

ПУТИ МОДЕРНИЗАЦИИ БР-К1 ДЛЯ РАБОТЫ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

**А. А. Девяткин, С. В. Воронцов, В. Ф. Колесов, И. А. Никитин, В. Х. Хоружий,
А. С. Кошелев, В. Б. Гречушкин**

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

Представлена работа по подготовке к модернизации реактора БР-К1. Дано краткое описание реактора и технических проблем, препятствующих его эксплуатации в импульсном режиме, а также путей решения этих проблем: замены стальных чехлов на титановые для снижения деформаций и напряжений в них; установки отражателя нейтронов для снижения напряжений путем уширения импульса; введения быстрого импульсного блока для снижения ударных нагрузок и реализации импульса с мощности.

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

WAYS OF MODERNISATION OF BR-K1 FOR ENABLING OF OPERATION IN PULSE MODE / A. A. DEVIATKIN, S. V. VORONTSOV, V. F. KOLESOV, I. A. NIKITIN, V. KH. KHORUZHNY, A. S. KOSHELEV, V. B. GRECHUSHKIN // The works devoted to modernization of BR-K1 pulse reactor are given in this article. The existing design of reactor and problems interfering with its operation in pulse mode are described in the first part. The ways of the above problems solution are described in the following parts: replacement of steel cases with those of titanium alloy to reduce stress and deformation, installation of neutron reflector to reduce stresses in reactor core through increasing pulse duration, installation of new fast pulse unit to reduce shock loads and enable pulse generation under constant power mode.

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

История создания реактора БР-К1.

Конструкция активной зоны

Бустер-реактор «Каскад», модификация 1 (БР-К1) – аperiodический импульсный реактор (АИР) самогасящегося действия (рис. 1) – был разработан и введен в эксплуатацию в РФЯЦ-ВНИИЭФ в 1995 году. Главным стимулом создания установки являлась идея уменьшения с помощью двухсекционных систем с односторонней нейтронной связью длительности импульса в АИР с большим объемом для облучения образцов [1]. По начальному проекту [2] (1980–1981 гг., авторы – В. Ф. Колесов, А. А. Малинкин) БР-К представлял со-

бой реакторную установку с двумя связанными цилиндрическими активными зонами (АЗ). АЗ1 из сплава нептуния-237 с галлием размещалась в полости внешней АЗ2, выполненной из сплава урана 36 %-ного обогащения с молибденом (массовая доля молибдена 9 %). АЗ1 и АЗ2 были разделены слоем вольфрама эффективной толщины 13-14 см. АЗ1 имела форму цилиндра диаметром 230 мм и длиной 250 мм, масса нептуниевого сплава ~125 кг. АЗ2 в форме полого цилиндра с наружным диаметром 700 мм и длиной 1050 мм содержала ~2400 кг уран-молибденового сплава.

Предполагалось, что при номинальных токе и энергии электронов от ускорителя

ЛИУ-30 в результате фотоядерных реакций возникает $\sim 10^{15}$ первичных нейтронов. Для проводки тормозного излучения от ускорителя к АЗ1 предполагался специальный канал в области вольфрамового слоя, заполненный замедлителем нейтронов типа гидрида лития или бериллия, хорошо пропускающим тормозное излучение. Допустимые температуры и энерговыделения ограничивались уровнями: 500 °С и 7,6 МДж в АЗ1; 680 °С и 120 МДж в АЗ2 соответственно. Импульс БР-К при указанных энерговыделениях в бустерном режиме должен был иметь длительность ~ 110 мкс, а при пониженном энерговыделении до ~ 50 МДж в АЗ2 – ~ 20 мкс.



Рис. 1. Внешний вид реактора БР-К1

В начале 1980-х гг. было развернуто строительство БР-К, но не закончено из-за осложнений, связанных с получением необходимого количества нептуния, и слабой надежды получения источника нейтронов на уровне 10^{15} . Поэтому был реализован вариант реактора БР-К1 без внутренней АЗ из нептуния [3].

Это обычный односекционный АИР, отличающийся горизонтальной ориентацией центральной оси 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 (массовая доля молибдена 9 %). Масса сплава в АЗ равна 1511 кг. По аналогии с АИР БИГР

и БР-1 АЗ реактора имеет кольцевую структуру. Топливный материал АЗ разбит на диски, а диски – на коаксиальные кольца. Диски по одному или попарно заключены в герметичные заполненные гелием чехлы (блоки) из нержавеющей стали. Топливные кольца в блоках подвешены на круговых выступах.

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 сильновозмущающими загрузками. Каждый из пяти содержащих топливо блоков оснащен экраном из сплава титана с гадолинием. Экран изготовлен из листа толщиной 2 мм и установлен внутри чехла. Регулирующие блоки 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, каждый имеет форму прямоугольного параллелепипеда размером 65×204×420 мм. Эти блоки изготовлены из бериллия и заключены в титановые чехлы. Все подвижные блоки АЗ (АБ, ПБ, ИБ, СБ, РБ-1, РБ-2) выполняют функции органов регулирования реактивности. АБ, ИБ, СБ перемещаются в вертикальном направлении на расстояниях 450, 580 и 420 мм соответственно. ПБ перемещается горизонтально на расстоянии 82 мм, РБ-1 и РБ-2 – горизонтально на расстоянии 71 мм. Конструкция реактора обеспечивает независимое падение АБ, ИБ, СБ под действием силы тяжести и независимое друг от друга перемещение ПБ, РБ-1 и РБ-2, обеспечивая тем самым срабатывание аварийной защиты и перевод реактора в заглушенное состояние. При полностью разведенных блоках подкритичность АЗ равна $\sim 18\beta_{эф}$.

АЗ, механизмы перемещения блоков регулирования реактивности, элементы систем технологического обеспечения работы реак-

тора скомпонованы на реакторном стенде. Конструкция стенда предусматривает возможность его транспортировки вдоль рельсовой колеи на базе ~30 м. Полностью собранный стенд имеет ширину 1,4 м, длину 2,82 м, высоту 3,08 м и массу 7 т.

Присутствие значительного внутреннего источника нейтронов, связанного со спонтанными делениями урана-238, затрудняет реализацию режима генерирования импульсов с остановкой импульсного блока на высоте центра АЗ. Поэтому используется пролетный режим со скоростью ИБ до 4,2 м/с.

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

Таблица 1

Проектные характеристики БР-К1

Параметр	Значение
Энерговыведение в АЗ, дел.	до $4 \cdot 10^{18}$
Диаметр центрального канала по топливу, мм	355
Флюенс нейтронов в центральном канале, см^{-2}	до $2 \cdot 10^{15}$
Флюенс нейтронов у внешней поверхности АЗ, см^{-2}	до $4 \cdot 10^{14}$
Ширина импульса на половине высоты, мкс	~ 200

Для загрузки объектов в полость АЗ служит специальный контейнер горизонтальной загрузки (КГЗ), кожух которого оснащен экраном из насыпного карбида бора. Внутренние размеры полости контейнера: диаметр – 310 мм, длина – 360 мм. В целях трансформации излучений реактора в контейнере могут быть установлены n -, γ -конвертор или свинцовый фильтр.

Недостатки существующей конструкции АЗ БР-К1. Меры по модернизации установки

Герметичные чехлы из нержавеющей стали, использованные в БР-К1, являются наиболее распространенным средством защиты элементов АЗ АИР от коррозии и применяются во многих реакторах.

Чехлы и корпус АИР подвергаются воздействию переменных во времени и простран-

стве температур и квазистатических напряжений, которые могут приводить к выпучиванию и короблению этих элементов. Однако к реальным осложнениям в работе АИР эти явления не приводили. Лишь при выполнении физического пуска БР-К1 разработчики столкнулись с деформациями чехлов, превышающими их привычный масштаб и создающими препятствия нормальной работе реактора при высоких уровнях стационарной мощности или энергосвободы за импульс [4].

Деформации в чехлах могут приводить к потере заложенного в конструкцию АЗ гарантированного зазора 3 мм между подвижными (АБ, ИБ и СБ) и неподвижными (НБ-2, НБ-1Л и НБ-1П) блоками. На схеме структурных блоков реактора БР-К1 (рис. 2) показаны места блокировки движения АБ, ИБ и СБ.

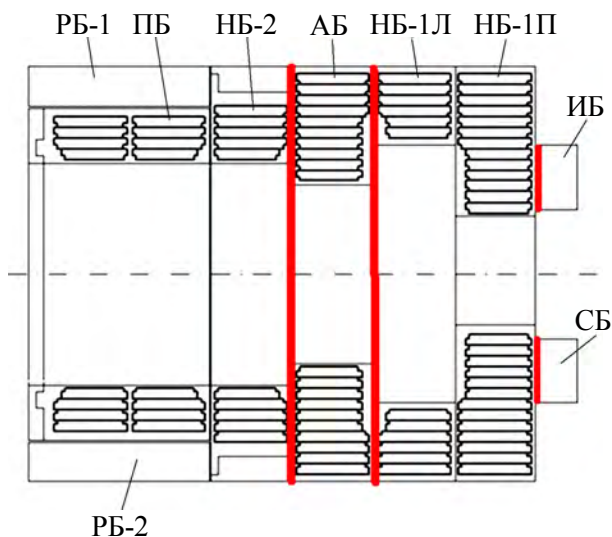


Рис. 2. Схема структурных блоков реактора БР-К1 (вид сверху): — — — места блокировки движения АБ, ИБ и СБ

В соответствии с экспериментальными данными, полученными при физическом пуске, и данными расчетного анализа предусмотренные проектом технические характеристики реактора были ограничены (табл. 2).

Перед возобновлением эксплуатации реактора в 2005 г. (после аварии на ФКБН-2М все АИР ВНИИЭФ были временно остановлены) импульсный режим был исключен за счет демонтажа ветви высокого давления в пневмоприводе ИБ, что было оформлено техническим решением.

Характеристики реактора БР-К1 существующей конструкции

Режим	Параметр	Значение
Импульсный	Энерговыведение в АЗ, дел. (МДж)	до $1,0 \cdot 10^{18}$ (~ 30)
	Флюенс нейтронов в опорной точке КГЗ, см^{-2}	$5,1 \cdot 10^{14}$
	Плотность потока нейтронов в опорной точке КГЗ, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$2,30 \cdot 10^{17}$
	Ширина импульса на половине высоты, мс	1,2
	Средняя энергия нейтронов, МэВ	0,78
Статический	Мощность, кВт (дел./с)	до 10 ($3,3 \cdot 10^{14}$)
	Максимальная температура чехла, °С:	
	НБ-1П	120
	НБ-1Л	115
	АБ	100
	НБ-2	85
ПБ	110	

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. Направления предлагаемой модернизации очевидны:

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

- исключение использования при изготовлении чехлов кованых 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».

Такая модернизация позволит исключить ограничения на параметры АИР БР-К1 и при этом потребует намного меньше средств и времени, чем, например, разработка и изготовление нового реактора.

Модернизация блоков АЗ БР-К1. Выбор материалов. Расчеты напряжений и деформаций в чехлах

В существующей конструкции АЗ топливные элементы (ТЭ) заключены в герметичные, заполненные гелием чехлы из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Сталь отличается сравнительно невысокими механическими характеристиками и в то же время высоким значением коэффициента температурного расширения.

Проблема уменьшения деформаций в чехлах может быть решена при оптимизации конструкции и применении материала с лучшими термомеханическими свойствами, например, жаропрочного титанового сплава. Результаты многолетних работ по комплексному исследованию работоспособности и ресурса титановых сплавов, проведенных ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» [5], показывают:

- по уровню наведенной радиоактивности и скорости ее спада во времени сплавы на основе титана являются максимально благоприятными конструкционными материалами,

обеспечивающими высокую экологическую безопасность при длительной эксплуатации и решающими проблему обращения с радиоактивными отходами;

– по комплексу физико-механических свойств, коррозионной и радиационной стойкости (до флюенса $3 \cdot 10^{20}$ н/см²) титановые сплавы и их сварные соединения соответствуют требованиям, предъявляемым к сталям ядерного класса ядерных энергетических установок;

– титановые сплавы в качестве конструкционного материала могут быть использованы для изготовления корпусов реакторов, парогенераторов, теплообменников и другого оборудования АЭС различного назначения.

В сравнении с нержавеющей сталью титановые сплавы отличаются высокой прочностью, в ~2 раза меньшим коэффициентом температурного расширения и высокой коррозионной стойкостью. Сплавы титана технологичны. Они хорошо куются, штамуются и прокатываются в горячем состоянии, хорошо свариваются аргонодуговой сваркой и с помощью электронно-лучевых установок (ЭЛУ). Внутренние напряжения в сварных швах титана снимаются путем отжига.

В качестве материала чехлов для реактора БР-К1 был выбран сплав ВТ20 [6]. Чехлы долж-

ны быть изготовлены из плит (прокат толщиной 15-20 мм) с последующей сваркой на ЭЛУ. Аргументация выбора данного сплава такова:

– он относится к псевдо- α -сплавам титана с небольшим содержанием β -стабилизаторов в пределах их растворимости в α -фазе;

– имеет практически однофазный состав и многокомпонентное легирование, что обеспечивает относительно высокую прочность и высокую жаропрочность при удовлетворительной пластичности;

– отличается большим содержанием алюминия и циркония, что обеспечивает высокое сопротивление ползучести;

– в области сварных швов имеет механические свойства, незначительно отличающиеся от свойств основного металла;

– не требует термической обработки сварных конструкций, необходимой для титановых сплавов на основе $\alpha+\beta$ -фазы;

– в связи с низким содержанием β -стабилизирующих элементов (Mo, Fe) подвержен лишь малым фазовым превращениям в сварных швах при нагреве;

– требует отжига сварных швов лишь в целях снижения уровня остаточных напряжений.

В табл. 3 приведены термомеханические характеристики нержавеющей стали и титанового сплава.

Таблица 3

Термомеханические характеристики материала

Характеристика	Сталь 12X18H10T	Титановый сплав ВТ20
Модуль упругости, ГПа	200	110
Коэффициент Пуассона	0,28	0,33
Плотность, г/см ⁻³	7,9	4,48
Теплоемкость, Дж/(г·град)	0,505	0,502
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град)	15,1	$\lambda(T) = (7,12 + 0,0144T)^*$
Коэффициент температурного расширения, град ⁻¹	$16,2 \cdot 10^{-6}$	$\alpha(T) = (8,3 + 0,00066T) \cdot 10^{-6}*$
Влияние температуры на прочность материала:		
σ_B , МПа, при °С:	20	1150
	400	850
	600	720
$\sigma_{0,2}$, МПа, при °С:	20	1030
	400	720
	600	550

* Температура (T) приведена в °С.

Количество, комплектация, способ подвески и конструкция ТЭ в структурных блоках АЗ остаются без изменений. Цилиндрические поглотители из титан-гадолиниевого сплава в модернизированной конструкции АЗ не применяются вследствие необходимости использования сегментов отражателей нейтронов.

Для оценки величины деформаций и напряжений в новых чехлах было проведено моделирование первых 600 секунд охлаждения активной зоны после максимального импульса с числом делений $3 \cdot 10^{18}$. Изучалось поведение чехлов из титанового сплава и нержавеющей стали.

В качестве представительных показателей напряжений исследовалось максимальное из главных напряжений σ_i ($i = 1, 2, 3$) и эквивалентное напряжение (напряжение по Мизесу) σ_{eqv} . Также исследовалась наибольшая величина деформации (смещения торцевых пластин) чехлов. Максимальные значения напряжений и смещений в блоках АЗ БР-К1 при использовании различных материалов приведены в табл. 4.

Анализ данных табл. 4 показывает, что титановые сплавы в сравнении с нержавеющей сталью кардинально решают проблему деформаций в блоках АЗ. Суммарные смещения торцевых пластин соседних чехлов НБ-1Л и АБ не превышают начального зазора между блоками, 0,3 см.

Нагрев топливных элементов и напряжения в них. Безопасная полуширина импульса. Сегменты отражателей нейтронов вокруг АЗ реактора для уширения импульса и снижения напряжений в ТЭ

В процессе моделирования напряжений в чехлах внимание привлекли напряжения и нагрев непосредственно ТЭ (колец) реактора. Было показано, что в отдельных элементах температуры разогрева в максимальном импульсе шириной на полувысоте 200 мкс могут достигать 600 °С. Для оценки напряженно-деформированного состояния ТЭ был проведен расчет напряжений в ТЭ двух наиболее нагруженных блоков реактора, АБ и НБ-1П, при различных темпах нагрева.

В табл. 5 приведены эквивалентные напряжения по Мизесу (далее – напряжения) при различных темпах нагрева ТЭ. По результатам расчета была подобрана полуширина импульса 600 мкс, при которой напряжения не превышают предела текучести материала, обозначенная как «безопасная» полуширина импульса. Из табл. 5 видно, что при длительности импульса 200 мкс напряжения отдельных ТЭ (выделено жирным шрифтом) превышают статический предел прочности уран-молибденового сплава (~330 МПа при 600 °С).

Таблица 4

Максимальные напряжения и смещения в блоках АЗ БР-К1

Блок	Нержавеющая сталь				Титановый сплав ВТ20			
	Расчетные смещения, см		Напряжения, МПа		Расчетные смещения, см		Напряжения, МПа	
	min	max	σ_1	σ_{eqv}	min	max	σ_1	σ_{eqv}
НБ-1Л	-0,17	0,168	1625	1190	-0,065	0,06	275	375
АБ	0,53	0,025	810	1200	-0,155	0,018	155	225
НБ-1П	-0,57	0,22	3300	2800	-0,175	0,08	640	540

Эквивалентные напряжения по Мизесу в ТЭ при различных темпах нагрева

Номер* кольца	Напряжения при ширине импульса на половине высоты, МПа		Напряжения при ширине импульса на половине высоты, МПа	
	200 мкс	600 мкс	200 мкс	600 мкс
	АБ		НБ-1П	
6	268	70	34	21
7	560	85	50	35
8	660	95	67	53
9	630	102	82	68
10	760	115	93	81
11	–	–	122	90
12	–	–	170	150
13	–	–	430	310

* Нумерация колец приведена от периферии к оси блока.

Как было сказано выше, модернизация реактора БР-К1 предполагает замену материала чехлов блоков АЗ. Если ограничиться лишь этой заменой, то реактивность реактора, вследствие меньшей плотности титановых сплавов по сравнению с нержавеющей сталью и меньшей толщины обечаек чехлов, уменьшится примерно на $3,3 \beta_{эф}$, поэтому возникает задача дооснащения реактора внешним отражателем. Отражатель также решает проблему достижения «безопасной» полуширины импульса.

Внешний отражатель должен:

- компенсировать убыль реактивности $3,3 \beta_{эф}$;
- обеспечить уширение импульса до 600 мкс;
- иметь оптимальные массогабаритные параметры;
- не вызывать перегрева внешних ТЭ тепловыми нейтронами.

Проведенные расчеты методом Монте-Карло показали, что водородосодержащие материалы вызывают слишком большой перегрев,

металлический отражатель для требуемой полуширины не вписывается в массогабаритные характеристики установки, а необходимыми характеристиками обладает графитовый отражатель. Графит обладает оптимальной плотностью и массой ядра, при которой он остается эффективным отражателем, но при этом имеет достаточно малую степень замедления, чтобы не перегревать внешние ТЭ активной зоны реактора. Конструкция отражателя приведена на рис. 3.

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). В отражателе могут использоваться блоки из графита марки РБМК плотностью не менее $1,6 \text{ г/см}^3$. Суммарная масса графита верхнего сегмента составляет 384 кг, суммарная масса графита каждого бокового сегмента – 576 кг. Среднее значение перегрева поверхностей ТЭ, обращенных к отражателю, ~13 %.

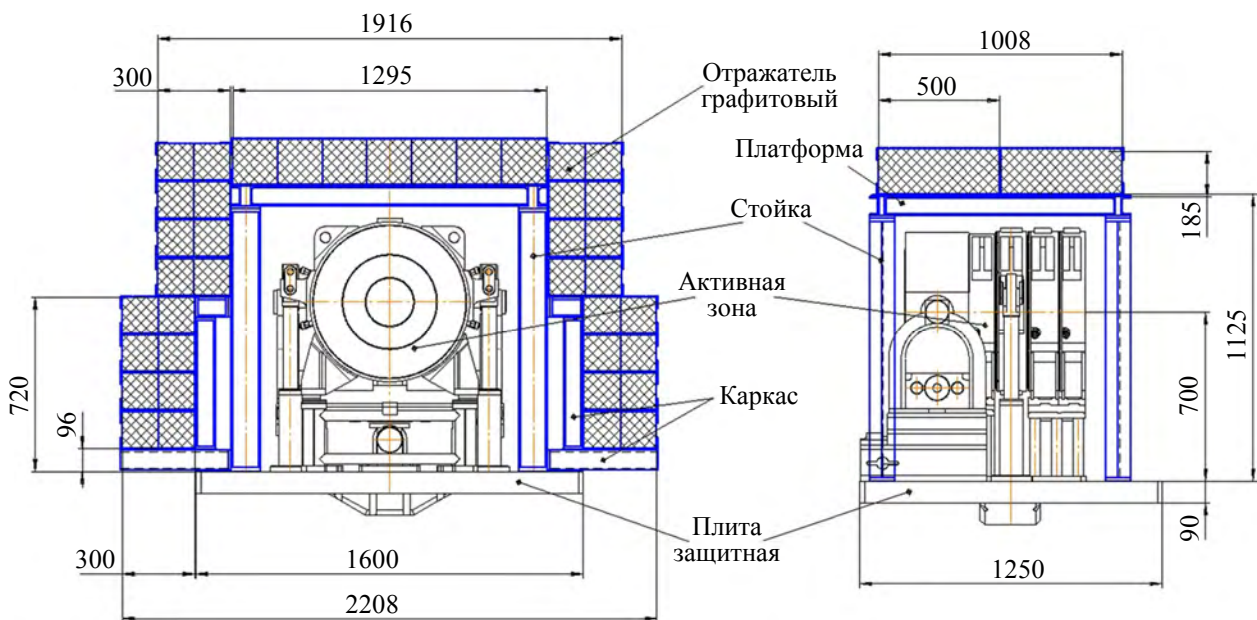


Рис. 3. Конструкция сегментов отражателя

Высокоэффективный модулятор реактивности (быстрый импульсный блок)

Система управления и генерации импульса реактора также была рассмотрена в ходе модернизации установки. Иногда, в интересах заказчика, необходимо провести импульсное облучение сразу после статического или облучение объекта, имеющего собственный нейтронный фон. В таком случае для генерации импульса требуется быстрый ввод реактивности и, соответственно, максимально легкий и быстро перемещающийся импульсный блок.

Анализ процедуры генерирования импульсов делений в режиме пролета штатного ИБ показал принципиальную возможность достижения поставленной цели при скорости перемещения ~ 20 м/с. При массе разгоняемого объекта (собственно ИБ и подвижной части пневмопривода) ~ 15 кг кинетическая энергия движущейся системы составляет 3000 Дж. Возникающие ударные нагрузки на элементы конструкции стенда реактора не влияют на работоспособность его механизмов, но могут создать определенные трудности в плане требуемой фиксации реактивности АЗ на стадии разгона ИБ.

С учетом опыта реализации высокоэффективного модулятора реактивности (ВМР) незначительной массы на реакторах БР-1, БАРС-5, -6, была рассмотрена реализация аналогичного

ВМР применительно к реактору БР-К1. В качестве исходной позиции в АЗ принято расположение центра ВМР в форме правильного цилиндра (диаметр и высота 100 мм) в центре блока НБ-1Л на центральной оси АЗ, как это показано на рис. 4. Направление перемещения ВМР – на вывод из АЗ в сторону блока НБ-1П. Материал ВМР – пресс-материал из смеси полипропилена с окисью кадмия (массовая доля 10 %).

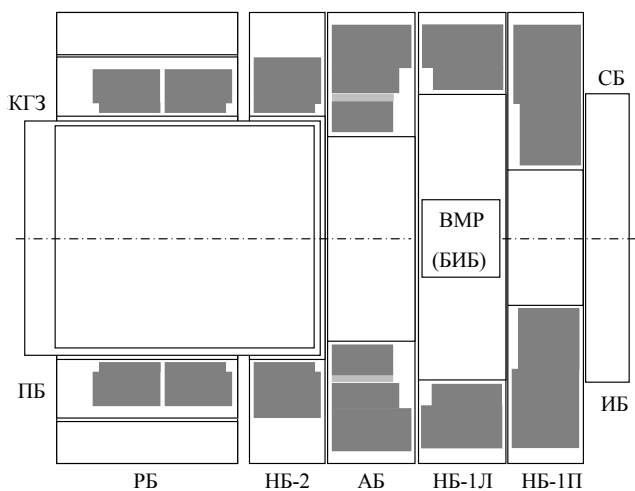


Рис. 4. Модулятор реактивности (быстрый импульсный блок) в АЗ БР-К1

В результате проведенных расчетов установлена целесообразность дополнения конструкции реакторного стенда специальным

механизмом БИБ, который обеспечивает генерирование импульса в пролетном режиме. Масса БИБ составляет $\sim 0,7$ кг, масса подвижной части механизма $\sim 2,0$ кг.

Расчетная процедура генерирования импульсов быстрым импульсным блоком:

- мощность реактора в момент старта БИБ – 10^{10} дел. АЗ/с (0,3 Вт);
- реактивность АЗ в момент старта БИБ – $0,2275 \beta_{эф}$ выше состояния запаздывающей критичности (период разгона реактора ~ 24 с);
- скорости движения БИБ – 5, 7, 9, 11 и 13 м/с.

Обобщенные параметры импульса делений, реализуемые при разноскоростном вводе БИБ, приведены в табл. 6.

При скорости БИБ от 7 до 11 м/с имеет место приемлемая воспроизводимость мак-

симального импульса с энерговыделением $\sim 3 \cdot 10^{18}$ дел. АЗ. Влиянием изменения реактивности при движении БИБ на колоколообразную часть импульса делений можно пренебречь. При реализации предлагаемого варианта БИБ кинетическая энергия подвижной системы, обеспечивающей перевод реактора через состояние мгновенной критичности, может быть снижена с 3000 до 100 Дж.

Результаты расчетов импульсов делений на мгновенных нейтронах при движении БИБ со скоростью 9 м/с представлены в табл. 7. 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. 5.

Таблица 6

Параметры импульса делений, реализуемые при вводе БИБ

Параметр	Скорость движения БИБ, м/с				
	5	7	9	11	13
Реализованная реактивность, $\beta_{эф}$	0,2417	0,2595	0,2692	0,2715	0,2718
Полуширина импульса, мкс	864	605	567	595	648
Максимальная мощность, 10^{21} дел. АЗ/с	1,92	2,47	2,60	2,44	2,14
Энерговыделение в колоколе, 10^{18} дел. АЗ	1,98	2,13	2,14	2,07	1,91
Полное энерговыделение, 10^{18} дел. АЗ	2,91	2,98	2,92	2,78	2,55
Доля энерговыделения в колоколе	0,680	0,715	0,733	0,745	0,749

Таблица 7

Параметры импульса делений при движении БИБ со скоростью 9 м/с и различной толщине графитовых отражателей

Параметр	$x = 250$ мм			$x = 300$ мм		
	$y = 200$ мм	$y = 225$ мм	$y = 250$ мм	$y = 150$ мм	$y = 185$ мм	$y = 200$ мм
Вводимая реактивность, $\beta_{эф}$	1,2562	1,2627	1,2690	1,2529	1,2627	1,2659
Реализованная реактивность, $\beta_{эф}$	1,2510	1,2605	1,2685	1,2466	1,2602	1,2647
Полуширина импульса, мкс	501	612	785	457	579	671
Пиковая мощность, 10^{21} дел. АЗ/с	3,60	2,94	2,42	3,79	3,00	2,651
Энерговыделение в колоколе, 10^{18} дел. АЗ	2,15	2,03	1,89	2,06	2,00	1,95
Полное энерговыделение, 10^{18} дел. АЗ	3,00	3,02	3,03	2,99	3,02	3,02
Доля в колоколе, отн. ед.	0,717	0,672	0,624	0,689	0,662	0,646

Примечание. Индекс «x» – толщина боковых сегментов отражателя; индекс «y» – толщина верхнего отражателя.

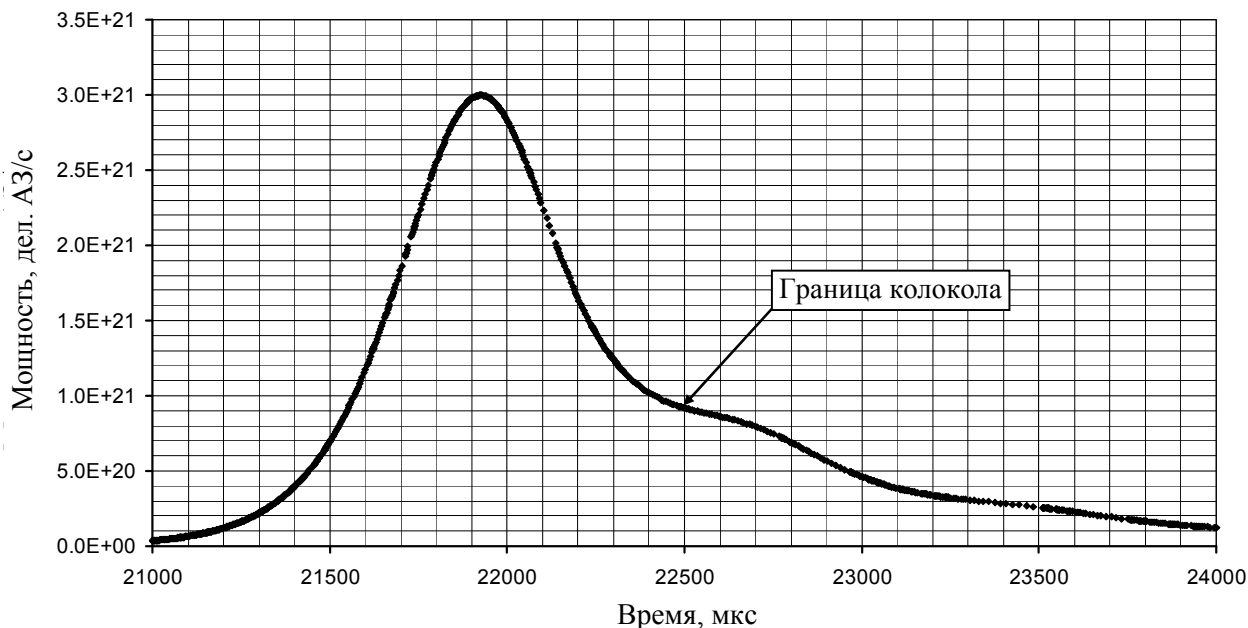


Рис. 5. Расчетная форма импульса делений на мгновенных нейтронах с отражателем ($x = 300$ мм, $y = 185$ мм) при начальной мощности $1 \cdot 10^{10}$ дел. АЗ/с и движении БИБ со скоростью 9 м/с

Параметр «Вводимая реактивность» характеризует реактивность, которая могла быть введена при перемещении БИБ из позиции «исходное» состояние до позиции, соответствующей максимуму вводимой реактивности, при этом предполагается, что другие механизмы изменения реактивности отсутствуют.

Параметр «Реализованная реактивность» характеризует реактивность, реально достигнутую в условиях проявляющегося температурного гашения по мере увеличения энерговода в процессе развития импульса делений.

Энерговыделение в колоколе определено на интервале от пуска БИБ до характерной временной отметки на заднем фронте импульса, показанной на рис. 5. Импульс делений рассчитан для конфигурации с боковыми отражателями 300 мм и верхним отражателем 185 мм. Полное энерговыделение соответствует расчетному интервалу времени от 0 до ~120 мс.

Заключение

В результате работы, выполненной коллективом авторов ИЯРФ, проведена подготовка к модернизации реактора БР-К1 для работы в импульсном режиме. Разработаны техническое предложение, техническое задание, технический проект, конструкторская документация на модернизацию реактора.

Эксплуатационные пределы и пределы безопасной эксплуатации модернизированного АИР БР-К1 отражены в проектной документации и должны быть уточнены при проведении физического пуска реактора, но не должны превышать значений (обусловленных проведенными теоретическими исследованиями и опытом эксплуатации ИЯР БР-К1), приведенных в табл. 8.

*Эксплуатационные пределы и пределы безопасной эксплуатации
модернизированного ИЯР БР-К1*

Режим	Параметр	Значение	
Генерирование импульсов на мгновенных нейтронах	Энерговыделение в АЗ, дел. (МДж)	до $3,0 \cdot 10^{18}$ (~90)	
	Ширина импульса на половине высоты, мкс	~ 600	
	Флюенс нейтронов в опорной точке КГЗ, см ⁻²	до $1,5 \cdot 10^{15}$	
Генерирование импульсов на запаздывающих нейтронах	Энерговыделение в АЗ, дел. (МДж)	до $3,0 \cdot 10^{18}$ (~90)	
	Мощность АЗ при реализации процессов управления, дел.·с ⁻¹ (МВт)	до $3,0 \cdot 10^{17}$ (~9)	
	Минимальный период роста мощности при реализации процессов управления, с	1,0	
Статический (стационарный), с длительностью работы более часа (максимально не более 45 ч)	Энерговыделение в АЗ, дел. (МДж)	Не ограничивается	
	Мощность, дел·с ⁻¹ (кВт)	не более $1 \cdot 10^{15}$ (~30)	
	Максимальная температура чехла, °С:	НБ-1П	440
		НБ-1Л	430
АБ		370	

Список литературы

1. Колесов В. Ф., Малинкин А. А. Кинетика двухсекционного бустер-реактора с асимметричной нейтронной связью между секциями // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 4, с. 10–23.

2. Павловский А. И., Малинкин А. А., Колесов В. Ф. и др. Двухсекционный бустер-реактор «Каскад» (БР-К) // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1992, вып. 3, с. 3–11.

3. 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.

4. Колесов В. Ф. Аperiodические импульсные реакторы. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1999.

5. Ушков С. С., Межонов В. А., Кожевников О.А. и др. Перспективы применения малоактивируемых титановых сплавов в сварных конструкциях атомных энергетических установок // Вопросы материаловедения, 2007, № 3. – С-Пб.: ЦНИИ КМ «Прометей».

6. Герасимов В. В., Монахов А. С. Материалы ядерной техники. – М.: Энергоиздат, 1982.

Контактная информация –

Девяткин Андрей Александрович,
начальник отделения ИЯРФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ,
e-mail: otd4@expd.vniief.ru

Статья поступила в редакцию 16.06.2017.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2017, вып. 4, с. 43–53.