

РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОЛУШИРИНЫ НОМИНАЛЬНОГО ИМПУЛЬСА ДЕЛЕНИЙ РЕАКТОРА БР-К1М С ПОМОЩЬЮ ГРАФИТОВОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

К. А. Белошицкий, В. Х. Хоружий, А. Б. Соколов, Д. В. Грачев

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

Конструкция активной зоны реактора БР-К1

Бустер-реактор «Каскад» (БР-К1) – аperiodический импульсный реактор (АИР) самогасящегося действия (рис. 1) был разработан и введен в эксплуатацию в РФЯЦ-ВНИИЭФ в 1995 году. Это односекционный АИР, отличающийся горизонтальной ориентацией центральной оси активной зоны (АЗ) и большими размерами как самой АЗ, так и центральной облучательной полости. АЗ выполнена в виде горизонтального полого цилиндра диаметром 617 мм и длиной 748 мм. Материалом АЗ является сплав урана 36 %-ного обогащения с молибденом (массовое содержание молибдена 9 %). Масса сплава в АЗ равна 1511 кг. Топливный материал АЗ разбит на коаксиальные кольца. Топливные элементы (ТЭ) заключены в герметичные, заполненные гелием чехлы (блоки) из нержавеющей стали.



Рис. 1. Внешний вид реактора БР-К1

Основой структуры АЗ являются пять автономных блоков, каждый блок представляет собой глубоко подкритичную сборку. Большая часть топливного материала приходится на три неподвижных блока НБ-1Л (левый), НБ-1П (правый) и НБ-2. Аварийный блок (АБ) является основным элементом аварийной защиты, обеспечивающим быстрый перевод реактора в глубоко подкритическое состояние. Подвижный блок (ПБ) компенсирует реактивность, вносимую сильно-возмущающими нагрузками. Регулирующие блоки (РБ) РБ-1 и РБ-2 выполнены в виде двух полуцилиндров из бронзы, охватывают подвижный блок. Импульсный блок (ИБ) и стоп-блок (СБ) размещены у торцевой стороны блока НБ-1П, изготовлены из бериллия и заключены в титановые чехлы [1].

Основные проектные характеристики БР-К1 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики реактора БР-К1

	Проектные параметры	Разрешенные (действующие) параметры
Импульсный режим		
Энерговыведение в АЗ, делений (МДж)	до $4 \cdot 10^{18}$	до $1,0 \cdot 10^{18}$ (~ 30)
Флюенс нейтронов в опорной точке КГЗ, см ⁻²	$2 \cdot 10^{15}$	$5,1 \cdot 10^{14}$
Ширина импульса на половине высоты, мкс	200	1200
Средняя энергия нейтронов, МэВ	0,78	
Статический режим		
Мощность, кВт (дел/с)	30 ($1 \cdot 10^{15}$)	до 10 ($3,3 \cdot 10^{14}$)

Недостатки существующей конструкции АЗ БР-К1. Предлагаемые меры по модернизации установки

При выполнении физического пуска БР-К1 разработчики столкнулись с деформациями чехлов из нержавеющей стали, создающими препятствия нормальной работе реактора при высоких уровнях стационарной мощности или энерговыведения за импульс [2]. На схеме структурных блоков реактора БР-К1, см. рис. 2, показаны места блокировки движения АБ, ИБ и СБ.

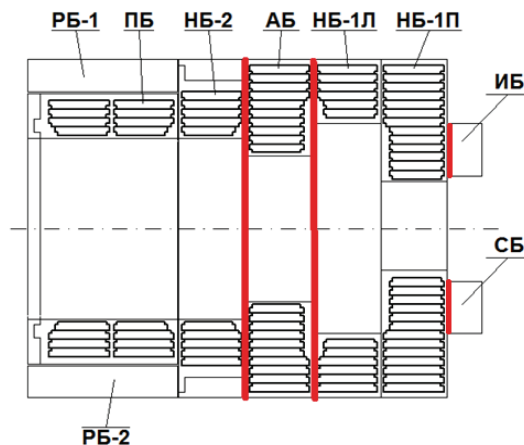


Рис. 2. Схема структурных блоков реактора БР-К1 (вид сверху): — места блокировки движения АБ, ИБ и СБ

В соответствии с экспериментальными данными, полученными при физическом пуске, и расчетным анализом предусмотренные проектом технические характеристики реактора были ограничены (см. табл. 1).

С развитием процедуры численного моделирования теплофизических процессов открылась возможность оптимизации конструкции чехлов реактора БР-К1 для исключения коробления последних, повышения безопасности функционирования установки во всех режимах и вывода реактора на параметры, близкие к проектным.

В настоящий момент модернизация реактора выполняется по следующим направлениям:

- исключение разнотолщинности стенок чехлов (уменьшение толщины массивных цилиндрических обечаек);

- исключение использования при изготовлении чехлов кованных заготовок, имеющих после поковки неоднородности структуры материала и внутренние напряжения;

- применение при изготовлении чехлов материалов, имеющих меньший коэффициент линейного расширения и лучшие прочностные свойства;

- изготовление и установка дополнительных сегментов отражателей нейтронов в целях искусственного уширения импульса для уменьшения напряжений в топливных элементах АЗ;

- изготовление и установка быстрого импульсного блока (БИБ) для достижения необходимой скорости ввода реактивности в процессе генерации импульса в безопасном режиме с «мощности».

Для реализации приведенных выше направлений модернизации были проведены расчеты, приведенные в [1], которые определили величину «безопасной» полуширины импульса – 600 мкс, при которой напряжение, возникающее в ТЭ двух наиболее нагруженных блоках реактора АБ и НБ-1П при различных температурах нагрева в процессе генерирования импульса, не превышают предела текучести материала.

Форма импульса делений на мгновенных нейтронах с отражателем $x = 300$ мм, $y = 185$ мм при начальной мощности $1 \cdot 10^{10}$ дел. АЗ/с и движении БИБ со скоростью 9 м/с приведена на рис. 3 [3].

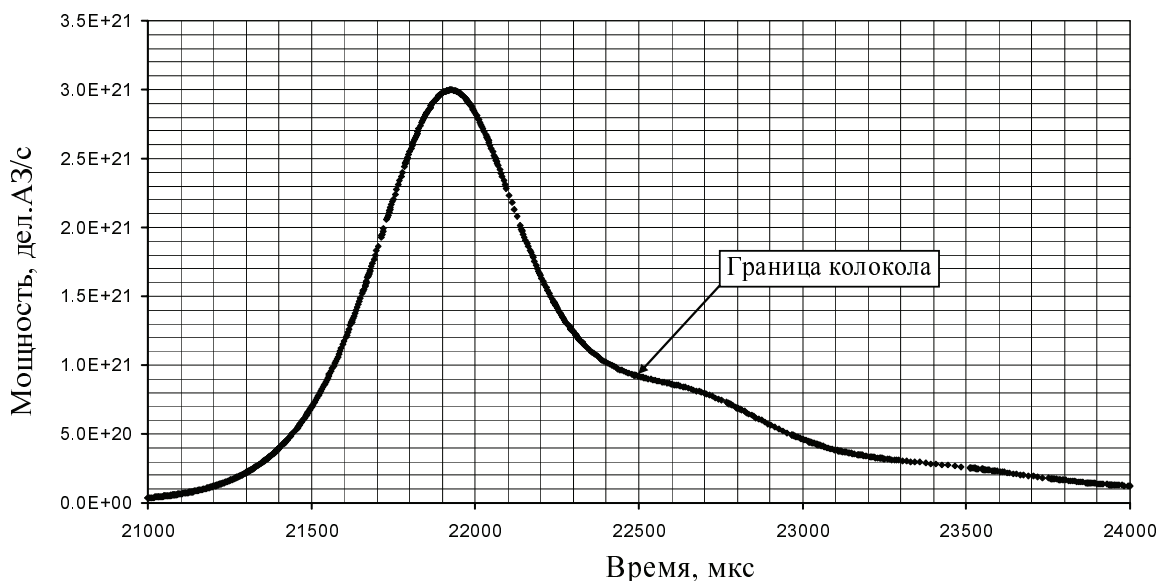


Рис. 3. Расчетная форма импульса делений на мгновенных нейтронах с отражателем $x = 300$ мм, $y = 185$ мм при начальной мощности $1 \cdot 10^{10}$ дел. АЗ/с и движении БИБ со скоростью 9 м/с

Регулирование полуширины номинального импульса делений реактора БР-К1М с помощью графитового отражателя

При проектировании модернизированного реактора БР-К1 (БР-К1М) на основании расчетов, результаты которых приведены в [1], была разработана конструкция графитового отражателя (см. рис. 4).

Расчетная модель, как правило, описывает реальные физические характеристики изучаемого процесса с некоторой погрешностью. В целях компенсации этой неопределенности была предложена новая конструкция верхнего сегмента графитового отражателя, предусматривающая возможность варьирования его толщины, а также зазора между верхним сегментом графитового отражателя и поверхностью АЗ.

Для регулирования полуширины импульса делений с целью достижения ее «безопасной» величины предполагается два способа:

1) изменение толщины верхнего графитового отражателя;

2) изменение расстояния от нижней поверхности верхнего графитового отражателя до центра АЗ.

Для оценки эффективности этих способов были проведены расчетные исследования влияния толщины верхнего сегмента графитового отражателя и зазора между ним и поверхностью АЗ на величину полуширины импульса делений на мгновенных нейтронах.

Следует отметить, что приведенные выше характеристики импульсов делений получены исходя из расчетной зависимости вводимой реактивности от положения БИБ при постоянной скорости его движения.

В данных исследованиях были учтены следующие особенности:

– использование экспериментальных данных по вводу реактивности в зависимости от положения БИБ [3] и реализуемым неравномерным скоростям его движения, полученных после обработки макета пневматического исполнительного механизма БИБ;

– использование более точных нейтронных констант для титана из библиотеки ENDF/B-7.1;

– новая конструкция верхнего сегмента графитового отражателя.

Конструкция графитового отражателя

Конструкция отражателя приведена на рис. 4.

Графитовые блоки прямоугольной формы размещены на силовом каркасе. Каркас закреплен на защитной плите реактора. Длина отражателя вдоль оси активной зоны реактора составляет 1,0 м, толщина от 185 (верхний сегмент) до 300 мм (боковые сегменты). Суммарная масса графита верхнего сегмента составляет 384 кг. Суммарная масса графита каждого бокового сегмента составляет 576 кг. Среднее значение перегрева поверхностей ТЭ, обращенных к отражателю, составляет ~13 %.

В расчетной модели рассматривались три варианта размещения верхней части графитового отражателя с толщиной графита 21 см относительно центра АЗ: 45,1, 50,1 и 55,1 см и три варианта представления графитового отражателя с высотой его верхней части 20,5, 21,5 и 22,5 см.

Схема конструктивных особенностей графитового отражателя, с толщиной верхней части графитового отражателя 21 см, который размещен на высоте 50,1 см от центра АЗ, приведена на рис. 5.

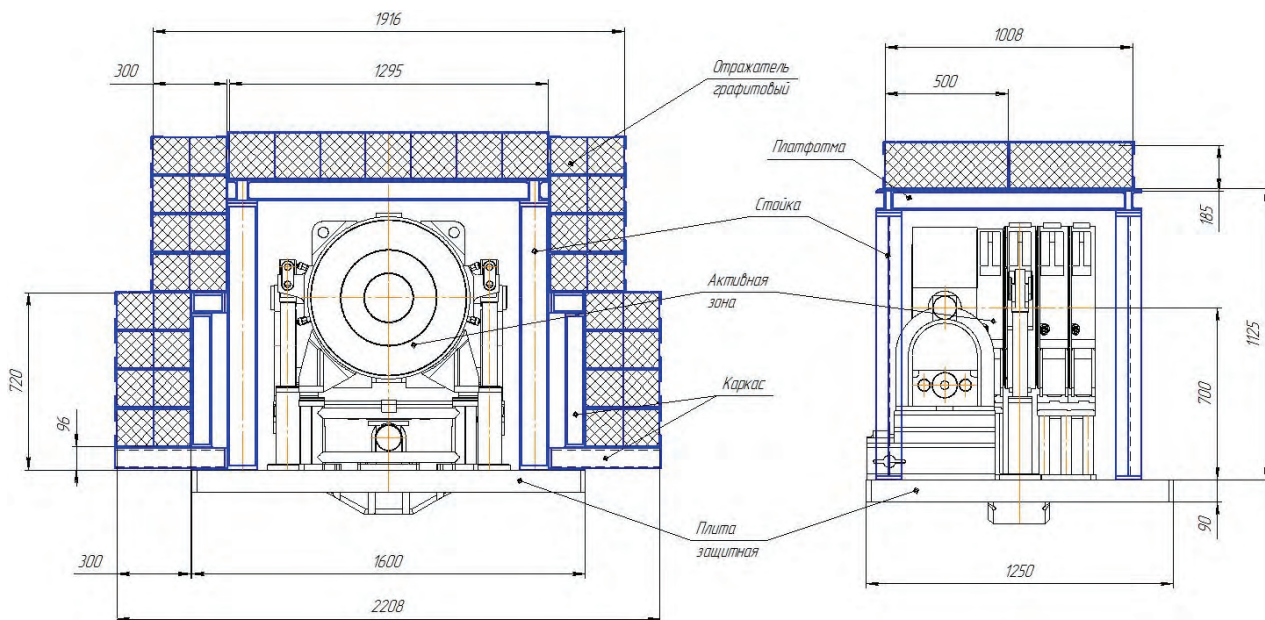


Рис. 4. Конструкция сегментов отражателя

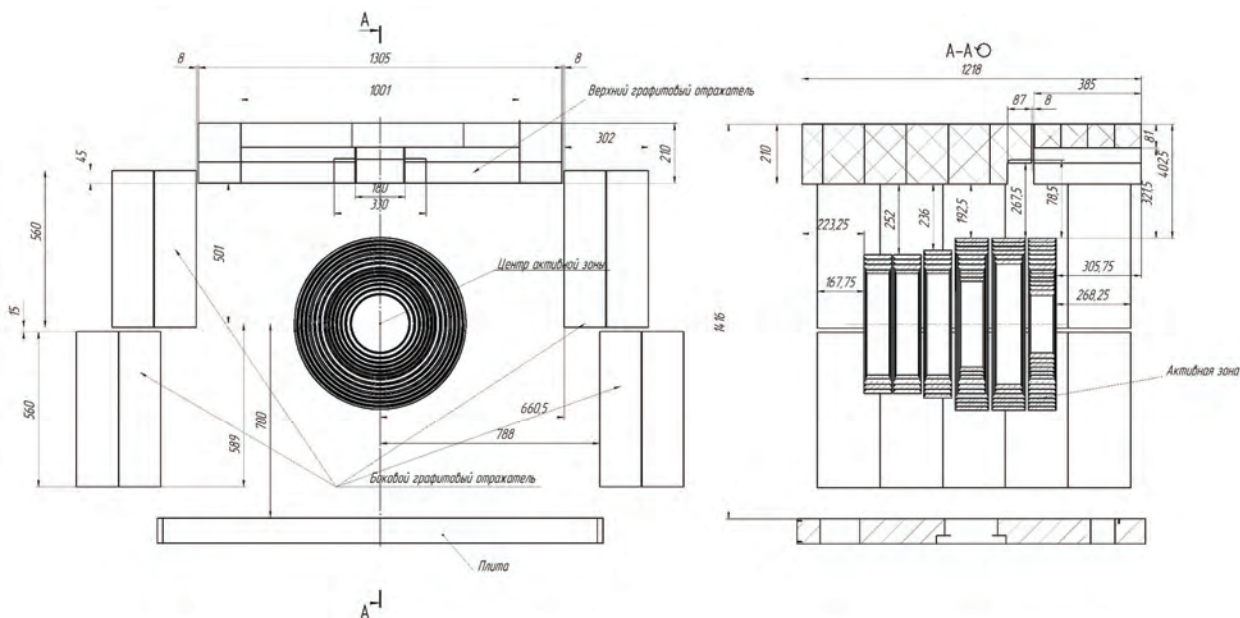


Рис. 5. Конструктивные особенности нового графитового отрагателя

Ввод реактивности с использованием пневматического исполнительного механизма БИБ

Учет функциональной связи реактивности, обусловленной перемещением БИБ, с его позиционной координатой на пролетной базе осуществлялся с использованием зависимостей ввода реактивности БИБ от позиционной координаты и характера перемещения БИБ макетом пневматического исполнительного механизма БИБ. В иллюстративной графической форме указанные функциональные зависимости представлены на рис. 6 [3].

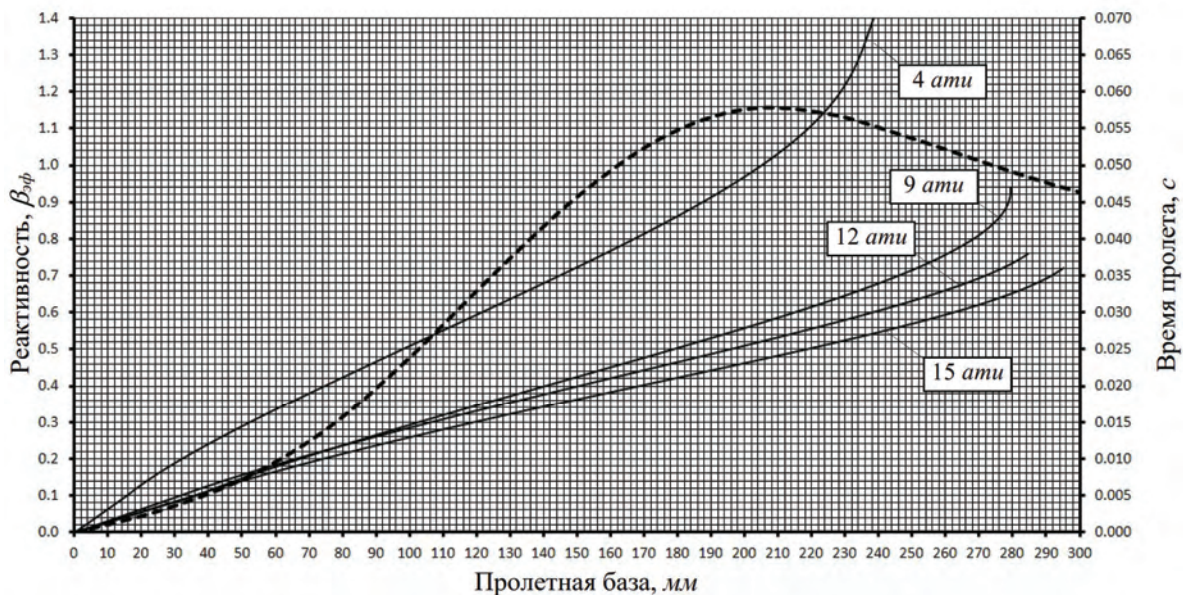


Рис. 6. Функциональные зависимости: - - - - зависимость реактивности, вносимой БИБ, от пролетной координаты; — — зависимости пролетной координаты от времени пролета и рабочего давления пневмопривода

Расчетный формализм

Влияние отрагателя на АЗ рассчитывалось с помощью метода Монте-Карло [4]. Расчеты позволили получить функцию Грина мгновенных нейтронов,

т. е. скорость вторичных делений $V_p(\tau)$, вызванную мгновенными нейтронами первичного деления, произошедшего в момент времени $\tau=0$ [5]. Функция необходима для расчета импульсов делений, так как

при наличии замедленных нейтронов описание быстрой размножающей системы с помощью среднего времени генерации является неадекватным.

Расчет учитывал облицовку боковых графитовых отражателей и верхнего графитового отражателя сталью марки 3 толщиной 6 мм и стальную опорную плиту толщиной 90 мм (материал – сталь марки 3), на которой размещена АЗ реактора и которая также предназначена для уменьшения дозовой нагрузки гамма-излучения на персонал при проведении технического обслуживания реакторного стенда.

Расчеты импульсов делений проводились с помощью методов Гира [6] с использованием эффективного времени генерации, обусловленного лишь короткоживущей компонентой функции. Долгоживущие компоненты функции учитывались аналогично запаздывающим нейтронам.

В качестве основной процедуры генерирования импульсов делений на мгновенных нейтронах принималась процедура, осуществляемая путем вывода БИБ из полости неподвижных блоков АЗ НБ-1Л, НБ-1П с избранной начальной мощности реактора величиной $1.0 \cdot 10^{10}$ дел. АЗ/с и со скоростями, реализуемыми на макете пневматического исполнительного механизма БИБ при начальных избыточных давлениях в ресивере БИБ 9, 12, 15 кг/см².

Результаты расчетов получены при условии равенства коэффициентов гашения реактивности ($\gamma = 1,96 \cdot 10^{-19} \beta_{эф/дел}$) в реакторах БР-К1 и БР-К1М и при использовании значения эффективной доли запаздывающих нейтронов $\beta_{эф} = 0,00719$, которая была рассчитана с использованием нейтронных констант библиотеки JENDL-4.

Расчетные параметры импульсов делений (мощность в пике импульса $P_{пик}$, полуширина импульса $\Theta_{1/2}$, полное энерговыделение Y), полученные для реактора БР-К1М с графитовым отражателем для местоположений по высоте верхнего отражателя относительно центра АЗ $L = 45,1$ см, $L = 50,1$ см и $L = 55,1$ см представлены в табл. 2. Толщина верхнего графитового отражателя составляла $H = 21$ см.

Расчетные параметры импульсов делений, полученные для реактора БР-К1М с графитовым отражателем с толщиной верхнего отражателя (H) 23, 24, 25 см представлены в табл. 3.

На рис. 7 и 8 приведены функции и их графики, полученные по результатам линейной аппроксимации данных табл. 2 и 3 с помощью стандартных функций Excel. Аппроксимирующие функции вида $\theta_{1/2}(L)$ выражают зависимость величины полуширины импульсов делений на мгновенных нейтронах с номинальным энерговыделением $Y = 3 \cdot 10^{18}$ делений от высоты расположения верхнего отражателя с толщиной графита 21 см относительно центра АЗ при вводе реактивности, реализуемой при начальных избыточных давлениях в ресивере БИБ 9, 12, 15 кг/см². Аппроксимирующие функции вида $\theta_{1/2}(H)$ выражают зависимость величины полуширины импульсов делений на мгновенных нейтронах с номинальным энерговыделением $Y = 3 \cdot 10^{18}$ делений от толщины графита в верхнем отражателе при вводе реактивности реализуемой при начальных избыточных давлениях в ресивере БИБ 9, 12, 15 кг/см².

Таблица 2

Расчетные параметры импульсов делений реактора БР-К1М с номинальным энерговыделением $Y = 3 \cdot 10^{18}$ делений при различных размещениях по высоте верхнего отражателя относительно центра АЗ

Параметр	Расстояние от оси АЗ до верхнего отражателя L , см ($H = 21$ см)		
	45,1	50,1	55,1
Избыточное давление $P = 9$ кг/см ²			
Мощность в пике импульса $P_{пик}$, дел.АЗ/с	$2,49 \cdot 10^{21}$	$2,80 \cdot 10^{21}$	$3,15 \cdot 10^{21}$
Полуширина импульса $\theta_{1/2}$, мкс	750	640	557
Полное энерговыделение Y , дел.АЗ	$3,00 \cdot 10^{18}$	$3,00 \cdot 10^{18}$	$3,00 \cdot 10^{18}$
Избыточное давление $P = 12$ кг/см ²			
Мощность в пике импульса $P_{пик}$, дел.АЗ/с	$2,54 \cdot 10^{21}$	$2,96 \cdot 10^{21}$	$3,43 \cdot 10^{21}$
Полуширина импульса $\theta_{1/2}$, мкс	727	607	523
Полное энерговыделение Y , дел.АЗ	$2,96 \cdot 10^{18}$	$3,00 \cdot 10^{18}$	$3,03 \cdot 10^{18}$
Избыточное давление $P = 15$ кг/см ²			
Мощность в пике импульса $P_{пик}$, дел.АЗ/с	$2,48 \cdot 10^{21}$	$2,96 \cdot 10^{21}$	$3,52 \cdot 10^{21}$
Полуширина импульса $\theta_{1/2}$, мкс	736	603	512
Полное энерговыделение Y , дел.АЗ	$2,89 \cdot 10^{18}$	$2,95 \cdot 10^{18}$	$3,01 \cdot 10^{18}$

Расчетные параметры импульсов делений БР-КИМ с номинальным энерговыделением $Y = 3 \cdot 10^{18}$ делений при различной высоте высота верхнего отражателя

Параметр	Высота верхнего отражателя H , см		
	20.5	21.5	22.5
Избыточное давление $P = 9 \text{ кг/см}^2$			
Мощность в пике импульса $P_{\text{пик}}$, дел.АЗ/с	$2,97 \cdot 10^{21}$	$2,80 \cdot 10^{21}$	$2,64 \cdot 10^{21}$
Полуширина импульса $\theta_{1/2}$, мкс	596	636	684
Полное энерговыделение Y , дел.АЗ	$3,00 \cdot 10^{18}$	$3,00 \cdot 10^{18}$	$3,00 \cdot 10^{18}$
Избыточное давление $P = 12 \text{ кг/см}^2$			
Мощность в пике импульса $P_{\text{пик}}$, дел.АЗ/с	$3,18 \cdot 10^{21}$	$2,97 \cdot 10^{21}$	$2,75 \cdot 10^{21}$
Полуширина импульса $\theta_{1/2}$, мкс	563	604	654
Полное энерговыделение Y , дел.АЗ	$3,01 \cdot 10^{18}$	$3,00 \cdot 10^{18}$	$2,98 \cdot 10^{18}$
Избыточное давление $P = 15 \text{ кг/см}^2$			
Мощность в пике импульса $P_{\text{пик}}$, дел.АЗ/с	$3,18 \cdot 10^{21}$	$2,97 \cdot 10^{21}$	$2,73 \cdot 10^{21}$
Полуширина импульса $\theta_{1/2}$, мкс	554	599	653
Полное энерговыделение Y , дел.АЗ	$3,01 \cdot 10^{18}$	$2,96 \cdot 10^{18}$	$2,92 \cdot 10^{18}$

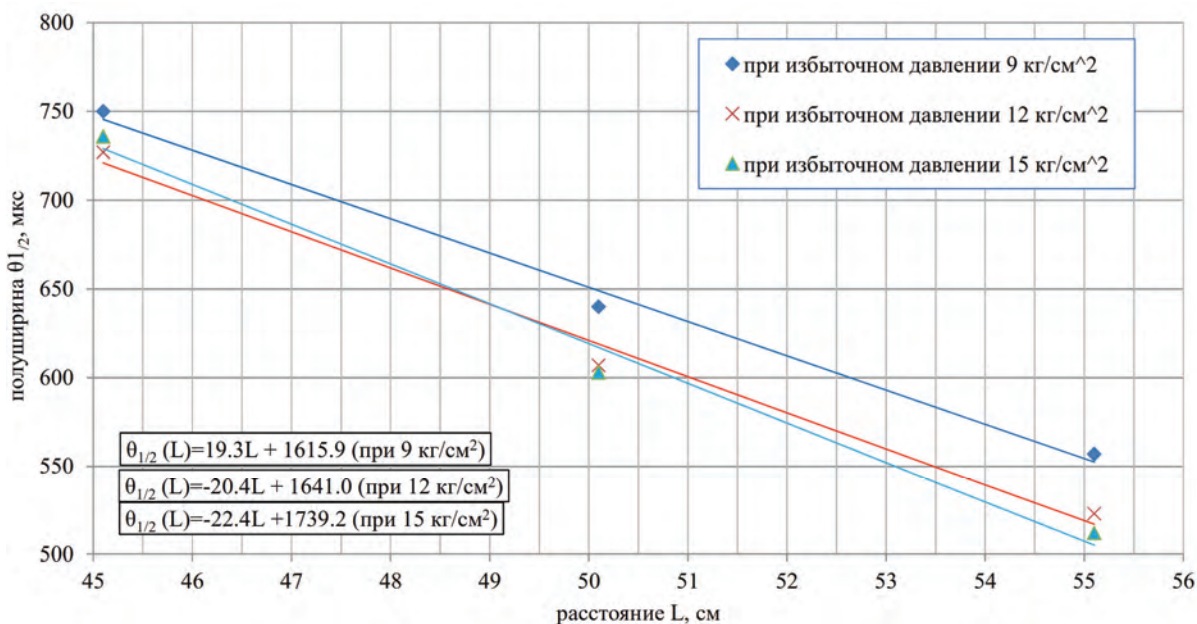


Рис. 7. Зависимость величины полуширины импульсов делений на мгновенных нейтронах от высоты расположения верхнего отражателя с толщиной графита 21 см

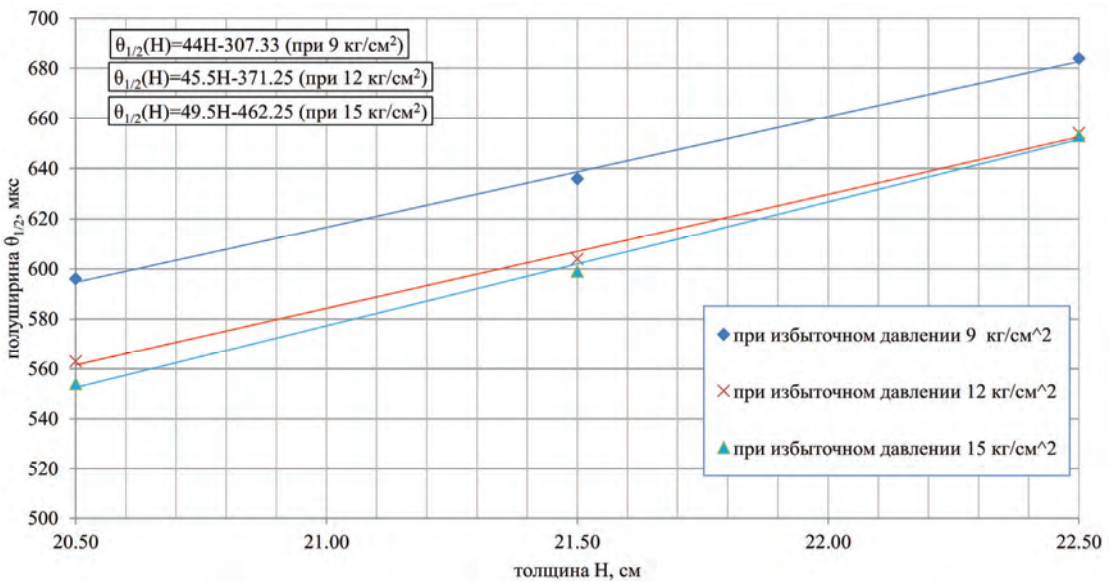


Рис. 8. Зависимость величины полуширины импульсов делений на мгновенных нейтронах от толщины графита в верхнем отражателе относительно центра АЗ

Для определения приращения полуширины импульса делений от изменения высоты верхнего отражателя относительно центра АЗ с толщиной графита 21 см или изменения толщины графита была использована формула для производной в средней точке, имеющая второй порядок точности[7]:

$$\frac{\partial \theta_{1/2}}{\partial x} = \frac{\theta_{1/2}(x + \Delta h) - \theta_{1/2}(x - \Delta h)}{2\Delta h}, \quad (1)$$

где x – величина в средней точке расстояния по высоте относительно центра АЗ верхнего отражателя (табл. 1) $x = L = 50,1$ см или величина в средней точке толщины графита (табл. 2) $x = H = 21,5$ см; Δh – величина разности расстояний по высоте относительно центра АЗ верхнего отражателя для двух соседних расчетных точек, согласно данным табл. 2 $\Delta h = \Delta L = 5$ см или величина разности толщин графита верхнего отражателя для двух соседних расчетных точек, согласно данным табл. 3 $\Delta h = \Delta H = 1$ см.

Таким образом, на основании данных, приведенных в табл. 2 и 3, для возможного регулирования полуширины номинальных импульсов делений в процессе физического пуска реактора возможно использовать следующие значения производных, полученных усреднением значений производных, определенных по соотношению (1), соответствующих вводу реактивности при начальных избыточных давлениях в ресивере БИБ 9, 12, 15 кг/см²:

– для подбора полуширины импульса делений за счет изменения высоты верхнего отражателя с толщиной графита 21 см относительно центра АЗ

$$\frac{\partial \theta_{1/2}}{\partial L} = -20,7 \frac{\text{мкс}}{\text{см}}; \quad (2);$$

– для подбора полуширины импульса за счет изменения толщины графита верхнего отражателя

$$\frac{\partial \theta_{1/2}}{\partial H} = 46,3 \frac{\text{мкс}}{\text{см}}. \quad (3)$$

Заключение

Расчетный анализ влияния параметров графитового отражателя, а именно его местоположения по высоте относительно центра АЗ при толщине графита 21 см или толщины графита, на параметры импульса делений на мгновенных нейтронах модернизируемого реактора БР-К1, показал, что регулирование полуширины импульса делений с энерговыделением $Y = 3 \cdot 10^{18}$ делений для достижения «безопасной» величины $\theta_{1/2} = 600$ мкс можно выполнить двумя способами.

Первый способ регулирования величины полуширины импульса делений – изменение местоположения по высоте относительно центра АЗ верхнего графитового отражателя с толщиной графита 21 см. Для подбора высоты верхнего графитового отражателя целесообразно использовать соотношение (2).

Второй способ регулирования величины полуширины импульса делений – изменение толщины графита верхнего отражателя при фиксированном расстоянии до центра АЗ 501 мм. Для подбора толщины графита верхнего отражателя целесообразно использовать соотношение (3).

Новая конструкция верхнего графитового отражателя и его крепления, разработанная, в том числе, на основании приведенного выше расчетного исследования, обеспечивает:

– жесткое крепление к силовому каркасу стенда реактора;

– возможность регулирования высоты верхнего отражателя относительно центра АЗ в диапазоне от 45 см до 56 см;

– возможность конструктивной вариативности толщины графита верхнего графитового отражателя в пределах от 19 до 27 см при сохранении расстояния между центральной осевой АЗ и нижней плоскостью отражателя величиной 501 мм.

Подводя итоги на основании вышеизложенного, следует отметить, что первый способ реализации требуемой величины полуширины импульса делений на мгновенных нейтронах за счет изменения высоты верхнего отражателя относительно центра АЗ при фиксированной толщине графита 21 см является более перспективным вследствие экономии времени и ресурсов при проведении работ по физическому пуску установки БР-К1М.

Литература

1. Девяткин А. А., Воронцов С. В., Колесов В. Ф. и др. Пути модернизации БР-К1 для работы в импульсном режиме // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2017. Вып. 4. С. 43–53.

2. Колесов В. Ф. Аперiodические импульсные реакторы. - Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1999.

3. Кошелев А. С., Никитин И. А., Хоружий В. Х. Быстрый импульсный блок для модернизируемого реактора БР-К1 // Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования. Труды межотраслевой научной конференции. Т. 2. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2016. С. 65–70.

4. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П. и др. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2011. Вып. 1. С. 17–24.

5. Хоружий В. Х. Уравнения кинетики реактора и бустера в терминах интенсивности делений // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2010. Вып. 2. С. 14–16.

6. Хоружий В. Х., Кошелев А. С., Колесов В. Ф. Интегрирование уравнений кинетики импульсного реактора на быстрых нейтронах жестко-устойчивыми методами Гира // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 1989. Вып. 1. С. 8–14.

7. Калиткин Н. Н. Численные методы. Санкт-Петербург. БХВ-Петербург. 2011.