстродействующей аварийной защиты (БАЗ);
- БАЗ – взрывное устройство для быстрого перевода реактора в подкритическое состояние.

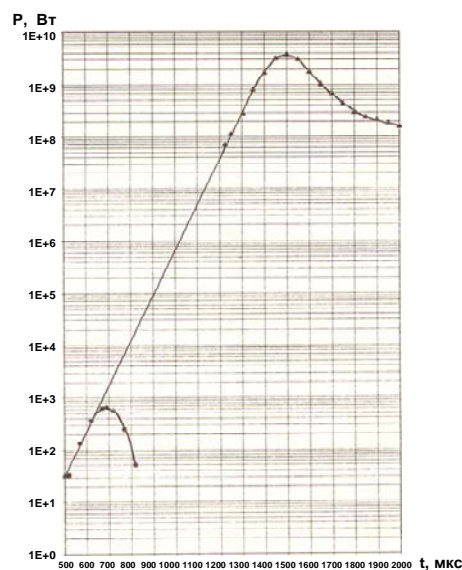


Рис. 10. Формы полномасштабного и оборванного с помощью БАЗ импульсов

БАЗ представляет собой устройство в виде ствола из специальной стали калибром 30 мм и наружным диаметром 45 мм, который при заряде ВВ $\sim 0,76$ г обеспечивает удаление полиэтиленовой пули (ПЭ-пули) массой ~ 10 г на расстояние ~ 100 мм за время ~ 210 мкс, отсчитываемое от момента подачи сигнала на подрыв ВВ. Ствол размещается в центральном канале АЗ реактора БИР.

Начальное положение ПЭ-пули в стволе соответствует центру АЗ. При подрыве ВВ ПЭ-пули вылетает из АЗ реактора вверх. При этом реактивность реактора уменьшается на $\sim 0,12\beta_{эф}$, что является достаточным для заглушения реактора. Параметры полномасштабного и «оборванного» с помощью БАЗ импульсов реактора БИР-2М приведены в таблице 2, форма импульсов на рис. 10.

Отметим, что энерговыделение за «оборванный» импульс на ~ 7 порядков меньше, чем в полномасштабном импульсе и поэтому не вызывает заметного нагрева АЗ. При срабатывании БАЗ время перевода реактора в подкритическое по мгновенным нейтронам состояние осуществляется за $\sim 0,0002$ с.

Результаты представленных экспериментов показали, что защиту целостности импульсных реакторов типа БИР можно реализовать с помощью компактного взрывного устройства.

6. Определение времени задержки развития импульса делений в надкритическом состоянии реактора БИР при слабом источнике нейтронов в АЗ

Одной из целей работы было получение данных о времени задержки развития цепной реакции деления в АЗ реактора БИР, находящегося в надкритическом по мгновенным нейтронам состоянии, при отсутствии стороннего источника нейтронов в реакторном зале. Для сокращения времени проведения экспериментов, необходимо для набора статистически значимых результатов, на стенде реактора БИР-2М был смонтирован специально разработанный механизм перезарядки взрывного устройства отстрела. Он изображен на рис. 11. Измерение времени ожидания импульса делений производилось с помощью пересчетного прибора, запускаемого сигналом ИОЦ (импульсный стержень в центре АЗ) и останавливаемого сигналом – «пороговое значение тока». Эти сигналы поступали из СУЗ системы измерений реактора.

На стенде реактора БИР-2М с макетом БАЗ и механизмом перезарядки была успешно проведена серия из ~ 200 импульсов, которые заглушались (в первую очередь) срабатыванием БАЗ и (затем) – с помощью штатной аварийной защиты реактора. Серии опытов проводились при избыточных реактивностях: $\sim 0,03\beta_{эф}$ (60 пусков), $0,05\beta_{эф}$ (115 пусков), $0,07\beta_{эф}$ (12 пусков). Алгоритм управления реактором БИР-2М и макетом БАЗ во всех опытах был одинаковым.

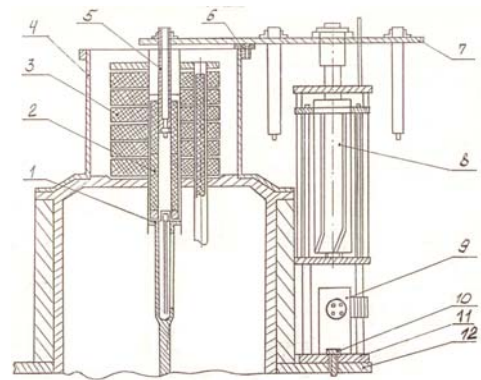


Рис. 11. Схема АЗ реактора БИР-2М и механизма перезарядки с устройством отстрела: 1 – шток ББ; 2 – ББ; 3 – диски АЗ; 4 – КВО; 5 – устройство отстрела; 6 – упор кассеты; 7 – кассета; 8 – барабан; 9 – привод МП; 10 – болт крепления МП; 11 – основание МП; 12 – плита стенда

На рис. 12 представлена экспериментальная гистограмма зависимости числа импульсов от времени ожидания для серии из 115 пусков реактора БИР при $\rho_p = 0,050\beta_{эф}$.

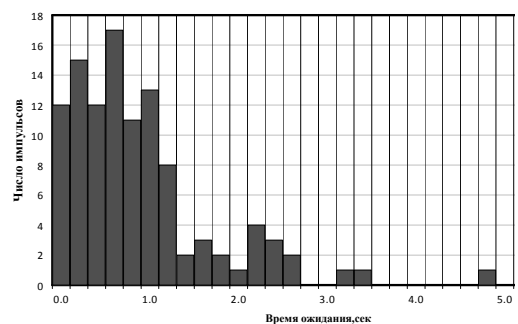


Рис. 12. Экспериментальная гистограмма зависимости чисел импульсов от времени ожидания для опытов серии из 115 пусков реактора БИР при $\rho_p = 0,050\beta_{эф}$

Список литературы

1. Дегтярев А. Н., Игнатов И. И., Кувшинов М. И. и др. Импульсный реактор БИР.// ВАНТ. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки. 1985. Вып.1. С.14–21.
2. Khariton Yu.B., Kolesov V. F., Kuvshinov M. I. et al. Overview of VNIIEF pulsed reactors.// International Embedded Topical Meeting “Physics, Safety, and Applications of Pulse Reactors”. 13–17 November 1994. Washington. D.C., P. 22-24.
3. Кувшинов М. И., Колесов В. Ф. Воинов А. М и др. Аперриодический импульсный реактор БИГР.// ВАНТ. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки. Вып.1, 1988, С. 3–12

4. Kuvshinov M. I., Voinov A. M., Kolesov V. F. et al. Aperiodic self-quenching BIGH reactor.// International Embedded Topical Meeting "Physics, Safety, and Applications of Pulse Reactors". 13–17 November 1994. Washington, D.C., P. 126–127.
5. Кувшинов М. И., Смирнов И. Г. Некоторые экспериментальные исследования по безопасности импульсных реакторов БИР и БИГР.// ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. Вып. 2. 1996. С. 12–18.
6. Kolesov V. F., Kuvshinov M. I., Smirnov I. G. et al. Experimental and Calculational investigations of the long-term dynamics of fast reactors subjected to super-prompt-critical step reactivity insertions and applications for the 17 June 1997 accident.// Sixth International Conference on Nuclear Criticality Safety. ICNC-99. September 20–24. 1999. Versailles, France. P. 890–897.
7. Колесов В. Ф., Петров Ю. В., Штарев С. К. Кинетика системы связанных импульсных реакторов.// Атомная энергия. 1975. т. 39, вып. 6. С. 392 – 396.
8. Кувшинов М. И., Чередник П. Ф., Игнатов И. И. и др. Экспериментальное исследование систем связанных импульсных реакторов.// ВАНТ. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки. 1978. Вып. 2 (2). С. 3–15.
9. Kuvshinov. M. I., Smirnov I. G.. Some experimental safety researches on BIR and BIGH pulsed reactors.// International Embedded Topical Meeting "Physics, Safety, and Applications of Pulse Reactors". 13–17 November 1994. Washington, D. C. P. 232–233.
10. Багрянов Б. В., Карташов Д. Г., Кувшинов М. И. и др. Экспериментальная проверка метода динамического конвертора ультрахолодных нейтронов на импульсном реакторе БИГР.// Ядерная физика. 1999. том 62, № 5. С. 844–850
11. Voinov A. M., Kuvshinov M. I., Smirnov I. G. et al. Ultracold neutrons (UCN) generator at the BIGH reactor (Arzamas-16).// International Embedded Topical Meeting "Physics, Safety, and Applications of Pulse Reactors". 13–17 November 1994. Washington, D.C. P. 179–180.
12. Kiselev A. B., Kuvshinov M. I., Lugovoi A. A et al. Researches on Nuclear Critical Safety on BIR-2M Pulse Reactor. Sixth International Conference on Nuclear Criticality Safety. ICNC-99. September 20–24. 1999. Versailles, France. P. 1206–1214.