

## БЫСТРЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ БЛОК РЕАКТОРА БР-К1М

А. С. Кошелев, И. А. Никитин, В. Х. Хоружий

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

Приводится анализ результатов расчета и эксперимента, связанных с возможностью применения на реакторе БР-К1М блока массой  $\sim 1,0$  кг и скоростью ввода реактивности  $\sim 100 \beta_{эф}/с$ . Блок предназначен для генерирования импульсов делений на мгновенных нейтронах полушириной  $\sim 600$  мкс при энерговыделении в активной зоне  $\sim 3 \cdot 10^{18}$  дел. АЗ. Приведены параметры пневматического привода исполнительного механизма и особенности его конструкции, обеспечивающие перемещение блока со скоростью  $\sim 9$  м/с.

**Ключевые слова:** бустер-реактор, модернизация, стальной чехол, титановый сплав, напряжение, деформация, отражатель, быстрый импульсный блок.

**QUICK PULSED BLOCK OF THE REACTOR BR-K1M / A. S. KOSHELEV, I. A. NIKITIN, V. KH. KHORUZHYY** // There is presented the analysis of results of calculation and experiment related to the possibility of applying on BR-K1M reactor a block with the mass of  $\sim 1.0$  kg and the reactivity insertion rate being  $\sim 100 \beta_{ef}/s$ . Block is aimed to generate fission pulses on prompt neutrons with the halfwidth equal to  $\sim 600 \mu s$  at the energy release in the core of  $\sim 3 \cdot 10^{18}$  fissions. The parameters of the actuator pneumatic drive and its design features providing the block travel at a velocity of  $\sim 9$  m/s are given.

**Key words:** booster-reactor, modernization, steel case, titanium alloy, stress, deformation, reflector, fast pulse unit.

### Введение

Бустер-реактор «Каскад», модификация 1 (БР-К1) – аperiодический импульсный реактор (АИР) самогасящегося действия – был разработан и введен в эксплуатацию в РФЯЦ-ВНИИЭФ в 1995 г. [1]. При проведении на реакторе БР-К1 в рамках физического пуска (1989–1990 гг.) кратковременного квазистатического энергопуска с выходом на стационарный уровень мощности  $\sim 30$  кВт и реализацией суммарного энерговыделения  $\sim 100$  МДж разработчики установки столкнулись с трудностями, связанными с особенностями температурного расширения герметизирующих оболочек структурных блоков активной зоны (АЗ).

Работа реактора всегда сопровождается воздействием на герметизирующие оболочки (чехлы, корпуса) блоков АЗ переменных во времени и пространстве температур и квазистатических напряжений, которые могут приводить к деформациям, выпучиванию и короблению этих элементов. Однако в АЗ с горизонтальной ориентацией оси, блочной структурой при реализации проектного энерговыделения ( $3,4 \cdot 10^{18}$  дел. АЗ, или  $\sim 100$  МДж) перечисленные выше эффекты привели к потере конструктивных зазоров между подвижными и неподвижными блоками. По этой причине были ограничены энергетические характеристики реактора до уровня  $1 \cdot 10^{18}$  дел. АЗ

(~30 МДж) в режимах кратковременного энерговыделения.

В настоящее время сочетание технических и конструктивных решений с современными методами численного моделирования теплофизических процессов позволили оптимизировать конструкцию существующей АЗ. Реализация намеченных путей модернизации обеспечит вывод реактора БР-К1М на повышенные энергетические параметры во всех режимах его работы [2].

### Конструкция активной зоны ИЯР БР-К1 и БР-К1М

Активные зоны реакторов БР-К1 и БР-К1М по количеству и компоновке структурных блоков, размещению делящегося материала (ДМ) в них и инертным материалам практически идентичны. Отличие состоит в материале герметизирующей оболочки ДМ, в первом случае это нержавеющая сталь, во втором – титановый сплав. Конструктивная схема АЗ реактора БР-К1 представлена на рис. 1, реактора БР-К1М без внешнего графитового отражателя – на рис. 2.

Активная зона имеет цилиндрическую форму с горизонтальной ориентацией центральной оси из соображений удобства загрузки объектов в облучательную полость. Максимальный внешний диаметр АЗ по топливу равен 617 мм, минимальный внутренний – 206 мм, а длина в сомкнутом состоянии – 748 мм. Диаметр полости для облучения объектов по ДМ равен 365 мм. Топливные кольца АЗ выполнены из сплава урана, обогащенного до 36 % по  $^{235}\text{U}$ , и молибдена с массовой долей 9 %. Полная масса уран-молибденового сплава в АЗ равна 1511 кг.

Конструктивную основу АЗ составляют пять автономных блоков с ДМ в виде диска, каждый из которых представляет глубоко подкритическую сборку. Делящийся материал разбит на коаксиальные кольца, которые заключены в герметичные неразъемные чехлы. Кольца в блоках подвешены по торцам на кольцевых выступках с зазором относительно друг друга и чехлом.

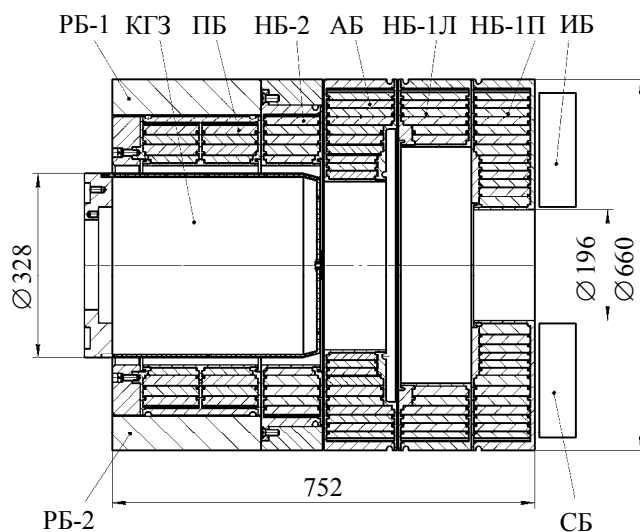


Рис. 1. Схема АЗ реактора БР-К1

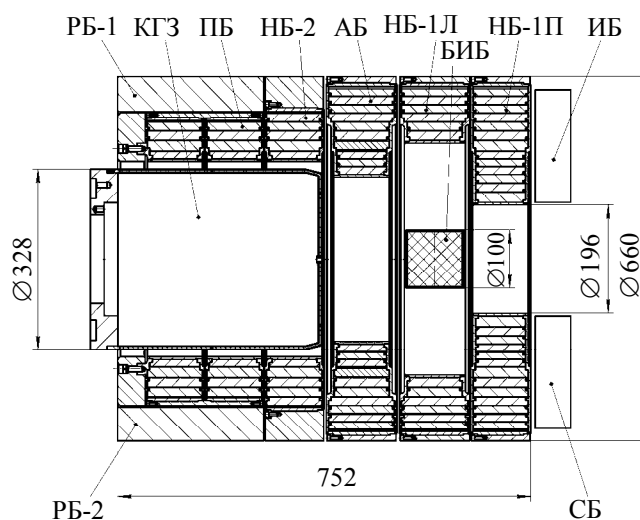


Рис. 2. Схема АЗ реактора БР-К1М

Активная зона реактора включает три неподвижных блока: НБ-1П, НБ-1Л и НБ-2. Подвижный блок АБ является основным элементом аварийной защиты, обеспечивающим быстрый перевод реактора в глубоко подкритическое состояние. Подвижный блок ПБ компенсирует реактивность, вносимую сильновозмущающими загрузками. Подвижные блоки РБ-1 и РБ-2, выполненные в виде двух полуцилиндров из бронзы, охватывают ПБ. Подвижные блоки ИБ и СБ размещены около торцевой поверхности НБ-1П, каждый имеет форму прямоугольного параллелепипеда с размерами 65×204×420 мм. Эти блоки изготовлены из бериллия, который заключен в титановый чехол. Все подвижные блоки АЗ (АБ, ПБ,

ИБ, СБ, РБ-1, РБ-2) выполняют функции органов регулирования реактивности. Блоки АБ, ИБ, СБ перемещаются в вертикальном направлении на расстояниях 450, 580 и 420 мм соответственно. Блок ПБ перемещается горизонтально вдоль оси АЗ на расстоянии 82 мм, блоки РБ-1 и РБ-2 – горизонтально в радиальном направлении относительно ПБ на расстоянии 71 мм. Конструкция реактора обеспечивает независимое падение АБ, ИБ и СБ под действием силы тяжести, а также независимые друг от друга перемещения ПБ, РБ-1 и РБ-2, тем самым обеспечивая срабатывание аварийной защиты и перевод реактора в подкритическое состояние. При полностью разведенных блоках подкритичность АЗ составляет  $\sim 18 \beta_{эф}$ .

Для размещения объектов испытания в полости АЗ служит специальный контейнер горизонтальной загрузки (КГЗ), внутренние размеры полости контейнера: диаметр 310 мм, длина 360 мм.

Одной из целей модернизации реактора является обеспечение возможности генерирования импульса делений на мгновенных нейтронах полушириной  $\sim 600$  мкс [2] с энерговыделением за импульс  $\sim 3 \cdot 10^{18}$  дел. АЗ при наличии высокого уровня мощности в момент старта ИБ. Расчеты, проведенные с использованием методики С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов [3], показали возможность получения требуемого импульса с использованием штатного ИБ. При этом скорость движения блока в области максимального ввода реактивности должна быть более 20 м/с. В штатном исполнении масса подвижной системы ИБ составляет  $\sim 15$  кг. Очевидно, что при разгоне и торможении такой системы потребуются значительные энергозатраты, которые приведут к воздействию на элементы конструкции АЗ и реакторного стенда значительных динамических нагрузок.

## Быстрый импульсный блок

Поиск альтернативного технического решения, позволяющего существенно снизить энергозатраты при перемещении регулятора реактивности и реализовать требуемые параметры импульса, выявил такую возможность в виде быстрого импульсного блока (БИБ), размещенного во внутренней полости АЗ реактора. Блок состоит из материалов, трансформирующих нейтронное излучение в месте его расположения (замедление быстрых нейтронов деления, поглощение образующихся медленных нейтронов). Схема размещения блока внутри АЗ реактора БР-К1М представлена на рис. 2. Геометрический центр блока совмещен с геометрическим центром неподвижного блока НБ-1Л.

Изменение реактивности АЗ реактора при перемещении БИБ из исходной позиции в центре НБ-1Л на базе 350 мм рассчитывалось по методике С-007 для двух вариантов. Конструктивное исполнение блока – цилиндр диаметром 100 мм и высотой 100 мм. В первом случае полиэтилен окружен внешней оболочкой кадмия толщиной 1 мм (далее по тексту ПК-100), во втором – имеем пресс-смесь полипропилена с массовой долей окиси кадмия 10 % (далее по тексту ПСК-100).

Конструктивные схемы блоков ПК-100 и ПСК-100 приведены на рис. 3.

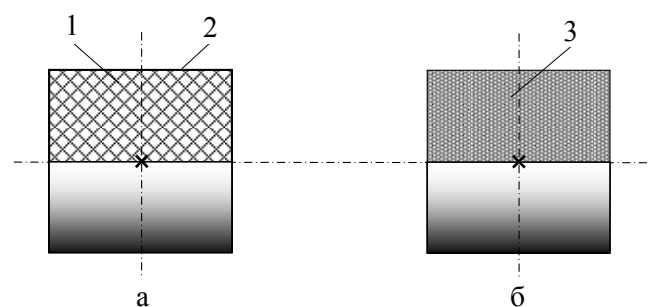


Рис. 3. Конструктивная схема блока ПК-100 (а) и ПСК-100 (б): 1 – полиэтилен; 2 – кадмий; 3 – смесь полипропилена с окисью кадмия

Для блоков ПК-100 и ПСК-100 были рассчитаны 13 и 15 значений реактивности реактора, соответственно. Полученные дискретные значения были переформатированы в непрерывные путем кубической сплайн-интерполяции (стандартные программы CSDEC, CSDER). Графики реактивности  $\rho(s)$  и параметра  $\partial\rho/\partial s$  при перемещении блока в АЗ реактора БР-К1М представлены на рис. 4.

Сплайн-решения реактивности нормированы по условию  $\rho(0) = 0$ . Максимальные реактивности при перемещении ПК-100 и ПСК-100 из положения  $s = 0$  реализуются в положении  $s \approx 145$  мм и равны  $\sim 0,93 \beta_{эф}$ . Максимальные значения параметра  $\partial\rho/\partial s$  так-

же совпадают, при  $s \approx 65$  мм они равны  $\sim 0,009 \beta_{эф}/\text{мм}$ .

Проведены расчеты по определению полуширины, мощности и энерговыделения импульсов делений с использованием специализированной программы [4]. При этом принималось, что начальная стартовая мощность реактора равна  $10^{10}$  дел. АЗ/с ( $\sim 0,3$  Вт), а скорость перемещения блока постоянна. Переход над мгновенной критичностью составлял в максимуме  $0,27 \beta_{эф}$  при скоростях перемещения блока 7, 9, и 11 м/с.

Импульсы делений при различных скоростях перемещения блока ПК-100 представлены на рис. 5.

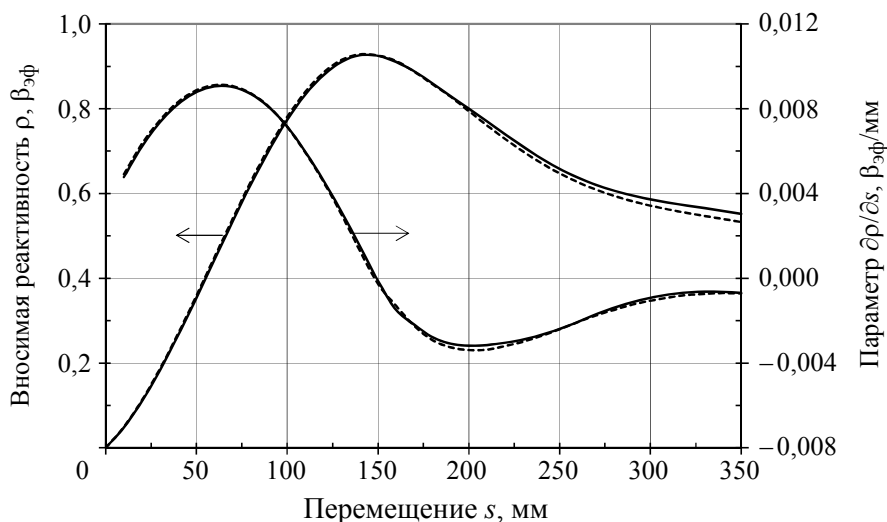


Рис. 4. Зависимость вносимой реактивности и параметра ( $\partial\rho/\partial s$ ) от перемещения блока (— — ПК-100; ---- — ПСК-100)

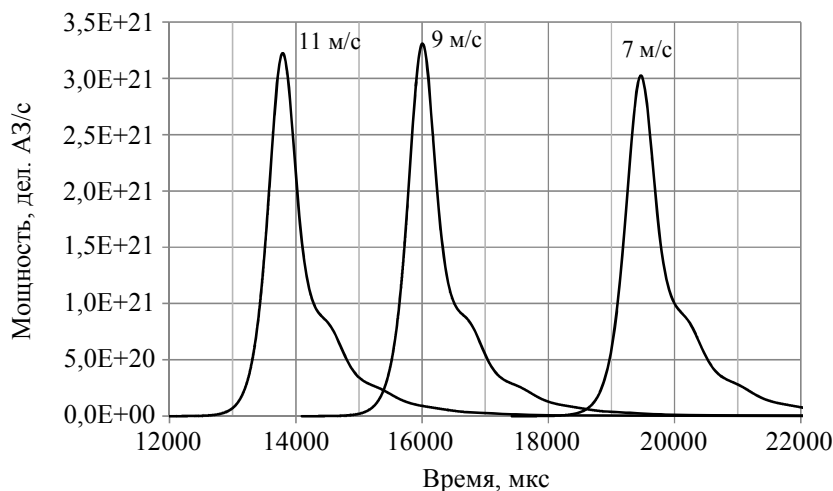


Рис. 5. Импульсы делений при перемещении блока ПК-100 с различной скоростью

Фактически одинаковая эффективность блоков ПК-100 и ПСК-100 (см. рис. 4) приводит к хорошему совпадению характеристик генерируемых импульсов делений. Перемещение блока со скоростью 9 м/с обеспечивает импульс делений с максимальной пиковой мощностью и минимальной полушириной. Скорости перемещения блока 7 и 11 м/с приводят к снижению пиковой мощности и увеличению полуширины импульса.

Расчетные параметры импульса делений, генерируемого в АЗ реактора с использованием блока ПК-100, приведены в табл. 1.

Таблица 1

*Расчетные параметры импульса делений, генерируемого в АЗ реактора с использованием блока ПК-100*

Параметры	Скорость движения ПК-100, м/с		
	7	9	11
Реализуемый максимум реактивности $\rho_{\max}$ , $\beta_{\text{эф}}$	0,255	0,266	0,270
Пиковая мощность импульса $P_{\max}$ , дел. АЗ/с	$3,2 \cdot 10^{21}$	$3,3 \cdot 10^{21}$	$3,0 \cdot 10^{21}$
Ширина импульса на половине высоты $\theta_{1/2}$ , мкс	598	554	557

Максимум реактивности  $\rho_{\max}$  характеризует максимально достижимую реактивность АЗ, которая реализуется при наличии двух факто-

ров: введения реактивности за счет перемещения БИБ и уменьшения ее за счет температурного гашения.

### Организация экспериментов и результаты исследований БИБ на реакторе БР-К1

С целью проверки расчетной функции реактивности БИБ, а также уточнения технических требований для исполнительного механизма (ИМ), были проведены экспериментальные исследования влияния блоков ПК-100 и ПСК-100 на АЗ реактора БР-К1. Были изготовлены два блока (макета) и технологическое приспособление для проведения исследований на реакторе. Конструктивная схема измерения функции реактивности БИБ на реакторе БР-К1 приведена на рис. 6.

Фактическая конструкция двух макетов представляла собой цилиндр: у ПК-100 – из полиэтилена, диаметром 98 мм и высотой 98 мм, который окружен внешней оболочкой кадмия толщиной 1 мм; у ПСК-100 – из пресс-смеси полипропилена с массовой долей окиси кадмия 6 %, диаметром 98 мм и высотой 98 мм, который также окружен внешней оболочкой кадмия толщиной 1 мм. В обоих случаях цилиндр размещен между стальными фланцами и стянут четырьмя шпильками.

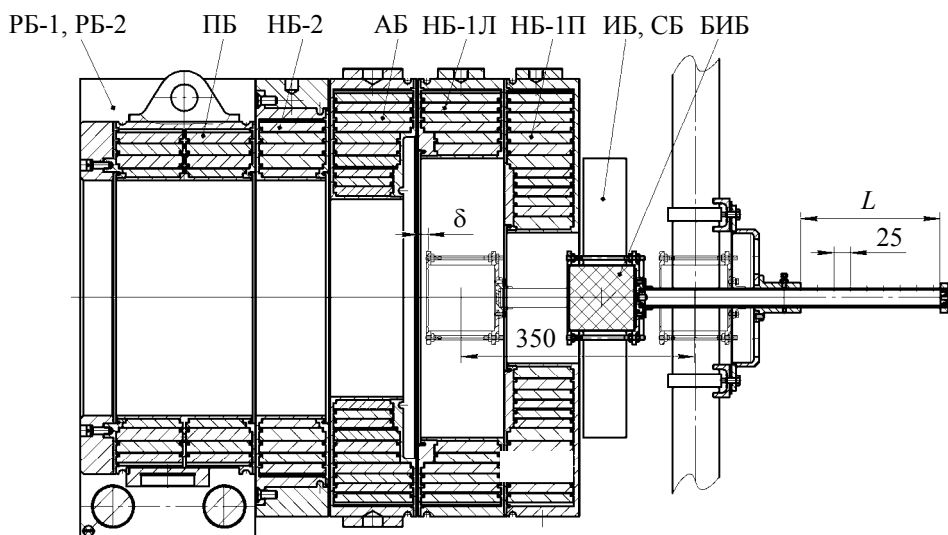


Рис. 6. Конструктивная схема измерения функции реактивности БИБ на реакторе БР-К1

Конструкция технологического приспособления предусматривала возможность дискретного перемещения блока ПК-100 или ПСК-100 в пределах 350 мм с шагом 25 мм. Измерение каждого положения БИБ проводилось в конфигурации АЗ с перемещением всех органов регулирования реактивности (ОРР) в необходимое состояние. При этом ввод ОРР в АЗ должен всегда обеспечивать реактивность в пределах от 0,05 до 0,30  $\beta_{эф}$ .

В результате проведенных исследований было установлено, что многократный вывод реактора в состояние фиксированной реактивности выше состояния критичности (как при выводе ОРР из АЗ с помощью механизмов, так и при аварийном сбросе) приводит к воспроизводимости реактивности не хуже 0,005  $\beta_{эф}$ . Результаты измерений, полученные при перемещении ПК-100 в АЗ реактора БР-К1, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений, полученные при перемещении ПК-100 в АЗ реактора БР-К1

s, мм	ИБ, мм	РБ-1, мм	РБ-2, мм	T1, с	T2, с	$\rho_1, \beta_{эф}$	$\rho_2, \beta_{эф}$	$\bar{\rho}, \beta_{эф}$
КГЗ↑, СБ↑, АБ↑, ПБ 10								
75	0,0	35,0	35,0	19,1	19,9	0,25567	0,24999	0,25283
		40,0	40,0	35,3	35,2	0,17817	0,17849	0,17833
		45,0	45,0	67,5	70,4	0,11461	0,11114	0,11287
50	0,0	25,0	25,0	18,4	19,8	0,26090	0,25068	0,25579
25	0,0	25,0	25,0	38,0	38,8	0,16999	0,16885	0,16942
0	0,0	25,0	25,0	70,2	70,9	0,11137	0,11056	0,11096
КГЗ↑, СБ↑, АБ↑, ПБ 20								
125	0,0	30,0	30,0	16,9	17,6	0,27303	0,26720	0,27012
		35,0	35,0	26,9	27,4	0,21043	0,20815	0,20929
		40,0	40,0	47,0	48,5	0,14777	0,14466	0,14621
100	0,0	20,0	20,0	37,9	39,4	0,17028	0,16606	0,16817
75	0,0	10,0	10,0	86,5	89,0	0,09524	0,09318	0,09421
КГЗ↑, СБ↑, АБ↑, ПБ 30								
150	0	15,0	15,0	25,9	26,2	0,21519	0,21374	0,21446
				26,3	26,0	0,21326	0,21470	0,21398
				25,6	26,3	0,21667	0,21326	0,21496
125	0,0	15,0	15,0	>1000	>1000	—	—	0,00361
175	100,0	15,0	15,0	36,1	37,5	0,17566	0,17144	0,17355
		20,0	20,0	60,4	62,2	0,12417	0,12159	0,12288
		25,0	25,0	132,5	130,7	0,06793	0,06869	0,06831
	0,0	25,0	25,0	17,3	17,7	0,26966	0,26640	0,26803
200	100,0	25,0	25,0	48,4	50,2	0,14486	0,14129	0,14308
	0,0	35,0	35,0	20,8	21,5	0,24394	0,23947	0,24174
225	100,0	25,0	25,0	61,9	64,1	0,12201	0,11899	0,12050
	0,0	35,0	35,0	22,8	23,6	0,23165	0,22713	0,22939
250	0,0	35,0	35,0	39,6	41,7	0,16552	0,16002	0,16277
300	0,0	25,0	25,0	62,9	61,1	0,12061	0,12315	0,12188
350	0,0	15,0	15,0	54,5	55,0	0,13349	0,13265	0,13307

В частной выборке данных с ПБ-30 обратим внимание на результат  $\rho = 0,00361 \beta_{\text{эф}}$ , полученный с использованием ОРУК-обработки регистрационного файла автономного канала контроля мощности с токовой камерой КНК-4 [5]. Результат получен в самом начале измерительного цикла. При отсутствии видимой нерегулярности в итоговом результате и значимых дополнительных затрат на дублирование в стандартном формате измерений было принято решение ограничиться полученным. Результаты измерений, полученные при перемещении ПСК-100 в АЗ реактора БР-К1, приведены в табл. 3. Для всех конфи-

гураций АЗ неизменным положением ОРР являлось полный ввод КГЗ в полость АЗ; подъем СБ и АБ до «жесткого» упора с помощью электромеханического привода.

Достаточно широкий допустимый интервал реактивности (от  $\sim 0,05$  до  $\sim 0,30 \beta_{\text{эф}}$ ) для проведения измерений и максимальная вносимая реактивность БИБ ( $\sim 1,1 \beta_{\text{эф}}$ ) потребовали использовать дополнительные положения ОРР: для ПБ равное 10, 20 и 30 мм; для ИБ равное 0 и 100 мм; для РБ необходимо было определить параметр  $\partial\rho/\partial h_{\text{РБ}}$ , где  $h_{\text{РБ}}$  – величина перемещения блока по указателю положения.

Таблица 3

*Результаты измерения, полученные при перемещении ПСК-100 в АЗ реактора БР-К1*

$s$ , мм	РБ-1, мм	РБ-2, мм	$T_1$ , с	$T_2$ , с	$\rho_1$ , $\beta_{\text{эф}}$	$\rho_2$ , $\beta_{\text{эф}}$	$\bar{\rho}$ , $\beta_{\text{эф}}$
КГЗ↑, СБ↑, АБ↑, ПБ = 10 мм, ИБ = 0 мм							
0	25,0	25,0	40,0	41,3	0,16444	0,16104	0,16274
	30,0	30,0	94,4	98,2	0,08889	0,08635	0,08762
25	30,0	30,0	51,8	53,2	0,13828	0,13575	0,13702
50	30,0	30,0	24,7	24,8	0,22124	0,22072	0,22098
75	45,0	45,0	45,3	46,4	0,15147	0,14905	0,15026
КГЗ↑, СБ↑, АБ↑, ПБ = 20 мм, ИБ = 0 мм							
75	5,0	5,0	30,9	30,0	0,19357	0,19709	0,19533
	10,0	10,0	55,0	56,2	0,13265	0,13066	0,13165
	15,0	15,0	135,0	139,0	0,06689	0,06530	0,06610
100	15,0	15,0	17,8	17,9	0,26559	0,26480	0,26520
125	35,0	35,0	23,4	23,7	0,22824	0,22658	0,22741
КГЗ↑, СБ↑, АБ↑, ПБ = 30 мм, ИБ = 0 мм							
125	5,0	5,0	55,5	56,0	0,13181	0,13098	0,13140
	10,0	10,0	114,3	118,4	0,07657	0,07443	0,07550
150	10,0	10,0	14,8	14,9	0,29253	0,29152	0,29202
	30,0	30,0	141,1	143,0	0,06450	0,06379	0,06414
175	30,0	30,0	24,6	24,4	0,22176	0,22281	0,22228
	35,0	35,0	38,2	38,8	0,16942	0,16772	0,16857
200	35,0	35,0	19,4	20,0	0,25350	0,24930	0,25140
225	35,0	35,0	21,2	22,0	0,24136	0,23639	0,23888
250	35,0	35,0	36,2	36,6	0,17535	0,17413	0,17474
275	30,0	30,0	46,3	47,1	0,14927	0,14756	0,14841
	20,0	20,0	18,7	19,1	0,25863	0,25567	0,25715
300	20,0	20,0	33,3	33,3	0,18482	0,18482	0,18482
325	20,0	20,0	54,8	56,7	0,13298	0,12985	0,13141
350	20,0	20,0	88,0	94,1	0,09399	0,08926	0,09163

Асимптотические периоды разгона реактора  $T1$  и  $T2$  устанавливали по показаниям штатных измерителей периода реактора. Соответствующую измеренным периодам реактивности определяли с использованием формализма обработки, рекомендованного в работе [6]. Для определения  $\partial\rho/\partial h_{РБ}$  по трем показаниям РБ использовали линейную *Excell*-аппроксимацию; для определения  $\partial\rho/\partial h_{РБ}$  по двум показаниям РБ использовали соотношение  $\Delta\rho/\Delta h_{РБ}$ .

Формат представления результатов определения  $\rho$  (пять десятичных знаков) выбран из соображений минимизации вычислительной погрешности и не отражает уровня физической погрешности полученных результатов. Для физической погрешности можно ожидать уровень порядка  $0,005 \beta_{эф}$ .

Методика преобразования выборки измеренных реактивностей, промежуточные и итоговые результаты процедуры преобразования исходных данных в искомые функционалы реактивности ПК-100 и ПСК-100 представлены в табл. 4.

На первом этапе были сформированы по три частные выборки данных (отдельно для ПК-100 и ПСК-100) с учетом возможности осуществления определенного нормирования в пределах выборки и установления связи между выборками. В табл. 4 это выборки с фиксированным положением ПБ 10, 20 и 30 мм. В графе  $s$  указываются входящие в выборку позиции ПК-100 (ПСК-100), в графе РБ – равнозначные позиции РБ-1 и РБ-2, в графе  $\rho$  – измеренная для указанной конфигурации АЗ реактивность.

На втором этапе осуществляли унификацию в пределах каждой частной выборки путем перехода от различных позиций РБ к унифицированной позиции РБ\*. Переход производился перерасчетом измеренной реактивности  $\rho$  в унифицированную реактивность  $\rho^*$  с использованием соответствующих значений  $\partial\rho/\partial h_{РБ}$  или способа пошагового сращения. При определении  $\rho^*$  (ПК-100) с использованием зависимости  $\partial\rho/\partial h_{РБ}$  от ПБ принималось:

$$\partial\rho/\partial h_{РБ} = -0,01400 \beta_{эф}/\text{мм при ПБ} = 10 \text{ мм,}$$

$$\partial\rho/\partial h_{РБ} = -0,01239 \beta_{эф}/\text{мм при ПБ} = 20 \text{ мм,}$$

$$\partial\rho/\partial h_{РБ} = 0,01052 \beta_{эф}/\text{мм при ПБ} = 30 \text{ мм.}$$

При определении  $\rho^*$  (ПСК-100) с использованием зависимости  $\partial\rho/\partial h_{РБ}$  от ПБ принималось:

$$\partial\rho/\partial h_{РБ} = -0,01502 \beta_{эф}/\text{мм при ПБ} = 10 \text{ мм,}$$

$$\partial\rho/\partial h_{РБ} = -0,01292 \beta_{эф}/\text{мм при ПБ} = 20 \text{ мм.}$$

На третьем этапе частные выборки значений  $\rho^*$  понятным из табл. 4 образом перенормировали в частные выборки значений  $\rho^{**}$ . На четвертом этапе осуществляли формирование обобщенных выборок реактивностей  $\rho(s)$  с нормировкой по условию  $\rho(0) = 0$ . Принцип сведения значений  $\rho^{**}$  частных выборок в обобщенную выборку  $\rho(s)$  с  $\rho(0) = 0$  также понятен из табл. 4.

Расчетные и экспериментальные зависимости изменения реактивности от перемещения БИБ различной конструкции в АЗ реактора БР-К1 представлены на рис. 6.

Результаты эксперимента с блоком ПК-100 были использованы для расчета параметров импульсов делений на мгновенных нейтронах, формируемых при линейном вводе реактивности на скоростях 7, 9 и 11 м/с. Детализацию функции реактивности ПК-100 при перемещении от 0 до 350 мм осуществляли с использованием кубической сплайн-интерполяции по стандартным программам CSDEC и CSDEK. В табл. 5 представлены расчетные параметры импульса делений с блоком ПК-100.

Расчетные импульсы делений, время смещения пика мощности при генерировании с помощью ПК-100 приведены на рис. 7. В момент старта БИБ размещался в координате  $s = 0$ . При этом начальная мощность была взята равной  $10^{10}$  дел. АЗ/с, а начальная реактивность такой, чтобы обеспечить параметры импульсов, близкие к параметрам номинального импульса (энерговыведение  $3 \cdot 10^{18}$  делений, полуширина 600 мкс).

Из рис. 7 видно, пик мощности в экспериментальном варианте БИБ при скорости перемещения блока 9 м/с формируется на  $\sim 7$  мс позже, чем в расчетном варианте БИБ. Уровень согласования расчета и эксперимента



быстрой части импульсов делений, генерируемых с помощью ПК-100, представлен на рис. 8.

Построение графиков проведено совмещением значений пиковых мощностей в импульсах.

Таблица 4

*Результаты преобразования выборок измеренных реактивностей в результирующие функционалы реактивности ПК-100 и ПСК-100*

$s$ , мм	ПБ, мм	РБ, мм	$\rho$ , $\beta_{эф}$	РБ*, мм	$\rho^*$ , $\beta_{эф}$	$\rho^{**}$ , $\beta_{эф}$	$\rho(s)$ , $\beta_{эф}$
ПК-100							
0	10	25	0,11096	25	0,11096	0,00000	0,00000
25		25	0,16942	25	0,16942	0,05846	0,05846
50		25	0,25579	25	0,25579	0,14483	0,14483
75		35	0,25283	25	0,39283	0,28187	0,28187
75	20	10	0,09421	10	0,09421	0,00000	0,28187
100		20	0,16817	10	0,29207	0,19786	0,47973
125		30	0,27012	10	0,51792	0,42371	0,70558
125	30	15	0,00361	25	-0,10159	0,00000	0,70558
150		15	0,21496	25	0,10976	0,21135	0,91693
175		25	0,26803	25	0,26803	0,36962	1,07520
200		35	0,24174	25	0,34694	0,44853	1,15411
225		35	0,22939	25	0,33459	0,43618	1,14176
250		35	0,16277	25	0,26797	0,36956	1,07514
300		25	0,12188	25	0,12188	0,22347	0,92905
350		15	0,13307	25	0,02787	0,12946	0,83504
ПСК-100							
0	10	30	0,08762	30	0,08762	0,00000	0,00000
25		30	0,13702	30	0,13702	0,04940	0,04940
50		30	0,22098	30	0,22098	0,13336	0,13336
75		45	0,15026	30	0,37556	0,28794	0,28794
75	20	15	0,06610	15	0,06610	0,00000	0,28794
100		15	0,26520	15	0,26520	0,19910	0,48704
125		35	0,22741	15	0,44241	0,37631	0,66425
125	30	10	0,07550	10	0,07550	0,00000	0,66425
150		10	0,29202	10	0,29202	0,21652	0,88077
150		30	0,06414	30	0,06414	0,00000	0,88077
175		30	0,22228	30	0,22228	0,15814	1,03891
275		30	0,14841	30	0,14841	-0,07387	0,96504
175		35	0,16857	35	0,16857	0,00000	1,03891
200		35	0,25140	35	0,25140	0,08283	1,12174
225		35	0,23888	35	0,23888	0,07031	1,10922
250		35	0,17474	35	0,17474	0,00617	1,04508
275		20	0,25715	20	0,25715	0,00000	0,96504
300		20	0,18482	20	0,18482	-0,07233	0,89271
325		20	0,13141	20	0,13141	-0,12574	0,83930
350	20	0,09163	20	0,09163	-0,16552	0,79952	

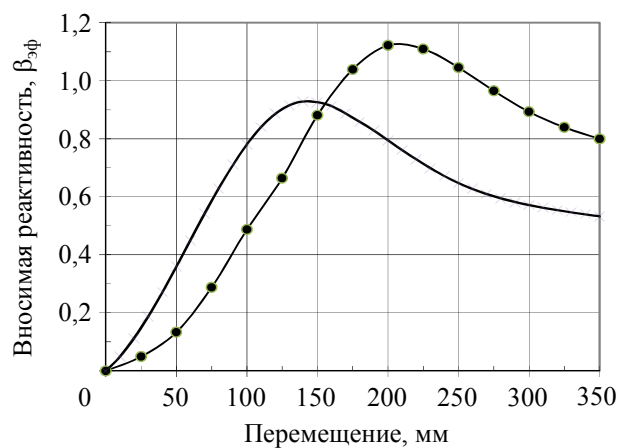
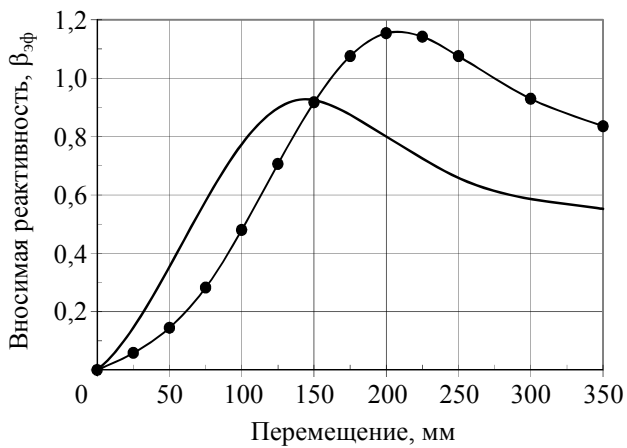


Рис. 6. Расчетные (—) и экспериментальные (●) зависимости вносимой реактивности от перемещения блока ПК-100 (а) и ПСК-100 (б) в АЗ реактора БР-К1

Таблица 5

Расчетные параметры импульса делений с блоком ПК-100

Параметры	Скорость движения ПК-100, м/с		
	7	9	11
Реализуемый максимум реактивности $\rho_{\max}$ , $\beta_{\text{эф}}$	0,251	0,263	0,268
Пиковая мощность импульса $P_{\max}$ , дел. АЗ/с	$2,88 \cdot 10^{21}$	$3,21 \cdot 10^{21}$	$3,23 \cdot 10^{21}$
Ширина импульса на половине высоты $\theta_{1/2}$ , мкс	622	568	560

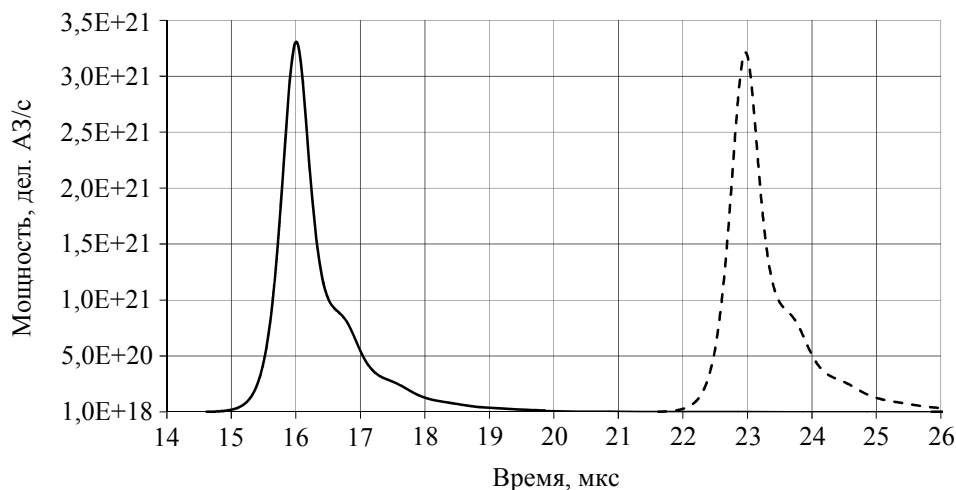


Рис. 7. Расчетные импульсы делений на мгновенных нейтронах, генерируемые при перемещении блока ПК-100 со скоростью 9 м/с: — — по данным расчета; ---- — по данным эксперимента

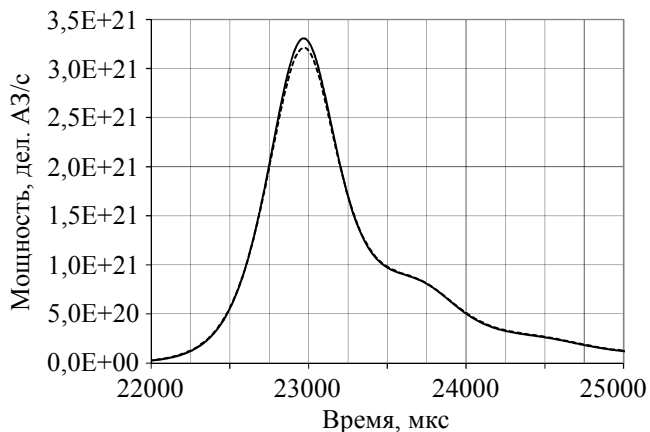


Рис. 8. Импульс делений на мгновенных нейтронах, генерируемый при перемещении блока ПК-100 со скоростью 9 м/с: — по данным расчета; - - - - по данным эксперимента

### Исполнительный механизм БИБ

Из приведенного выше материала следует, что реактор БР-К1М должен быть оснащен исполнительным механизмом (ИМ) БИБ, предназначенным для генерации импульса делений на мгновенных нейтронах. Расположение ИМ БИБ горизонтальное, вдоль оси АЗ реактора. В режиме стартовой подготовки реактора медленное перемещение БИБ в обоих направлениях желательно проводить с помощью электромеханического привода. Для получения скорости  $\sim 9$  м/с в момент генерирования импульса делений целесообразно использовать пневматический привод. В виду незначительной массы блока подвижная часть механизма приобретает кинетическую энергию не более 300 Дж, что позволяет рассматривать пневматический механизм как комбинированное устройство, обеспечивающее ускоренное перемещение и торможение.

Экспериментально получено, вносимая реактивность макетами ПК-100 и ПСК-100 (см. рис. 6) достигает максимального значения на расстоянии 200 мм от его начального положения в АЗ и составляет 1,15 и 1,12  $\beta_{эф}$ , соответственно.

При разработке конструкции ИМ это расстояние можно рассматривать как базовое. Из конструктивных соображений рабочий ход механизма выбран равным 250 мм. Из рис. 6

видно, что такой рабочий ход обеспечивает реализацию высокоскоростного движения на базовом участке перемещения с последующим торможением подвижной части. Так как ИМ БИБ расположен горизонтально, то для получения необходимого стартового ускорения подвижной части пневматический привод должен быть снабжен фиксатором.

Параметры электромеханического привода (скорость перемещения подвижной части, точность позиционирования и др.) можно определить, используя экспериментальные данные вносимой реактивности блоком (см. рис. 6) и рекомендации работы [7].

Предварительные параметры пневматического привода рассчитывали согласно рекомендациям работы [8]. В расчетной модели диаметр цилиндра составлял 50 мм; ход поршня – 250 мм; объем ресивера – 1 л; давление газа (воздух) в ресивере – 2 МПа; внутренний диаметр трубопровода – 10 мм; усилие механического фиксатора  $\sim 1000$  Н. Расчетные зависимости скорости и перемещения подвижной части от времени, представлены на рис. 9.

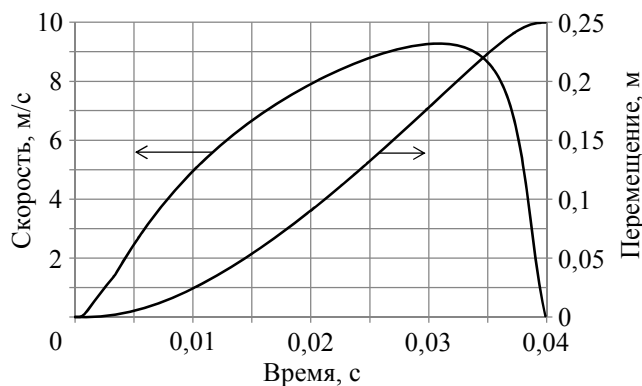


Рис. 9. Расчетные зависимости скорости и перемещения подвижной части от времени

Расчетные зависимости скорости перемещения и скорости изменения реактивности при перемещении ПК-100 в АЗ реактора БР-К1 представлены на рис. 10.

Из рис. 9 и 10 видно, что рассматриваемый пневматический механизм способен обеспечить подвижной части требуемую скорость в координате максимальной реактивности, а также эффективно ее затормозить после генерирования импульса делений.

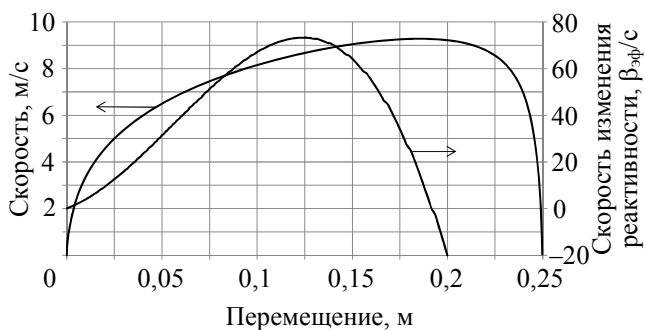


Рис. 10. Расчетные зависимости скорости и скорости изменения реактивности при перемещении ПК-100 в АЗ реактора БР-К1

Рассмотренные варианты ПК-100 и ПСК-100 конструктивного исполнения БИБ не имеют существенных отличий по массогабаритным параметрам и вводимой реактивности в АЗ реактора, что позволяет сделать вывод о возможности практического применения пневматического ИМ в части реализации требуемой скорости.

### Заключение

Рассмотрены физико-технические аспекты создания для модернизируемого реактора БР-К1М дополнительного ИМ БИБ. Блок обеспечивает генерирование импульсов делений на мгновенных нейтронах до  $3,0 \cdot 10^{18}$  дел. АЗ длительностью на половине пиковой мощности  $\sim 600$  мкс. При этом динамические нагрузки на конструкцию реакторного стенда снижены с  $\sim 4,0$  кДж при перемещении штатного ИБ на реакторе БР-К1 до  $\sim 100$  Дж при перемещении БИБ на реакторе БР-К1М.

Рассмотрены два варианта конструкции компактного трансформера в качестве регулятора реактивности, преобразующего быстрые реакторные нейтроны в тепловые с последующим их поглощением. Расчеты и эксперименты показали, что с помощью БИБ, масса которого  $\sim 1,0$  кг, максимальная вносимая реактивность  $\sim 1,1 \beta_{эф}$ , возможно генерировать максимальные импульсы делений на мгновенных нейтронах с начальной стартовой мощности реактора  $1 \cdot 10^{10}$  дел. АЗ/с, при скорости перемещения блока  $\sim 9$  м/с. Также показано,

что выявленное расхождение расчетных и экспериментальных функциональных представлений не влияет на процессы генерации импульса делений.

Представлены параметры пневматического привода для высокоскоростного перемещения БИБ, показана возможность реализации требуемой скорости на участке максимума вводимой реактивности и торможения подвижной части на пути 250 мм.

### Список литературы

1. Босамыкин В. С., Малинкин А. А., Колесов В. Ф. и др. Конструкция и физико-технические характеристики бустер-реактора БР-К1 // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1996. Вып. 1. С. 3–12.
2. 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.
3. 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 // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2011. Вып. 1. С. 17–24.
4. Хоружий В. Х., Кошелев А. С., Колесов В. Ф. Интегрирование уравнений кинетики импульсного реактора на быстрых нейтронах жестко-устойчивыми методами Гира // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1989. Вып. 1. С. 8–14.
5. Кошелев А. С., Арапов А. В., Овчинников М. А. О возможности создания специализированного ОРУК-реактиметра с токовым детектором нейтронов // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2015. Вып. 4. С. 39–48.
6. Кошелев А. С. К выбору параметров запаздывающих нейтронов для импульсных реакторов на быстрых нейтронах // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1998. Вып. 2. С. 19–24.

7. Никитин И. А. Некоторые вопросы проектирования исполнительных механизмов импульсных ядерных реакторов // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2013. Вып. 3. С. 94–101.

8. Никитин И. А. Пневматические исполнительные механизмы рабочих органов системы управления и защиты импульсных ядерных реакторов // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2007. Вып. 2. С. 47–58.

Контактная информация –

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

Статья поступила в редакцию 20.06.18.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2018, вып. 4, с. 116–128.