

## О ВОЗМОЖНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ИНТЕРВАЛА ВРЕМЕНИ МЕЖДУ ПИКАМИ ИМПУЛЬСОВ РЕАКТОРА БР-1М И УСКОРИТЕЛЯ ЛИУ-30 В РЕЖИМЕ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ

А. С. Кошелев, В. Х. Хоружий

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

Статья поступила в редакцию 19.05.2021, после доработки – 14.07.2021, принята к публикации – 18.11.2021

Проанализированы особенности формирования импульсов делений реактора БР-1М и ускорителя ЛИУ-30 в режиме совместной работы установок. Рассмотрены варианты конструктивной реализации и пространственного перемещения специализированного высокоскоростного регулятора реактивности реактора с возможностью значительного влияния на интервал между пиками импульсов ЛИУ-30 и БР-1М при инициировании импульса делений реактора с фиксированными параметрами импульсом излучений ускорителя.

**Ключевые слова:** импульс делений реактора, связь импульсов ускорителя и реактора, специализированный высокоскоростной регулятор реактивности, вариативность межпикового интервала импульсов установок.

**ON THE POSSIBILITY OF REGULATING THE TIME INTERVAL BETWEEN PULSE PEAKS OF REACTOR BR-1M AND ACCELERATOR LIU-30 IN THE MODE OF THEIR JOINT OPERATION / A. S. Koshelev, V. Kh. Khoruzhy** // The peculiarities of fission pulse formation in BR-1M and accelerator LIU-30 in the mode of the facilities joint operation are analyzed. There are considered the versions of design realization and spatial displacement of a specialized high-speed reactivity regulator with the rated possibility of a considerable effect on the value of the interval between the peaks of LIU-30 and BR-1M pulses at the initiation of the reactor fission pulse with the fixed parameters by the accelerator radiation pulse.

**Key words:** reactor fission pulse, relation between accelerator and reactor pulses, specialized high-speed reactivity regulator, variability of the interval between pulse peaks of the facilities.

### Введение

При совместной работе мощного линейного ускорителя электронов ЛИУ-30 и импульсного ядерного реактора на быстрых нейтронах БР-1М [1, 2] в режиме инициирования импульса делений реактора импульсом излучений ускорителя формируемый в активной зоне реактора всплеск мощности делений оказывается настолько значительным (практически реализо-

ванный максимум составил  $\sim 2,5 \cdot 10^{20}$  дел.А3/с при полном выходе индуцированного источника  $\sim 5 \cdot 10^{12}$  дел.А3), что интервал времени между импульсом ускорителя и пиком импульса реактора в практически востребованных редакциях совместных пусков действующими системами управления ускорителя и реактора может варьироваться только незначительно, от  $\sim 100$  до  $\sim 150$  мкс.

В настоящей статье рассматривается один из возможных путей расширенного варьирования межпикового интервала импульсов ускорителя ЛИУ-30 и реактора БР-1М до 450 мкс и более за счет введения в конструкцию реактора дополнительного специализированного высокоскоростного регулятора реактивности (СВРР) и перехода от одноступенчатой процедуры быстрого достижения реактивности реакторной системы, необходимой для генерирования импульса делений на мгновенных нейтронах с заданными параметрами, к двухступенчатой. Она реализуется путем последовательного ввода штатного импульсного блока реактора, обеспечивающего увеличение реактивности реакторной системы до промежуточного уровня  $\rho \approx 0,85\beta_{эф}$ , с последующим генерированием импульса ускорителя и одновременным или с варьируемо задержанным пуском СВРР реактора, обеспечивающим «на лету» достижение необходимой надкритичности по мгновенным нейтронам.

### Особенности формирования импульса реактора

Особенности развития импульса делений реактора БР-1М, инициируемого импульсом излучений ускорителя ЛИУ-30, иллюстрируют экспериментально установленные [3] графические отображения изменения мощности реактора в интервале от момента генерирования импульса ускорителя  $t = 0$  до 700 мкс (рис. 1).

Генерирование импульса делений реактора при мощности индуцированного в активной зоне источника делений  $2,56 \cdot 10^{20}$  дел.АЗ/с (полный выход  $\sim 5 \cdot 10^{12}$  дел.АЗ) осуществлено в конфигурации взаиморасположения центров активной зоны реактора и мишенного блока ускорителя на центральной оси ускорителя. Генерирование импульса делений реактора при мощности индуцированного в активной зоне источника делений  $5,80 \cdot 10^{19}$  дел.АЗ/с (полный выход  $\sim 1,2 \cdot 10^{12}$  дел. АЗ) осуществлено при перпендикулярном смещении центра актив-

ной зоны реактора от центральной оси ускорителя на 20 см без изменения его расстояния от пола в помещении совместной работы установок.

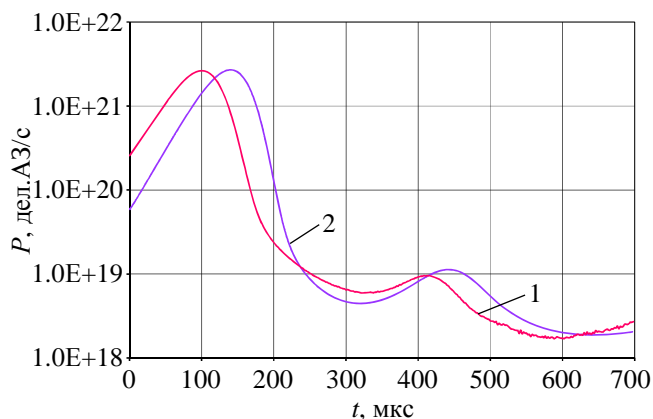


Рис. 1. Развитие импульса делений реактора БР-1М в состоянии «нулевой» мощности с момента инициирования его импульсом ускорителя ЛИУ-30. Мощность сформированного источника –  $2,56 \cdot 10^{20}$  дел.АЗ/с (1) и  $5,80 \cdot 10^{19}$  дел.АЗ/с (2)

При почти совпадающих импульсных характеристиках: полуширина  $\sim 72$  мкс, пиковая мощность (интенсивность)  $\sim 2,7 \cdot 10^{21}$  дел.АЗ/с, полное энергосодержание  $\sim 2,6 \cdot 10^{17}$  дел.АЗ – практически пятикратное уменьшение мощности (и выхода) индуцированного источника делений изменяет межпиковый интервал импульсов ускорителя и реактора всего на  $\sim 35\%$ , от 100 до 135 мкс.

### Варианты конструктивного решения СВРР

Двухступенчатая процедура генерирования импульса делений реактора, инициируемого импульсом излучений ускорителя, предопределяет следующие требования к СВРР:

- максимально короткое время изменения реактивности реакторной системы, от  $\rho_1 \approx 0,85\beta_{эф}$  до  $\rho_2 \approx 1,10\beta_{эф}$ , обеспечивающей для реактора БР-1М генерирование импульса делений с рекомендованным пределом по полному энергосодержанию  $2,5 \cdot 10^{17}$  дел.АЗ;

– максимально возможное постоянство уровня реактивности реакторной системы  $\rho_2$  за счет СВРР при его возможном перемещении после реализации перехода  $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$ .

С учетом указанных требований к характеру изменения реактивности при движении СВРР и результатам предварительных оценок, выполненных с использованием расчетной схемы, реализованной в [4], для детализированного рассмотрения были выбраны четыре варианта конструктивной компоновки структурных элементов СВРР.

Вариант 1 – это комбинация из трех конструктивно объединенных элементов цилиндрической формы:

– полого цилиндра из полиэтилена с диаметрами (внешний×внутренний) 40×20 мм, высотой 60 мм; функционально неподвижного;

– полого цилиндра из бора с диаметрами 40×20 мм, высотой 100 мм; функционально неподвижного;

– полого цилиндра из бора с диаметрами 20×10 мм, высотой 60 мм; функционально подвижного на базе перемещения от исходной позиции до формализованной  $\infty$ .

Рассматриваемое размещение на реакторе – центральный канал активной зоны (рис. 2,а).

Вариант 2 – это комбинация из пяти конструктивно объединенных элементов цилиндрической формы:

– цилиндра из полиэтилена диаметром 10 мм, высотой 60 мм; функционально неподвижного;

– полого цилиндра из полиэтилена диаметрами 40×20 мм, высотой 60 мм; функционально неподвижного;

– цилиндра из бора диаметром 10 мм, высотой 100 мм; функционально неподвижного;

– полого цилиндра из бора с диаметрами 40×20 мм, высотой 100 мм; функционально неподвижного;

– полого цилиндра из бора с диаметрами 20×10 мм, высотой 60 мм; функционально подвижного на базе перемещения от исходной позиции до формализованной  $\infty$ .

Рассматриваемое размещение на реакторе – центральный канал активной зоны (рис. 2,б).

Вариант 3 – комбинация из трех конструктивно объединенных элементов цилиндрической формы:

– полого цилиндра из полиэтилена с диаметрами 40×20 мм, высотой 60 мм; функционально неподвижного;

– полого цилиндра из бора с диаметрами 40×20 мм, высотой 180 мм; функционально неподвижного;

– полого цилиндра из бора с диаметрами 20×10 мм, высотой 60 мм; функционально подвижного на базе перемещения от исходной позиции до формализованной  $\infty$ .

Рассматриваемое размещение на реакторе – центральный канал активной зоны (рис. 2,в).

Вариант 4 – комбинация из конструктивно объединенных элементов цилиндрической формы:

– полого цилиндра из полиэтилена с диаметрами 40×20 мм, высотой 60 мм; функционально неподвижного;

– полого цилиндра из бора с диаметрами 80×20 мм, высотой 180 мм; функционально неподвижного;

– полого цилиндра из бора с диаметрами 20×10 мм, высотой 60 мм; функционально подвижного на базе перемещения от исходной позиции до формализованной  $\infty$ .

Рассматриваемое размещение на реакторе – центральный канал активной зоны (рис. 2,г).

При проведении расчетов во всех выбранных вариантах СВРР элементы из полиэтилена принимались сформированными из монолитного материала плотностью 0,92 г/см<sup>3</sup>, а элементы из бора – сформированными из борного порошка с 85 % обогащением по <sup>10</sup>B с насыпной плотностью 0,95 г/см<sup>3</sup>.

Расчетные конфигурации активной зоны реактора и СВРР в состоянии, принимаемом за исходное, представлены на рис. 2. Изменение реактивности реакторной системы при перемещении из исходной позиции  $z = 1$  см (соответствует координате нижнего торца подвижного цилиндра из бора на оси  $z$ ) до формализованного значения  $z = \infty$  рассчитывалось по методике С-007 [5]. Следуя [2], в качестве

делящегося материала активной зоны принимался сплав высокообогащенного (90 % по  $^{235}\text{U}$ ) урана с молибденом (массовая доля 10 %). Для каждого варианта СВРР определялись 10 значений реактивности, соответствующих

юющих положениям нижнего торца подвижного цилиндра из бора,  $z = 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 17, 21, 25$  см, и одно значение реактивности, определенное в расчете без подвижного борного цилиндра ( $z = \infty$ ).

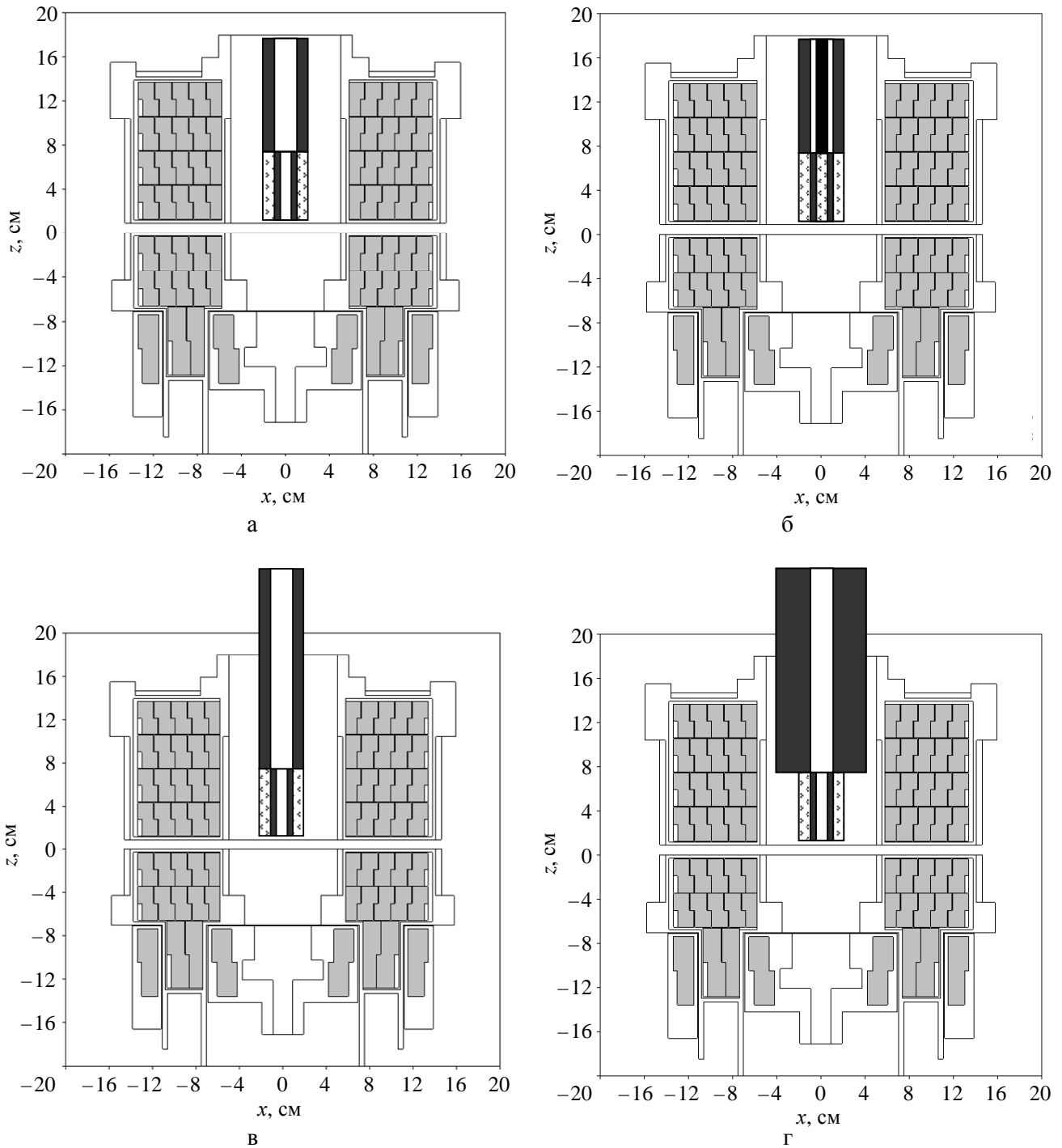


Рис. 2. Расчетная схема активной зоны БР-1М с вариантами конфигурации комплектующих элементов СВРР: 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (г);  $\square$  – сплав урана-235 с молибденом,  $\square$  – полиэтилен,  $\blacksquare$  – бор-10

Генеральная выборка результатов расчета в нормировке данных по условию  $\rho(z = 1 \text{ см}) = 0$  (далее по тексту  $\rho_{\text{норм}}$ ) представлена в табл. 1. Графическое отображение нормированных реактивностей на интервале изменения  $z$  от 1 до 25 см представлено на рис. 3. Точки на графике соответствуют значениям  $\rho_{\text{норм}}$  в табл. 1. Соединительные линии – Excel-вариант точечного графика с гладкими межточечными кривыми.

Таблица 1

Генеральная выборка расчетных значений нормированных реактивностей СВРР

z, см	$\rho_{\text{норм}}, \beta_{\text{эф}}$			
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
1	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,075	0,082	0,071	0,080
5	0,167	0,188	0,163	0,170
7	0,244	0,270	0,240	0,232
9	0,268	0,296	0,266	0,250
11	0,278	0,305	0,274	0,254
13	0,282	0,309	0,275	0,256
17	0,269	0,299	0,259	0,247
21	0,262	0,289	0,256	0,248
25	0,260	0,290	0,258	0,248
$\infty$	0,259	0,287	0,257	0,246

### Расчетный прогноз совместной работы ЛИУ-30 и БР-1М с СВРР

В практике расчета параметров для импульсов делений реакторов на быстрых ней-

тронах давно и успешно находит применение расчетно-теоретическая модель, используемые уравнения кинетики реактора которой, ориентированные на наличие внешнего (привнесенного извне) источника делений, сформулированы в работе [6], а жестко-устойчивые методы их решения – в работе [7].

Для учета влияния защитной бетонной оболочки реакторных помещений, к которым относится зал совместной работы ускорителя и реактора, хорошо зарекомендовали себя методы расчета, конкретизированные в работе [8].

Существенно инерционное гашение реактивности реактора описывается с помощью характерных для импульсных реакторов с металлической активной зоной уравнений [9]:

$$\rho(t) = \rho_0 - \sum_{\omega} a_{\omega} v_{\omega}(t) - \Delta\rho(t),$$

$$\frac{1}{\omega^2} \frac{d^2 v_{\omega}}{dt^2} + v_{\omega} = Y(t), \quad Y(t) = \int_{t_0}^t dt' P(t'),$$

$$\Delta\rho(t) = c(t - t_{\text{пик}} - \Delta)^2 \text{ при } t \geq t_{\text{пик}} + \Delta.$$

Здесь  $\rho_0$  – стартовая реактивность реактора;  $P(t)$  – скорость делений в реакторе;  $Y(t)$  – энерговыделение в реакторе к моменту времени  $t$ ;  $v_{\omega}(t)$  – условные смещения в единицах энерговыделения, соответствующие частотам колебаний элементов активной зоны  $\omega$ , а  $a_{\omega}$  – коэффициенты гашения реактивности, оцененные с помощью теории возмущений. Член  $\Delta\rho(t)$  приближенно описывает сброс реактивности после импульса делений.

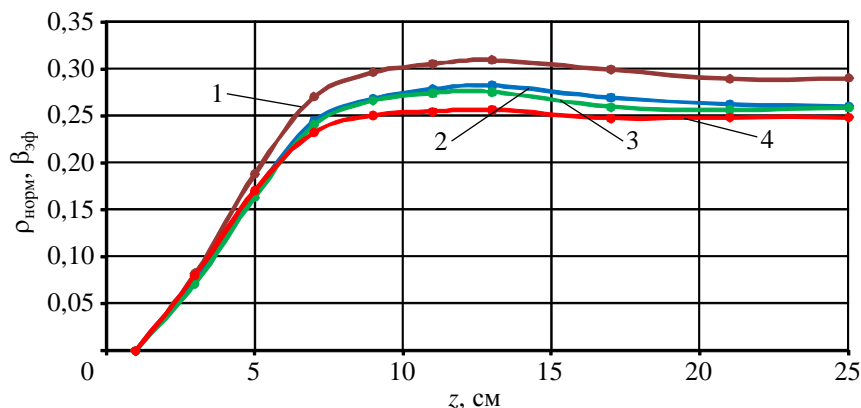


Рис. 3. Изменение реактивности при выводе СВРР из центрального канала активной зоны реактора БР-1М (1–4 – варианты СВРР)

Для детализированного расчетного рассмотрения особенностей генерирования импульсов делений реактора БР-1М, инициируемых импульсом излучений ускорителя ЛИУ-30, в процессе двухступенчатой процедуры комплексной работы ядерно-физических установок с использованием штатного импульсного блока реактора и предлагаемого специализированного высокоскоростного регулятора реактивности был выбран вариант 4 СВРР как наиболее соответствующий сформулированным выше требованиям к характеру изменения реактивности при движении СВРР.

Дискретизированная зависимость реактивности  $\rho_{\text{норм}}(z)$  на интервале перемещения СВРР по  $z$  от 1 до 25 см, представленная в табл. 1, переформатировалась в непрерывную путем кубической сплайн-интерполяции с использованием стандартных программ. Для всех используемых в процессе расчета значений  $z > 25$  см принималось  $\rho_{\text{норм}} = 0,248\beta_{\text{эф}}$ .

Индукцированный излучениями ускорителя в активной зоне реактора источник был выбран равным  $6 \cdot 10^{11}$  дел.АЗ. Выбор источника сделан из расчета возможности его реализации при смещении центра активной зоны реактора несколько более 20 см, что позволяет увеличить объем пространства, доступного комплексному воздействию излучений ускорителя и реактора.

Скорость перемещения СВРР из начального положения до окончания процедуры расчета принималась неизменной, равной 100, 200, 300, 400 и 500 м/с. Интервал времени, охватываемый расчетом, – от 0,1 до  $10^5$  мкс. Шаг дискретизации по времени  $t$  – в мкс, переменный, автоматически регулируемый в процессе счета. Рассчитываемые величины – суммарное изменение реактивности реакторной системы  $\rho$  в  $\beta_{\text{эф}}$  (за счет перемещения СВРР, нагрева и колебания кольцевых элементов из делящегося материала), интенсивности делений в активной зоне  $P$  в дел.АЗ/с, суммарное число

делений в активной зоне к моменту времени  $t$   $Y$  в дел.АЗ и ожидаемая реактивность  $\rho_{\text{норм}}(\beta_{\text{эф}})$ , вносимая «на лету» в реакторную систему.

На рис. 4 в графической форме представлено изменение реактивности активной зоны реактора с учетом ее разогрева  $\rho_1$ , без учета ее разогрева  $\rho_2$  и интенсивности делений в зоне  $P_f$  в процессе формирования импульса делений реактора на мгновенных нейтронах, инициированного импульсом ускорителя при всех пяти рассмотренных скоростях перемещения СВРР. Наблюдаемый на рис. 4, в, г, д всплеск реактивности  $\rho_1$  обусловлен изменением реактивности активной зоны за счет колебания колец из делящегося материала.

Изменение интервала времени между пиком импульса излучений ускорителя и пиком импульса делений реактора, инициированным импульсом ускорителя, в графической форме представлено на рис. 5. Точками на графике обозначены значения  $\Delta T_{\text{пик}}$ , полученные в расчете. Сплошная кривая соответствует *Excel*-аппроксиманте  $\Delta T_{\text{пик}} = 11357V^{-0,566}$  ( $\Delta T_{\text{пик}}$  – в мкс, скорость перемещения СВРР  $V$  – в м/с, достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,9995$ ).

Несмотря на то, что при реактивности активной зоны  $0,85\beta_{\text{эф}}$ , имеющей место на момент генерации импульса ускорителя, должен наблюдаться разгон реактора на запаздывающих нейтронах с периодом  $\sim 0,5$  с согласно [10], по мгновенным нейтронам реакторная система подкритична на  $\sim -0,15\beta_{\text{эф}}$ . Поэтому для всех расчетных зависимостей интенсивности делений в активной зоне реактора после всплеска делений, обусловленных излучениями ускорителя, некоторое время (от  $\sim 250$  мкс для  $V_{\text{СВРР}} = 100$  м/с до  $\sim 60$  мкс для  $V_{\text{СВРР}} = 500$  м/с) имеет место значимый спад интенсивности делений в активной зоне (в  $\sim 200$  раз для  $V_{\text{СВРР}} = 100$  м/с, в  $\sim 20$  раз для  $V_{\text{СВРР}} = 300$  м/с, в  $\sim 7$  раз для  $V_{\text{СВРР}} = 500$  м/с).

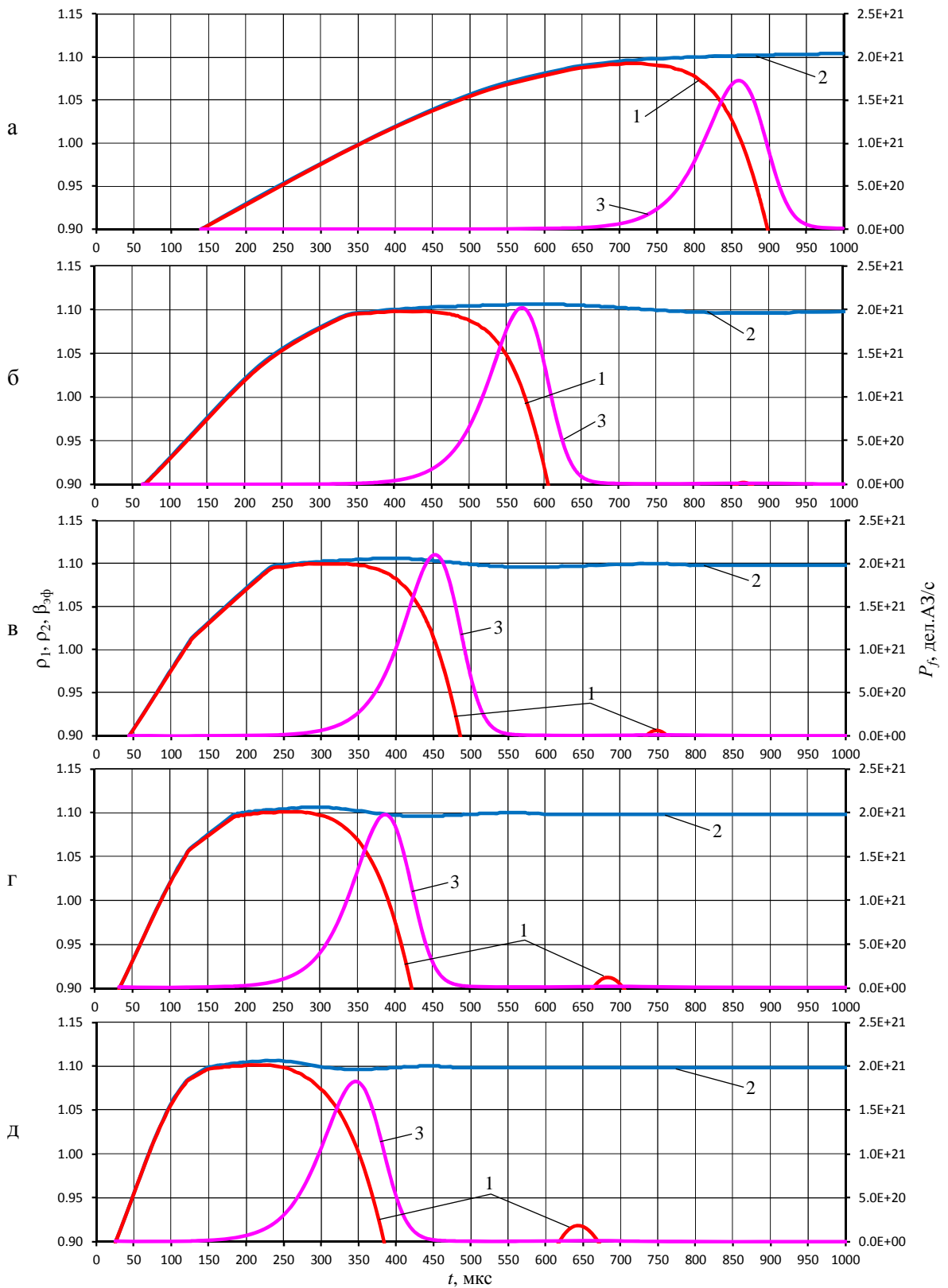


Рис. 4. Изменение реактивности активной зоны реактора с учетом ее разогрева  $\rho_1$  (1), без учета ее разогрева  $\rho_2$  (2) и интенсивности делений в зоне  $P_f$  (3) в процессе формирования импульса делений реактора на мгновенных нейтронах, инициированного импульсом ускорителя при скоростях перемещения СВРР 100 (а), 200 (б), 300 (в), 400 (г) и 500 м/с (д)

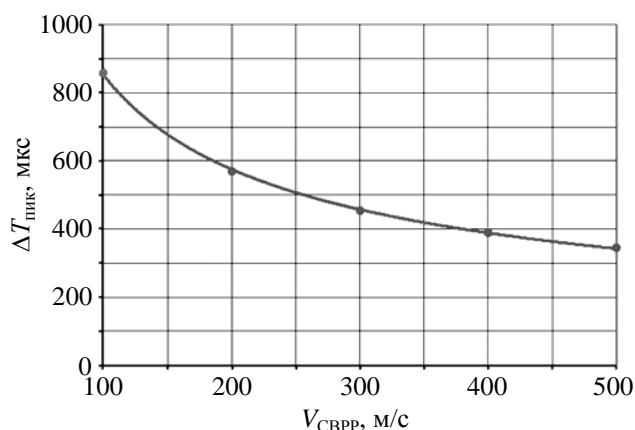


Рис. 5. Изменение интервала времени между пиками импульсов ускорителя и реактора при изменении скорости перемещения СВРР от 100 до 500 м/с

Выявленное наличие спада интенсивности делений в активной зоне реактора после всплеска делений, обусловленного импульсом излучений ускорителя, позволяет рассмотреть вариант пуска СВРР не в момент импульса ускорителя, а некоторое время спустя, с интервалом времени между импульсом ускорителя и пуском СВРР  $\Delta T_{\text{зап}}$ . Результаты расчета зависимости изменения интенсивности делений в активной зоне реактора после импульса излучений ускорителя в случае перемещения СВРР на скорости 300 м/с и задержки его пуска на  $\Delta T_{\text{зап}}$  50, 100, 150, 250 и 350 мкс позволили конкретизировать величину интервала времени между пиками импульсов ускорителя и реактора при всех упомянутых  $\Delta T_{\text{зап}}$ . Полученные данные в графической форме представлены на рис. 6. В выборку расчетных данных, отмеченных точками на рисунке, включены также и данные для  $\Delta T_{\text{зап}} = 0$ .

Кривые на рис. 6 соответствуют Excel-аппроксимационным решениям для функциональной связи межпикового интервала  $\Delta T_{\text{пик}}$  и интервала задержки запуска СВРР  $\Delta T_{\text{зап}}$ .

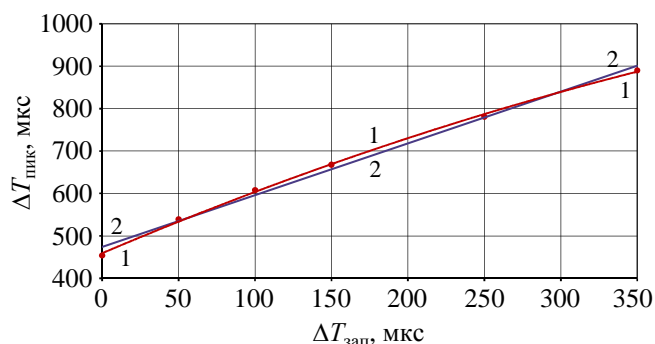


Рис. 6. Изменение интервала времени между пиками импульсов ускорителя и реактора при перемещении СВРР со скоростью 300 м/с и изменении задержки пуска СВРР после генерирования импульса ускорителя от 0 до 350 мкс (1 и 2 – параболическая и линейная аппроксимация соответственно)

Аппроксимационное решение 1 получено в виде  $\Delta T_{\text{пик}} = 459,23 + 1,553\Delta T_{\text{зап}} - 0,0009\Delta T_{\text{зап}}^2$  с достоверностью аппроксимации  $R^2 = 0,9990$ . Аппроксимационное решение 2 получено в виде  $\Delta T_{\text{пик}} = 473,67 + 1,22\Delta T_{\text{зап}}$  с достоверностью аппроксимации  $R^2 = 0,9937$ . Принимая во внимание фактически реализуемый разброс ожидаемых значений  $\Delta T_{\text{пик}}$  в интервале изменения  $\Delta T_{\text{зап}}$  от 50 до 350 мкс  $\sim \pm 10$  мкс для решения 1 и  $\sim \pm 5$  мкс для решения 2, можно говорить о наличии линейной связи между  $\Delta T_{\text{пик}}$  и  $\Delta T_{\text{зап}}$  в рассмотренных пределах изменения  $\Delta T_{\text{зап}}$ .

Изменение интенсивности делений в активной зоне реактора БР-1М в интервале от 0 до 1000 мкс после импульса излучений ускорителя и задержанном запуске СВРР в интервале от 0 до 350 мкс со скоростью перемещения 300 м/с в графической форме представлено на рис. 7. Численные значения базовых параметров импульсов делений БР-1М, соответствующих их графическому отображению на рис. 7, представлены в табл. 2.



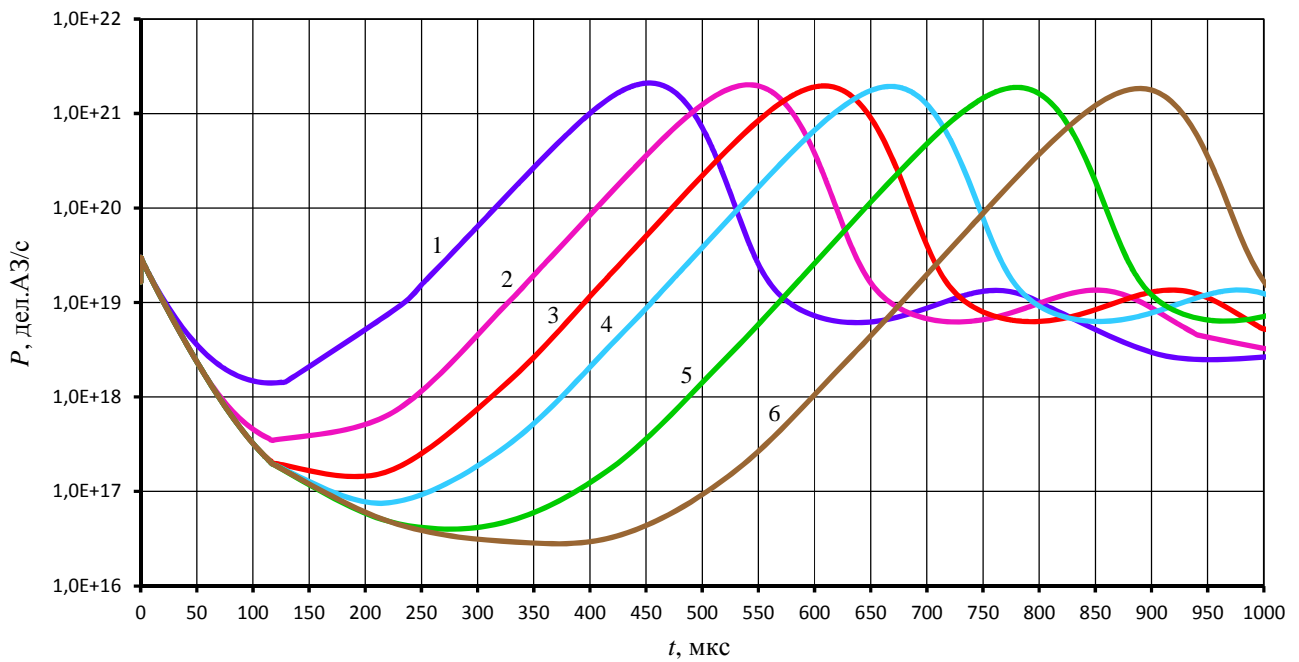


Рис. 7. Изменение интенсивности делений в активной зоне реактора при инициировании импульса делений реактора импульсом излучений ускорителя, скорости перемещения СВРР 300 м/с и варьировании задержки пуска СВРР после импульса ускорителя  $\Delta T_{\text{СВРР}}$ : 1 –  $\Delta T_{\text{СВРР}} = 0$ ; 2 –  $\Delta T_{\text{СВРР}} = 50$  мкс; 3 –  $\Delta T_{\text{СВРР}} = 100$  мкс; 4 –  $\Delta T_{\text{СВРР}} = 150$  мкс; 5 –  $\Delta T_{\text{СВРР}} = 250$  мкс; 6 –  $\Delta T_{\text{СВРР}} = 350$  мкс

Таблица 2

Результаты расчета базовых параметров импульса делений реактора БР-1М при перемещении СВРР со скоростью 300 м/с и варьируемой задержкой его пуска после импульса ускорителя в интервале от 0 до 350 мкс

Рассчитываемый параметр	Задержка пуска СВРР, мкс					
	0	50	100	150	250	350
Интервал времени между пиками импульсов ускорителя и реактора $\Delta T_{\text{пик}}$ , мкс	454	539	608	668	781	890
Интенсивность делений в пике импульса реактора $P_{\text{max}}$ , $10^{21}$ дел.АЗ/с	2,10	2,01	1,96	1,94	1,89	1,84
Полуширина импульса реактора $\theta_{1/2}$ , мкс	89,1	90,6	91,4	91,8	92,6	93,6
Энерговыведение в «быстрой» части импульса реактора (до первого минимума интенсивности делений после $P_{\text{max}}$ ) $Y_{\text{Imin}}$ , $10^{17}$ дел.АЗ	2,11	2,04	2,01	1,99	1,96	1,93
Энерговыведение в импульсе реактора за полное время расчета 100 мс $Y$ , $10^{17}$ дел.АЗ	2,35	2,28	2,25	2,23	2,20	2,17
Долевое соотношение $Y_{\text{Imin}}/Y$	0,898	0,895	0,893	0,892	0,890	0,889

В результате расчетного анализа выявлена принципиальная возможность осуществления планируемого регулирования интервала времени между пиком импульса излучений ускорителя ЛИУ-30 и пиком импульса интенсивности делений реактора БР-1М от ~450 мкс до ~900 мкс при иницировании импульса делений реактора импульсом излучений ускорителя.

Подтверждена целесообразность использования на момент генерирования импульса излучений ускорителя реактивности реакторной системы  $\sim 0,85\beta_{эф}$ , что позволяет избежать быстрого разгона реакторной системы сразу после импульса ускорителя и значительно уменьшить прирост реактивности после пуска ускорителя для вывода реактора на уровень, требуемый для генерирования импульса делений на мгновенных нейтронах с плановыми параметрами.

Установлено одно из возможных физико-технических решений для специализированного высокоскоростного регулятора реактивности, обеспечивающего переход реакторной системы из состояния  $\sim 0,85\beta_{эф}$  в состояние  $\sim 1,10\beta_{эф}$  с необходимым профилем и скоростью изменения реактивности.

Выявлена возможность фиксирования скорости перемещения СВРР значением  $\sim 300$  м/с с последующим регулированием времени запуска СВРР после импульса излучений ускорителя, обеспечивающая практически линейную связь между изменением интервала задержки запуска СВРР и изменением интервала между пиками импульсов ускорителя и реактора. Отметим, что конструктивная возможность достижения требуемой скорости перемещения СВРР выходит за пределы данной работы, так как требует специального рассмотрения.

1. Завьялов Н. В., Гордеев В. С., Савченко В. А. и др. Моделирующие и облучательные комплексы и установки РФЯЦ-ВНИИЭФ // 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергий: В 2-х выпусках. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. Вып. 1. С. 165–191.
2. Колесов В. Ф., Кувшинов М. И., Воронцов С. В. и др. Критические стенды и импульсные реакторы РФЯЦ-ВНИИЭФ // Там же. С. 136–164.
3. Кошелев А. С., Хоружий В. Х. Формирование импульсов делений на мгновенных нейтронах реактора БР-1М в условиях высокой стартовой мощности // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2013, вып. 3, с. 102–111.
4. Кошелев А. С., Никитин И. А., Хоружий В. Х. Быстрый импульсный блок реактора БР-К1М // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2018, вып. 4, с. 116–128.
5. 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.
6. 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.
7. 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.

8. Хоружий В. Х., Колесов В. Ф. К расчету полей отраженных нейтронов и нейтронов утечки с помощью методов инвариантного погружения и сложения // Вопросы атомной науки и техники, сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки, 1987, № 1, с. 3–11.

9. Колесов В. Ф. Аперiodические импульсные реакторы: Монография в двух томах. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. Т. 2.

10. Кошелев А. С. К выбору параметров запаздывающих нейтронов для импульсных реакторов на быстрых нейтронах // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 1998, вып. 2, с. 19–24.

Контактная информация –

Кошелев Александр Сергеевич,  
ведущий научный сотрудник ИЯРФ,  
РФЯЦ-ВНИИЭФ,  
e-mail: otd4@exped.vniief.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2021, вып. 4, с. 108–118.