

УДК 621.039.566.2:621.039.564:681.5.08

## РЕЗУЛЬТАТЫ ВТОРОЙ СТАДИИ ФИЗИЧЕСКОГО ПУСКА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ БР-К1М

© 2024 г. И. М. Пискорский<sup>1,\*</sup>, А. В. Арапов<sup>1</sup>, А. В. Данилов<sup>1</sup>, А. А. Девяткин<sup>1</sup>, А. В. Жирнов<sup>1</sup>,  
И. А. Кирилин<sup>1</sup>, Н. А. Красавин<sup>1</sup>, А. Е. Никифоров<sup>1</sup>, Г. Н. Пикулина<sup>1</sup>, К. А. Савасичев<sup>1</sup>,  
А. Б. Соколов<sup>1</sup>, В. А. Юхневич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский  
научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия

\*e-mail: otd4@expd.vniief.ru

Поступила в редакцию 16.03.2024

После доработки 24.03.2024

Принята к публикации 29.04.2024

Подведены итоги модернизации исследовательской ядерной установки БР-К1М (бустера-реактора типа «Каскад»). Обсуждаются результаты исследований, полученные на второй стадии физического пуска установки, описаны методы измерений и обработки результатов, использованные для определения основных параметров активной зоны, эксплуатационных параметров и пределов безопасной эксплуатации установки.

*Ключевые слова:* исследовательская ядерная установка, реактивность, импульс на мгновенных нейтронах, импульс на запаздывающих нейтронах, установившийся период, верхне-критическое состояние, органы регулирования реактивности

DOI: 10.31857/S0367676524080199, EDN: OPPPTW

### ВВЕДЕНИЕ

Реактор БР-К1 разработан и введен в эксплуатацию во ВНИИЭФ в 1995 году [1, 2]. Он представляет собой многоцелевую ядерно-физическую установку, предназначавшуюся для исследования возможностей двухсекционного бустера-реактора «Каскад» с односторонней нейтронной связью секций, для проведения облучательных экспериментов в режиме автономного аperiodического импульсного реактора [3].

Комиссия по физическому пуску БР-К1 установила значения предельно допустимых параметров приблизительно в три раза меньшие проектных. Для генерирования импульсов на мгновенных и запаздывающих нейтронах было разрешено предельно допустимое энерговыделение в АЗ не более  $1.2 \cdot 10^{18}$  дел, работа в статическом режиме была разрешена на мощности не более 10 кВт. Уменьшение предельно допустимых параметров реактора БР-К1 было обусловлено значительными температурными деформациями торцевой поверхности топливных блоков АЗ, превышающими допустимые пределы при работе на проектных параметрах. На стадии физического пуска при работе реактора БР-К1 в статическом режиме на проектной предельно допустимой мощности 30 кВт было обнаружено заклинивание блоков аварийной защиты, а также коробление топливных блоков.

С развитием возможностей численного моделирования теплофизических процессов был обоснован и разработан проект модернизации исследовательской ядерной установки (ИЯУ) БР-К1 с целью повышения безопасности ее функционирования во всех режимах и вывода на параметры, близкие к проектным: генерированию импульса на мгновенных нейтронах с энерговыделением 91 МДж и длительностью не менее 600 мкс [4].

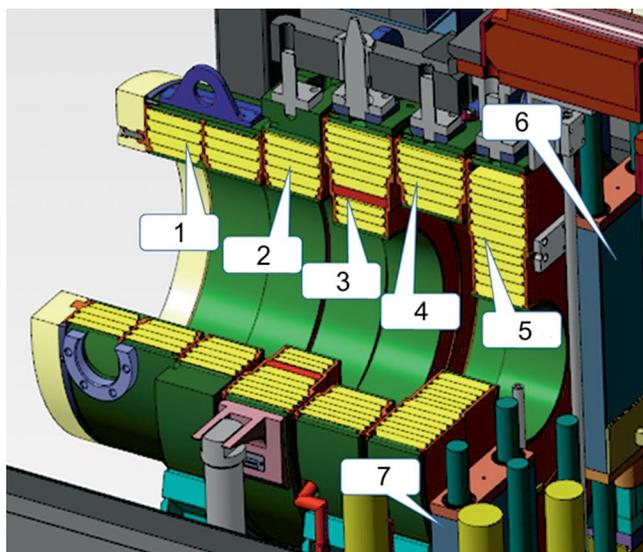
С февраля 2020 года ИЯУ БР-К1М была в процессе физического пуска, который, ввиду большого объема работ, был разделен во времени на две стадии. В рамках первой стадии были осуществлены сборка активной зоны реактора и проведены критмассовые исследования параметров модернизируемой установки [5, 6]. На второй стадии физического пуска ИЯУ БР-К1М проводились работы с целью определения основных параметров АЗ, эксплуатационных параметров и пределов безопасной эксплуатации установки. Исследования проводились при работе ИЯУ в статическом, квазиимпульсном (импульсном на запаздывающих нейтронах (ИЗН)) и импульсном на мгновенных нейтронах (ИМН) режимах.

Материалы статьи были представлены в качестве доклада на очередной международной конференции «Ядро-2023», научная программа которой охватывает широчайший спектр ядерно-физических процессов [7]. Одно из направлений — современные методы

и технологии в области ядерной физики. ИЯУ БР-К1 является современным техническим средством, предназначенным для изучения воздействия импульсного и статического (продолжительного) нейтронного излучения и сопутствующего гамма-излучения на вещества и приборы. Во ВНИИЭФ накоплен большой опыт по разработке, безопасной эксплуатации и регистрации физических параметров излучения подобных установок [8].

### КОНСТРУКЦИЯ АЗ РЕАКТОРА БР-К1М

Материалом АЗ реактора БР-К1М является сплав урана с молибденом. АЗ имеет кольцевую структуру, топливный материал которой разбит на диски, а диски — на коаксиальные кольца. Диски по одному или попарно заключены в герметичные заполненные гелием чехлы. Аварийный блок (АБ) является основным элементом аварийной защиты, обеспечивая быстрый перевод реактора в глубоко подкритическое состояние. Импульсный блок (ИБ) и стоп-блок (СБ) размещены у торцевой стороны неподвижного блока 1 правого (НБ-1П) и имеют форму прямоугольного параллелепипеда (см. рис. 1). Эти блоки изготовлены из сплава бериллия и герметично заварены в титановые чехлы. Все подвижные блоки АЗ выполняют функции органов регулирования реактивности. Конструкция реактора обеспечивает независимое падение АБ, ИБ, СБ под действием силы тяжести, обеспечивая тем самым срабатывание аварийной защиты и перевод реактора в заглушенное состояние.



**Рис. 1.** Активная зона реактора БР-К1М. 1 — подвижный блок (ПБ); 2 — неподвижный блок 2 (НБ-2); 3 — аварийный блок (АБ); 4 — неподвижный блок 1 левый (НБ-1Л); 5 — неподвижный блок 1 правый (НБ-1П); 6 — импульсный блок (ИБ); 7 — стоп-блок (СБ).

На второй стадии физического пуска во всех режимах работы ИЯУ осуществлялся контроль деформаций чехлов АЗ. По результатам произведенных измерений зарегистрированная величина максимальной деформации торцевой поверхности блока НБ-1П 2.3 мм не превышает минимального технологического зазора и гарантирует беспрепятственное перемещение органов регулирования реактивности (ОРР). При этом деформирование торцевой поверхности НБ-1П происходит в упругой области, что исключает пластические деформации чехла.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО, МОЩНОСТНОГО И КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕАКТИВНОСТИ

Температурный и мощностной коэффициент реактивности для ИЯУ БР-К1М были определены при проведении статических пусков, а квазистатический коэффициент определен на стадии генерирования ИЗН.

Для анализа экспериментов на ИЯУ БР-1М использовался статический коэффициент обратной связи  $\gamma_{ст}$ , который определялся через изменение реактивности, обусловленное нагреванием АЗ при работе реактора в статическом режиме на  $1^\circ\text{C}$  в месте расположения термопары. Величина внесенного изменения (возмущения) реактивности определялась как сумма всех скачков реактивности в течение пуска, которые соответствовали перемещению ОРР для компенсации потери реактивности за счет разогрева АЗ.

Прирост температур был определен как среднее значение для двух термопар, расположенных на торцевой поверхности блока НБ-1П на радиусе, соответствующем наиболее разогретому топливному кольцу блока, за вычетом температуры воздуха в реакторном зале. Для АЗ БР-К1М были получены следующие значения статического температурного коэффициента реактивности: при естественном охлаждении АЗ —  $1.23 \cdot 10^{-3} \beta_{эф} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  и при принудительном охлаждении АЗ —  $2.08 \cdot 10^{-3} \beta_{эф} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Мощностной коэффициент реактивности  $\gamma_p$  определялся как отношение скачка реактивности, введенной в реактор, к приращению мощности, которое можно реализовать данным скачком реактивности.

Для определения  $\gamma_p$  в статическом режиме был реализован переходной процесс: после реализации прироста температуры  $124^\circ\text{C}$ , фиксируемого торцевыми термопарами НБ-1П, было включено принудительное воздушное охлаждение. В результате охлаждения блоков АЗ введена реактивность и зафиксирован рост мощности. Скачок реактивности в результате охлаждения блоков АЗ составил  $0.02328 \beta_{эф}$ , прирост мощности АЗ составил  $\sim 23100$  Вт. Таким образом, мощностной коэффициент реактивности составил минус  $1.008 \cdot 10^{-6} \beta_{эф} \cdot \text{Вт}^{-1}$ .

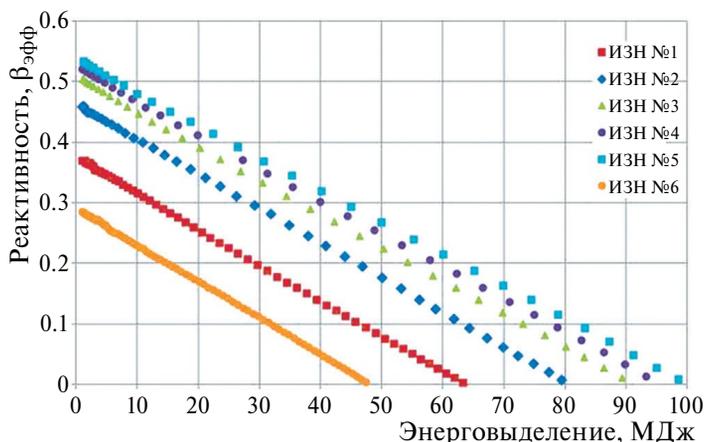


Рис. 2. Реактивность в зависимости от энерговыделения АЗ в импульсах на запаздывающих нейтронах (ИЗН № 1 ÷ ИЗН № 6).

Квазистатический коэффициент гашения реактивности является одной из основных характеристик импульсного реактора и используется при расчетах параметров импульсов. Он определяется из анализа зависимости изменения реактивности от числа делений, произошедших в АЗ.

Текущая реактивность  $\rho(t)$  АЗ при генерировании ИЗН с учетом самогашения АЗ определялась по соотношению (1):

$$\rho(t) = \rho_0 - A_0 \cdot Y(t), \tag{1}$$

где  $\rho_0$  — начальная (стартовая) реактивность,  $A_0$  — квазистатический коэффициент гашения реактивности,  $Y(t)$  — текущее значение энерговыделения.

По результатам измерения мощности и энерговыделения в ИЗН были построены графики зависимости реактивности от энерговыделения (см. рис. 2).

С учетом минимизации нестационарных процессов перераспределения тепла в АЗ было получено значение квазистатического коэффициента гашения реактивности, равное  $5.34 \cdot 10^{-3} \beta_{эфф} \cdot \text{МДж}^{-1}$ .

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

Работа БР-К1М в статическом режиме ограничивается тремя факторами: максимальной температурой топливных элементов, величиной деформации торцевых поверхностей блоков и прочностными свойствами материалов. Анализ термомеханического расчета показал, что ограничивающий фактор по прочностным свойствам материала чехлов (ВТ20) значительно опережает ограничения по температуре и деформациям. Исходя из этого, был установлен предел безопасной эксплуатации в статическом режиме: максимальная температура чехла НБ-1П — не более 440 °С.

Для определения эффективности системы охлаждения АЗ в количественном эквиваленте при работе реактора на стационарной мощности 2.7 кВт с отключенной системой охлаждения было произведено ее включение и зафиксирован отклик термопар. На рис. 3 приведена временная зависимость показаний термопар при включении системы охлаждения АЗ.

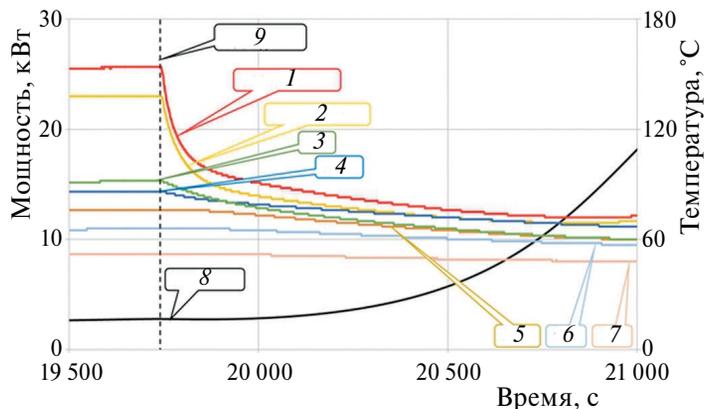


Рис. 3 Временная диаграмма показаний термопар при включении системы охлаждения. 1 — термопара (ТП) на НБ-1П верх; 2 — ТП на НБ-1П низ; 3 — ТП на АБ; 4 — ТП на НБ-1Л; 5 — ТП на НБ-1П; 6 — ТП на НБ-2; 7 — ТП на ПБ; 8 — мощность; 9 — включение охлаждения.

Как видно из данных графика, система охлаждения эффективно осуществляет теплоотвод с поверхности структурных блоков чехлов АЗ.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПЕРЕВОДА РЕАКТОРА В ПОДКРИТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ СРАБАТЫВАНИИ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Определение времени перевода реактора в подкритическое состояние при срабатывании аварийной защиты было выполнено путем определения реактивности АЗ во временном интервале сброса (падения под действием силы тяжести) органов аварийной защиты.

Реактивность АЗ при сбросе блоков аварийной защиты определялась методом «сброса стержня» и методом обращенного решения уравнения кинетики (ОРУК) [9]. Для этого реактор БР-К1М выводился на стационарный уровень мощности 1 кВт, стационарный уровень мощности, поддерживался в течение 300 с для исключения влияния на результат измерений неравновесности концентрации предшествующих запаздывающих нейтронов. По завершении процедуры удержания реактора на стационарной мощности был произведен совместный сброс органов аварийной защиты.

При обработке данных методом «сброса стержня» получено, что при сбросе органов аварийной защиты за время 200 мс из АЗ выводится реактивность  $2.17 \beta_{эфф}$ . При обработке данных методом ОРУК с учетом нулевого значения фона и нулевого значения внешнего источника нейтронов получено, что при сбросе органов аварийной защиты за время 200 мс из АЗ выводится реактивность  $2.20 \beta_{эфф}$ .

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ БЫСТРОГО ИМПУЛЬСНОГО БЛОКА

Быстрый импульсный блок (БИБ) является вновь разработанным ОРР, предназначенным для реализации импульсного на мгновенных нейтронах режима работы ИЯУ БР-К1М. Механизм управления БИБ имеет электропривод перемещения блока между исходным и рабочим положениями, и пневмопривод перемещения из рабочего в исходное положение. Генерация ИМН обеспечивается путем быстрого вывода БИБ из внутризонной полости АЗ пневмоприводом, который позволяет разогнать БИБ до скорости  $9 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Определение реактивности реактора АЗ при перемещении быстрого импульсного блока вдоль центральной оси было выполнено методом установившегося периода [10]. Для этого БИБ был перемещен в крайнее положение внутри АЗ с координатой 0.0 мм (исходное положение). Измерителями периода из состава ИЯУ БР-К1М было проведено измерение значения периода разгона, по которому вычислялась

реактивность АЗ для положения БИБ 0.0 мм. Далее БИБ перемещался в направлении вывода из АЗ. При каждом реализованном положении БИБ выполнялись процедуры по измерению установившегося периода и реактивности. Вклад БИБ в реактивность АЗ был рассчитан на рабочей базе перемещения от 0.0 до 266.8 мм.

На основе проведенных расчетов был сделан вывод о том, что положение максимальной реактивности (ПМР) соответствует положению БИБ 192 мм, максимальный вклад БИБ в реактивность АЗ составляет  $0.977 \beta_{эфф}$ . Минимальный вклад БИБ в реактивность АЗ реализуется в положении 0.0 мм. При исходном положении 266.8 мм вклад БИБ в реактивность АЗ составляет  $0.772 \beta_{эфф}$ . При перемещении от исходного положения до ПМР БИБ вносит положительную реактивность  $0.205 \beta_{эфф}$ .

При генерировании ИМН, реализуемого пролетом БИБ положения ПМР на больших скоростях, на конечном участке пролета при торможении происходит отскок БИБ в направлении к АЗ. Для уменьшения энерговыделения в ИМН, обусловленного запаздывающими нейтронами, необходимо минимизировать величину отскока БИБ. Для этого были определены оптимальная скорость перемещения БИБ пневмоприводом и оптимальное давление в ресивере БИБ.

В ходе проведенных исследований было получено, что при значении избыточного давления в ресивере 0.9 МПа остановка БИБ при торможении производится в положении 250 мм, а при 1.2 МПа — в положении 264 мм, поэтому для генерирования ИМН более предпочтительным вариантом является быстрое перемещение БИБ, реализуемое при избыточном давлении в ресивере 1.2 МПа (БИБ большую реактивность выносит из АЗ при пролете на конечном участке перемещения). Сравнивая значения скорости ввода реактивности, реализуемые при перемещении БИБ при избыточных давлениях 1.2 МПа и 1.5 МПа, более предпочтительным является перемещение БИБ при избыточном давлении 1.5 МПа, но с учетом жесткого удара об дно пневмоцилиндра и отскока 10 мм для генерирования ИМН следует выбрать перемещение БИБ при начальном избыточном давлении в ресивере 1.2 МПа. Таким образом, в качестве оптимального было выбрано значение давления в ресивере БИБ 1.2 МПа, при котором реализуются максимальная скорость БИБ  $6.9 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  и соответствующая ей максимальная скорость ввода реактивности  $51.4 \beta_{эфф} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Для выбора оптимальной мощности реактора в момент старта БИБ на ИЯУ БР-К1М был произведен ИМН с планируемым переходом выше верхне-критического состояния на мгновенных нейтронах  $1.025 \beta_{эфф}$ . Мощность в момент старта БИБ составила 3 Вт. Зарегистрировать параметры ИМН не удалось ввиду малого значения мощности в импульсе (порог запуска аппаратуры, предназначенной для регистрации формы импульса, был установлен на уровень мощности  $3 \cdot 10^7$  Вт).

Для увеличения мощности, реализуемой при малых значениях избыточной реактивности выше верхне-критического состояния, генерирование следующих ИМН было произведено при старте БИБ с мощности, равной 30 Вт. Эта величина установлена исходя из критерия сильного источника нейтронов [11], который определяется соотношением (2):

$$S \cdot \Lambda \gg 4, \quad (2)$$

где  $S$  — источник нейтронов,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\Lambda$  — время генерации нейтронов, с.

Расчитанное по концентрации предшественников запаздывающих нейтронов значение источника нейтронов в АЗ составило  $4.3 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ . С учетом оценки времени генерации нейтронов  $3 \cdot 10^{-7} \text{ с}$  критерий сильного источника при пуске БИБ со стартовой мощности 30 Вт выполняется ( $4.3 \cdot 10^{14} \cdot 3 \cdot 10^{-7} = 1.3 \cdot 10^8 \gg 4$ ).

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЯУ БР-К1М

#### Параметры статического режима работы

Для определения эксплуатационных и предельно допустимых параметров реактора в статическом режиме работы были выполнены четыре статических пуска.

В статическом режиме параметры ИЯУ БР-К1М имеют ограничения по стационарной мощности (30 кВт) и по максимальной температуре нагрева чехла НБ-1П (~440 °С). По результатам генерирования статических энергопусков была достигнута установленная максимальная стационарная мощность, при этом предел безопасной эксплуатации по температуре чехла НБ-1П не был достигнут с более

чем двукратным запасом, а «равновесный» температурный режим был установлен в течение ~ 2 ч.

При работе ИЯУ БР-К1М на предельно допустимой стационарной мощности в течение неограниченного времени с включенной на максимальных параметрах системой охлаждения заклинивание ОРР аварийной защиты исключено.

#### Параметры режима генерирования импульса на запаздывающих нейтронах

С целью определения эксплуатационных параметров реактора проведена серия из пяти ИЗН со стартовой реактивностью от  $0.289 \beta_{\text{эфф}}$  до  $0.524 \beta_{\text{эфф}}$  с максимальной мощностью в пике от 0.8 до 4.5 МВт (см. рис. 4).

Для генерирования ИЗН с планируемым периодом увеличения мощности подбиралось «стартовое» состояние АЗ по реактивности. После подготовки «стартового» состояния реактор переводился в подкритическое состояние сбросом ИБ, затем выполнялись подготовительные операции для проведения измерений, после которых производился пневмоввод ИБ в крайнее верхнее положение. Импульс формировался за счет теплового расширения деталей АЗ, изменения объема АЗ и увеличения вероятности утечки нейтронов из реактора.

С целью гарантированного не превышения предела безопасной эксплуатации по энерговыделению была реализована уставка на сброс ОРР по значению энерговыделения. Включение системы охлаждения производилось после фиксации факта установления максимальной температуры на поверхности блока НБ-1П.

Для достижения максимальной мощности был подготовлен импульс со стартовой реактивностью  $0.537 \pm 0.009 \beta_{\text{эфф}}$ . Общий сброс ОРР осуществлялся по достижению установленного предела максимального энерговыделения в АЗ. Включение системы

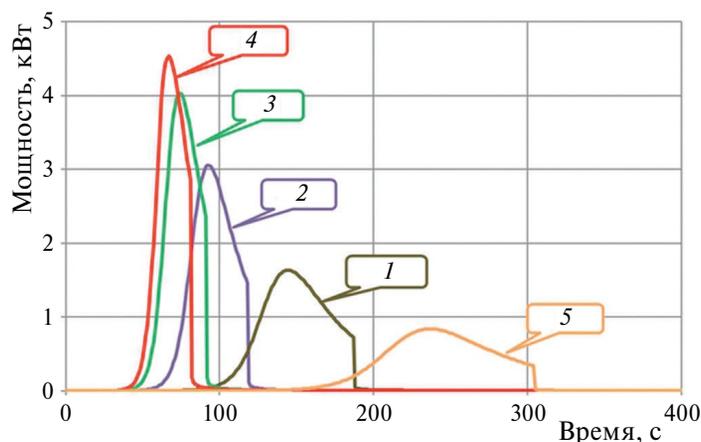


Рис. 4. Временные диаграммы мощности в процессе генерирования импульса на запаздывающих нейтронах (ИЗН). 1 — ИЗН № 1; 2 — ИЗН № 2; 3 — ИЗН № 3; 4 — ИЗН № 4; 5 — ИЗН № 5

охлаждения производилось после фиксации факта установления максимальной температуры на поверхности блока НБ-1П.

Отметим, что максимальная температура на торцевой поверхности НБ-1П не превысила значение предела безопасной эксплуатации по температуре чехла НБ-1П. При этом предел безопасной эксплуатации по максимальной температуре чехла НБ-1П не достигается даже без охлаждения.

По результатам исследований в ИЗН комиссия по физическому пуску приняла решение об увеличении предельно допустимых параметров для режима генерирования импульсов на запаздывающих нейтронах (максимальная мощность и энерговыделение) на ~5% по максимальной мощности и на ~10% по энерговыделению по сравнению с первоначально зафиксированными значениями в ООБ (отчете по обоснованию безопасности) ИЯУ БР-К1М.

#### *Параметры режима генерирования импульса на мгновенных нейтронах*

Ввиду того, что на установке БР-К1М в рамках модернизации был введен новый ОРР — БИБ, а также изменена схема генерирования ИМН, особое внимание было уделено отработке процедуры подготовки и генерирования ИМН.

Эксплуатационные и предельно допустимые параметры импульса на мгновенных нейтронах были определены по данным, зарегистрированным в тринадцати проведенных пусках: ИМН № 1 — ИМН № 13. Исследован диапазон планируемого перехода выше верхне-критического состояния от  $0.025 \beta_{эфф}$  до  $0.221 \beta_{эфф}$ . Под величиной реализованного перехода по реактивности выше верхне-критического состояния понимается разность значений реактивности, вносимой БИБ, и реактивности, выводимой из АЗ за счет самогашения. Предельно допустимые параметры были определены по данным, полученным в ИМН № 13. Полученные значения в пределах погрешности измерений соответствуют пределам безопасной эксплуатации ИЯУ БР-К1М.

Полный флюенс нейтронов составил  $(1.98 \pm 0.40) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , флюенс нейтронов с энергией  $\geq 0.1 \text{ МэВ}$  —  $(1.75 \pm 0.35) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , доля нейтронов в спектре с энергией  $\geq 0.1 \text{ МэВ}$  — 0.89, экспозиционная доза гамма излучения —  $(2.78 \pm 0.47) \cdot 10^5 \text{ Р}$ . По результатам исследований не выявлено значимого влияния (в пределах погрешности измерений) на параметры импульсов (энерговыделение, мощность в пике, длительность) штатных предельных нагрузок: свинцового фильтра и  $n$ - $\gamma$ -конвертор. Исключением составил параметр длительности: в случае свинцового фильтра импульс стал шире в ~1.1 раза.

В нормировке на 100 МДж в опорной точке  $n$ - $\gamma$  конвертора получены следующие значения: полный флюенс нейтронов —  $(3.90 \pm 0.78) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , флюенс нейтронов с энергией  $\geq 0.1 \text{ МэВ}$  —  $(1.90 \pm 0.38) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , доля

нейтронов в спектре с энергией  $\geq 0.1 \text{ МэВ}$  — 0.49, экспозиционная доза гамма излучения —  $(5.94 \pm 1.18) \cdot 10^5 \text{ Р}$ .

В нормировке на 100 МДж в опорной точке свинцового фильтра получены следующие значения: полный флюенс нейтронов —  $(1.21 \pm 0.24) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , флюенс нейтронов с энергией  $\geq 0.1 \text{ МэВ}$  —  $(9.84 \pm 1.97) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , доля нейтронов в спектре с энергией  $\geq 0.1 \text{ МэВ}$  — 0.81, экспозиционная доза гамма излучения —  $(3.84 \pm 0.77) \cdot 10^4 \text{ Р}$ .

Предельно допустимые параметры были определены по данным, полученным в ИМН № 13: полное энерговыделение в ИМН —  $(106.0 \pm 7.4) \text{ МДж}$ , полуширина импульса —  $(544 \pm 24) \text{ мкс}$ , максимальная мощность в пике импульса —  $(110 \pm 13) \text{ ГВт}$ , максимальный разогрев торцевой поверхности блока НБ-1П —  $(435 \pm 7)^\circ\text{С}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы по физическому пуску ИЯУ БР-К1М были успешно завершены в 2022 году. На основании всей совокупности полученных экспериментальных данных на двух стадиях физического пуска, комиссия по физическому пуску ИЯУ БР-К1М установила, что условия работы ИЯУ БР-К1М в режимах статического и генерирования импульсов на запаздывающих и мгновенных нейтронах, предписываемые стандартом госкорпорации «Росатом», обеспечиваются и рекомендовала РФЯЦ-ВНИИЭФ ввести в эксплуатацию ИЯУ БР-К1М в режимах статического и генерирования импульсов на запаздывающих и мгновенных нейтронах.

Работы по использованию ИЯУ БР-К1М в экспериментальных исследованиях в полном объеме ее функциональных возможностей будут продолжены.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павловский А.И., Малинкин А.А., Колесов В.Ф. и др. // ВАНТ. Сер. Физ. ядерн. реакт. 1992. № 3. С. 5.
2. Босамыкин В.С., Малинкин А.А., Колесов В.Ф. и др. // ВАНТ. Сер. Физ. ядерн. реакт. 1996. № 1. С. 3.
3. Колесов В.Ф. Аперриодические импульсные реакторы. Том 1. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. 552 с.
4. Девяткин А.А., Воронцов С.В., Колесов В.Ф. и др. // ВАНТ. Сер. Физ. ядерн. реакт. 2017. № 4. С. 43.
5. Девяткин А.А., Арапов А.В., Красавин Н.А. и др. // ВАНТ. Сер. Физ. ядерн. реакт. 2021. № 4. С. 26.
6. Арапов А.В., Дюдяев А.М., Майорников В.С. и др. // ВАНТ. Сер. Физ. ядерн. реакт. 2023. № 4. С. 45.
7. Власников А.К., Жеребчевский В.И., Лазарева Т.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. С. 614; Vlasnikov A.K., Zherebchevsky V.I., Lazareva T.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. P. 469.
8. Белошицкий К.А., Кошелев А.С., Мовкаев М.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. С. 1280;

- Beloshitskiy K.F., Koshelev A.S., Mochkaev M.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. P. 1290.
9. *Попов В.А., Дюдяев А.М.* // Атомн. энерг. 1997. Т. 82. № 3. С. 238.
10. *Уриг Р.* Статистические методы в физике ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1974. 400 с.
11. *Лукин А.В.* Физика импульсных ядерных реакторов. Снежинск: Из-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2006. 528 с.

## Results of physical start-up second stage for research nuclear facility BR-K1M

**I. M. Piskorskiy<sup>1, \*</sup>, A. V. Arapov<sup>1</sup>, A. V. Danilov<sup>1</sup>, A. A. Devyatkin<sup>1</sup>, A. V. Zhirnov<sup>1</sup>,  
I. A. Kirilin<sup>1</sup>, N. A. Krasavin<sup>1</sup>, A. Ye. Nikiforov<sup>1</sup>, G. N. Pikulina<sup>1</sup>, A. B. Sokolov<sup>1</sup>,  
K. A. Savasichev<sup>1</sup>, V. A. Yukhnevich<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Russian Federal Nuclear Center — All-Russia Research Institute of Experimental Physics, Sarov, 607188, Russia*  
*\* e-mail: otd4@expd.vniief.ru*

There are summarized modernization results of the BR-K1M (booster-reactor cascade) research nuclear facility. There are discussed research results of the facility start-up second stage, measuring and processing techniques, used to obtain the main characteristics of reactor active zone, operational parameters, and limit values for safe facility operation.

*Keywords:* research nuclear facility, reactivity, prompt neutron impulse, delayed neutron impulse, stable reactor period, upper critical state, reactivity control elements.