

## РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА БР-К1 ПРИ РАБОТЕ В СТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Л. С. Шалаева, И. А. Никитин

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

Приведено краткое описание активной зоны реактора и особенности ее конструкции. Представлены результаты физического пуска реактора БР-К1 в статическом режиме работы на проектной мощности 30 кВт (энергосвободение  $3 \cdot 10^{18}$  дел). Показаны причины, ограничивающие эксплуатационные параметры реактора. Разработана конструктивная схема воздушного охлаждения активной зоны. Проведены расчеты термомеханического деформирования корпуса в блоках активной зоны и эффективности охлаждения ее воздушным потоком. Определены предельные уровни мощности безопасной работы БР-К1 в статическом режиме при естественной и вынужденной конвекции.

**Ключевые слова:** бустер-реактор, активная зона, статический режим, естественная конвекция, вынужденная конвекция, герметизирующие чехлы, термомеханическое деформирование, турбулентный режим течения, система охлаждения, хладагент.

**CALCULATED SUBSTANTIATION OF A CONSTRUCTION DIAGRAM OF THE BR-K1 REACTOR CORE AIR COOLING WHEN IT FUNCTIONS IN A STATIC MODE / L. S. SHALAEVA, I. A. NIKITIN** // A brief description of reactor core and its design features are presented. There are given the results of BR-K1 first criticality in a static mode of operation the rated capacity being 30 kW (energy release  $3 \cdot 10^{18}$  fis.). The reasons restricting reactor operation parameters are demonstrated. The construction diagram of the core air cooling is developed. There are performed calculations of the body thermomechanical deformation in the blocks of the core and its cooling efficiency with air flow. The ultimate power levels of BR-K1 safe operation in the static mode at natural and forced convection are determined.

**Key words:** booster-reactor, reactor core, static mode, natural convection, forced convection, sealing case, thermomechanical deformation, turbulent flow, cooling system, cooling medium.

### Краткое описание реактора БР-К1

В настоящее время возросла потребность проведения испытаний на радиационную стойкость изделий, аппаратуры и пр. различных сфер науки и техники. Особое место занимают испытания на исследовательских ядерных реакторах (ИЯР) в статических режимах, когда элементы конструкции активной

зоны длительное время находятся под воздействием температурных нагрузок, уровень которых непосредственно влияет на безопасность работы установки.

Бустер-реактор «Каскад», модификация 1 (БР-К1), был разработан и введен в эксплуатацию в РФЯЦ-ВНИИЭФ в 1995 г. Согласно классификации Е. П. Шабалина, ядерный реактор относится к типу аperiодических им-

пульсных реакторов (АИР), в которых вспышка делений генерируется быстрым вводом избыточной реактивности, а гасится за счет отрицательной обратной связи между температурой и реактивностью [1].

Активная зона (АЗ) БР-К1 имеет цилиндрическую форму с горизонтальной ориентацией центральной оси из-за соображений удобства загрузки объектов в облучательную полость, что является необычным для ИЯР. Максимальный внешний диаметр АЗ по топливу равен 617 мм, минимальный внутренний – 206 мм, длина в сомкнутом состоянии – 748 мм. Диаметр полости для облучения объектов по топливу составляет 365 мм. Топливные элементы АЗ выполнены из сплава урана с обогащением 36 % по  $^{235}\text{U}$  и молибдена с массовой долей 9 %. Полная масса уран-молибденового сплава в АЗ равна 1511 кг.

Делящийся материал (ДМ) АЗ разбит на диски, а диски – на коаксиальные кольца, топливные элементы (ТЭ). Топливные элементы заключены в герметичные неразъемные чехлы из нержавеющей стали, которые формируют блоки. В блоках ТЭ подвешены по торцам на кольцевых выступях с зазором относительно друг друга и чехлом. Конструктивная схема АЗ реактора БР-К1 представлена на рис. 1.

Конструктивную основу АЗ составляют пять автономных блоков с ДМ, каждый из ко-

торых представляет глубоко подкритическую сборку. Блоки НБ-1Л (левый), НБ-1П (правый) и НБ-2 – неподвижные части, а блоки АБ и ПБ – подвижные.

Аварийный блок (АБ) является основным элементом аварийной защиты, обеспечивающим быстрый перевод реактора в глубоко подкритическое состояние. Подвижный блок (ПБ) компенсирует реактивность, вносимую сильно возмущающими нагрузками. Каждый блок с ДМ 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, выполненные в виде двух полуцилиндров из бронзы, охватывают ПБ. Импульсный блок (ИБ) и стоп-блок (СБ) размещены у торцевой стороны 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 расстоянии 450, 580 и 420 мм соответственно. Блок ПБ перемещается по оси АЗ на расстоянии 82 мм, РБ-1 и РБ-2 – горизонтально, в радиальном направлении относительно оси АЗ, на расстоянии 71 мм.

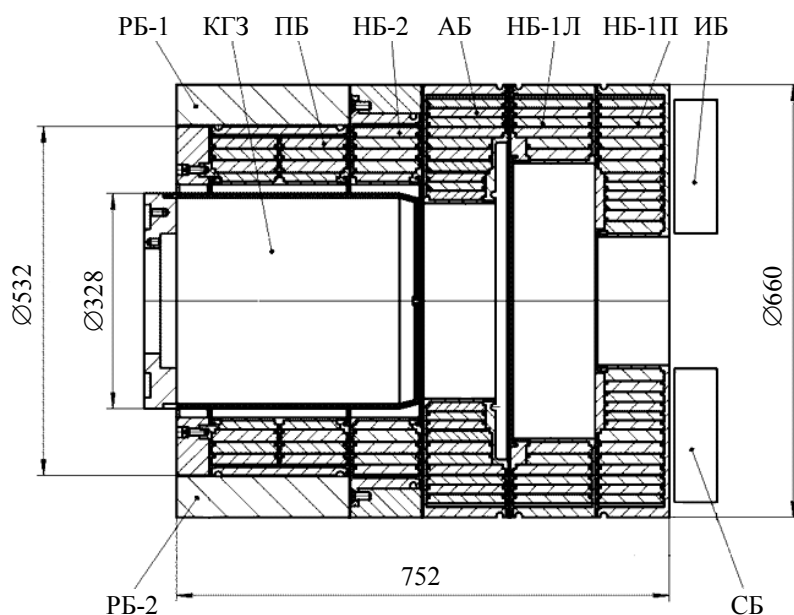


Рис. 1. Схема АЗ реактора БР-К1

Перемещения блоков ПБ, РБ-1 и РБ-2, а также АБ, ИБ, СБ под действием силы тяжести, обеспечивает перевод реактора в подкритическое состояние при срабатывании аварийной защиты. При полностью разведенных блоках подкритичность АЗ составляет  $\sim 18 \beta_{эф}$  [2].

Для размещения объектов испытания в полости АЗ используется 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  $n$ -,  $\gamma$ -конвертор или свинцовый фильтр.

Фотография реактора БР-К1 и вспомогательного оборудования в зале автономной работы приведена на рис. 2.

### Особенности конструкции АЗ БР-К1

В работе достаточно широко представлен материал физического пуска реактора БР-К1, который проводился в 1989–1990 г. Эти данные приведены, во-первых, чтобы читатель более полно воспринимал материал работы, во-вторых, они использовались при создании

расчетных моделей и сравнении результата расчета с экспериментом.

При физическом пуске реактора БР-К1 была исследована плотность делений по АЗ. Полное энерговыделение и поле температур по ДМ были определены для случая реализации в точке максимального разогрева (НБ-1П) в предположении, что начальная температура топливных элементов составляла 20 °С. Полное энерговыделение в АЗ составило  $3,42 \cdot 10^{18}$  дел. Данные о поле температур в АЗ приведены на рис. 3.

Делящийся материал в блоках заключен в герметичные чехлы из нержавеющей стали, которые являются распространенным средством защиты элементов от коррозии и применяются во ВНИИЭФ на всех реакторах. Чехлы (корпуса блоков) подвергаются воздействию переменных во времени и пространстве температур и квазистатических напряжений, которые могут приводить к выпучиванию и короблению этих элементов. Однако к реальным осложнениям в работе АИР эти явления не приводили.

При проведении физического пуска реактора БР-К1 в статическом режиме работы планировалось получить энерговыделение  $3 \cdot 10^{18}$  дел. за один час работы (30 кВт).

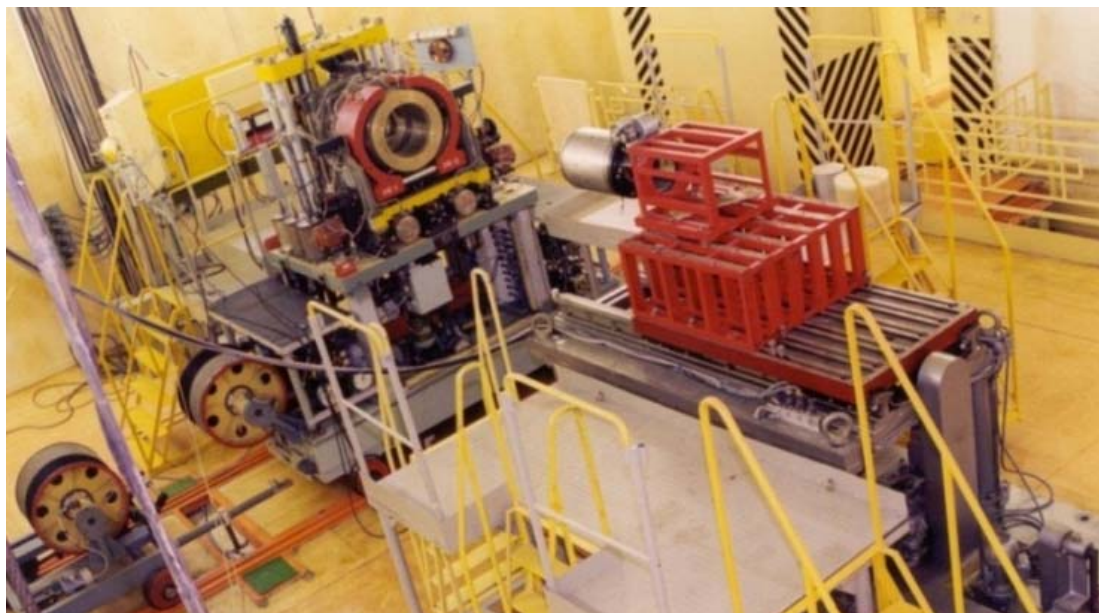


Рис. 2. Оборудование реактора БР-К1



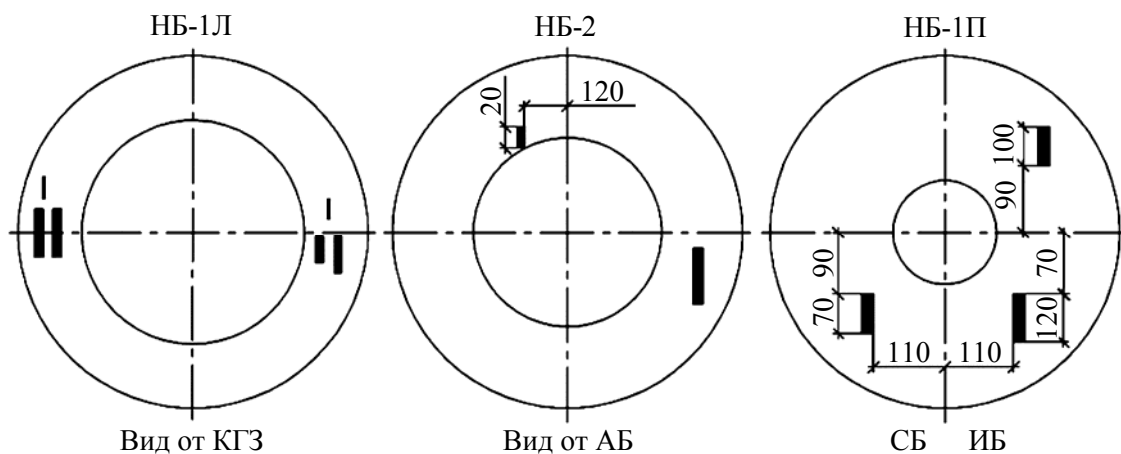


Рис. 5. Задиры и затираания в блоках НБ-1Л, НБ-2 и НБ-1П после статического пуска на мощности 30 кВт (■ – затираания, — – задиры)

Из рис. 5 видно, что коробления в блоках могут приводить к потере зазора 3 мм, заложенного в конструкцию АЗ, между подвижными и неподвижными частями. На рис. 6 приведена схема структурных блоков реактора БР-К1, на которой показаны места блокировки движения АБ, ИБ и СБ.

Для определения характера и уровня деформаций на внешней торцевой поверхности блока НБ-1П были установлены дополнительные хромель-копелевые термопары и токовихревые датчики контроля перемещения. Размещение датчиков на НБ-1П показано на рис. 7.

В рамках физического пуска также проведена работа реактора в статическом режиме на мощности 5 и 10 кВт. В этих режимах коробления в блоках не препятствовали движению подвижных частей вниз на всем пути перемещения.

В результате проведения физического пуска реактора предусмотренные проектом технические характеристики были ограничены. Параметры работы реактора БР-К1 в статическом режиме приведены в таблице.

Зависимости изменения температур на корпусе блоков от времени при работе реактора на мощности 10 кВт приведены на рис. 8. Зависимости перемещения внешней торцевой поверхности блока НБ-1П от времени при работе реактора на мощности 10 кВт в статическом режиме приведены на рис. 9.

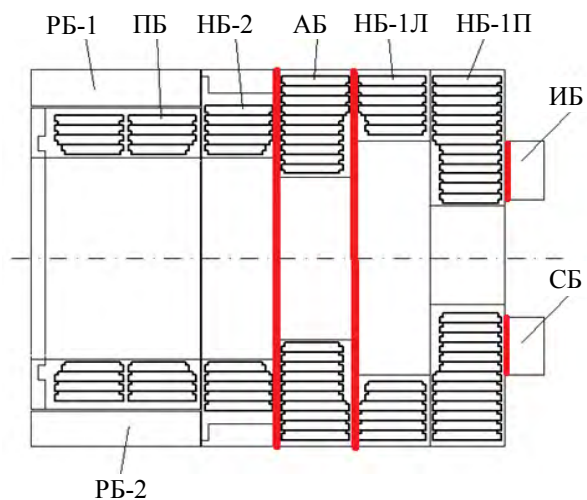


Рис. 6. Схема структурных блоков реактора БР-К1 (— — места блокировки движения АБ, ИБ и СБ)

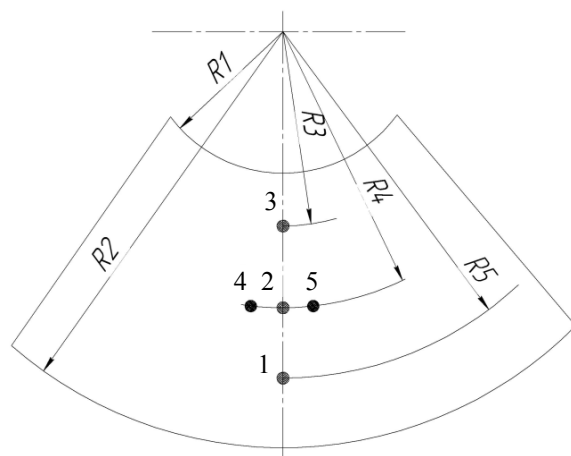


Рис. 7. Схема размещения датчиков на внешней торцевой поверхности НБ-1П ( $R_1 = 98$  мм;  $R_2 = 330$  мм;  $R_3 = 174$  мм;  $R_4 = 214$  мм;  $R_5 = 254$  мм; 1, 2, 3 – датчики перемещения; 4, 5 – термопары)

Параметр	Значение
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

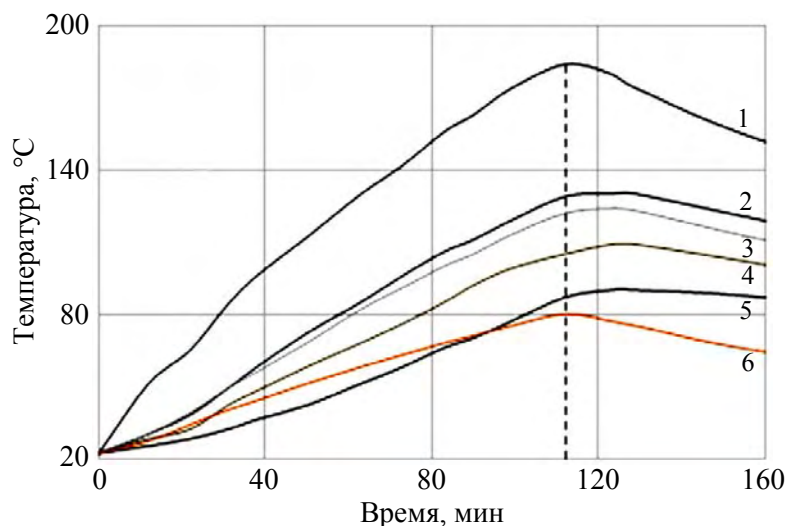


Рис. 8. Зависимость изменения температуры на корпусе блока от времени при статическом режиме работы реактора на мощности 10 кВт (1 – НБ-1П\_торец, 2 – НБ-1П, 3 – НБ-1Л, 4 – АБ, 5 – НБ-2, 6 – ПБ)

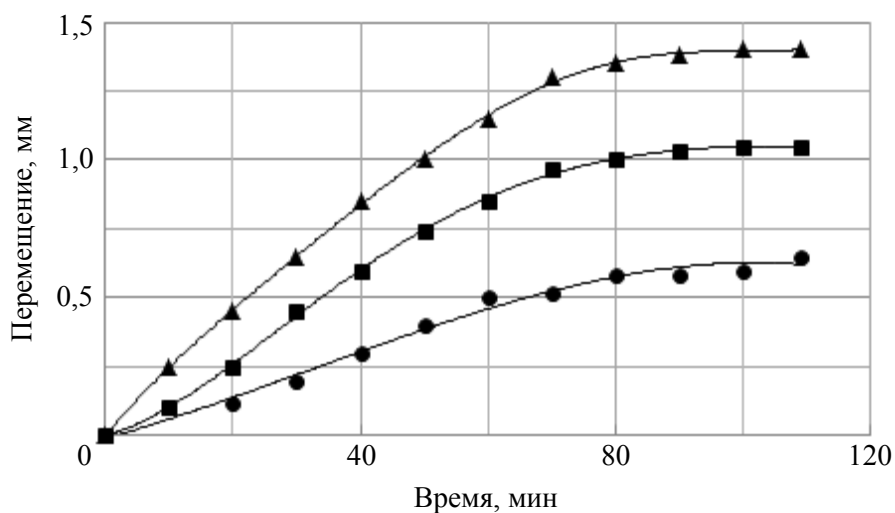


Рис. 9. Зависимость перемещения внешней торцевой поверхности блока НБ-1П от времени при статическом режиме работы реактора на мощности 10 кВт (● – датчик № 1; ■ – датчик № 2; ▲ датчик № 3)

## Расчеты температур и деформаций в блоках реактора БР-К1

Для блоков АЗ, наиболее подверженных термодинамическим нагрузкам (НБ-1П, НБ-1Л, АБ), разработана расчетная модель. Расчеты статического режима проводились в два этапа. На первом этапе в результате решения нестационарной задачи теплопроводности определено пространственно-временное распределение температуры в элементах блоков. Предполагалось, что отвод тепла осуществляется посредством естественной конвекции воздуха и лучистого теплообмена с поверхности блока. На втором этапе при решении задачи термомеханического деформирования использовалось распределение температур от времени, полученное на первом этапе, в предположении, что чехол изолирован от собственных

топливных элементов и соседних блоков. В результате определяли деформации в чехле.

На примере блока НБ-1П представлены результаты расчета при работе реактора в статическом режиме на мощности 10 и 30 кВт. Зависимости изменения температуры на корпусе НБ-1П и его деформации от времени при статическом пуске реактора БР-К1 на мощности 10 кВт приведены на рис. 10, 12, на мощности 30 кВт – на рис. 11, 13.

Из рис. 10–12 видно, что экспериментальные значения температур и деформаций хорошо согласуются с расчетными значениями. Рис. 13 показывает, что при работе реактора на мощности 30 кВт максимальное перемещение торцевой поверхности НБ-1П (внутренняя обечайка) в сторону ИБ и СБ достигало 3,0 мм.

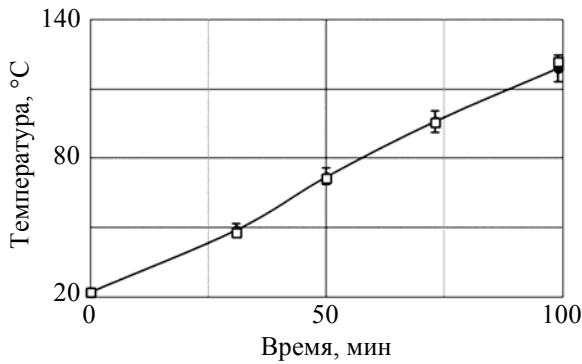


Рис. 10. Зависимость изменения температуры на корпусе НБ-1П от времени при статическом пуске реактора БР-К1 на мощности 10 кВт: ● – эксперимент, □ – расчет

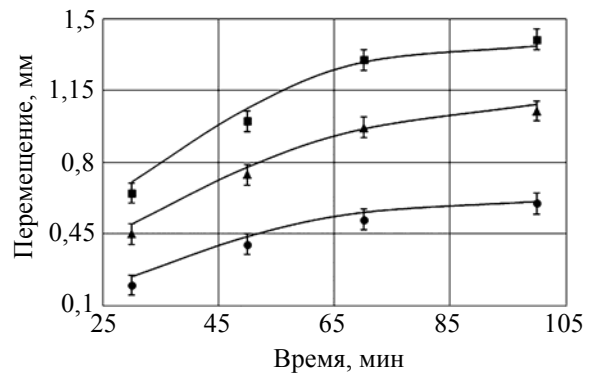


Рис. 12. Зависимость перемещения внешней торцевой поверхности НБ-1П от времени при статическом пуске на мощности 10 кВт: ●, ▲, ■ – эксперимент Д1, Д2, Д3 соответственно; — – расчет Д1–Д3

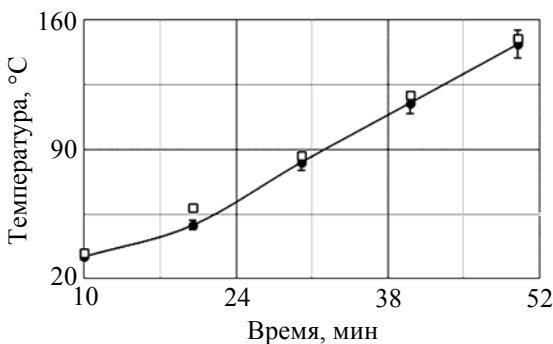


Рис. 11. Зависимость изменения температуры на корпусах НБ-1П от времени при статическом пуске реактора БР-К1 на мощности 30 кВт: ● – эксперимент, □ – расчет

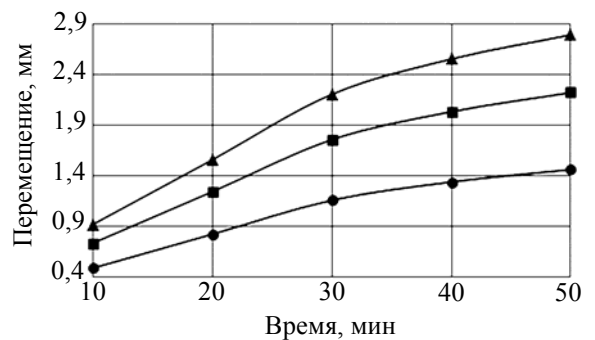


Рис. 13. Расчетная зависимость перемещения внешней торцевой поверхности НБ-1П от времени при статическом пуске на мощности 30 кВт: ●, ■, ▲ – датчики 1, 2, 3 соответственно

Погрешность измерения температуры термомпарой составляет  $\pm 5\%$ . Погрешность измерения перемещения торцевой поверхности чехла НБ-1П датчиками составляет  $\sim 0,05$  мм.

### Охлаждение АЗ реактора БР-К1

Выбор конструктивной схемы воздушного охлаждения АЗ реактора БР-К1 проводился с учетом следующих подходов:

- сохранения структуры блоков АЗ реактора;
- сохранения алгоритма работы, заложенного в реактор;
- минимизации изменений, проводимых в СУЗ;
- сохранения контейнера горизонтальной загрузки (КГЗ-1) и способа его перемещения в облучательную полость АЗ;
- обеспечения безопасного обслуживания оборудования системы охлаждения и т. д.

Конструктивная схема воздушного охлаждения АЗ реактора БР-К1 приведена на рис. 14. Она позволяет:

- использовать стенд загрузки (см. рис. 2);

– разместить составные части оборудования системы охлаждения на стенде загрузки;

– создать устройство формирования воздушного потока (УФВП) с отражателем (ОТ).

Создание расчетной модели вынужденного воздушного охлаждения АЗ реактора БР-К1 при работе в статическом режиме заключалось в необходимости выбора фактора, ограничивающего уровень мощности работы установки в данном режиме. Было принято, что перемещения чехла НБ-1П на уровне мощности 10 кВт являются допустимыми пороговыми значениями (см. рис. 12).

По результатам физического пуска реактора на рис. 15 приведены экспериментальные зависимости перемещения торцевой поверхности чехла НБ-1П от температуры, при работе реактора в статическом режиме на уровне мощности 10 кВт, когда теплообмен корпуса с окружающей средой происходит при естественной конвекции.

Рис. 15 показывает, что в качестве порогового значения следует выбрать перемещение торцевой поверхности НБ-1П в расположении датчика 3, которое не должно превышать значения 1,4 мм. Это перемещение соответствует температуре 174 °С.

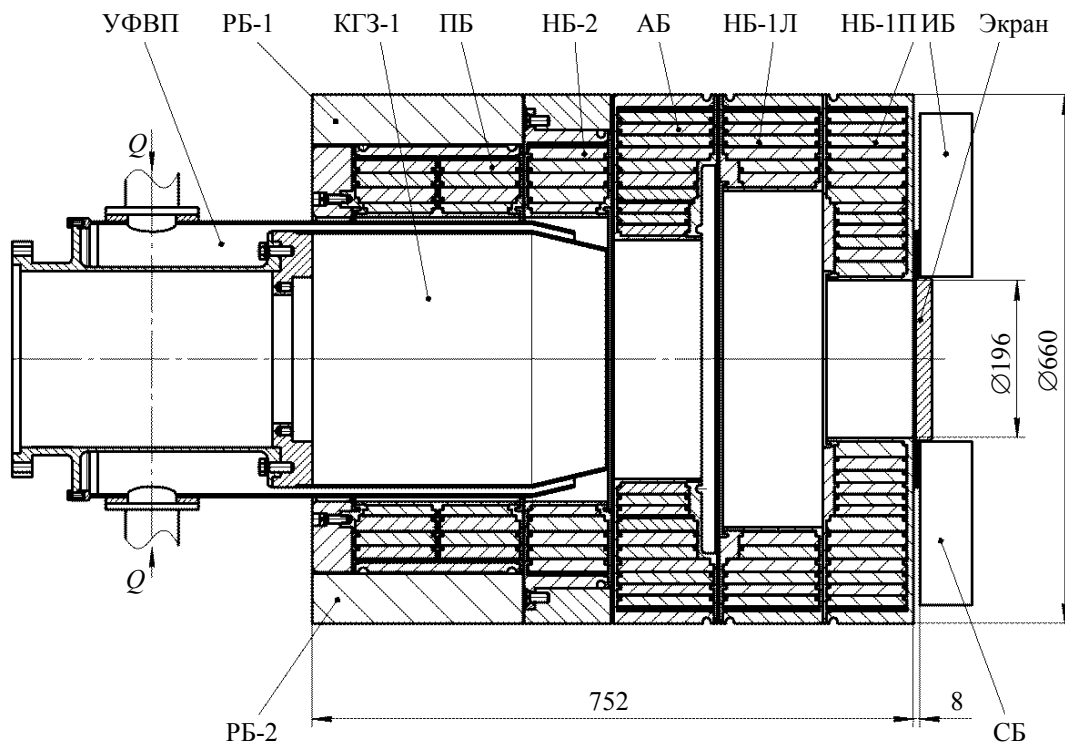


Рис. 14. Конструктивная схема АЗ реактора при работе в статическом режиме



При расчете принудительного охлаждения отвод тепла от АЗ осуществляется вынужденной конвекцией и лучистым теплообменом с окружающей средой. Расчеты показали, что начальная скорость потока охлаждающего газа через кольцевой канал шириной  $\delta = 9$  мм должна составлять  $w_0 = 20$  м/с, при этом объемный расход составит  $G = 0,2887$  м<sup>3</sup>/с. Выход воздушного потока в полость АЗ должен осуществляться по конусу, образуемому КГЗ-1, где наименьший диаметр составляет 275 мм, а угол – 27°.

В расчетной модели принималось, что экран имеет форму диска, у которого диаметр равен корпусу НБ-1П. Экран расположен таким образом, чтобы зазор между отражателем и НБ-1П составлял 3 мм.

Проведены расчеты по определению эффективности системы охлаждения при работе реактора в статическом режиме на мощности 10 кВт, результаты расчетов (графики 5–8) приведены на рис. 16. Из рисунка видно, что температура НБ-1П на торце (график 7) значительно снижена и составляет ~110 °С. Поэтому итерационно была подобрана мощность реактора так, чтобы максимальная температура торца чехла НБ-1П была равна предельно допустимой температуре (график 3 на рис. 16). Уровень мощности, соответствующий данному условию, составляет 18 кВт. Зависимости изменения температуры на чехлах блоков от времени при работе реактора на мощности 10 и 18 кВт приведены на рис. 16.

Зависимости изменения температуры на торцевой поверхности НБ-1П от времени при работе реактора на мощности 10 и 18 кВт приведены на рис. 17.

Реальная компоновка АЗ реактора БР-К1 с учетом положения на внешней торцевой поверхности НБ-1П датчиков измерения деформаций и температуры (см. рис. 7) позволяет разместить экран диаметром до 320 мм (см. рис. 14) в зазоре 8 мм между блоками НБ-1П, СБ и ИБ. Расчеты показали, что АЗ достигнет теплового равновесного состояния, не превышая порогового значения температуры на торцевой поверхности блока 174 °С, при работе реактора БР-К1 на статической мощности, равной 12,0 кВт. Отвод тепла с торца блока значительно снижен, так как поле скоростей при перемещении рабочего тела по поверхности уменьшается в ~6 раз.

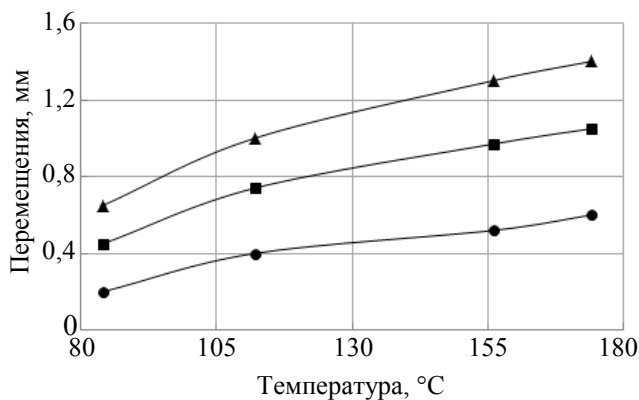


Рис. 15. Экспериментальная зависимость перемещения чехла НБ-1П от температуры при статическом пуске на мощности 10 кВт: ●, ■, ▲ – датчики 1, 2, 3 соответственно

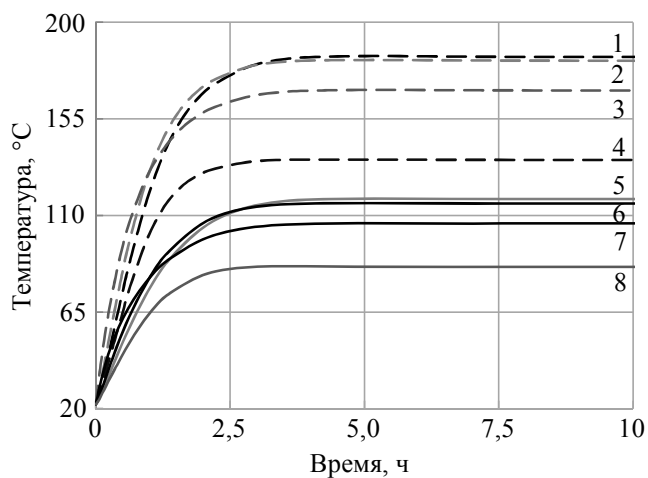


Рис. 16. Расчетная зависимость изменения температуры на чехле блока от времени (1, 5 – НБ-1П; 2, 6 – НБ-1Л; 3, 7 – НБ-1П торец; 4, 8 – АБ; — — мощность 10 кВт; - - - - мощность 18 кВт)

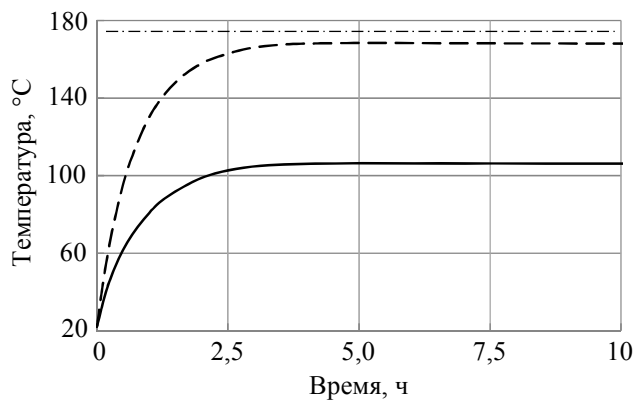


Рис. 17. Расчетная зависимость изменения температуры на торцевой поверхности НБ-1П от времени: — — мощность 10 кВт; - - - - мощность 18 кВт; — · — · значение пороговой температуры

Также были приведены расчеты охлаждения АЗ естественной конвекцией. Определен уровень мощности для случая теплового равновесного состояния АЗ и температур на чехлах блоков, близких к предельным значениям. Выбор уровня мощности произведен итерационно. Мощность реактора составляет 2,9 кВт.

На рис. 18 представлены зависимости изменения температур в блоках АЗ от времени при работе реактора на стационарной мощности 2,9 кВт.

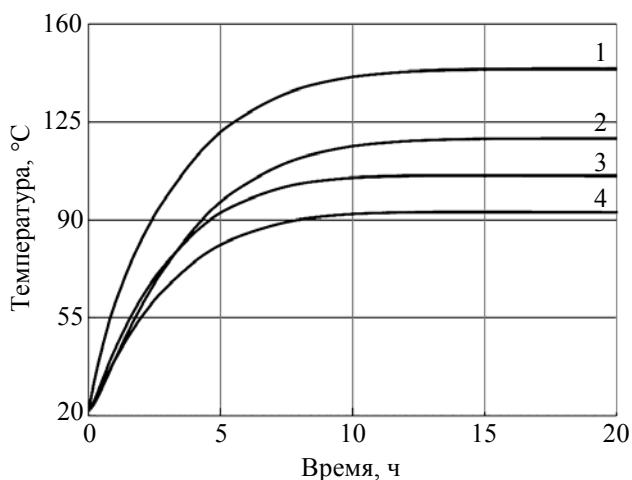


Рис. 18. Расчетная зависимость изменения температуры от времени при работе реактора на стационарной мощности 2,9 кВт и охлаждении АЗ естественной конвекцией: 1 – НБ-1П торец, 2 – НБ-1П, 3 – НБ-1Л, 4 – АБ

### Заключение

Работа проводилась в целях обоснования конструктивной схемы вынужденного охлаждения АЗ реактора БР-К1 при работе в статическом режиме. Проведены расчеты по определению пространственно-временного распределения температуры в блоках АЗ, деформаций в чехлах из нержавеющей стали. Получено хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных.

Проведены расчеты вынужденной конвекции. В результате расчетов установлено, что принудительное воздушное охлаждение АЗ реактора БР-К1 с использованием формализованного экрана (диаметр 660 мм) на торцевой поверхности НБ-1П позволяет увеличить значение тепловой мощности до 18 кВт, при этом длительность статического режима составляет десятки часов.

С учетом реальной компоновки АЗ реактора БР-К1 определен диаметр экрана системы охлаждения (до 320 мм). В результате расчетов получено, что принудительное охлаждение с использованием данного экрана АЗ достигает теплового равновесного состояния при работе реактора БР-К1 на тепловой мощности 12 кВт.

Проведены расчеты работы реактора на стационарной мощности и охлаждения АЗ с помощью естественной конвекции. Определен уровень мощности (2,9 кВт), при котором в АЗ наступает тепловое равновесное состояние, когда температуры на чехлах блоков близки к предельно допустимым значениям.

Определены геометрические параметры устройства формирования воздушного потока.

Представленную конструктивную схему охлаждения АЗ с горизонтальной ориентацией оси предлагается проверить на эксплуатируемом реакторе БР-К1, результаты численного расчета сравнить с экспериментальными данными, при необходимости провести соответствующие корректировки. Такой подход позволит провести более качественные расчетные оценки системы охлаждения для модернизируемого реактора БР-К1М, в котором топливные элементы заключены в титановые оболочки [3].

### Список литературы

1. Шабалин Е. П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. – М.: Атомиздат, 1976.
2. Колесов В. Ф. Аперiodические импульсные реакторы – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. Т. 1.
3. Девяткин А. А., Воронцов С. В., Колесов В. Ф., Никитин И. А. и др. Пути модернизации БР-К1 для работы в импульсном режиме // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2017, вып. 4. С. 43–53.

Контактная информация –

Шалаева Людмила Сергеевна,  
инженер-исследователь 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. 140–149.