

ВОПРОСЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ В ТОПЛИВНЫХ БЛОКАХ АПЕРИОДИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА БР-К1

И. А. Никитин, Л. С. Богомолова, В. Х. Хоружий, А. В. Богомолов

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

Статья поступила в редакцию 04.07.2019, после доработки – 17.09.2019, принята к публикации – 04.10.2019

Представлена термодинамическая система сброса избыточного давления в топливных блоках активной зоны реактора БР-К1 после генерирования импульса делений на мгновенных нейтронах. Показаны физические явления, влияющие на изменения давления в блоках активной зоны. Приведена аналитическая модель учета данных эффектов. Проведены расчеты, определены термодинамические параметры в блоках после генерирования импульса делений. Показано, что термодинамические процессы в блоках активной зоны реактора быстротечны, составляют десятки миллисекунд. Представленный материал может быть полезен для специалистов, связанных с проектированием и эксплуатацией АИР.

Ключевые слова: реактор, импульс делений, давление, температура, газовая прослойка.

DETERMINATION OF THERMALPHYSIC AND DYNAMIC PARAMETERS OF GAS MEDIUM IN FUEL BLOCKS OF APERIODIC PULSE REACTOR BR-K1 // I. A. NIKITIN, L. S. BOGOMOLOVA, V. Kh. KHORUZHII, A. V. BOGOMOLOV / There is presented a thermodynamic system of excessive pressure release in a block of BR-K1 reactor core after a fission pulse on prompt neutrons is generated. Physical phenomena affecting the changes of pressure in the core block are shown. The analytical model of such effects account is presented. There are made computations, determined thermodynamic parameters in the block after the fission pulse generation. It is demonstrated that thermodynamic processes in the reactor core block are transient – they are tens of milliseconds long. The data presented can be useful for specialists dealing with APR design and operation.

Key words: critical stand, section of active zone, critical parameters, reactivity, temperature reactivity coefficient.

Введение

К аperiodическим импульсным реакторам (АИР) относятся устройства, работающие в режиме коротких всплесков делений, генерируемых в результате быстрого перевода реактора в надкритическое состояние по мгновенным нейтронам. Развитие АИР всегда было направлено на достижение предельного числа делений за импульс и высоких интенсивностей потока нейтронов. С другой стороны, по

своему назначению АИР должны быть рассчитаны на большое число (от нескольких сотен до тысяч) включений, поэтому за один импульс в них не должны происходить заметные необратимые изменения. Вследствие этого энерговыделение, а следовательно, и уровень флюенса нейтронов за импульс в АИР ограничены. В зависимости от типа реактора вводятся ограничения по уровню температуры и динамическому нагружению топливных элементов активной зоны (АЗ) или ее корпуса.

Действующие в настоящее время реакторы аperiодического действия можно условно разделить на два класса. Это АИР с АЗ из сплава высокообогащенного изотопом-235 урана с молибденом и реакторы с АЗ из растворов или смесей урана-235 с материалами, замедляющими нейтроны. Для второго класса реакторов характерны импульсы длительностью несколько миллисекунд и существенно смягченный по сравнению со спектром деления спектр нейтронов утечки [1].

При конструировании АИР с металлической АЗ важными и взаимосвязанными вопросами являются защита топливных элементов от высокотемпературной коррозии и создание физических барьеров на пути распространения радиоактивных веществ в окружающую среду. Эти задачи традиционно решаются путем заключения делящегося материала в герметичные защитные оболочки. Наиболее распространенным способом защиты деталей из металлического ДМ является медно-никелевое гальваническое покрытие. Например, в реакторах типа БАРС диски АЗ имеют только такое защитное покрытие [2]. В конструкции реактора БИР впервые для каждого диска был применен индивидуальный герметичный чехол из нержавеющей стали [3]. Иногда в дополнение к гальваническому покрытию дисков АЗ закрывают кожухом, например, из алюминия, как в реакторах SPR II, SPR III [1]. Кожух формирует полость для охлаждения деталей из ДМ и при этом обеспечивает дополнительный барьер по радиационной защите.

Стремление к снижению ограничительной роли механических напряжений при разработке конструкций АЗ быстрых АИР всегда было доминирующим во ВНИИЭФ. Такой подход наиболее выражен в оригинальной конструкции АЗ бустер-реактора БР-1 [4]. Отличительной особенностью и новизной БР-1 явилось то, что впервые для этого класса АИР осуществлен вариант структурного разбиения АЗ на диски, которые в свою очередь состоят из ряда коаксиальных колец (тонких и коротких цилиндрических оболочек) без каких-либо отверстий для их крепления, при этом применена свободная подвеска этих колец друг

на друге. Между кольцами по высоте и по радиусу предусмотрены зазоры для радиальных и осевых расширений. Диски объединены в отдельные блоки, конструктивной основой которых является герметичный чехол из нержавеющей стали, заполненный гелием.

Аналогичный подход использован и при разработке реактора БР-К1 [5], особенность конструкции его АЗ состоит в подвеске деталей из ДМ в чехле.

Учет избыточного давления и разработка систем его сброса в топливных блоках активной зоны АИР после генерирования импульса делений на мгновенных нейтронах представляют собой отдельную задачу. Например, для снижения избыточного давления газа в чехлах топливных блоков АЗ БР-К1 при генерировании импульсов применены ресиверы компенсации давления.

В связи с проведением модернизации реактора БР-К1 [6] возникла задача расчетным путем оценить уровни и характер изменения давления в блоках АЗ, наиболее подверженных высоким термомеханическим нагрузкам при генерировании импульса деления на мгновенных нейтронах.

Постановка задачи

Основу АЗ реактора БР-К1 составляют пять автономных блоков с ДМ в виде диска, каждый из которых представляет глубоко подкритическую сборку. Делящийся материал разбит на коаксиальные кольца (топливные элементы), которые заключены в герметичные неразъемные чехлы. Топливные элементы в блоках подвешены по торцам на кольцевых выступях с зазором относительно друг друга и чехлом. Конструктивная схема АЗ реактора БР-К1 приведена на рис. 1.

При эксплуатации реактора БР-К1, независимо от режима его работы, во внутренней полости блока с ДМ давление газа увеличивается за счет объемного температурного расширения топливных колец и температурного разогрева газа (гелия), окружающего ДМ. При генерировании импульса делений на мгновен-

ных нейтронах давление в первом случае увеличится «скачком» за время, при котором происходит быстрое изменение объема, во втором – время и характер температурного разогрева газа определяется его теплофизическими свойствами и геометрическими параметрами зазора. Увеличение давления в блоке АЗ при работе реактора в статическом режиме характеризуется такими же эффектами, только происходящими в течение длительного времени.

Для снижения избыточного давления в блоках с ДМ внутренние полости связаны через трубопроводы с буферными объемами. Ресиверы расположены над защитной плитой симметрично относительно каждого блока. На рис. 2 представлена фотография реактора БР-К1, на которой показаны места размещения ресиверов компенсации давления относительно АЗ.

При генерировании импульса деления на мгновенных нейтронах на изменение давления газа во внутренней полости блока влияют следующие процессы:

- объемное расширение ДМ, $p_{ск}(t)$;
- температурный разогрев газа, $p_T(t)$;
- перетекание газа из полости блока в ресивер с расходом G , $p_{сб}(t)$.

Расчетная газовая схема блока АЗ реактора БР-К1 приведена на рис. 3. Параметры расчетной схемы: ДМ в виде короткого цилиндра объемом $V_{ДМ}$ заключен в цилиндрический блок объемом V_B , где δ_0 – толщина газовой прослойки в начальный момент времени. Внутренняя полость блока через трубопроводы длиной $L = 600$ мм (диаметр проходного сечения $d = 9,2$ мм) связана с двумя ресиверами, объем каждого равен $V_P = 6,3$ л. Внутренняя полость заполнена гелием до давления $(1,05 \pm 0,01)$ атм. В начальный момент времени система находится в равновесии при температуре 20 °С и условии $p_B = p_P$. Для определения давления газа в блоке, принимаем, что газ является идеальным, $p = \rho RT / \mu$ (где ρ – плотность, R – универсальная газовая постоянная, T – температура, μ – молекулярный вес).

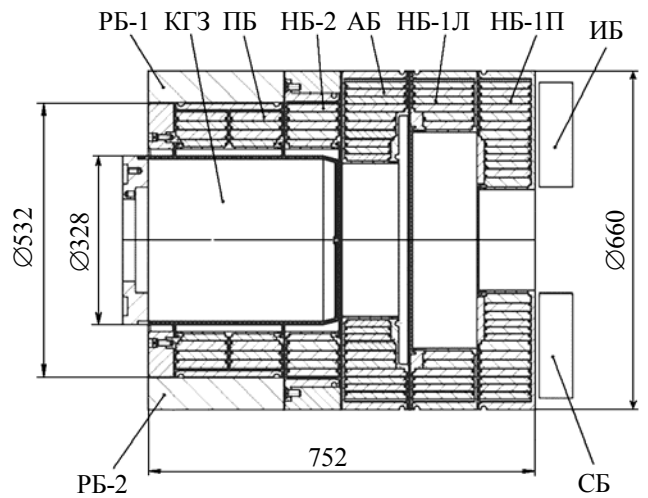


Рис. 1. Схема АЗ реактора БР-К1

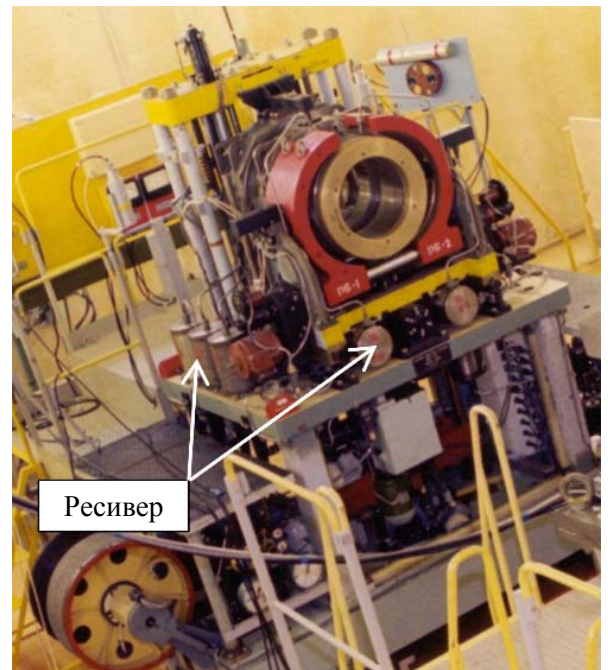


Рис. 2. Реактор БР-К1

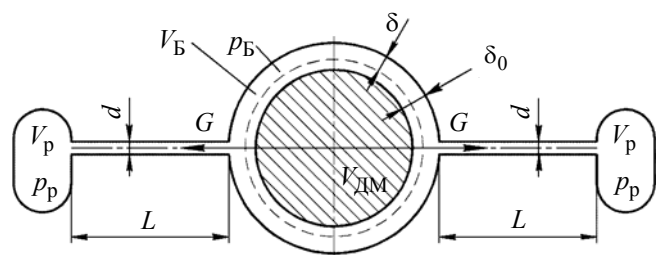


Рис. 3. Расчетная газовая схема блока АЗ реактора БР-К1

Объемное расширение ДМ

Во время физического пуска реактора БР-К1 было исследовано распределение плотности делений по АЗ. Определено распределение температур по топливным кольцам, когда полное энерговыделение в АЗ составляло $3,42 \cdot 10^{18}$ делений. Данные о поле температур в АЗ приведены в [7]. В работе [6] представлены параметры реактора при работе в импульсном режиме на мгновенных нейтронах после проведения модернизации: энерговыделение $3,0 \cdot 10^{18}$ делений при ширине импульса на половине высоты около 0,6 мс. Поэтому все дальнейшие рассуждения и расчеты будут проводиться относительно этих значений.

Распределения средних значений температур в кольцах структурных блоков АЗ реактора приведены на рис. 4. Начальная температура топливных элементов составляла 20°C . Из рис. 4 видно, что в реакторе БР-К1, наиболее высоким температурам разогрева подвержены топливные кольца в блоках НБ-1П, НБ-1Л и АБ.

Проведем расчеты по оценке характера изменения избыточного давления в блоках и времени сброса газа в ресивер. Определим термодинамические параметры газа после генерирования импульса делений.

Генерирование импульса делений на мгновенных нейтронах сопровождается быстрым разогревом топливных колец АЗ. Время объемного температурного расширения ДМ принимаем равным времени достижения в АЗ максимального энерговыделения, которое определяется как $\tau \approx 3\Theta_{1/2}$.

Изменение объема тела ΔV , т. е. объемное расширение кольца, можно рассматривать как линейное расширение в трех направлениях, которое с учетом проведения некоторых преобразований, определяется как

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_2 - V_1 = l_2^3 - l_1^3 = l_1^3 (1 + \alpha \Delta T)^3 - l_1^3 = \\ &= l_1^3 3\alpha \Delta T = V_1 3\alpha \Delta T, \end{aligned}$$

где l_1 , V_1 – начальный характерный размер и объем тела при температуре T_1 ; l_2 , V_2 – конечный характерный размер и объем тела при температуре T_2 ; α – коэффициент линейного расширения. Тогда

$$V_2 = V_1 + \Delta V = V_1 + V_1 3\alpha \Delta T = V_1 (1 + 3\alpha \Delta T).$$

Параметры блока НБ-1П при импульсном разогреве топливных колец приведены в табл. 1.

			328 (290)	355 (314)	263 (233)
			407 (359)	443 (391)	330 (292)
			477 (421)	515 (454)	400 (353)
		342 (302)	533 (470)	571 (503)	454 (401)
191 (170)	246 (218)	403 (356)	577 (509)	611 (538)	500 (441)
221 (196)	290 (257)	441 (389)	596 (525)	630 (555)	540 (476)
241 (214)	317 (281)	460 (406)			567 (500)
255 (226)	321 (284)	449 (396)	598 (527)		574 (506)
			586 (516)		564 (497)
			559 (493)		556 (490)
					550 (485)
					532 (469)
					493 (435)
ПБ	НБ-2	АБ	НБ-1Л	НБ-1П	

Рис. 4. Средние значения температур в блоках АЗ при работе реактора БР-К1 в импульсном режиме с энерговыделением $Y = 3,42 \cdot 10^{18}$ дел. ($Y = 3 \cdot 10^{18}$ дел.)

Параметры блока НБ-1П при импульсном разогреве топливных колец

Номер кольца*	Масса кольца (ДМ), кг	Объем кольца при 20 °С, см ³	Свободный газовый объем в блоке, см ³	Температура кольца, °С	Объем кольца при разогреве, см ³	Свободный газовый объем в блоке при разогреве, см ³
1	20,075	1167	2047	233	1176	1656
2	20,082	1168		292	1180	
3	20,371	1184		353	1199	
4	21,223	1234		401	1252	
5	21,715	1262		441	1282	
6	22,420	1303		476	1325	
7	40,443	2351		500	2394	
8	40,395	2349		506	2392	
9	40,963	2383		497	2426	
10	41,473	2411		490	2454	
11	41,416	2408		485	2450	
12	42,101	2448		469	2490	
13	42,556	2474		435	2513	
–	Сумма: 415,233	Сумма: 24142	–	–	Сумма: 24533	–

* Нумерация колец приведена от оси к периферии блока АЗ.

Из табл. 1 видно, что при генерировании импульса делений средняя температура разогрева топливных колец в блоке НБ-1П составляет 429 °С и газовый объем в блоке уменьшится на 391 см³.

Согласно схеме рис. 3, между ДМ и оболочкой имеется газовая прослойка. Чтобы определить ее величину, сделаны следующие допущения:

– толщина газовой прослойки δ между ДМ и оболочкой везде одинаковая;

– величина δ определяется как отношение свободного объема газа в блоке к площади внешней поверхности ДМ.

Для блока НБ-1П толщина газовой прослойки после расширения ДМ составляет 2,1 мм.

Скачок давления в результате объемного расширения ДМ определяем из уравнения состояния идеального газа

$$\frac{p_{Б0}V_{Б0}}{T_{Б0}} = \frac{p_{Б}V_{Б}}{T_{Б}} \quad \text{или} \quad \frac{pV}{T} = \text{const},$$

где $p_{Б0}$, $T_{Б0}$, $V_{Б0}$ – начальные давление, температура и объем газа; $p_{Б}$, $T_{Б}$, $V_{Б}$ – давление, температура и объем газа после объемного расширения ДМ.

Процесс изменения давления газа в результате объемного расширения ДМ считаем адиабатическим. Частный случай уравнения состояния идеального газа при протекании процесса без теплообмена с окружающей средой описывает закон Пуассона:

$$\left[\begin{array}{l} \frac{T_{Б0}}{T_{Б}} = \left(\frac{V_{Б}}{V_{Б0}} \right)^{\gamma-1}, \\ \frac{T_{Б0}}{T_{Б}} = \left(\frac{p_{Б0}}{p_{Б}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \quad \text{или} \quad \left[\begin{array}{l} TV^{\gamma-1} = \text{const}, \\ T^{\gamma} p^{1-\gamma} = \text{const}, \\ pV^{\gamma} = \text{const}. \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (1)$$

Согласно уравнениям (1), в результате объемного расширения ДМ давление газа составляет $p_B = 1,49$ атм, а температура $T_B = 64$ °С при показателе адиабаты в гелии, равном $\gamma = 1,66$ [9].

В момент импульса увеличение объема ДМ создает в газе волну возмущения, которая движется по среде со скоростью звука. Скорость распространения звука в гелии равна 965 м/с [8], длина свободного пробега составляет $\sim 0,2$ мкм [10]. Время прохождения волны возмущения в ресивер по трубопроводу составляет $\sim 1,0$ мс. Данное время характеризует начало движения газовой среды из блока в ресивер, обусловленное перепадом давления. Поэтому для упрощения в расчетах принимаем, что движение газовой среды начнется в момент достижения в АЗ максимального энерговыделения.

Разогрев газовой прослойки в блоке АЗ

Применим консервативный подход при расчете разогрева газовой прослойки в блоке АЗ. Консервативный подход предполагает установление таких условий температурного разогрева газа, при которых значение избыточного давления в газовой системе будет максимальным.

Для блоков АЗ, наиболее подверженных термодинамическим нагрузкам (НБ-1П, НБ-1Л, АБ), разработана расчетная модель с использованием схемы рис. 3 и принято допущение: разогрев газовой прослойки начинается в момент достижения импульсом максимального энерговыделения.

Краевые условия для формирования предельных параметров газовой системы (консервативный подход) таковы:

– на поверхности контакта ДМ с газовой прослойкой – граничное условие первого рода. Распределение температуры T_{F1} по поверхности предполагается однородным на протяжении всего процесса теплообмена:

$$(T_{F1}, \tau) = \text{const}(\tau);$$

– поверхность контакта газовой прослойки с корпусом теплоизолирована – граничное

условие второго рода, которое задает на границе тепловой поток $q = 0$.

Теплообмен между ДМ и газовой прослойкой осуществляется теплопроводностью, поток тепла пропорционален по величине и противоположен по направлению градиенту температуры,

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \text{grad} T),$$

где τ – время; ρ и c – плотность и удельная теплоемкость при постоянном давлении.

Расчетные зависимости изменения температуры на поверхности контакта газовой прослойки с корпусом от времени в блоках АЗ при генерировании импульса делений на мгновенных нейтронах приведены на рис. 5. Максимальные температуры разогрева газовой прослойки в блоках соответствуют средним температурам разогрева топливных колец.

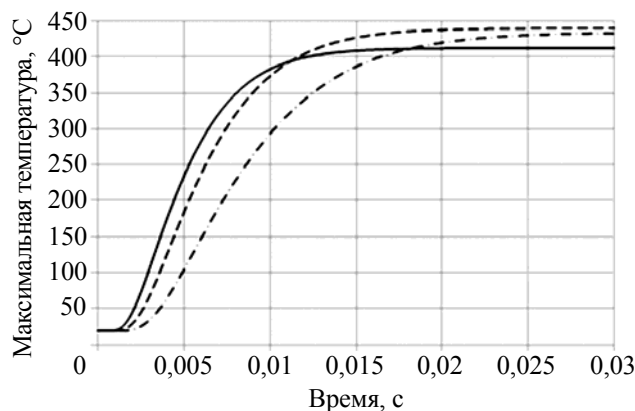


Рис. 5. Зависимость изменения температуры в газовой прослойке от времени в блоках НБ-1П (—), НБ-1Л (---) и АБ (— · —) реактора БР-К1 при генерировании импульса делений на мгновенных нейтронах

Изменение давления в газовой системе блока АЗ

Параметры $p_{ск}(t)$ и $p_T(t)$ характеризуют рост давления в блоке и определяются с учетом выше принятых допущений. Расчетная зависимость изменения давления от времени в блоке НБ-1П без учета перетекания газа из полости блока в ресивер и производная этой функции приведены на рис. 6.

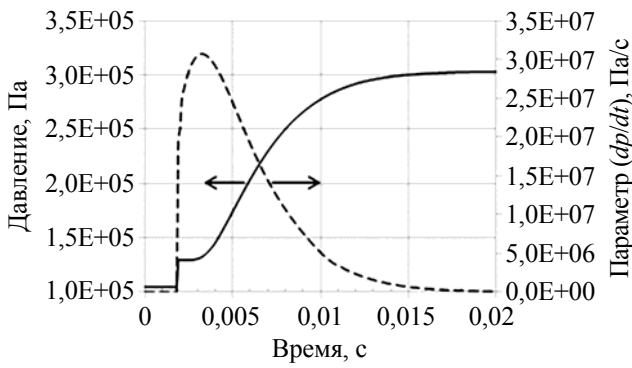


Рис. 6. Зависимость изменения давления и параметра dp_T/dt от времени в блоке НБ-1П (без учета перетекания газа из полости блока в ресивер)

Параметр $p_{сб}(t)$ характеризует снижение давления в блоке. Процессы изменения давления при температурном разогреве газа $p_{ск}(t)$ и перетекании газа из полости блока в ресивер $p_{сб}(t)$ происходят одновременно и зависят от температуры газовой прослойки.

Считаем, что процесс течения газа из полости блока в полость ресивера является адиабатическим, теплообмен отсутствует. Влияние соединительных трубопроводов ввиду их малой длины учтем с помощью постоянного коэффициента расхода газа μ .

Параметр $p_{сб}(t)$ можно определить, если принять, что перетекание газа из одной полости газовой системы в другую описывается формулой Сен-Венана и Ванцеля,

$$G_{ji} = \mu_{ji} f_{ji} \varphi \left(\frac{p_i}{p_j} \right) \sqrt{\frac{2k}{k-1}} p_j \rho_j,$$

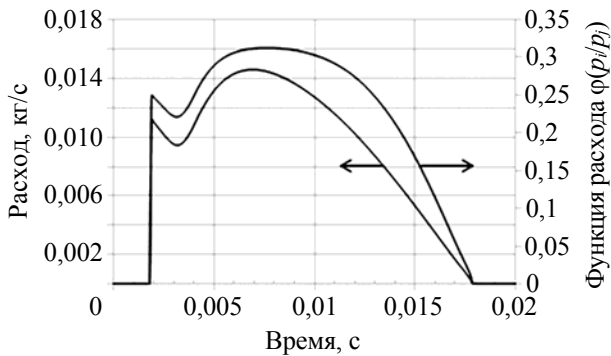


Рис. 7. Зависимость массового расхода и функции расхода от времени в блоке НБ-1П

и ввести значение

$$\varepsilon_{ji} = \frac{k}{k-1} RT_j G_{ji},$$

где $\varphi \left(\frac{p_i}{p_j} \right) = \sqrt{\left(\frac{p_i}{p_j} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_i}{p_j} \right)^{\frac{k+1}{k}}}$ – функция

расхода; $i = j + 1$; $j = 1$.

Состояние газа внутри блока и ресивера можно записать в виде обыкновенных дифференциальных уравнений:

– для полости блока

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_B}{dt} &= -\frac{1}{V_B} G, \\ \frac{dp_B}{dt} &= -\frac{k-1}{V_B} \varepsilon, \end{aligned} \right\};$$

– для ресивера

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_P}{dt} &= -\frac{1}{2V_P} G, \\ \frac{dp_P}{dt} &= -\frac{k-1}{2V_P} \varepsilon, \end{aligned} \right\};$$

где ρ и p – плотность и давление газа; G – расход; V – внутренний объем полости; k – показатель адиабаты; f – площадь отверстия; R – газовая постоянная; μ – коэффициент расхода.

Расчетные зависимости массового расхода и функции расхода от времени в газовой системе блока НБ-1П приведены на рис. 7.

Расчетные зависимости изменения давления от времени в газовой системе блока НБ-1П приведены на рис. 8.

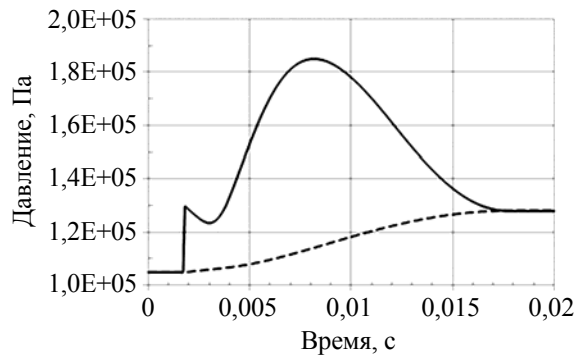


Рис. 8. Зависимость изменения давления от времени в газовой системе блока НБ-1П: — – полость блока; ---- полость ресивера

Термодинамические параметры газовой системы в блоках АБ и НБ-1Л

Толщина газовой прослойки в блоках НБ-1Л и АБ определяется описанным выше способом. В табл. 2 приведены параметры блока НБ-1Л, в табл. 3 – блока АБ при импульсном разогреве топливных колец.

В блоке НБ-1Л внутренний объем уменьшится на 267 см³, толщина газовой прослойки равна ~2,4 мм, средняя температура разогрева топливных колец – 459 °С. В результате объемного расширения ДМ в блоке НБ-1Л температура газовой прослойки составила 51 °С, давление – 1,35 атм.

Таблица 2

Параметры блока НБ-1Л при импульсном разогреве топливных колец

Номер кольца*	Масса кольца (ДМ), кг	Объем кольца при 20 °С, см ³	Свободный газовый объем в блоке, см ³	Температура кольца при импульсе, °С	Объем кольца при разогреве, см ³	Свободный газовый объем в блоке при разогреве, см ³
1	40,395	2348	1902	555	2395	1635
2	40,963	2382		538	2429	
3	50,087	2912		503	2965	
4	49,697	2889		454	2936	
5	50,518	2937		391	2978	
6	50,064	2911		314	2943	
–	Сумма: 281,724	Сумма: 16379	–	–	Сумма: 16646	–

* Нумерация колец приведена от оси к периферии блока АЗ.

Таблица 3

Параметры блока АБ при импульсном разогреве топливных колец

Номер кольца*	Масса кольца (ДМ), кг	Объем кольца при 20 °С, см ³	Свободный газовый объем в блоке, см ³	Температура кольца при импульсе, °С	Объем кольца при разогреве, см ³	Свободный газовый объем в блоке при разогреве, см ³
1	21,223	1234	2452	493	1256	2130
2	21,715	1262		516	1286	
3	22,42	1303		527	1328	
4	–	2154**		–	2154**	
5	40,395	2348		525	2393	
6	40,963	2382		509	2426	
7	50,087	2912		470	2962	
8	49,697	2889		421	2933	
9	50,518	2937		359	2975	
10	50,064	2911		290	2941	
–	Сумма: 347,082	Сумма: 22332	–	–	Сумма: 22654	–

* Нумерация колец приведена от оси к периферии блока АЗ.

** Кольцо из нержавеющей стали.

В блоке АБ внутренний объем уменьшится на 322 см^3 , толщина газовой прослойки равна $\sim 2,8 \text{ мм}$, средняя температура разогрева топливных колец – $457 \text{ }^\circ\text{C}$. В результате объемного расширения ДМ в блоке АБ температура газовой прослойки составила $49 \text{ }^\circ\text{C}$, давление – $1,33 \text{ атм}$.

Динамический разогрев газовой прослойки в блоках НБ-1Л и АБ выполняется описанным выше способом. Результаты расчета представлены на рис. 5.

Расчетные зависимости изменения давления от времени в блоках НБ-1Л, АБ без учета перетекания газа из полости блока в ресивер и производные этих функций приведены на рис. 9.

На рис. 10 представлены зависимости изменения массового расхода и функции расхода от времени в блоках НБ-1Л, АБ.

Зависимости изменения давления от времени в газовой системе блоков НБ-1Л и АБ приведены на рис. 11.

Как показано на рис. 8 и 11, в АЗ реактора БР-К1 при генерировании импульса на мгновенных нейтронах с энерговыделением $3,0 \cdot 10^{18}$ делений, давление газа в блоках НБ-1П, НБ-1Л и АБ через $\sim 9 \text{ мс}$ достигает максимальных значений, $0,190$; $0,174$ и $0,157 \text{ МПа}$, соответственно. Сброс давления из блока в ресивер также происходит достаточно быстро, в течение $\sim 20 \text{ мс}$. После импульса делений газовая система достигает равновесного состояния при давлении $\sim 0,130 \text{ МПа}$.

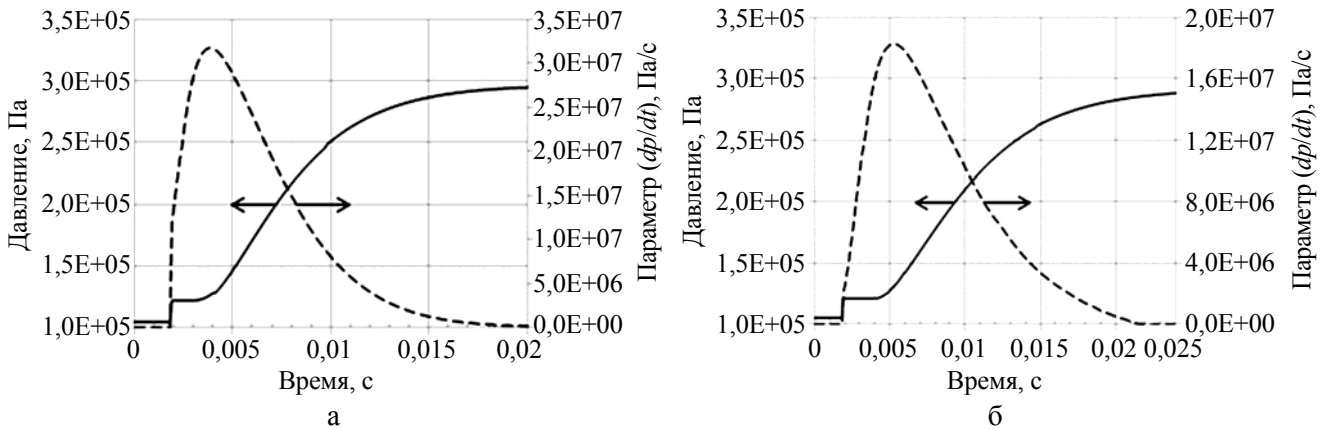


Рис. 9. Зависимость изменения давления газа и параметра dp_T/dt от времени (без учета перетекания газа из полости блока в ресивер): а – блок НБ-1Л; б – блок АБ

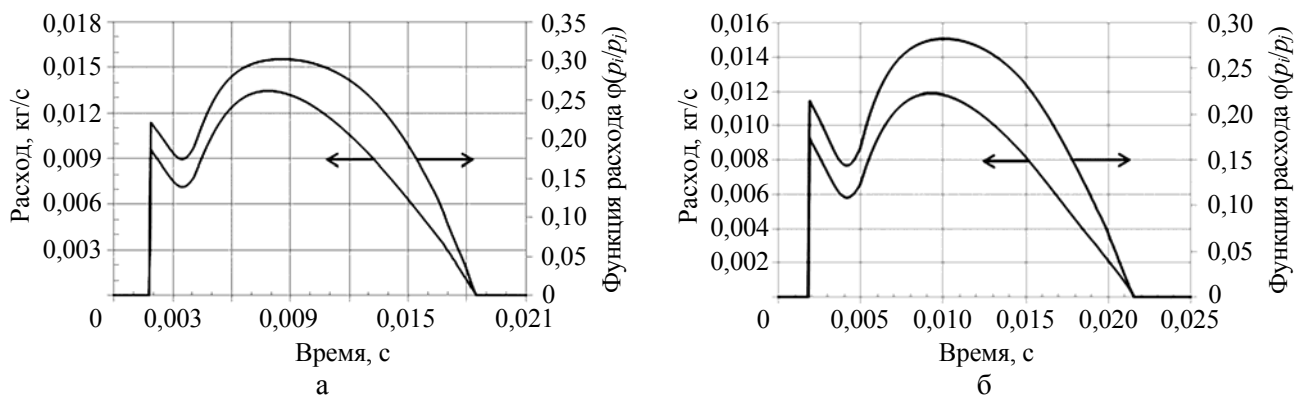


Рис. 10. Зависимость изменения массового расхода и функции расхода от времени в блоках НБ-1Л (а) и АБ (б)

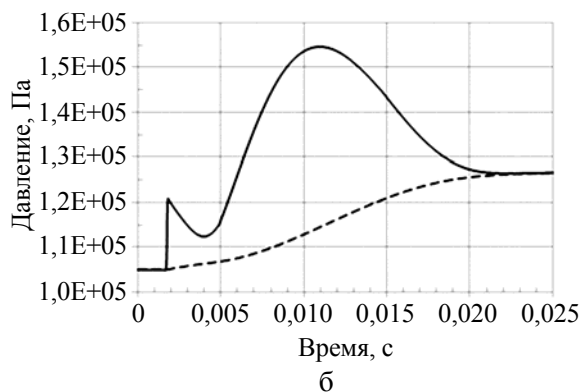
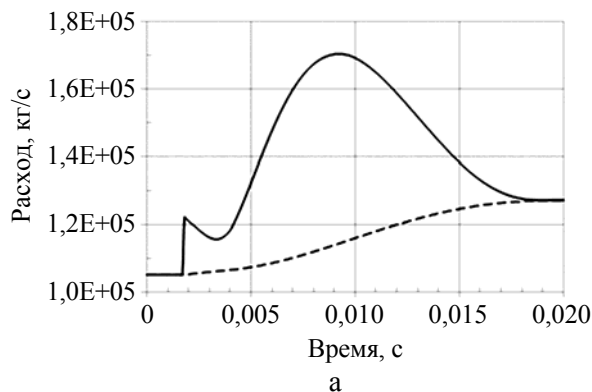


Рис. 11. Зависимость изменения давления от времени в газовой системе в блоках НБ-1Л (а) и АБ (б):
 — — полость блока; --- — полость ресивера

Заключение

Представлен технический подход разработки активной зоны аperiodического импульсного реактора, используемый во ВНИИЭФ, в части конструкции блоков, содержащих делющийся материал.

На примере активной зоны БР-К1 рассмотрена пневматическая система снижения избыточного давления газа в блоках реактора при генерировании импульса делений на мгновенных нейтронах. Приведены основные физические явления, которые влияют на изменения давления в блоке активной зоны реактора. Представлена аналитическая модель, учитывающая данные эффекты.

Разработана модель динамического разогрева газовой прослойки в блоке активной зоны реактора. Проведены расчеты, определены параметры разогрева газовой прослойки в блоках, подверженных значительным термодинамическим нагрузкам.

Проведены расчеты, определены термодинамические параметры газовой системы в блоках НБ-1П, НБ-1Л и АБ при генерировании в реакторе импульса делений на мгновенных нейтронах. Показано, что длительность термодинамических процессов в блоке активной зоны реактора БР-К1 составляет ~20 мс.

Расчетные модели рекомендуется использовать на стадии проектирования активной зоны АИР для определения оптимальной конструкции.

Список литературы

1. Колесов В. Ф. Аperiodические импульсные реакторы. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1999.
2. Леваков Б. Г., Лукин А. В., Магда Э. П. и др. Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ-ВНИИТФ. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2002.
3. Дегтярев А. Н., Игнатов И. И., Колесов В. Ф. и др. Импульсный реактор БИР // ВАНТ. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки. 1985, вып. 1, с. 14–21.
4. Павловский А. И., Малинкин А. А., Колесов В. Ф., Кошелев А. С. и др. Бустер-реактор БР-1 // ВАНТ. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки, 1985, вып. 1, с. 3–13.
5. 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.
6. 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.
7. Шалаева Л. С., Никитин И. А. Расчетное обоснование конструктивной схемы воздушно-го охлаждения активной зоны реактора БР-К1 при работе в статическом режиме // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2018, вып. 4, с. 140–149.

8. Кикоин И. К. Таблицы физических величин. Справочник. – М.: Атомиздат, 1976.

9. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. – Москва: Мир, 1983.

10. Кошкин Н. И., Миркевич М. Г. Справочник по элементарной физике. – М.: Наука, 1964.

Контактная информация –

Богомолова Людмила Сергеевна,
инженер по испытаниям ИЯРФ,

РФЯЦ-ВНИИЭФ,

e-mail: otd4@expd.vniief.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2019, вып. 4, с. 164–174.