

ПУТИ МОДЕРНИЗАЦИИ БР-К1 ДЛЯ РАБОТЫ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ WAYS OF MODERNISATION OF BR-K1 FOR ENABLING OD OPERATION IN PULSE MODE.

*А. А. Девяткин, С. В. Воронцов, В. Ф. Колесов, И. А. Никитин, В. Х. Хоружий,
А. С. Кошелев, В. Б. Гречушкин
А. А. Devyatkin, S. V. Vorontsov, V. F. Kolesov, I. A. Nikitin, V. Kh. Khoruzhi,
A. S. Koshelev, V. B. Grechushkin*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,
пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия
Federal Nuclear Center of Russia – All-Russia Research Institute of Experimental
Physics

Приведено описание работ по подготовке к модернизации реактора БР-К1. Дано краткое описание реактора и технических проблем, препятствующих его эксплуатации в импульсном режиме. Описаны пути решения этих проблем. Замена стальных чехлов на титановые для снижения деформаций и напряжений в них. Установка отражателя нейтронов для снижения напряжений путем уширения импульса. Введение быстрого импульсного блока для снижения ударных нагрузок и реализации импульса с мощности.

The works, devoted to modernization of BR-R1 pulse reactor are given in this article. The existing design of reactor and its problems halting operation in pulse mode described in the first part. Ways of solution of those problems described in following parts. Replacement of steel cases with titanium alloy ones to reduce stress and deformation. Installation of neutron reflector to reduce stresses in reactor core by terms of increasing pulse duration. Installation of new fast pulse unit to reduce shock loads and enable pulse generation from constant power mode.

1. История создания реактора БР-К1. Конструкция активной зоны

Бустер-реактор «Каскад», модификация 1 (БР-К1) – аperiodический импульсный реактор (АИР) самогасящего 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 г.г., авторы В. Ф. Колесов, А. А. Малинкин) БР-К представлял собой реакторную установку с двумя связанными цилиндрическими активными зонами (АЗ). АЗ 1 из сплава нептуния-237 с галлием размещалась в полости внешней АЗ 2, выполненной из сплава урана 36%-ного обогащения с молибденом (массовое содержание молибдена 9%). АЗ 1 и АЗ 2 были разделены слоем вольфрама эффективной толщиной 13–14 см. АЗ 1 имела форму цилиндра $\varnothing 23$ см и длиной 25 см, масса нептуниевого сплава ~125 кг.

АЗ 2 в форме полого цилиндра $\varnothing 70$ см и длиной 105 см 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 АЗ 1 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°C и 7,6 МДж в АЗ 1; 680°C и 120 МДж в АЗ 2 соответственно. Импульс БР-К при указанных энерговыделениях в бустерном режиме должен иметь длительность ~110 мкс, а при пониженном энерговыделении в АЗ 2 до ~50 МДж – ~20 мкс.

В начале 80-х годов было развернуто строительство БР-К, но оно не было закончено из-за осложнений, связанных с получением необходимого количества нептуния, и вследствие слабой надежды получения источника нейтронов на

уровне 10^{15} . Был реализован сильно урезанный вариант проекта – реактор БР-К1 без внутренней неплутниевой АЗ[3]. Это обычный односекционный АИР, отличающийся горизонтальной ориентацией центральной оси АЗ и большими размерами как самой АЗ, так и центральной облучательной полости. АЗ выполнен 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. 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 из нержавеющей стали. Топливные кольца в дисках подвешены на круговые выступы чехлов. Диски или структурные блоки АЗ представляют собой глубоко подкритичные сборки. 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, обеспечивая быстрый перевод реактора в глубоко подкритическое состояние. Подвижный блок ПБ компенсирует реактивность, вносимую сильно-возмущающими загрузками. Каждый из пяти содержащих топливо блоков оснащен экраном из сплава титана с гадолинием. Экраны изготовлены из проката толщиной 2 мм и установлены внутри герметизирующих чехлов. Регулирующие блоки РБ-1 и РБ-2 выполнены в виде двух бронзовых полуцилиндров, охватывающих подвижный блок. Импульсный блок ИБ и стоп-блок СБ размещены у торцевой стороны блока НБ-1П и имеют каждый форму прямоугольного параллелепипеда размером 65×204×420 мм. Эти блоки изготовлены из сплава бериллия и герметично заварены 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 расстоянии 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 $\sim 18 \beta_{эфф}$.

АЗ, механизмы перемещения блоков регулирования реактивности, элементы систем технологического обеспечения работы реактора 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 таблице 1.

Таблица 1

Проектные характеристики БР-К1

Энерговыведение в АЗ	до $4 \cdot 10^{18}$ делений
Диаметр центрального канала по топливу	$\varnothing 355$ мм
Флюенс в центральном канале	до $2 \cdot 10^{15}$ см ⁻²
Флюенс у внешней поверхности АЗ	до $4 \cdot 10^{14}$ см ⁻²
Минимальная длительность импульса	~ 200 мкс

Для загрузки объектов в полость АЗ служит специальный контейнер горизонтальной загрузки, кожух которого оснащен экраном из насыпного карбида бора. Внутренние размеры полости контейнера $\varnothing 310$ мм, длина 360 мм. В целях трансформации излучений реактора в контейнере могут быть установлены п-, γ -конвертор или свинцовый фильтр.



Рис. 1. Внешний вид реактора БР-К1

2. Недостатки существующей конструкции АЗ БР-К1. Предлагаемые 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. То, что их нагрев в процессе генерации импульса может приводить к деформации и короблению, до начала физического пуска БР-К1 в 1990 г никогда не наблюдалось на практике. Деформация чехлов блоков приводит к значительному уменьшению зазоров между свободно падающими АБ, ИБ и СБ и неподвижными НБ-2, НБ-1Л и НБ-1П, что в свою очередь ведет к заклиниванию падающих блоков и невозможности срабатывания аварийной защиты и перевода реактора в заглушенное состояние, см. рисунок 2. Проведенные расчеты[4] показали, что после номинального импульса блоки АЗ остывают за 10 часов. При этом максимальные температуры в торцевых круговых пластинах чехлов блоков НБ-1П, НБ-1Л и АБ равны 436, 424 и 374 °С и достигаются через ~4 мин после импульса в НБ-1П, а в НБ-1Л и АБ – через 2 мин. В отличие от торцевых пластин внешние цилиндрические обечайки чехлов прогреваются через 25 мин.

Расчеты деформаций и напряжений показали, что выпучивание торцевых пластин и коробление чехлов в целом связано с потерей чехлами термоупругой устойчивости.

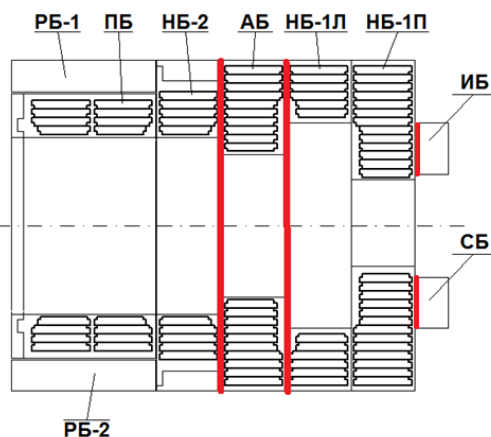


Рис. 2. Структурные блоки реактора БР-К1 (вид сверху): — места блокировки движения аварийного, импульсного и стоп блоков в результате коробления чехлов

До потери устойчивости наблюдаются только небольшие выпучивания торцевых пластин, а после чехол сильно перекашивается, более всего

около внутренней цилиндрической оболочки. Деформации при этом достигают 1–1,5 см при плоском начальном зазоре между чехлами 0,3 см. Чехол блока НБ-1П начинает терять устойчивость через 10 с после импульса, коробление достигает максимума 1,7 см через 2 мин. В АБ коробление начинается спустя 30 с после импульса, достигает максимума в 0,8 см через 2 мин. Чехол блока НБ-1Л устойчивости не теряет.

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

Таблица 2

Характеристики реактора БР-К1 существующей конструкции

Импульсный режим	
Энерговыведение в АЗ: предельное-допустимое (допустимое)	$1,2(1,0) \cdot 10^{18}$ делений (30 МДж)
Флюенс в опорной точке КГЗ	$5,1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$
Плотность потока нейтронов в опорной точке КГЗ	$2,30 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
Длительность импульса	1,2 мс
Средняя энергия нейтронов	0,78 МэВ
Статический режим	
Предельная допустимая мощность:	10 кВт ($3,3 \cdot 10^{14}$ дел/с)
Предельная температура чехлов:	
НБ-1П	120°С
НБ-1Л	115°С
АБ	100°С
НБ-2	85°С
ПБ	110°С

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 импульсного блока, что было оформлено техническим решением.

С развитием возможностей 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 данной установки на параметры, близкие к проектным. Направления предлагаемой модернизации очевидны:

- 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 новейших 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 установку 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.

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

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

Проблема коробления должна быть решена оптимизацией конструкции чехлов и применением более современных материалов с улучшенными термомеханическими свойствами – жаростойких титановых сплавов. Результаты многолетних работ по комплексному исследованию работоспособности и ресурса титановых сплавов, проведенных ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»[5] показывают:

- по уровню наведенной радиоактивности и скорости её 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 3×10^{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 намного большей прочностью, в ~2 раза меньшим коэффициентом температурного расширения и высокой коррозионной стойкостью. Сплавы титана технологичны. Они хорошо куются, штампуются и прокатываются в горячем состоянии,

Из всех титановых сплавов в качестве материала чехлов для реактора БР-К1 был выбран сплав ВТ20[6]. Чехлы должны быть изготовлены из плит (прокат толщиной 15–20 мм) с последующей сваркой на ЭЛУ. Аргументация выбора в качестве материала чехлов этого сплава заключается в том, что 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.

Анализ данных таблицы 3 показывает, что термомеханические характеристики сплава намного лучше, чем у стали, в частности предел текучести и прочности выше, а коэффициент линейного расширения ниже.

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.

Таблица 4

Напряжения и смещения в чехлах АЗ БР-К1 из различных материалов

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

Таблица 3

Сравнительные характеристики материалов чехлов БР-К1

Характеристика	Сталь 12Х18Н10Т	Титановый сплав ВТ20
Модуль упругости Е, ГПа	200	110
Коэффициент Пуассона ν	0,28	0,33
Плотность ρ , г/см ³	7,9	4,48
Теплоемкость С, Дж/(г×К)	0,505	0,502
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м×К)	15,1	$\lambda(T) = (7,12+0,0144T)$
Коэффициент температурного расширения α , К ⁻¹	$16,2 \times 10^{-6}$	$\alpha(T) = (8,3+0,00066T) \times 10^{-6}$
Показатели прочности, МПа		
σ_B при °С:		
20	650	1150
400	450	850
600	400	720
$\sigma_{0,2}$ при °С:		
20	300	1030
400	180	720
600	180	550

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 из 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 чехлах из различного материала приведены в табл. 4.

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

4. 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 блока реактора: АБ и НБ-1П при различных темпах нагрева. В итоге была подобрана полуширина импульса 600 мкс, при которой напряжения не превышают предела текучести материала, обозначенная как «безопасная» полуширина импульса. Как видно из табл. 5, при нагреве за 200 мкс, эквивалентные напряжения по Мизесу (далее – напряжения) в отдельных ТЭ (выделены курсивом) превышают статический предел прочности уран-молибденового сплава.

Как было сказано выше, модернизация реактора БР-К1 предполагает замену герметизирующих стальных чехлов АЗ на чехлы из титановых сплавов. 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 $3,3\beta_{\text{эфф}}$, поэтому возникает задача дооснащения реактора отражателем. Отражатель также решает проблему достижения «безопасной» полуширины импульса.

Таблица 5

Эквивалентные напряжения по Мизесу в ТЭ наиболее нагруженных блоков при минимальной и безопасной полуширине импульса.

№ 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
Блок:	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

Материал отражателя и его конструкция должны отвечать четырем требованиям:

- должна быть компенсирована убыль реактивности $3,3\beta_{\text{эфф}}$;
- должно быть обеспечено уширение импульса до 600 мкс;
- отражатель должен иметь разумные массогабаритные характеристики;
- отражатель не должен 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. Для создания отражателя было принято решение использовать графитовые блоки, аналогичные тем, которые применялись

при создании критического стенда ИКАР-С. Конструкция отражателя приведена на рис. 3. Используются графитовые блоки прямоугольной формы, которые 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 $1,6 \text{ г/см}^3$.

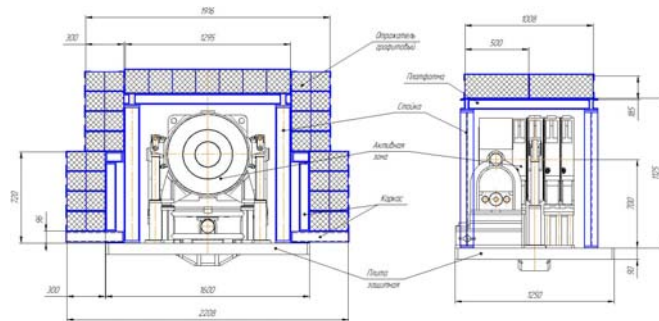


Рис. 3. Конструкция сегментов отражателя

Суммарная масса графита верхнего сегмента составляет 384 кг. Суммарная масса графита каждого бокового сегмента составляет 576 кг. В целях уменьшения открытой пожарной нагрузки графитовые блоки изолируются стальными листами, закрепленными на силовом каркасе. Среднее значение перегрева поверхностей ТЭ, обращенных к отражателю, составляет ~13%.

5. 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 на скоростях пневмоввода ИБ ~20 м/с при проектных возможностях 25 м/с. При массе разгоняемого объекта (собственно ИБ и элементов пневмопривода) ~15 кг кинетическая энергия движущейся системы на скорости 20 м/с

весьма значительна (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 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 – прессматериал из смеси полипропилена с окисью кадмия (10% по массе).

В результате проведенных расчетов установлена целесообразность дополнения конструкции реакторного стенда специальным БИБ, который при весе подвижного элемента ~1,5 кг (собственно БИБ ~0,75 кг, элементы пневмопривода ~0,75 кг) обеспечивает генерирование импульса делений с необходимыми параметрами в пролетном режиме. 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);
- скорость движения БИБ 5 м/с, 7 м/с, 9 м/с, 11 м/с, 13 м/с;
- рассчитанные параметры: реализуемые реактивность, мощность и энерговыделение реактора; полуширина импульса; пиковая мощность приведены в табл. 6.

В диапазоне изменения скорости ввода БИБ от 7 до 11 м/с имеет место практически приемлемая воспроизводимость импульса делений с максимально необходимыми энергетическими параметрами (энерговыделение за импульс $\sim 3 \cdot 10^{18}$ дел.АЗ). При реализации импульса делений в области максимума вводимой БИБ реактивности (19–20 см от исходного положения) влиянием изменения реактивности за счет движения ВМР на параметры собственно импульса делений (колоколообразной его части) можно пренебречь.

При реализации предлагаемого варианта БИБ кинетическая энергия подвижной системы, обеспечивающей результирующий перевод реактора через состояние мгновенной критичности, может быть снижена с 3000 Дж до 75 Дж, или в 40 раз.

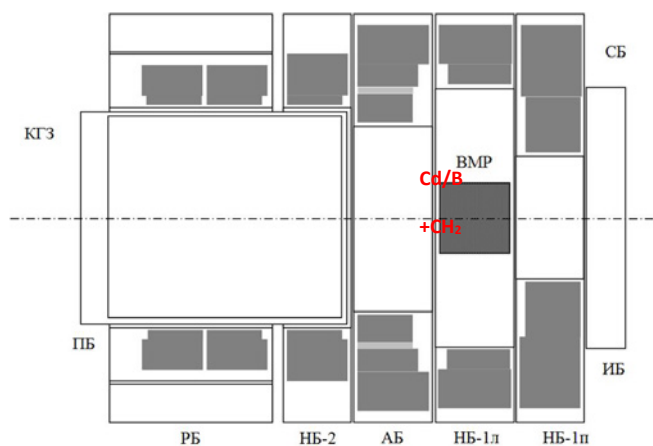


Рис. 4. Модулятор реактивности (Быстрый Импульсный Блок) в АЗ БР-К1

Результаты расчетов генерирования импульса на мгновенных нейтронах при движения БИБ со скоростью 9 м/с представлены в таблице 7.

Таблица 6

Избранные обобщенные параметры импульса делений, реализуемые при разноскоростном 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, дел.АЗ/с	1,92+21	2,47+21	2,60+21	2,44+21	2,14+21
Энерговыделение в колоколе, дел.АЗ	1,98+18	2,13+18	2,14+18	2,07+18	1,91+18
Полное энерговыделение, дел.АЗ	2,91+18	2,98+18	2,92+18	2,78+18	2,55+18
Доля энерговыделения в колоколе	0,680	0,715	0,733	0,745	0,749

Параметры импульса делений при движении БИБ со скоростью 9 м/спри 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, $\beta_{эфф}$	1,2562	1,2627	1,2690	1,2529	1,2627	1,2659
Реализованная реактивность, $\beta_{эфф}$	1,2510	1,2605	1,2685	1,2466	1,2602	1,2647
Полуширина, мкс	501	612	785	457	579	671
Пиковая мощность, дел.АЗ/с	3,60+21	2,94+21	2,42+21	3,79+21	3,00+21	2,65+21
Энерговыделение в колоколе, дел.АЗ	2,15+18	2,03+18	1,89+18	2,06+18	2,00+18	1,95+18
Полное энерговыделение, дел.АЗ	3,00+18	3,02+18	3,03+18	2,99+18	3,02+18	3,02+18
Доля в колоколе, отн.ед.	0,717	0,672	0,624	0,689	0,662	0,646

В табл. 7 индексом «x» обозначена толщина боковых сегментов отражателя, а индексом «y» – верхнего сегмента отражателя.

Параметр «Вводимая реактивность» характеризует реактивность, которая могла быть введена при перемещении БИБ с позиции «исходное» состояние до позиции, соответствующей максимуму вводимой реактивности, при отсутствии иных механизмов изменения реактивности, кроме ее изменения при движении БИБ.

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

Энерговыделение в колоколе определено на интервале от пуска БИБ до характерной временной отметки на заднем фронте импульса, показанной на рисунке 5 для импульса делений, расчетно реализованного для конфигурации с боковыми

отражателями 300 мм и верхним отражателем 185 мм. Полноеэнерговыделение соответствует расчетному интервалу времени от 0 до ~120 мс.

Заключение

В результате вышеописанной обширной работы, выполненной коллективом авторов ИЯРФ, была проведена подготовка к модернизации реактора БР-К1 для работы в импульсном режиме, которая должна начаться в ближайшее время. Разработаны: техническое предложение, техническое задание, технический проект, конструкторская документация на модернизацию реактора. В настоящее время отрабатывается технология изготовления крупногабаритных чехлов из титанового сплава для структурных блоков АЗ.

Эксплуатационные пределы и пределы безопасной эксплуатации модернизированного АИР



Рис. 5. Импульс 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

Таблица 8

Эксплуатационные пределы и пределы безопасной эксплуатации модернизированного ИЯР БР-К1

Импульсный на мгновенных нейтронах режим	
Энерговыделение в АЗ: предельное-допустимое (допустимое)	$3,5(3,0) \cdot 10^{18}$ дел. 106 МДж 91 МДж)
Мощность в пике импульса: предельно-допустимая (допустимая)	$3,2(2,8) \cdot 10^{21}$ дел·с ⁻¹ 100 (85) ГВт
Минимальная полуширина импульса: предельно-допустимая (допустимая)	550 (600) мкс
Флюенс в опорной точке КГЗ	$1,75(1,5) \cdot 10^{15}$ см ⁻²
Импульсный на запаздывающих нейтронах режим	
Энерговыделение в АЗ: предельное-допустимое (допустимое)	$3,5(3,0) \cdot 10^{18}$ дел. 106 МДж 91 МДж)
Максимальная мощность активной зоны при реализации процессов управления:	$3,0 \cdot 10^{17}$ дел·с ⁻¹ 9 МВт
Минимальный период разгона мощности при реализации процессов управления:	1,0 с
Статический (стационарный) режим с длительностью работы более часа (максимально не более 45 часов)	
Энерговыделение в АЗ:	не ограничивается
Допустимая мощность:	$9,9 \cdot 10^{14}$ дел·с ⁻¹ 30 кВт
Предельно-допустимая (допустимая) температура чехлов:	
НБ-1п	440 (350) °С
НБ-1л	430 (340) °С
АБ	370 (300) °С

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

Список литературы

1. В. Ф. Колесов, А. А. Малинкин Кинетика двухсекционного бустер-реактора с асимметричной нейтронной связью между секциями. – ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 4, С. 10–23.
2. И. Павловский, А. А. Малинкин, В. Ф. Колесов и др. Двухсекционный бустер-реактор «Каскад» (БР-К). – ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1992, вып. 3, С. 3–11.
3. В. С. Босамыкин, А. А. Малинкин, В. Ф. Колесов и др. Конструкция и физико-технические характеристики бустер-реактора БР-К1. – ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1996, вып. 1, С. 3–12.
4. В. Ф. Колесов Аперiodические импульсные реакторы. г. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 1999. 1032 с.
5. С. С. Ушков, В. А. Межонов, О. А. Кожевников и др. «Перспективы применения малоактивируемых титановых сплавов в сварных конструкциях атомных энергетических установок» – Сб. статей. «Вопросы материаловедения» № 3, изд-е ЦНИИ КМ «Прометей». – С.-Пб. 2007.
6. В. В. Герасимов, А. С. Монахов Материалы ядерной техники. – Москва: Энергоиздат, 1982. – 288 с.