

РАСЧЕТЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЛОКА НБ-1п РЕАКТОРА БР-К1М

Д. Н. Ткаченко, Н. В. Лопухов, К. Г. Плужян

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, г. Саров Нижегородской обл., пр. Мира, д. 37

Статья поступила в редакцию 08.07.2022, после доработки – 15.07.2022, принята к публикации – 20.09.2022

В работе представлены результаты численного исследования нестационарного термомеханического состояния активной зоны быстрого импульсного реактора при действии импульса делений длительностью 600 мкс с учетом физической и геометрической нелинейности процесса деформирования материалов, контактного взаимодействия и зависимости прочностных характеристик топливных колец от температуры.

В работе впервые на основе трехмерного численного моделирования динамики составных частей реактора БР-К1М и последующего анализа напряженно-деформированного состояния блока в условиях нестационарного (импульсного) гомогенного разогрева топливных элементов исследована динамика структурных узлов блока НБ-1п в процессе развития импульса делений. Анализ результатов показал отсутствие ударного контактного взаимодействия между функциональными узлами блока НБ-1п в импульсном режиме работы.

Ключевые слова: быстрый импульсный реактор, бустер-реактор, топливные кольца, численное исследование, активная зона, математическая модель, энерговыделение, корпус реактора, прочностные характеристики, импульсный режим, длительный статический режим, напряженно-деформированное состояние.

Dynamic deformation calculations of block NB-1p of reactor BR-K1M. D. N. Tkachenko, N. V. Lopukhov, K. G. Pluzyan (*FSUE «RFNC-VNIIEF», 607188, Sarov, Nizhny Novgorod region, Mira ave., 37*). In the paper there are presented the results of numerical investigation of nonstationary thermomechanical state of fast pulsed reactor core under the effect of a 600 μ s-long fission pulse in terms of physical and geometric nonlinearity of material deformation process, contact interaction and dependence of fuel ring strength properties on temperature.

In the paper there was for the first time developed – on the base of three-dimensional simulation of BR-K1M reactor components dynamics and further analysis of stress-deformed state of the block under nonstationary (pulsed) homogeneous heating of fuel elements – the dynamics of the NB-1p block units in the course of fission pulse development. The analysis of results demonstrated the lack of shock contact interaction between submachines of block NB-1p in the pulsed operation mode.

Key words: Fast pulsed reactor, booster-reactor, fuel rings, numerical investigation, core, mathematical model, energy release, reactor vessel, strength properties, pulsed mode, long-time static mode, stress-deformed state.

DOI 10.53403/02054671_2022_3_17

Введение

Быстрый импульсный реактор БР-К1 (предшественник реактора БР-К1М) был

введен в эксплуатацию в июне 1995 г. Реактор БР-К1 представлял собой многоцелевую ядерно-физическую установку, предназначавшуюся как для апробации

элементов концептуального проекта каскадного бустер-реактора БР-К, так и для проведения различных облучательных экспериментов в режиме аperiodического импульсного реактора (АИР) (рис. 1) [1, 2].

Герметичные чехлы из нержавеющей стали, использованные в БР-К1, являются наиболее распространенным средством защиты топливных элементов активных зон от коррозии и применяются во многих реакторах. То, что их нагрев в процессе генерации статического пуска может приводить к деформации и короблению, до начала физического пуска БР-К1 в 1989 г. не наблюдалось на практике. Деформация чехлов приводит к значительному уменьшению зазоров между свободно падающими и неподвижными блоками активной зоны, что, в свою очередь, ведет к заклини-

ванию падающих блоков, невозможности срабатывания аварийной защиты и перевода реактора в заглушенное состояние. Расчеты [3] деформаций и напряжений показали, что выпучивание торцевых пластин (крышек) и коробление чехлов в целом связано с потерей чехлами термоупругой устойчивости. До потери устойчивости наблюдаются только небольшие выпучивания торцевых пластин, а после чехол сильно перекашивается, более всего около внутренней цилиндрической обечайки. Смещения при этом достигают 0,5–1,0 см при плоском начальном зазоре между чехлами 0,4 см. В соответствии с вышеуказанными расчетными данными предусмотренные проектом технические характеристики реактора были серьезно ограничены (уменьшены более чем в 3 раза).

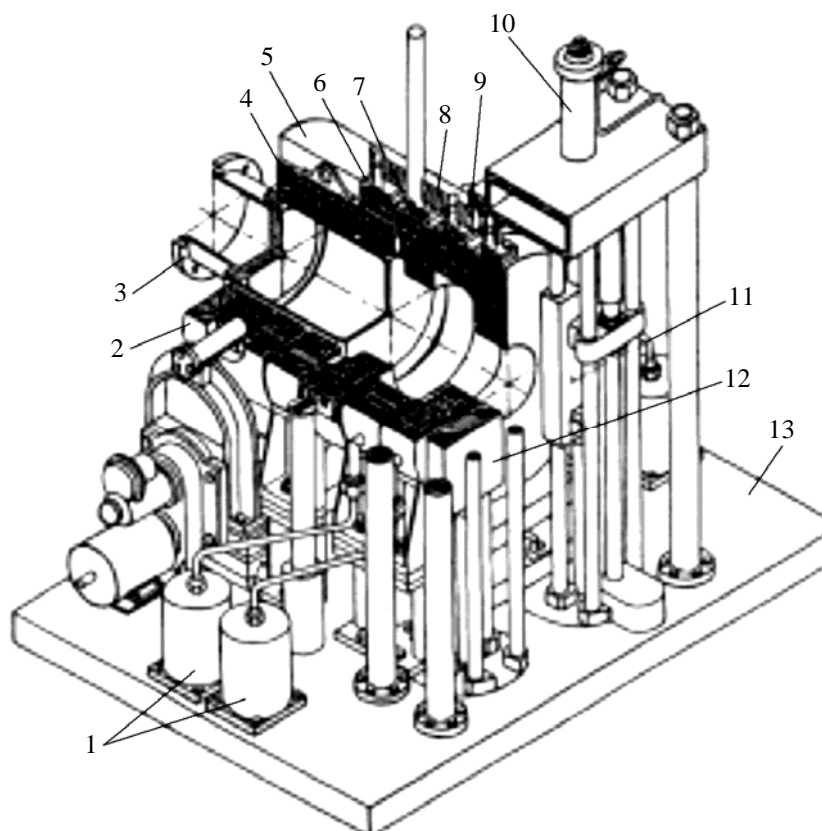


Рис. 1. Общий вид АЗ БР-К1 и других элементов реактора: 1 – резонатор; 2, 5 – регулирующие блоки; 3 – контейнер горизонтальной загрузки; 4 – подвижный блок; 6, 8, 9 – неподвижные блоки; 7 – блок безопасности; 10 – демпфер импульсного блока; 11 – импульсный блок; 12 – стоп-блок; 13 – опорная плита

Деформации топливных колец (ТК) АЗ, используемые в уравнениях динамики реактора, рассчитывались с помощью аналитических выражений в предположении, что вибрации каждого кольца осуществляются устойчиво и полностью независимо от других колец [4]. Механические напряжения в ТК АЗ БР-К1 определяли с помощью программы численного расчета произвольных оболочек вращения в рамках модели упругости с учетом неравномерности распределения температуры по длине и по ободу оболочки [5].

До генерации мощных импульсов в реакторе БР-К1 дело не дошло: этому помешало коробление герметизирующих чехлов – реактор эксплуатировался в статическом и квазиимпульсном режимах [6].

Проблема коробления была решена оптимизацией конструкции чехлов и применением современных материалов с улучшенными термомеханическими свойствами – жаростойких титановых сплавов. Направления оптимизации, предложенные в обосновании модернизации реактора для вывода его на проектные параметры [7], были следующими:

- исключение асимметричной конструкции чехлов, состоящих из двух деталей, одна из которых объединяет внешнюю и внутреннюю обечайки и одну из торцевых крышек, а вторая – вторую торцевую крышку;

- исключение разнотолщинности стенок чехлов (уменьшение толщины массивных внешних цилиндрических обечаек, которые в прежней конструкции исполняли роль силового крепежного элемента блока, и введение в этом качестве отдельного специального силового корпуса);

- исключение использования при изготовлении чехлов кованных заготовок, имеющих в результате поковки внутренние ориентированные напряжения, высвобождающиеся с нагревом;

- применение при изготовлении чехлов титанового сплава, имеющего меньший коэффициент линейного расширения и зна-

чительно более высокие пределы текучести и прочности (по сравнению с ранее применявшейся нержавеющей сталью).

В современной конструкции топливные кольца блоков АЗ реактора БР-К1М находятся в чехлах из жаропрочного титанового сплава ВТ20. Чехлы закрепляются в силовом корпусе из нержавеющей стали с помощью шпонок, предотвращающих их вращение и перемещение в осевом направлении. Стальной силовой корпус каждого блока закреплен на стальной опорной плите, неподвижные блоки механически связаны друг с другом.

В процессе развития импульса делений ТК испытывают термический удар. Быстрое расширение ТК в АЗ реактора может, в принципе, привести к возникновению ударного контактного взаимодействия между кольцами и узлами конструкции реактора (через чехлы из сплава ВТ20 на стальной силовой корпус и шпонки).

Ударные контактные взаимодействия между функциональными узлами реактора могут стать причиной возникновения пластических деформаций, коробления, потери устойчивости составных частей блоков, разрушения креплений и фиксирующих элементов конструкции, в том числе шпонок. Это может привести к потере возможности нормального функционирования систем аварийной защиты. Кроме того нормативные документы, регламентирующие разработку и эксплуатацию импульсных реакторов, требуют не менее чем двукратного запаса прочности корпусных элементов активной зоны.

В данной работе на основе трехмерного численного моделирования динамики составных частей реактора БР-К1М с использованием комплекса ЛОГОС [8–10] и последующего анализа НДС блоков в условиях нестационарного (импульсного) гомогенного разогрева ТК представлены результаты решения следующих задач:

- установления факта наличия/отсутствия ударного контактного взаимодействия между функциональными узлами

конструкции при импульсном режиме работы реактора;

– исследования динамики структурных узлов реактора в процессе развития импульса делений;

– проверки сохранения устойчивости составных частей блоков реактора.

Многофункциональный программный комплекс ЛОГОС впервые применен для решения задач, связанных с расчетным обоснованием возможности безопасной реализации регламентированных эксплуатационных пределов АИР.

1. Особенности формирования импульса делений

Реактор БР-К1 разработан в ИЯРФ ВНИИЭФ и введен в эксплуатацию в июне 1995 г. Реактор представляет собой многоцелевую ядерно-физическую установку, предназначенную как для апробации элементов концептуального проекта двухсекционного бустера-реактора «Каскад» (БР-К) с односторонней нейтронной связью секций, так и для проведения различных облучательных экспериментов в режимах аperiодического импульсного реактора и бустера. В последнем случае предполагалась работа БР-К1 совместно с ускорителем электронов ЛИУ-30 [11]. В настоящее время ускоритель ЛИУ-30 генерирует $\sim 10^{14}$ нейтронов за импульс, что недостаточно для работы в полноценном бустерном режиме.

Планируемые параметры импульса на мгновенных нейтронах модернизированного реактора БР-К1М следующие:

– предельно-допустимое энерговыделение в АЗ – $3,5 \cdot 10^{18}$ делений (106 МДж);

– минимальная ширина импульса на половине максимальной мощности – 600 мкс.

Эти параметры определяются во многом максимальной температурой ТК, которая не должна превышать ~ 650 °С. Кроме того, осевые и нормальные перемещения торцевых поверхностей титановых чехлов

не должны препятствовать срабатыванию аварийной защиты – свободному падению под собственным весом аварийного, импульсного и стоп-блоков.

Превышение эксплуатационных пределов БР-К1М приведет к существенному ограничению ресурса установки. Ограничение максимальной температуры ТК связано со свойствами U-Mo сплава [12].

Модуль упругости уменьшается почти пропорционально температуре. При температуре ≈ 640 °С модуль упругости резко убывает (данный эффект связан с переходом урана из вязко-пластичного состояния в хрупкое). Физические особенности топливного материала реактора БР-К1М определяют максимально допустимую температурную нагрузку, связанную с разогревом в процессе импульса делений, и, тем самым, ограничивают полуширину импульса делений на мгновенных нейтронах – обуславливают предельную мощность в пике импульса.

Зависимость мощности реактора, работающего в импульсном режиме на мгновенных и запаздывающих нейтронах [13], от времени при безынерционном гашении реактивности может быть представлена в виде

$$Q(t) \approx \frac{P_0 \alpha \exp[-\alpha \cdot |t - t_0|]}{[1 + \exp(-\alpha \cdot |t - t_0|)]^2}, \quad (1)$$

где Q – мощность, Вт; P_0 – энерговыделение, Дж; α – обратный период разгона, с^{-1} ; t_0 – момент времени, в который мощность максимальна, с; t – время, с.

Отсчет времени будем вести от того момента, при котором энерговыделение еще не началось или, по крайней мере, очень мало. Для этого, как следует из формулы (1), достаточно положить t_0 равным трем полуширинам импульса делений: $t_0 \approx 3\Theta_{1/2}$, где $\Theta_{1/2}$ – полуширина импульса делений, равная 600 мкс. При безынерционном гашении длительность импульса на половине высоты (полуширина импульса) определяется как

Данные о поле температур АЗ БР-К1 можно использовать для БР-К1М, поскольку характер пространственного распределения энерговыделения существенно не изменен: сохранена структура АЗ, а именно она преимущественно определяет распределение энерговыделения.

С учетом того, что пространственное распределение энерговыделения постоянно и не зависит от мощности и режима работы, можно утверждать, что относительное распределение числа делений по блокам

сохранено. В табл. 1 и 2 приведено распределение числа делений по кольцам и структурным блокам АЗ реактора БР-К1М.

На основе данных о распределении числа деления по кольцам рассчитаны зависимости удельной мощности внутреннего источника теплоты в ТК НБ-1п от времени (рис. 3) при работе реактора в импульсном режиме с полным числом делений $3,42 \cdot 10^{18}$ и полушириной импульса 600 мкс (величина энерговыделения на 1 акт деления принята равной 180 МэВ).

Таблица 1

Число делений в ТК блоков АЗ БР-К1М

№ кольца**	Число делений в топливном кольце, отн. ед. 10^{-2}					
	ПБ*		НБ-2	АБ	НБ-1л	НБ-1п
	ПБ-л	ПБ-п				
1	0,862	1,08	1,52	1,79	3,84	1,49
2	1,47	1,93	2,80	1,92	3,77	1,61
3	1,35	1,77	2,68	2,02	4,31	1,69
4	1,18	1,52	2,49	***	3,86	1,78
5	–	–	2,14	3,63	3,37	1,85
6	–	–	–	3,56	2,68	1,94
7	–	–	–	4,02	–	3,46
8	–	–	–	3,57	–	3,29
9	–	–	–	3,10	–	3,09
10	–	–	–	2,47	–	2,84
11	–	–	–	–	–	2,50
12	–	–	–	–	–	2,09

* ПБ условно разбит на два диска: левый и правый.

** Нумерация колец приведена от оси АЗ к периферии блока.

*** Кольцо из нержавеющей стали.

Таблица 2

Относительное распределение числа делений в блоках АЗ

Блок	Полное число делений, отн. ед.	Число делений при усреднении температуры колец, отн. ед.
ПБ	0,103	0,112
НБ-2	0,116	0,116
АБ	0,265	0,261
НБ-1л	0,219	0,218
НБ-1п	0,297	0,293
АЗ	1,000	1,000

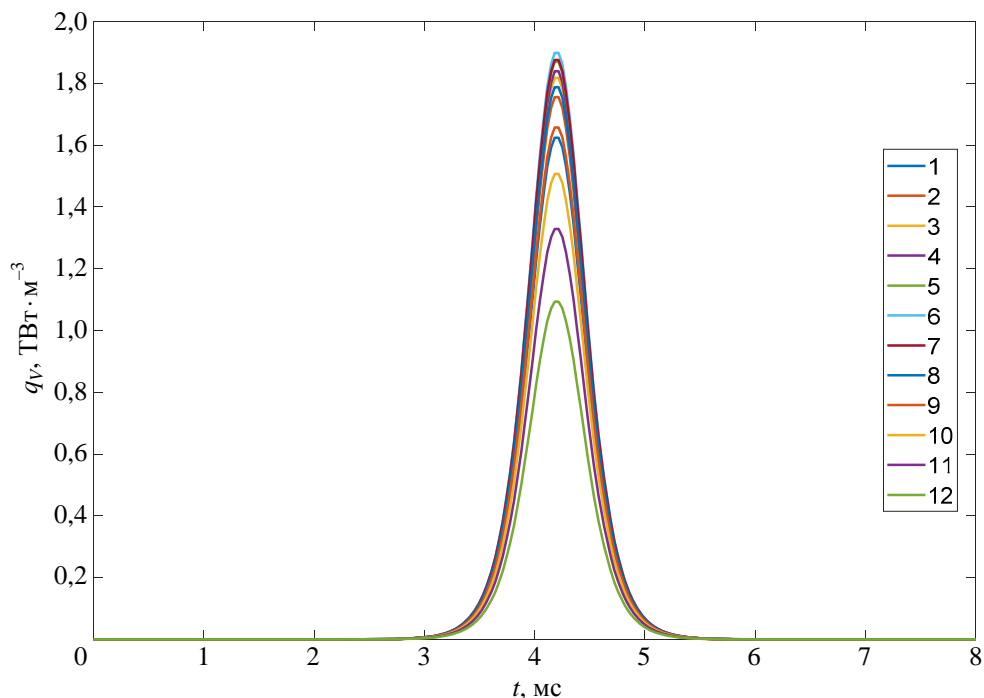


Рис. 3. Зависимость удельной мощности внутреннего источника теплоты в кольцах блока НБ-1п от времени (1–12 – номера колец)

Зависимости, представленные на рис. 3, являются исходными данными для расчета температур ТК блока НБ-1п – основного фактора, вызывающего их термомеханическое деформирование в процессе развития импульса делений.

2. Расчетная модель

На основе твердотельной CAD-модели и эскизной конструкторской документации разработана детальная трехмерная расчетная конечно-элементная модель, которая включает все элементы конструкции с учетом их силового замыкания. Дискретизация расчетной области по пространству выполнена на основе 8-узловых конечных элементов. Количество элементов в модели составляет 1 510 411. Характерный размер конечного элемента в модели варьируется от 2 до 5 мм (рис. 4).

Динамическое деформирование конструкционных материалов описывается

в упругопластической и геометрически нелинейной постановках с учетом нестационарного контактного взаимодействия с переменными границами и возможности взаимного проскальзывания элементов конструкции между собой. Коэффициент трения между контактными поверхностями в процессе взаимодействия принимается равным $f_{тр} = 0,2$. Перемещение и деформирование элементов конструкции моделируется с учетом силы тяжести.

Для описания деформирования конструкции используются изотропная упругопластическая модель материала и соотношения дифференциальной теории пластичности с кинематическим упрочнением. Упругопластические диаграммы деформирования материалов аппроксимируются билинейными функциями. Для ТК и материалов корпусных элементов используются модели материалов, учитывающие изменение механических свойств в зависимости от температуры.

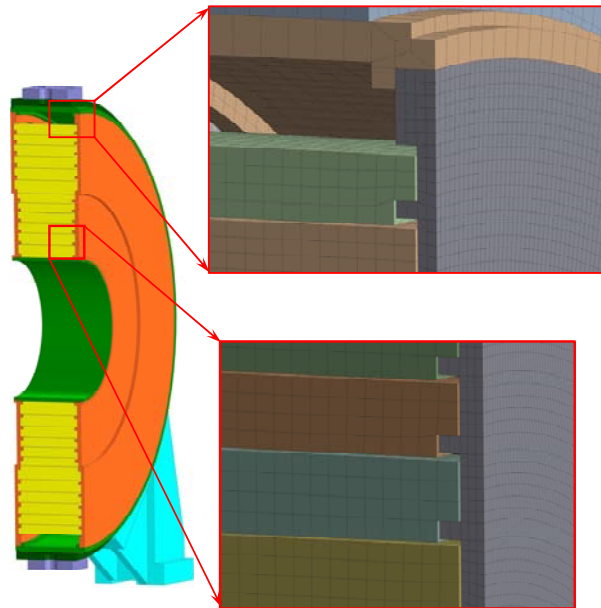


Рис. 4. Фрагменты конечно-элементной сетки блока НБ-1п

3. Температуры ТК блока НБ-1п

На рис. 5 представлены зависимости максимальной температуры ТК и удельного энерговыделения в ТК блока НБ-1п от времени при работе реактора в импульс-

ном режиме с полным числом делений $3,42 \cdot 10^{18}$ и полушириной импульса 600 мкс.

Зависимости температуры от времени в кольцах рассчитывались с помощью комплекса трехмерного математического моделирования ЛОГОС-Тепло.

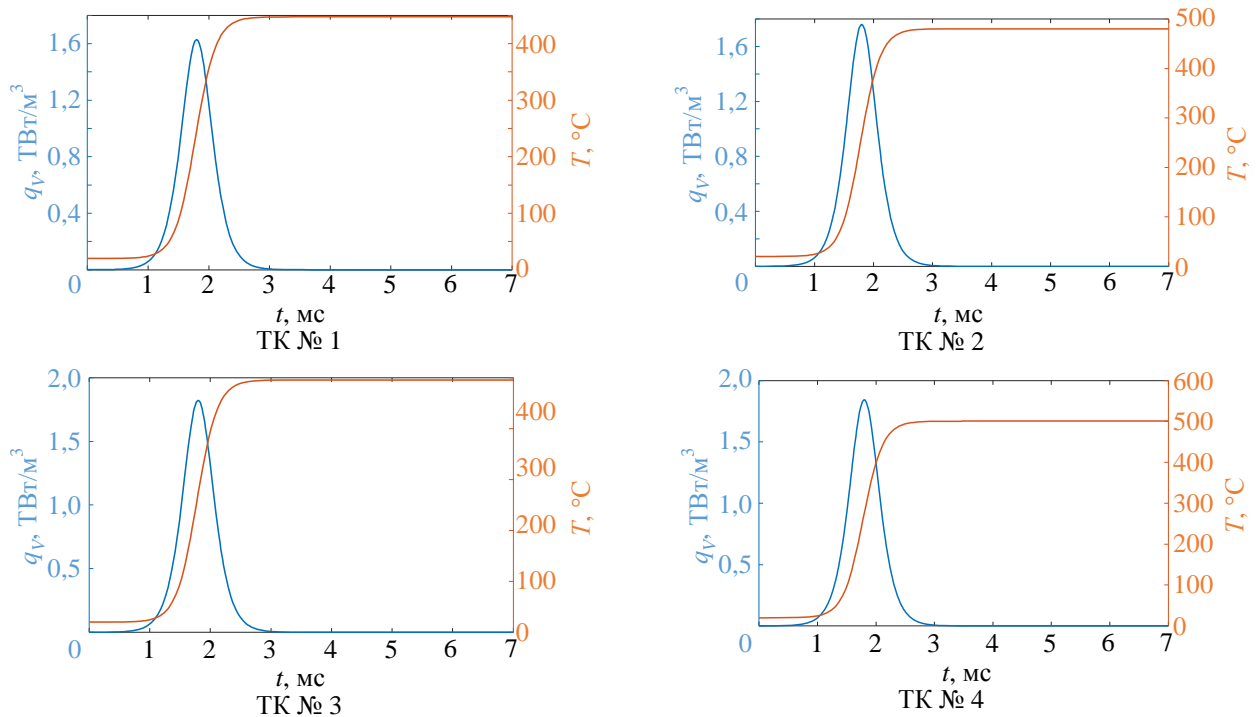


Рис. 5. Зависимости максимальной температуры ТК 1–12 и удельного энерговыделения в ТК блока НБ-1п от времени (см. также с. 25)

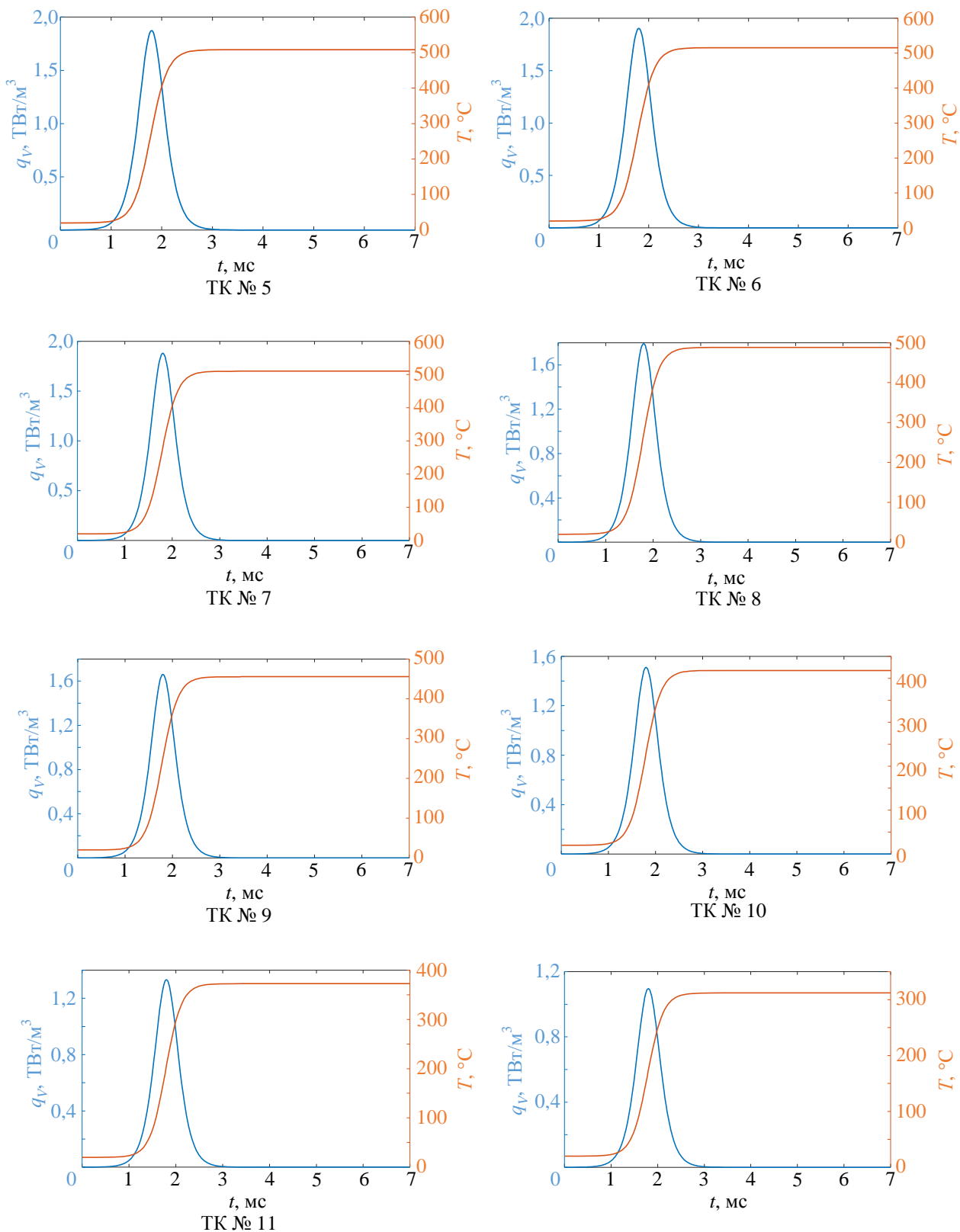


Рис. 5. Окончание

4. Результаты расчетов НДС

Общий вид и вид конструкции в разрезе твердотельной геометрической модели представлен на рис. 6, 7.

В процессе импульса деления температура в ТК монотонно повышается во времени синхронно от 20 °С до максимального значения. Для расчетов принимается однородное распределение температуры по каж-

дому ТК. Температура каждого кольца имеет свое максимальное значение (см. рис. 5).

Нормированная зависимость температуры любого ТК от времени для импульса деления полушириной 600 мкс представлена на рис. 8. Характерный вид зависимости мощности от времени для импульса деления полушириной 600 мкс показан на рис. 3.

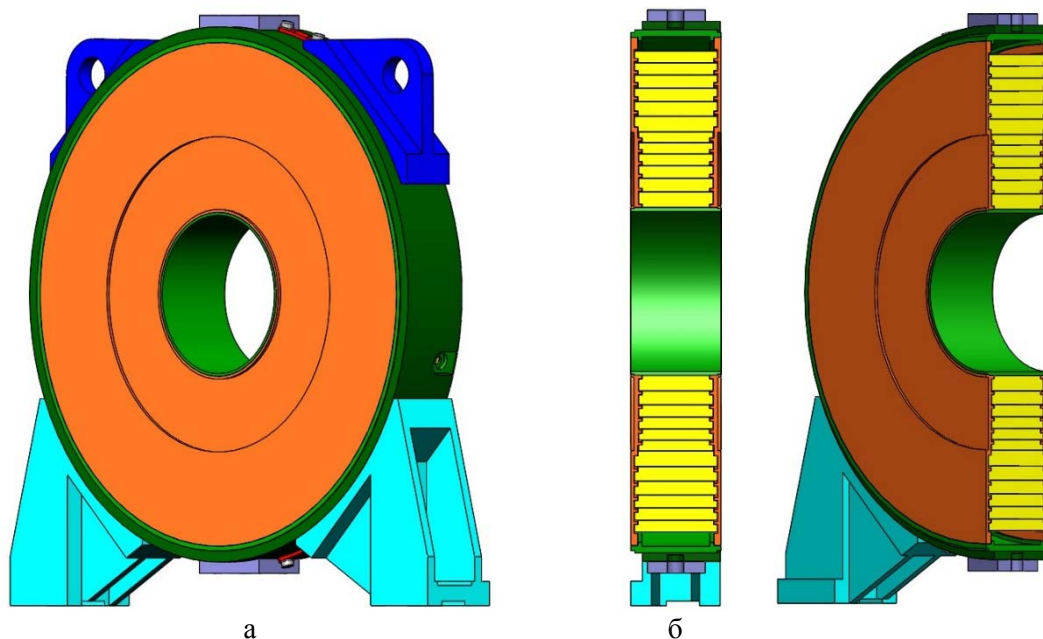


Рис. 6. Конструкция блока НБ-1п: а – общий вид; б – в разрезе

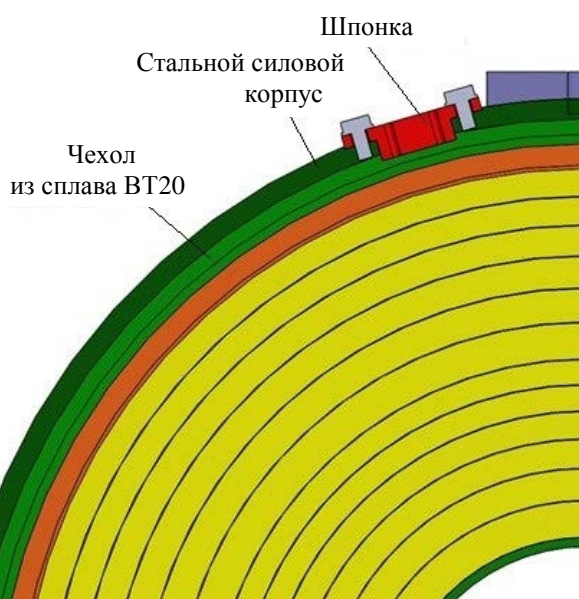


Рис. 7. Поперечное сечение блока НБ-1п

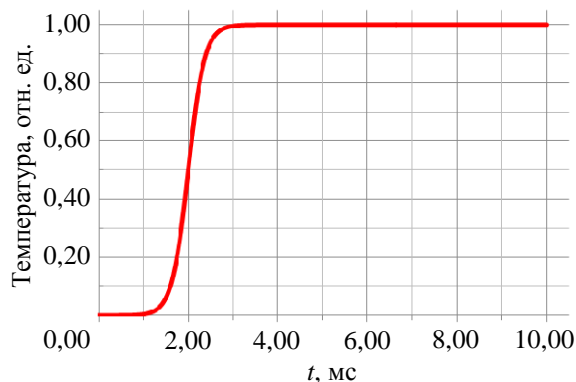


Рис. 8. Нормированная зависимость температуры любого ТК от времени для импульса деления полушириной 600 мкс

Анализ результатов расчета показывает, что при воздействии импульса деления ТК испытывают тепловое расширение и совершают колебания относительно положения равновесия. При этом зазоры между ТК и чехлом уменьшаются, но не выбираются полностью. Контактное взаимодействие между ТК и титановым чехлом не происходит.

На рис. 9 и 10 показано распределение максимальных значений интенсивности напряжений и перемещений в элементах конструкции блока НБ-1п в конечный момент времени расчета.

На рис. 11 приведено распределение максимальных значений интенсивности напряжений в титановом чехле. На рис. 12 и 13 – распределение максимальных значений интенсивности напряжений и температурных полей в наиболее нагруженном кольцевом выступе под ТК № 6.

Анализ результатов расчетов показывает:

– наиболее нагруженным элементом титанового чехла являются торцы кольцевых выступов под ТК. Эти напряжения не являются опасными, так как возникают в концентраторах напряжений вследствие температурного нагрева и инерциального воздействия ТК. Из рис. 12 видно, что об-

ласть развития напряжений находится в поверхностном слое кольцевых выступов и не доходит до корневой зоны, следовательно, риск их среза или деформации отсутствует. Максимальные значения эквивалентных напряжений составляют $\sigma_i = 148$ МПа, что соответствует запасу прочности $\eta_T \approx 4$ ($\sigma_T = 585$ МПа при 350°C [14]);

– коробление титанового чехла не происходит, так как максимальные значения эквивалентных напряжений в области торцевой крышки титанового чехла (область точки № 1) составляют $\sigma_i = 18$ МПа, что значительно ниже предела текучести материала титановых чехлов ($\sigma_T = 585$ МПа при 350°C). При таком значении уровня напряжений утери чехлом термоупругой устойчивости не происходит. Максимальные перемещения крышки титанового чехла составляют 0,044 мм, что не приводит к соприкосновению крышек титановых чехлов соседних блоков;

– максимальные значения эквивалентных напряжений в сварных швах реализуются на стыке крышки титанового чехла и внутренней обечайки, и составляют 12 МПа, что многократно ниже предела текучести титанового сплава ВТ20 ($\sigma_T = 585$ МПа при 350°C);

– максимальное значение эквивалентных напряжений в шпонках составляет $\sigma_i = 6,61$ МПа, что многократно ниже предела текучести материала шпонок (сталь 30Х13, $\sigma_T = 700$ МПа при 20°C [15]).

Поэтому можно утверждать, что в процессе импульса делений и разогрева топливных колец, обечаек крышки титановых чехлов, стальные корпуса и их элементы, шпонки и болты крепления шпонок сохраняют прочность с большим запасом по пределам текучести и прочности материалов.

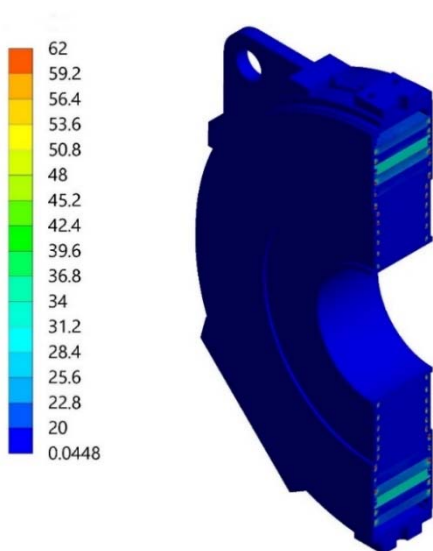


Рис. 9. Интенсивность максимальных напряжений в блоке НБ-1п (МПа)

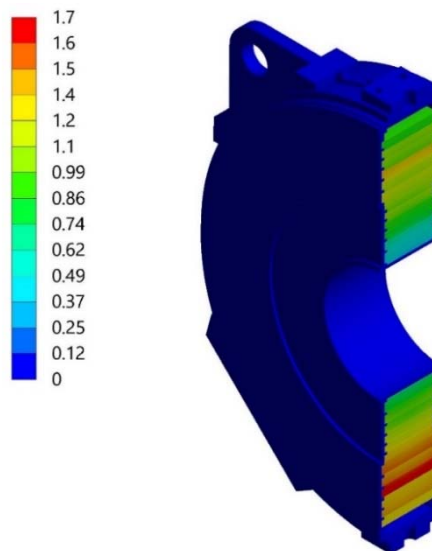


Рис. 10. Распределение перемещений в блоке НБ-1п (мм)

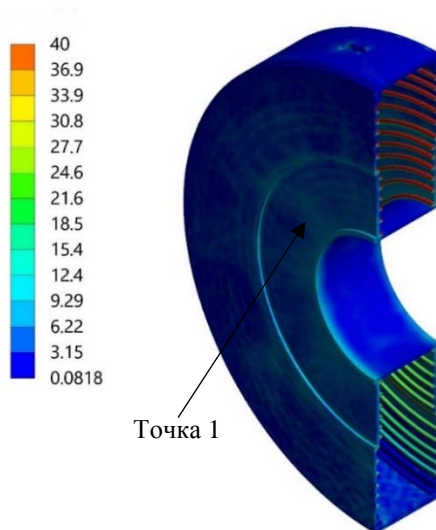


Рис. 11. Интенсивность максимальных напряжений в титановом чехле (МПа)

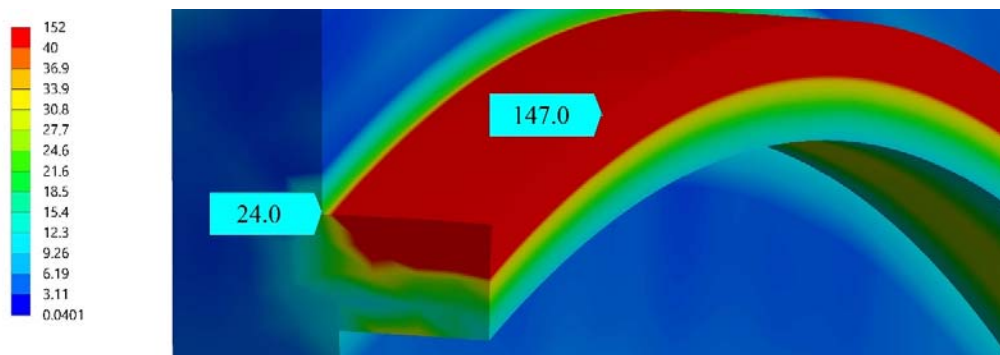


Рис. 12. Интенсивность максимальных напряжений в кольцевом выступе под ТК № 6 (МПа)

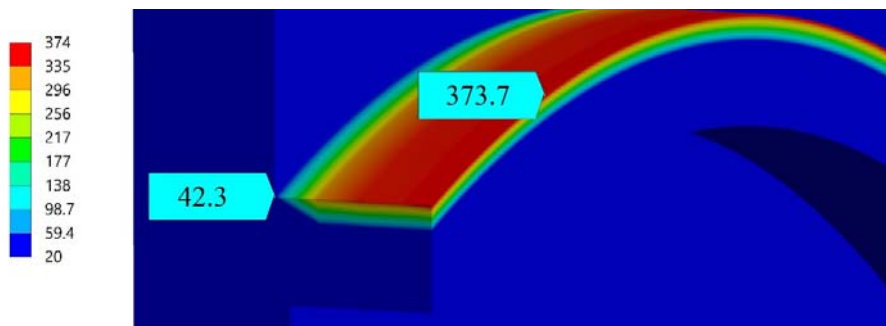


Рис. 13. Распределение температурных полей в кольцевом выступе под ТК № 6 (°C)

На рис. 14 показаны максимальные перемещения крышки титанового чехла блока НБ-1п (масштаб перемещений увеличен в 800 раз), на рис. 15 – распределение мак-

симальных значений интенсивности напряжений в сварном шве между крышкой титанового чехла и внутренней обечайкой.

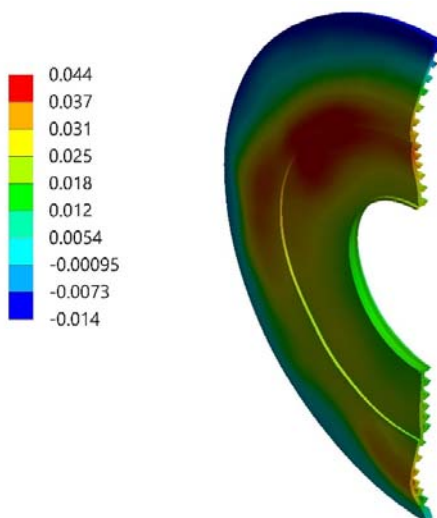


Рис. 14. Максимальные перемещения крышки титанового чехла блока НБ-1п (мм)

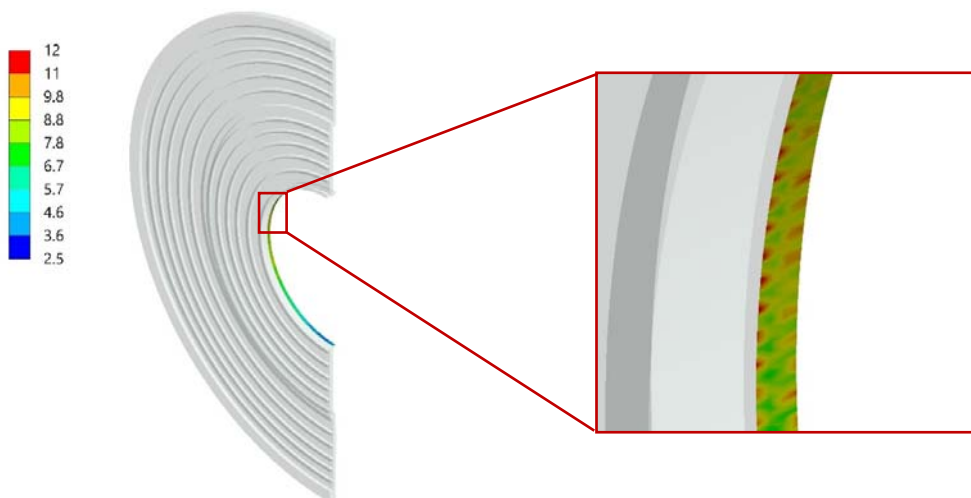


Рис. 15. Интенсивность максимальных напряжений в сварном шве (МПа)

На рис. 16 и 17 приведены временные зависимости максимальных значений интенсивности напряжений в титановом чехле и шпонках.

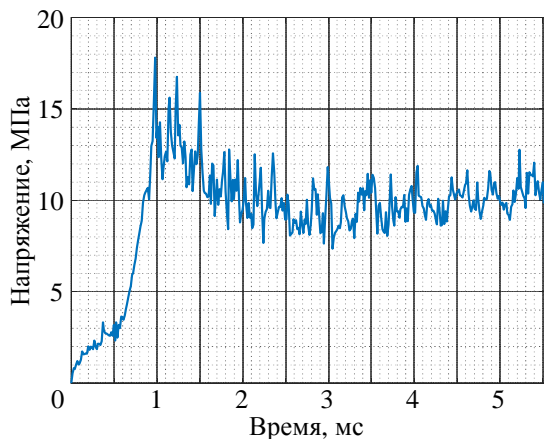


Рис. 16. Зависимость от времени эквивалентных напряжений в стенках титанового чехла блока НБ-1п

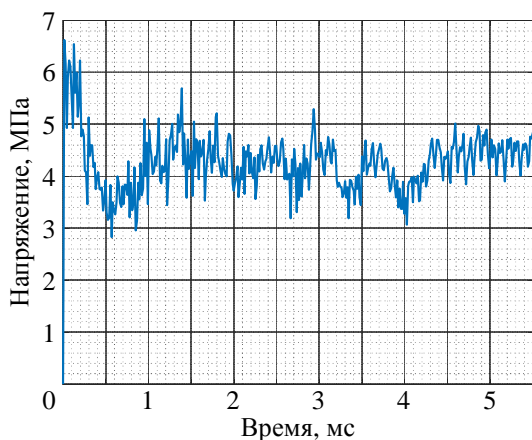


Рис. 17. Зависимость от времени эквивалентных напряжений в шпонках

На основе результатов расчетов выполнен анализ изменения зазоров между торцами ТК и титановым чехлом блока. На рис. 18 показана принятая нумерация ТК. Начальное значение зазора между торцами колец и крышкой титанового чехла составляет 0,5 мм.

На рис. 19 представлена временная зависимость замеряемых расстояний. Анализ результатов показывает, что смыкания указанных зазоров не происходит, что подтверждает отсутствие какого-либо воздей-

ствия топливных колец на титановый чехол в процессе развития импульса делений. На рис. 20 представлены зависимости максимальных эквивалентных напряжений от времени в наиболее нагруженных ТК блока НБ-1п.

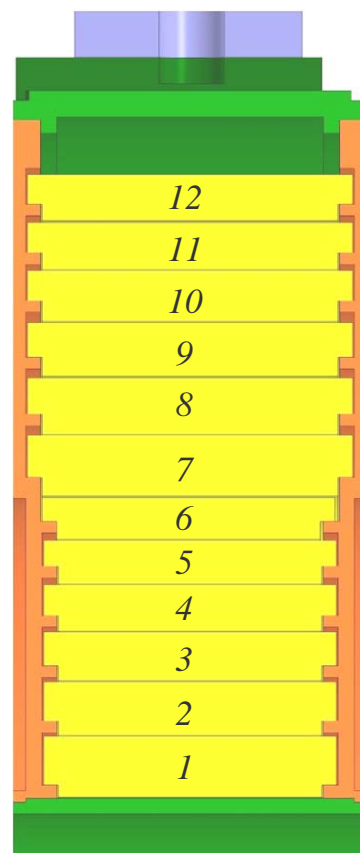


Рис. 18. Принятая нумерация топливных колец в блоке НБ-1п

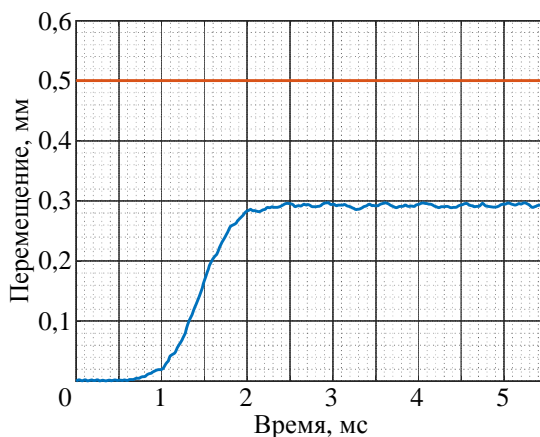
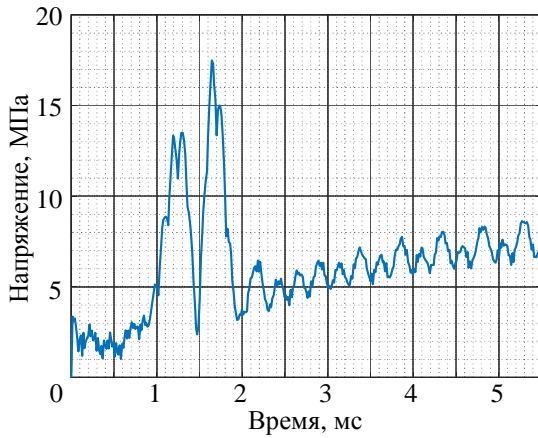


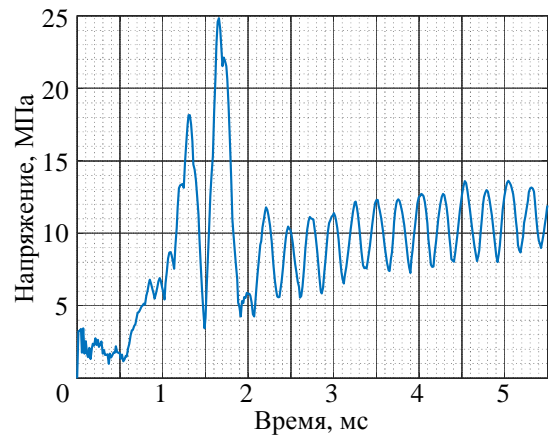
Рис. 19. Зависимость от времени расширения наиболее разогретого ТК

Из графиков рис. 20 видно, что изменение максимальных эквивалентных напряжений в ТК во времени носит колебательный характер с небольшими биениями. Максимальное значение эквива-

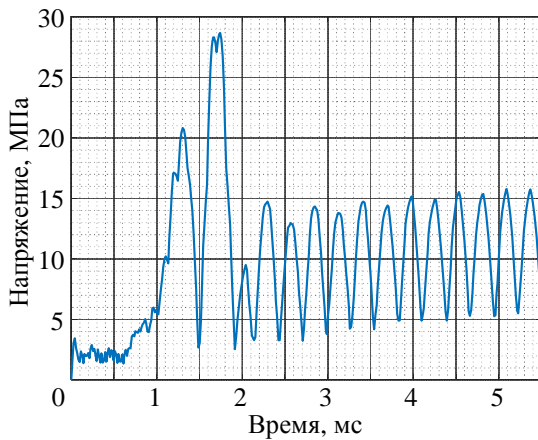
лентных напряжений составляет $\sigma_i = 47,4$ МПа, что ниже предела текучести материала ТК при соответствующей температуре в 8,5 раз.



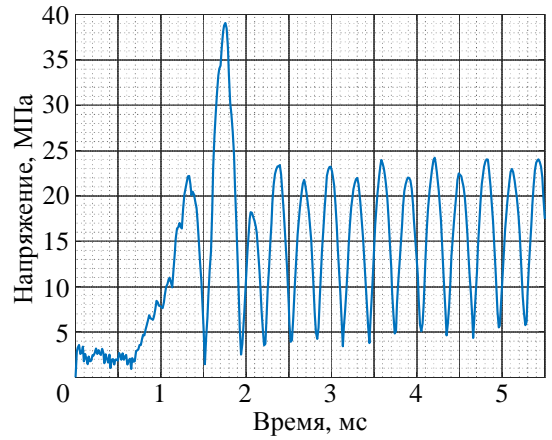
Кольцо № 5



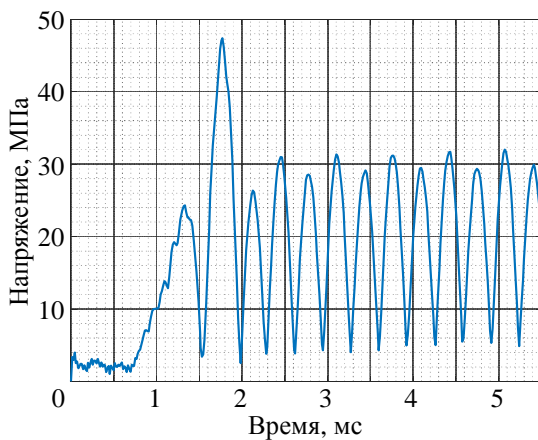
Кольцо № 6



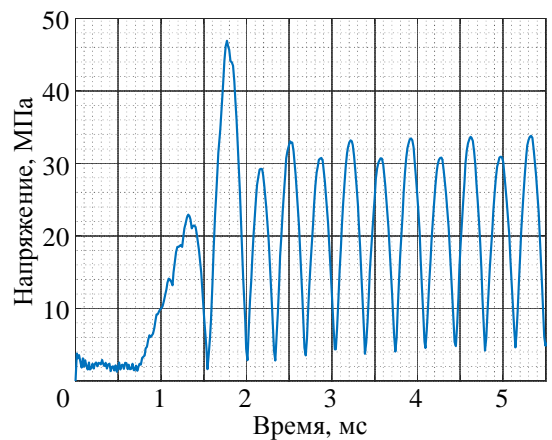
Кольцо № 7



Кольцо № 8



Кольцо № 9



Кольцо № 10

Рис. 20. Зависимость максимальных эквивалентных напряжений от времени в ТК блока НБ-1п (см. также с. 32)

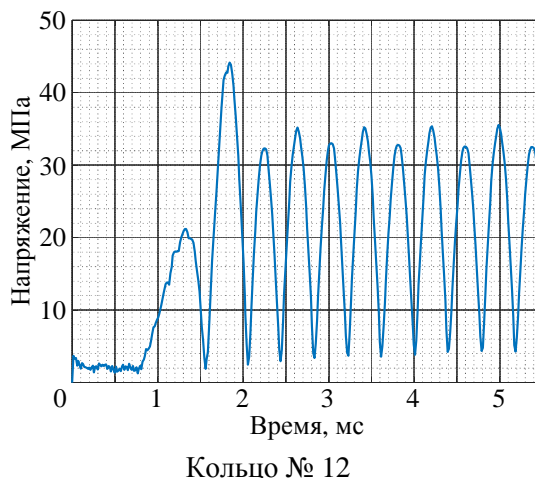
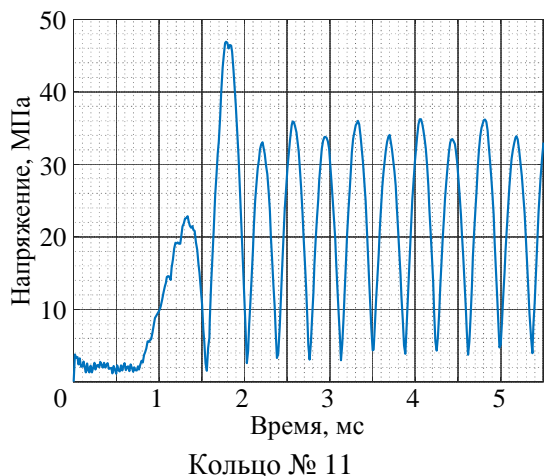


Рис. 20. Окончание

Заключение

На основе детальной трехмерной конечно-элементной модели наиболее нагруженного блока НБ-1п исследовательского реактора БР-К1М с помощью многофункционального программного комплекса ЛОГОС выполнены расчеты нестационарного термомеханического состояния конструкции при воздействии импульса делений длительностью 600 мкс с учетом физической и геометрической нелинейностей процесса деформирования материалов, контактного взаимодействия и зависимости прочностных характеристик материалов ТК от температуры.

Расчеты НДС и численное моделирование динамики наиболее нагруженного блока реактора БР-К1М показали, что в процессе импульса делений (с полушириной 600 мкс и числом делений $3,42 \cdot 10^{18}$) ТК не испытывают ударного контактного взаимодействия с внутренней боковой поверхностью титановых чехлов, а шпонки и крепежные элементы сохраняют прочность.

Анализ НДС конструкции блока НБ-1п, рассчитанного в условиях нестационарного гомогенного разогрева ТК и зависимости прочностных характеристик корпусных материалов от температуры, позволяет сделать следующие выводы:

- в процессе импульса деления и разогрева топливные кольца не испытывают ударного контактного взаимодействия с внутренней боковой поверхностью титановых корпусов;

- корпуса блоков не испытывают контактного взаимодействия между собой;

- шпонки и крепежные элементы сохраняют прочность;

- максимальное значение интенсивности напряжений в шпонках составляет $\sigma_i = 6,61$ МПа;

- запас прочности шпонок по пределу текучести составляет $\eta_T > 5$;

- чехол блока НБ-1п сохраняет прочность и устойчивость;

- максимальное значение интенсивности напряжений в крышках титанового чехла составляет $\sigma_i = 18$ МПа;

- титановый чехол блока реактора не подвержен короблению, запас прочности по пределу текучести составляет $\eta_T > 5$;

- максимальные уровни интенсивности напряжений в топливных кольцах относительно невысоки;

- максимальный уровень интенсивности напряжений достигается в топливном кольце № 9 и составляет $\sigma_i = 47,4$ МПа;

- запас прочности ТК по пределу текучести составляет $\eta_T > 5$;

– максимальные уровни интенсивности напряжений в кольцевых выступлениях под ТК не вызывают опасений;

– максимальный уровень интенсивности напряжений достигается в кольцевом выступе под ТК № 6 и составляет $\sigma_i = 148$ МПа;

– запас прочности кольцевых выступов по пределу текучести составляет $\eta_T \approx 4$.

Список литературы

1. Колесов В. Ф. Аперiodические импульсные реакторы. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2007, т. 1, 2.

2. Будников Д. В., Воронцов С. В., Глушков С. Л., Гордеев В. С., Гречушкин В. Б., Девяткин А. А., Завьялов Н. В., Кайгородов А. А., Картанов С. А., Колесов В. Ф., Назаренко С. Т., Панин А. В., Пикулев А. А., Плужян К. Г., Сметанин М. Л., Страбыкин К. В., Тельнов А. В. Ядерные и электрофизические установки РФЯЦ-ВНИИЭФ: настоящее и будущее // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2021, вып. 4, с. 5–25.

3. Колесов В. Ф., Хоружий В. Х. Расчет температур и деформаций в герметизирующих чехлах импульсных ядерных реакторов // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 4, с. 31–38.

4. Хоружий В. Х., Колесов В. Ф. Решения динамической задачи термоупругости для круговой цилиндрической оболочки // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1990, вып. 3, с. 29–33.

5. Колесов В. Ф. Импульсные реакторы самогасящегося действия и методы их расчета. Ч. 2 // ВАНТ. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки, 1986, вып. 1, с. 41–78.

6. Колесов В. Ф., Кувшинов М. И., Воронцов С. В. и др. Критические стенды и импульсные реакторы РФЯЦ-ВНИИЭФ // 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии. – Саров:

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. вып. 1, с. 136–164.

7. Девяткин А. А., Воронцов С. В., Колесов В. Ф. и др. Пути модернизации БР-К1 для работы в импульсном режиме // Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования. Труды межотраслевой конференции. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015, т. 2, с. 54–70.

8. Дерюгин Ю. Н., Козелков А. С., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В., Шагалиев Р. М. Многофункциональный высокопараллельный пакет программ ЛОГОС для решения задач тепломассопереноса и прочности // Сб. тез. докл. С.-Петербургского науч. форума «Наука и общество». – С.-Пб.: Изд-во Политех. ун-та, 2012. С. 102.

9. Дьянов Д. Ю., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В., Наумова Е. И., Борляев В. В., Стародубов С. В., Шувалова Е. В., Медведкина М. В., Артемова Е. О., Челаков А. А., Казанцев А. В., Рябов А. А., Романов В. И., Куканов С. С. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения динамических задач прочности // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2018. Вып. 1. С. 3–14.

10. Дьянов Д. Ю., Казанцев А. В., Стародубов С. В., Циберев К. В., Челаков А. А. Пакет программ ЛОГОС. Учет контактного взаимодействия при решении нелинейных быстропротекающих задач механики деформируемого твердого тела // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2020. Вып. 2. С. 45–59.

11. 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.

12. Годин Ю. Г., Тенишев А. В., Новиков В. В. Физическое материаловедение: Учебник для вузов / Под общей ред. Б. А. Калина. Т6. Ч. 2. Ядерные топливные материалы – Москва: МИФИ, 2008. 604 с.

13. Шабалин Е. П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. – Москва: Атомиздат, 1976. 248 с.

14. Колачев Б. А., Ливанов В. А., Буханова А. А. Механические свойства титана и его сплавов. – Москва: Металлургия, 1974. 554 с.

15. Сорокин В.Г., Волоснякова А.В., Вяткин С.А. и др. Марочник сталей и сплавов. – Москва: Машиностроение, 1989. 640 с.

Контактная информация –

Ткаченко Дмитрий Николаевич,
инженер-исследователь III категории,
РФЯЦ-ВНИИЭФ,
e-mail: otd4@expd.vniief.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2022, вып. 4, с. 17–34.