

## ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ РЕАКТОРОВ СЕРИИ БР

## HISTORY OF DEVELOPMENT BR LINE REACTORS

К. А. Белошицкий, А. А. Девяткин, А. В. Арапов, М. В. Мочкаев, А. С. Кошелев  
K. A. Beloshitski, A. A. Devyatkin, A. V. Arapov, M. V. Mochkaev, A. S. Koshelev

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров Нижегородской обл.

Federal Nuclear Center of Russia – All-Russian Research Institute of Experimental Physics

*Представлены все основные этапы создания и эксплуатации реактора БР-1М. Приведены существовавшие и действующая конструкции активной зоны импульсного реактора БР-1М. Рассмотрены основные технические усовершенствования, примененные при модернизации реактора БР-1М. Отражены первоначально-планируемый и существующий режимы совместной работы реактора БР-1М и ускорителя ЛИУ-30М. Представлены физико-технические характеристики реактора БР-1М, входящего в состав облучательного комплекса «Пульсар».*

*Will presented main stages of the creation and staff usage reactor BR-1M. Will given existing and acting construction of active zone of the pulse BR-1M reactor. It is considered the main technical improvements applied at modernization of the BR-1M reactor. Will reflected the initial planned and existing modes of collaboration of the BR-1M reactor and LIU-30M accelerator. Will presented physics and technology characteristics of the BR-1M reactor which is a part of the irradiating complex «Pulsar».*

Начиная с 50-х годов, в качестве мощных источников нейтронного и гамма излучений в различных областях науки и техники, получили широкое распространение реакторы, обеспечивающие генерирование контролируемых и повторяемых вспышек деления атомных ядер, которые представляют разновидность исследовательских реакторов, известную под названием импульсных ядерных реакторов (ИЯР). ИЯР различаются по составу и конструкции активной зоны (АЗ), по параметрам нейтронного импульса, а также по способам и физическим процессам компенсации избыточной реактивности [1]. Распространенный класс ИЯР составляют быстрые реакторы с металлической АЗ. Достоинствами этих реакторов являются их компактность, жесткий спектр нейтронов, малая длительность импульса и высокая плотность потока нейтронов. Большая часть этих установок относится к классу аperiodических импульсных реакторов (АИР), импульсные реакторы самогасящегося типа.

Основными показателями качества АИР как источника ядерных излучений является уровень флюенса нейтронов за импульс, длительность импульса и объем пространства с высоким флюенсом, доступный для проведения экспериментов по облучению. Считается, что качество реактора тем выше, чем меньше длительность импульса и, естественно, чем больше флюенс и доступный для экспериментов объем пространства [1]. Для улучшения качества реакторов было осуществлено их использование в составе различных комплексов. В сравнении с обычными АИР в этих устройствах или достигается существенное укорочение длительности импульса излучений, или добавляются к реакторной радиации другие компоненты излучений, или увеличиваются объемы областей с высоким флюенсом нейтронов, доступным для испытаний. В режиме бустера реактор используется как подкритическая система (ПС). Нейтроны от внешнего источника поступают в сборку и размножаются в ней. При этом развивается импульс делений, длительность переднего фронта которого примерно равна длительности иницирующего импульса, а спад определяется временной постоянной ПС.

Одним из направлений расширения возможностей АИР во ВНИИЭФ стало включение их в состав комплексов с мощными сильноточными ускорителями электронов.

Первая этого рода комплексная установка ЛИУ-10+ГИР была создана во ВНИИЭФ в первой половине 80-х годов. В процессе ее опытной эксплуатации в течение 1984–1990 гг. были решены основные научно-технические проблемы и изучены особенности функционирования двух сильно различающихся по принципам действия физических установок. [1]

## Этапы развития аperiodического импульсного реактора БР-1

В 1993 г во ВНИИЭФ был создан комплекс, включающий более мощный ускоритель ЛИУ-30 (линейный индукционный ускоритель-30) и ИР БР-1.

Разработка и изготовление бустер-реактора БР-1 проводились во ВНИИЭФ с 1973 по 1977 годы в соответствии с планами создания облучательного комплекса «Пульсар». Проект БР-1 был разработан с учетом опыта создания и эксплуатации первого во ВНИИЭФ ИЯР БИР (быстрый импульсный реактор). Его эксплуатация показала, что значительное улучшение параметров импульса в быстром реакторе можно достигнуть путем понижения механических напряжений в АЗ. Стремление к снижению в конструкции АЗ ограничительной роли механических напряжений стало доминирующим в дальнейших разработках быстрых АИР во ВНИИЭФ. С наибольшей четкостью эта тенденция нашла выражение в конструкции реактора БР-1. Отличительной особенностью и новизной конструкции БР-1 явилось то, что впервые для этого класса АИР осуществлен вариант структурного разбиения дисков АЗ на ряд коаксиальных колец (тонких и коротких цилиндрических оболочек), без каких либо отверстий для их крепления, и, при этом, применена свободная подвеска этих колец друг на друга.

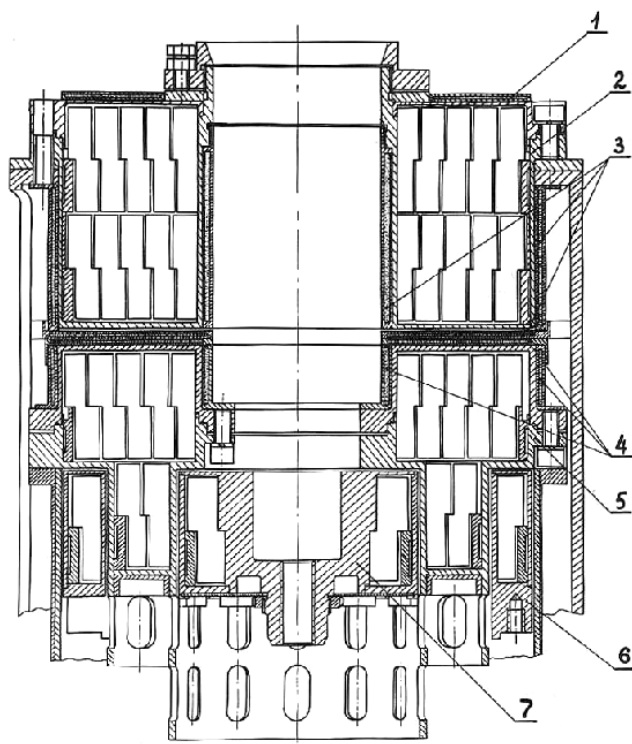


Рис. 1. Осевой разрез конструкции АЗ импульсного реактора БР-1: 1 – фильтр из В4С; 2 – верхний блок; 3, 4 – фильтры из 10В; 5 – нижний блок; 6 – регулирующий блок; 7 – импульсный блок

АЗ представлена на рис. 1 и имеет форму полого цилиндра, разделенного на четыре части, функционально различные: неподвижный верхний блок (ВБ), подвижные нижний, регулирующий и импульсный блоки. Размеры АЗ по топливу: высота 266 мм, внешний диаметр 268 мм и диаметр осевой полости 116 мм. Для снижения напряжений верхний и нижний блоки структурно расчленены на ряды (по два в каждом) коаксиальных колец. Каждое кольцо имеет уступ на середине высоты по всей окружности, с помощью которого оно опирается на соседнее кольцо или на внешний чехол из нержавеющей стали. Между кольцами по высоте и радиусу предусмотрены зазоры для радиальных и осевых смещений кольца [2]. Толщина колец по радиусу 15 мм, высота 62 мм. Кольца выполнены из сплава урана 90 %-ного обогащения по  $^{235}\text{U}$  с 9 % молибдена. Общая масса сплава в АЗ равна ~177 кг.

В 1979 году реактор БР-1 был введен в эксплуатацию в отдельном здании на производственной площадке ВНИИЭФ. Актом ввода в эксплуатацию был принят в качестве максимального, допустимого для эксплуатации, импульс с числом делений  $4,0 \cdot 10^{17}$  и температурой в наиболее разогретом участке АЗ  $700^\circ\text{C}$ . Этот импульс имеет ширину на половине высоты 53 мкс, флюенс нейтронов в полости и на внешней поверхности АЗ  $1,05 \cdot 10^{15}$  и  $3,5 \cdot 10^{14}$  нейтрон/см<sup>2</sup>, дозу  $\gamma$ -излучения в полости и на внешней поверхности  $2 \cdot 10^3$  и  $0,45 \cdot 10^3$  Гр. В качестве номинальных приняты импульсы с числом делений  $3 \cdot 10^{17}$  и шириной на половине высоты 70 мкс. Флюенс нейтронов и доза  $\gamma$ -излучения в полости при номинальном импульсе составили  $8 \cdot 10^{14}$  нейтрон/см<sup>2</sup> и  $1,35 \cdot 10^3$  Гр.

Реактор БР-1 в данной конфигурации проработал до 1986 г. и выдал за это время 608 импульсов. Осмотр деталей АЗ после 608 импульсов выявил наличие трещин во многих кольцах. Несмотря на серьезные повреждения АЗ, реактор до самого осмотра выдавал прогнозируемые по энерговыделению и форме импульсы. Единственными изменениями в поведении реактора были проявившиеся на пятой сотне импульсов понижение реактивности в исходной конфигурации и сглаживание пульсаций интенсивности на хвосте импульсов.

Поврежденная АЗ была демонтирована, изготовлена другая АЗ без каких-либо изменений в прежней конструкции, и в 1990 году БР-1, уже с новой АЗ, был опять введен в эксплуатацию, но уже в здании 860 (рис. 2), которое является площадкой размещения облучательного комплекса «Пульсар». Так закончился первый этап эксплуатации реактора БР-1 и начался второй.

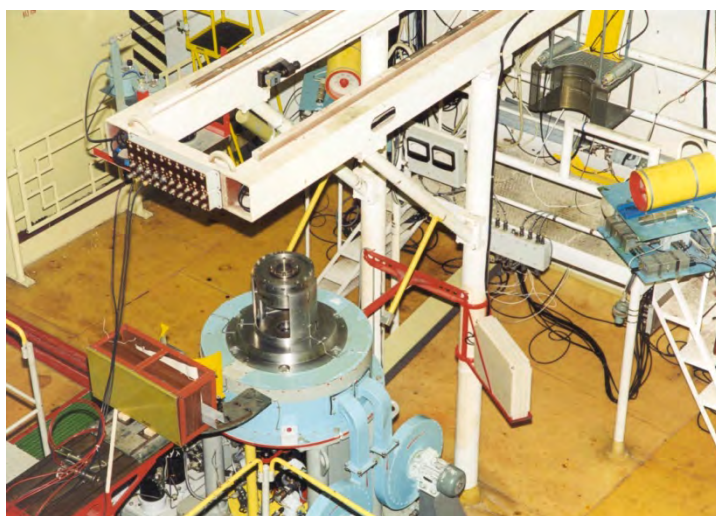


Рис. 2. Размещение реактора БР-1 в помещении автономной работы здания 860

На втором этапе параметры максимальных допустимых ( $3,6 \cdot 10^{17}$  дел.) и номинальных импульсов ( $3,0 \cdot 10^{17}$  дел.) были незначительно снижены. Приказом и Актом о вводе в опытную эксплуатацию реактора предписано применение максимальных импульсов лишь в случае действительной необходимости (по письменному указанию директора ВНИИЭФ), а также предписано проведение дефектации топливных элементов (ТЭ) после генерирования 200 импульсов. На этом этапе было достигнуто устойчивое функционирование двух сложных ядерно-физических установок (ИЯР БР-1М и ускоритель ЛИУ-30) в совместном режиме работы. Были проведены циклы исследований как совместного режима работ установок, так и режима включения ИЯР БР-1 в качестве бустера.

В 1998 году была выполнена дефектация после генерации 192 импульсов делений. По результатам инструментального контроля выявлено, что детали АЗ не имеют дефектов, сохранили свою целостность, радиальные пластические деформации большей части деталей не превышают 0,05 %, но две самые энергонагруженные детали имеют пластические деформации в диаметральной плоскости. Анализ результатов дефектации обосновал возможность дальнейшего использования элементов АЗ.

Эксплуатация реактора БР 1 была возобновлена с 20.12.99. С этого момента начинается третий этап. Однако, по настоянию контролирующих ядерную безопасность организаций, энерговыделение за импульс ограничено величиной  $2,0 \cdot 10^{17}$  делений, а количество импульсов до следующей дефектации ограничено числом 100. Наложённые ограничения резко снизили потенциал ИЯР БР-1 как облучательной установки, как по параметрам импульса, так и по объёму проводимых испытаний.

Вышесказанное привело к необходимости оснащения реактора БР-1 новой усовершенствованной активной зоной, конструкция которой обеспечивала бы при эксплуатации на характерных для БР-1 номинальных параметрах (число делений за импульс –  $3,0 \cdot 10^{17}$ , полуширина импульса – 70 мкс) значительное увеличение ресурса элементов АЗ и повышение безопасности работы реактора.

Уже в 2000 году начались работы по разработке новой усовершенствованной АЗ. Для решения этой задачи был проведен большой комплекс работ по численному моделированию динамического поведения ТЭ исходной конструкции АЗ БР 1 и при её вариативных изменениях, связанных с уменьшением высоты ТЭ, увеличением радиальных зазоров между ТЭ и скруглений в области уступов и торцов ТЭ. Были проведены расчеты по сравнительной оценке ресурса ТЭ исходной и новой (оптимальной с точки зрения снижения напряжений) конструкций АЗ реактора БР-1 по существующей во ВНИИЭФ методике [3].

На основании вышеуказанных исследований была разработана новая конструкция активной зоны (представлена на рис. 3). Новая АЗ реактора БР-1 по своим габаритным параметрам практически не отличается от «старой» конструкции и имеет форму полого цилиндра с центральной внутренней полостью – центральным каналом, предназначенным для загрузки облучаемых образцов. Размеры новой АЗ по делящемуся материалу: высота 264 мм, внешний диаметр 268 мм и диаметр осевой полости 116 мм.

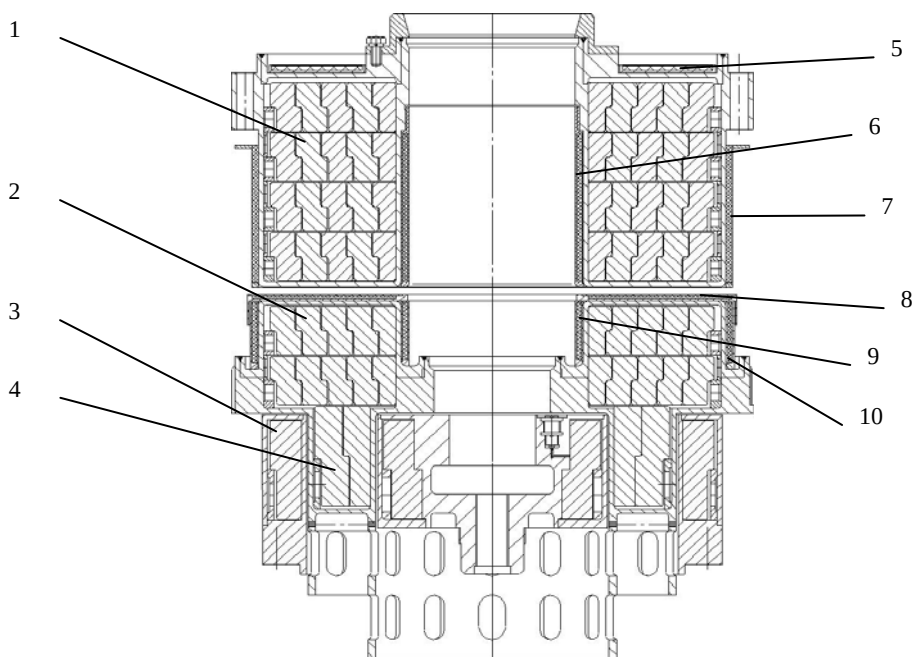


Рис. 3. Схема новой АЗ реактора БР-1 в осевом разрезе: 1 – блок верхний; 2 – блок нижний; 3 – блок регулирующей; 4 – блок импульсный; 5, 6, 7, 8, 9, 10 – экран с засыпкой из бора

Главные отличия новой конструкции АЗ от старой состоят в следующем:

– все ТЭ изготовлены из сплава высокообогащенного урана (массовая доля изотопа  $^{235}\text{U}$  в уране – 90 %) с молибденом (массовая доля в сплаве – 10 %), что позволяет по сравнению с ранее использованным сплавом (массовая доля молибдена в сплаве – 9 %) значительно увеличить минимальный инкубационный период начала трансформации исходной  $\gamma$ -фазы в сплаве и практически исключить фазовые превращения в топливе;

- общая масса сплава в новой АЗ уменьшена со ~177 до ~172,9 кг;
- верхний блок состоит из четырёх идентичных слоев (в прежней конструкции два слоя) топливных элементов, при этом в каждом слое располагается по пять ТЭ высотой 30,6 мм, т. е. уменьшенных приблизительно вдвое по высоте по сравнению с конструкцией старой АЗ;
- нижний блок состоит из двух идентичных слоев (в прежней конструкции один слой) по пять ТЭ высотой 30,6 мм и одного слоя из двух ТЭ высотой 62 мм, аналогичных по конструкции ТЭ прежней АЗ БР-1;
- радиальные зазоры между ТЭ увеличены с 0,33 до 0,53 мм за счет соответствующего уменьшения (по сравнению со старой конструкцией) толщины каждого ТЭ. Толщина всех ТЭ новой АЗ по радиусу составляет 14,95 мм;
- для достижения необходимого значения  $K_{эфф}$  новой АЗ горизонтальные зазоры между рядами ТЭ уменьшены с 1 до 0,6 мм;
- радиусы закругления в зонах уступов и торцов всех ТЭ увеличены с 1 до 1,5 мм;
- геометрия ТЭ импульсного и регулирующего блоков за исключением радиусов закруглений осталась без изменений;
- для гарантированного исключения процесса поверхностного коррозионного растрескивания под действием кислорода воздуха, разработана конструкция чехлов НБ и ВБ с применением в качестве герметизирующего элемента сварного шва, что позволило значительно снизить дозовые нагрузки на персонал из-за отсутствия работ, связанных с разборкой АЗ.

Таким образом, для существенного снижения термомеханических напряжений при генерировании импульсов делений в новой конструкции АЗ применен способ большой фрагментации ДМ в сочетании с понижением роли концентраторов напряжений за счет увеличения радиусов закругления в зонах уступов и торцов всех ТЭ и тепловых зазоров между ТЭ. Также необходимо отметить, что увеличение содержания массовой доли молибдена до 10 % по сравнению с ранее использованным сплавом (массовая доля в сплаве 9 %) приводит к заметному повышению (на 10–20 кг/мм<sup>2</sup>) значений прочности сплава во всем исследованном интервале температур от 20 °С до 700 °С.

В период с 26.11.2007 по 29.04.2009 был проведен физический пуск реактора БР–1 с новой активной зоной А0413-Л11060 в здании 860 в залах 105 и 106 при автономной работе реактора.

Согласно проведенным оценкам, ресурс работы топливных элементов АЗ составит 3000 импульсов на мгновенных нейтронах в разрешенном диапазоне полного числа делений. Указанный ресурс значительно превышает ресурс прежней конструкции АЗ (как минимум в 6 раз).

Для контроля целостности ТЭ было принято использовать способ неразрушающего контроля на основе анализа характера колебаний мощности на «плато» в специальных «контрольных» импульсах на мгновенных нейтронах, проводимых через каждые 50 импульсов, но не реже одного раза в год.

Все этапы эксплуатации реактора БР-1М можно кратко сформулировать в виде табл. 1.

Таблица 1

Этапы эксплуатации реактора БР-1М

| Этап | Комплект деталей АЗ | Размещение | Период эксплуатации | Количество импульсов | Энерговыделение номинального импульса (максимального), 10 <sup>17</sup> делений |
|------|---------------------|------------|---------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 1    | Первый              | Здание 808 | с 1979 по 1986      | 608                  | 3,0 (4,0)                                                                       |
| 2    | Второй              | Здание 860 | с 1990 по 1997      | 192                  | 3,0 (3,6)                                                                       |
| 3    |                     |            | с 1999 по 2006      | 83                   | 2,0                                                                             |
| 4    | Третий              |            | С 2009              | ~180                 | 2,7 (3,0)                                                                       |

### Совместный режим работы комплекса ЛИУ-30М+БР-1М

Со времен разработки проекта бустер-реактора БР-1 всегда имелось в виду, что эта установка будет использоваться не только как АИР, но и как аperiодический бустер, что и отразилось в названии установки. Предполагалось использование БР-1 в качестве бустера в комплексе с уско-

рителем ЛИУ-30. Ожидалось, что ускоритель будет поставлять в АЗ БР-1 примерно  $1 \cdot 10^{15}$  нейтронов в импульсе длительностью (0,03–0,1) мкс. Работа БР-1 в режиме бустера при таком внешнем источнике позволила бы достигнуть значительного прогресса в направлении уменьшения длительности импульса делений. Как следует из расчетов, в этом случае в БР-1 можно было бы генерировать максимально допустимые импульсы длительностью  $\sim 10$  мкс с флюенсом в полости  $\sim 0,7 \cdot 10^{15}$  нейтрон/см<sup>2</sup> и, например, импульсы длительностью  $\sim 1,5$  мкс с флюенсом нейтронов в полости  $\sim 1 \cdot 10^{14}$  нейтрон/см<sup>2</sup>.

Ускоритель ЛИУ-30 в нынешнем его виде генерирует  $\sim 1 \cdot 10^{14}$  нейтронов. Этот источник не достаточен для работы БР-1 в полномасштабном бустерном режиме. Освоенный режим комплексной работы установок БР-1 и ЛИУ-30, тем не менее, открывает ценные новые возможности для проведения облучательных экспериментов.

В цикле исследований совместного режима работы установок ЛИУ-30 и БР-1 был осуществлен ряд пусков в условиях размещения АЗ реактора БР-1 на оси ускорительного тракта ускорителя ЛИУ-30 при расстояниях между мишенью ускорителя и центром АЗ реактора  $\sim 0,9$  м. Эти пуски показали устойчивую работу обеих установок, возможность достижения максимальных параметров по выходу нейтронов даже при совпадении во времени пиков импульсов излучений и возможности прогнозирования временной корреляции между пиками импульсов с точностью до десятков микросекунд. [1]

В серии из 8 совместных пусков ускорителя ЛИУ-30 и бустер-реактора БР-1 получены экспериментальные данные при работе реактора в качестве бустера. При значениях коэффициента умножения от 100 до  $\sim 4500$  реализованы импульсы делений в АЗ с энерговыделением от  $\sim 3 \cdot 10^{14}$  до  $\sim 1 \cdot 10^{16}$  делений/имп., полушириной от  $\sim 0,1$  до  $\sim 40$  мкс. Максимальный нейтронный выход, равный  $\sim 1,4 \cdot 10^{16}$  нейтронов/имп. при длительности (полуширине) импульса 25 мкс, достигнут в совместном пуске с коэффициентом умножения реакторной системы 2570 [4].

В настоящий момент реактор БР-1М входит в состав уникального облучательного комплекса «Пульсар» (ОК «Пульсар»). ОК «Пульсар» состоит из базовых установок: линейного ускорителя ЛИУ-30 и АИР БР-1М; и электрофизических установок дооснащения комплекса: СТРАУС-2, ИЛТИ-1, УРС, АРСА, ЛУ-7-2, что позволяет обеспечить обширные испытательные возможности в лабораторных условиях.

## Облучательные характеристики и допустимые параметры работы реактора БР-1М

При работе реактора в режиме генерирования импульсов на мгновенных нейтронах:

- В качестве предельно-допустимого полного энерговыделения  $Y_{полн}$  в активной зоне установлено значение  $3,0 \cdot 10^{17}$  делений.

- В качестве допустимого (предельного для планирования) полного энерговыделения  $Y_{полн}$  в активной зоне установлено значение  $2,7 \cdot 10^{17}$  делений

- Наименьшая длительность импульса на мгновенных нейтронах на уровне 0,5 от максимальной мощности  $\sim 67$  мкс.

- Минимальный период разгона в импульсе на мгновенных нейтронах  $\sim 25$  мкс.

- Мощность в пике импульса на мгновенных нейтронах – до  $4 \cdot 10^{21}$  делений/с,

При работе реактора в режиме генерирования импульсов на запаздывающих нейтронах:

- При работе реактора в режиме генерирования импульсов на запаздывающих нейтронах в качестве допустимого (предельного для планирования) полного энерговыделения в активной зоне установлено значение  $Y_{полн} = 3,6 \cdot 10^{17}$  делений;

- Наименьшая длительность импульса на запаздывающих нейтронах на уровне 0,5 от максимальной мощности  $\sim 50$  с.

- Минимальный период разгона в импульсе на запаздывающих нейтронах  $\sim 9,4$  с.

- Мощность в пике импульса на запаздывающих нейтронах до  $6,8 \cdot 10^{15}$  делений/с.

При работе реактора в статическом режиме:

- Максимальная мощность – 5 кВт;

- При выходе на мощность период разгона реактора не должен быть короче 15 с (с учетом погрешности измерения);

- полное энерговыделение в активной зоне за пуск не ограничивается.

Облучательные характеристики приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Облучательные характеристики реактора БР-1М

| Характеристика                                                                          | Значение                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Полный флюенс нейтронов в центральном канале активной зоны                              | $7,6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ |
| Флюенс нейтронов с энергией выше 0,1 МэВ в центральном канале активной зоны             | $7,3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ |
| Максимальная доза сопутствующего $\gamma$ -излучения в центральном канале активной зоны | 2,1 кГр                             |
| Полный флюенс нейтронов на поверхности активной зоны                                    | $2,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ |
| Флюенс нейтронов с энергией выше 0,1 МэВ на поверхности активной зоны                   | $2,1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ |
| Максимальная доза сопутствующего $\gamma$ -излучения на поверхности активной зоны       | 0,46 кГр                            |

В настоящее время установка БР-1М является базовой установкой ОК «Пульсар» и одной из самых востребованных ядерно-физических установок во ВНИИЭФ как в автономном режиме, так и в совместном. На данный момент с начала эксплуатации реактора после его модернизации в 2009 реализовано ~180 импульсов на мгновенных нейтронах и ~200 импульсов на запаздывающих нейтронах.

## Список литературы

1. Колесов В. Ф. Аперiodические импульсные реакторы. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1999.
2. Харитон Ю. Б., Воинов А. М., Колесов В. Ф. и др. Аперiodические исследовательские импульсные реакторы // В кн.: Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики. Л.: Наука, 1984. С. 103–119.
3. Петрин С. В., Колесов В. Ф. К вопросу об оценке ресурса топливных элементов аперiodических импульсных реакторов // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1996. Вып. 2, с. 71–75.
4. Кошелев А. С., Одинцов Ю. М., Маслов Г. Н. Характеристики бустер-реактора БР-1 при работе в бустерном режиме совместно с ускорителем ЛИУ-30 // ВАНТ, 1998. Вып. 2, с. 3–11.