

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ БЫСТРЫХ ИМПУЛЬСНЫХ РЕАКТОРОВ С УТОЧНЕННЫМ УЧЕТОМ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ДЛЯ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

В. Б. Гречушкин, В. Ф. Колесов, Е. В. Интяпина

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

Введение

По материалу топлива активной зоны импульсные реакторы можно разделить на несколько типов: с металлической активной зоной (АЗ), с топливом в виде различного рода керамики и растворные реакторы с жидкой АЗ. В данной работе рассматриваются реакторы с металлической АЗ. Данный тип реакторов используется для создания коротких импульсов нейтронов и гамма-квантов. Обычно длительность импульса в подобных установках составляет 60–300 мкс, а флюенс нейтронов в облучательной полости порядка 10^{15} н/см². Их АЗ представляет собой набор из сферически-либо цилиндрически-симметричных элементов из высокообогащенного урана, легированного различными добавками для улучшения его механических свойств [1]. В процессе эксплуатации для того, чтобы достигнуть максимального выхода за минимальный отрезок времени, установки данного типа работают в форсированных режимах. В процессе импульса элементы АЗ реактора с твердым топливом (в т. ч. металлическим) испытывают сильнейший тепловой удар. В ходе него они нагреваются на 300–500 °С. При этом, поскольку время выделения ядерной энергии и повышения температуры значительно меньше собственного периода колебаний топливных деталей, в них возбуждаются механические колебания и пиковые знакопеременные инерциальные напряжения, являющиеся основным фактором, ограничивающим энерговыделение в импульсе [2]. Многократное использование данного типа реактора, вообще говоря, возможно, только если возникающие деформации обратимы и не выходят за рамки упругой деформации. Напряжения в АЗ во время максимального импульса зачастую приближаются к пределу прочности материала элементов, в силу чего они постепенно разрушаются и реальный ресурс активной зоны составляет от нескольких сотен до тысяч импульсов в зависимости от проектных параметров и конструкции реактора.

Проведение неразрушающего контроля активной зоны реактора затруднено в силу большой толщины и массивности деталей и высокого уровня радиации вокруг реактора. Помимо этого все реакторы с твердым топливом, эксплуатируемые в РФЯЦ-ВНИИЭФ, находятся в заваренных чехлах и разборка активной

зоны для проверки ее износа крайне затруднительна, не говоря уж о том, что подобные работы сопряжены со значительным облучением персонала.

В этой ситуации крайне важно знать ресурс конкретной установки. Для определения ресурса конкретной установки в ИЯРФ создана методика [3, 4]. Описанный ниже метод моделирования импульсов позволяет в рамках нее определить величину и количество дефектов, обнаружимых с помощью анализа формы импульса, и определить уровень изменений в ней, соответствующих критическому износу реактора. Как уже было отмечено выше, в процессе импульса в активной зоне реактора возникают термоупругие колебания элементов. Поскольку падение реактивности вследствие расширения элементов является основной отрицательной обратной связью в реакторах с металлической активной зоной, термоупругие колебания элементов вызывают колебания мощности на хвосте импульса реактора. Формулы, описывающие связь реактивности со смещением элементов, приведены на слайде 0.1. При появлении дефектов в элементах активной зоны частота и амплитуда их колебаний изменяется, и следом за ней меняются и колебания мощности на хвосте импульса. Для того, чтобы точнее изучить влияние дефектов активной зоны на форму импульса, был разработан метод моделирования импульсов реактора с улучшенным учетом термомеханических явлений в нем. Ранее применявшиеся методы моделирования импульсов реакторов используют аналитические решения уравнений термоупругости для элементов (например, см. слайды 0.2–0.3), которые непосредственно встраивались в формулы на слайде 0.1. Такие решения в аналитическом виде существуют только для элементов простой геометрической формы без дефектов или со сквозными разрезами.

Функция Грина реактивности

$$\Delta\rho^0(t) = \int_{V_{аз}} \vec{u}\nabla w(\vec{r}) d\vec{r},$$

где \vec{u} – вектор смещений элементов; $w(\vec{r})$ – функция влияния реактивности.

Для цилиндрически-симметричных реакторов определяющим является радиальное смещение

$$\Delta\rho^0(t) = \int_{V_{аз}} u_r \frac{\partial w(\vec{r})}{\partial r} d\vec{r}.$$

Изменение реактивности

$$\Delta\rho = \int_0^t \Delta\rho^0(t-\eta)\Theta(\eta)d\eta,$$

где Θ – температура

Слайд 0.1. Система уравнений, описывающих связь реактивности и смещения элементов АЗ

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial\varphi}\left(\frac{\partial v}{\partial\varphi} - w\right) - KR\frac{\partial\Theta}{\partial\varphi} = \frac{\rho R^2}{E}\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial v}{\partial\varphi} - w - KR\Theta = \frac{\rho R^2}{E}\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \end{cases}$$

где u – азимутальное смещение, w – радиальное смещение цилиндра; R – радиус цилиндрической оболочки; Θ – температура $\Theta = \Theta_0 q(t)$; ρ – плотность материала; K – коэффициент расширения материала; E – модуль Юнга материала.

Слайд 0.2. Система уравнений, описывающих термоупругие колебания тонкой цилиндрической оболочки – одного из вариантов элементов АЗ

Решение для оболочки со сквозным вертикальным разрезом

$$w(\varphi, t) = -\frac{EK\Theta_0}{\rho R} \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin \frac{k}{2}\varphi \int_0^t \sin \omega_k(t-\xi) q(\xi) d\xi,$$

где $\omega_k = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{E}{\rho} \left(1 + \left(\frac{k}{2}\right)^2\right)}$, и без него

$$w(t) = K\Theta_0 \sqrt{\frac{E}{\rho}} \int_0^t \sin \omega(t-\xi) q(\xi) d\xi,$$

где $\omega = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$.

Слайд 0.3. Решение системы уравнений

В данной работе используется иной подход: для всех элементов реактора производится численный трехмерный расчет термоупругих колебаний, вызванных единичным квазимгновенным изменением температуры (с учетом распределения энерговыделения внутри элемента). После этого, на основании функций Грина термоупругих колебаний элементов и распределения энерговыделения по объему реактора, рассчитывается изменение реактивности, вызванное единичным изменением температуры (функции Грина реактивности). Зная функцию Грина реактивности и историю энерговыделения в реакторе до текущего момента времени, можно вычислить изменение реактивности в данный момент и пошагово рассчитать весь импульс реактора, опираясь на формулы, приведенные на первом слайде. Таким образом, с помощью современных программ трех-

мерного расчета, можно смоделировать реактор практически любой геометрии, в которой происходят колебания мощности, обусловленные термоупругими колебаниями ТЭ с любым количеством и размером дефектов в них.

Для того чтобы подтвердить работоспособность и функциональность данного метода, в настоящем докладе приводятся результаты расчетов для трех различных установок, действующих или ранее работавших в ИЯРФ: БР-1 (старая активная зона) с вертикальной сквозной трещиной в одном и в нескольких элементах, БР-1М (новая активная зона) с аналогичными дефектами и БИР с дефектами в виде трещин, соединяющих четыре малых и одно большое отверстия в массиве элемента.

1. Реактор БИР

Хотя эксплуатация реактора БИР уже остановлена и моделирование его импульсов не представляет практической ценности, он конструктивно хорошо подходит для демонстрации нашего метода. Его активная зона состоит из сравнительно небольшого числа элементов, а характерные для нее дефекты теоретически должны значительно влиять на частоту и амплитуду их колебаний. В связи с этим данный реактор был выбран для того, чтобы подтвердить применимость метода к системам с различной конструкцией.

Активная зона реактора БИР состоит из шести элементов в виде дисков с большим центральным отверстием и четырьмя малыми отверстиями по периметру (рис. 1).

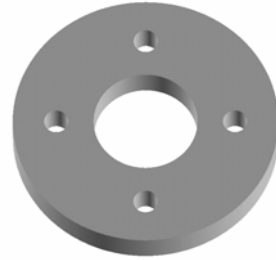


Рис. 1. Элемент активной зоны реактора БИР

Наиболее распространенным типом дефектов, возникающих в АЗ реактора БИР в процессе эксплуатации, стали трещины между одним из малых отверстий и центральным отверстием диска (рис. 2).

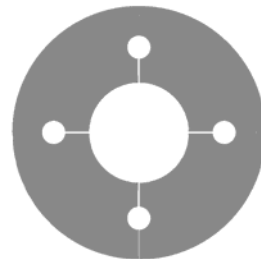


Рис. 2. Элемент реактора БИР с характерным типом дефекта (ширина трещин увеличена для наглядности)

Хотя геометрические размеры всех основных элементов активной зоны одинаковы, условия их нагрева в процессе импульса отличаются в несколько раз. В связи с этим, в отличие от БР-1 и БР-1М, где считалось, что нагрев элемента равномерен, в данном расчете учитывалось распределение температуры по элементу (см. рис. 3). Поскольку в использованной программе не было возможности наложения нагрузок, зависящих от координат, для учета неравномерности нагрева каждый элемент был разбит на зоны – восемь по радиусу и четыре по высоте элемента, в каждой из которых задавалась своя температурная нагрузка (рис. 4). Распределение нагрузки по зонам для каждого элемента АЗ вычислялось исходя из известного распределения энерговыделения по активной зоне реактора.

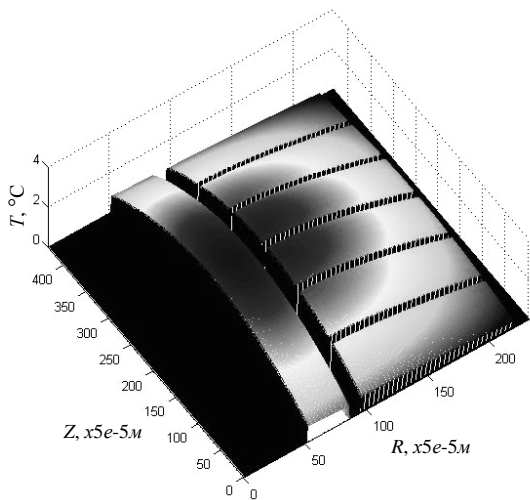


Рис. 3. Отнормированное на «1» энерговыделение в активной зоне реактора БИР

На первом этапе расчета была проведена проверка на точность расчета с точки зрения шага сетки конечных элементов. Был проведен расчет 5 мс термоупругих колебаний при шаге сетки от 3 до 28 мм. Как видно из рис. 4, 5, при шаге сетки элементов свыше 6 мм наблюдается быстрое затухание колебаний, не совпадающее с экспериментальными результатами. Исходя из этого критерия и доступных вычислительных мощностей, был выбран шаг сетки 4,5 мм.

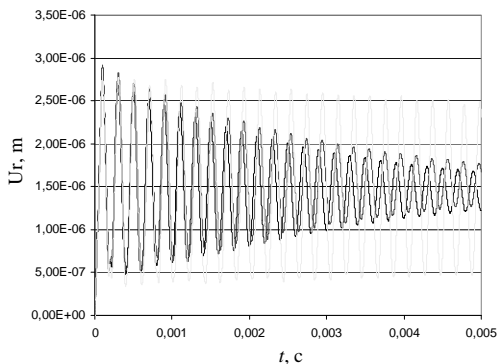


Рис. 4. Термоупругие колебания топливного элемента с шагом сетки конечных элементов от 7 до 21 мм

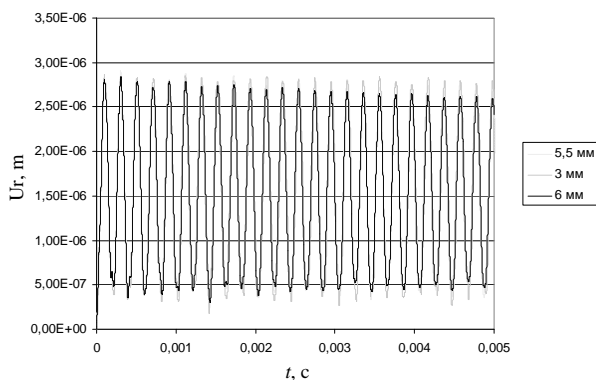


Рис. 5. Термоупругие колебания топливного элемента с шагом сетки конечных элементов от 3 до 6 мм

Для оценки влияния повреждений на работу реактора был произведен расчет всех элементов активной зоны с трещинами и без них. Как видно из графика термоупругих колебаний и анализа спектра их частот, при появлении дефектов характер колебаний изменяется, а их частота существенно падает (см. рис. 6).

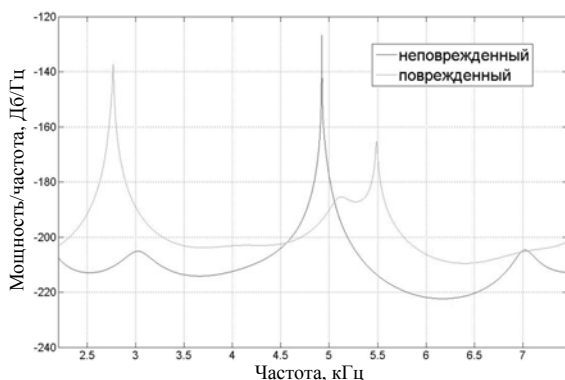


Рис. 6. Частотный спектр термоупругих колебаний неповрежденного и поврежденного элементов реактора БИР

Эти изменения согласуются с теорией, поскольку возникновение дефектов исключает из упругих колебаний центральную часть диска, и если рассматривать диск как цилиндрическую оболочку, ее средний радиус при этом возрастает, а собственная частота соответственно падает.

На основании полученных данных был смоделирован импульс реактора с различным числом и местоположением поврежденных элементов. Для сравнения эксперимента с результатами моделирования были использованы результаты физ. пуска, когда его АЗ была заведомо неповрежденной. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало, что расчет и эксперимент сходятся с погрешностью не хуже 10 %.

После проверки точности была проведена серия расчетов с различным количеством и местоположением дефектов в активной зоне реактора. Полученная зависимость мощности реактора от времени была обработана для проведения частотного анализа: быстрая часть импульса была отброшена, а из хвостовой части было вычтено компонента, соответствующая экспоненциальному затуханию мощности, чтобы оста-

вить только колебания, обусловленные термоупругой вибрацией элементов. Аналогичная обработка данных применялась для обработки данных со всех рассмотренных в данной работе установок.

Спектральный анализ полученных данных показал, что по мере появления дефектных элементов в активной зоне пик, соответствующий собственной частоте неповрежденного элемента, уменьшается и размывается, а пик, соответствующий собственной частоте поврежденного элемента, появляется и растет (см. рис. 7). Заметные изменения происходят даже в случае появления одного дефекта в крайнем, наименее влияющем на реактор в целом элементе.

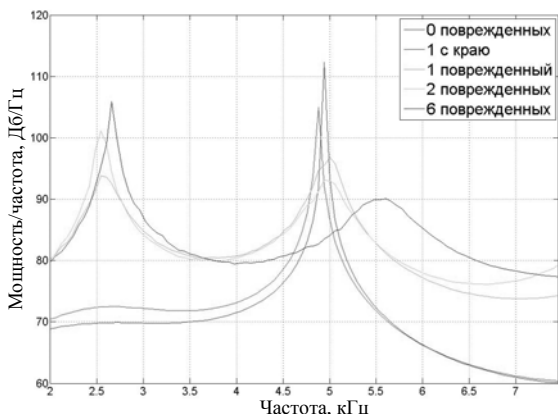


Рис. 7. Частотные спектры колебаний мощности на хвосте реактора с различным числом поврежденных элементов

Столь четкие и ясные результаты обусловлены в первую очередь простотой конструкции реактора. Его активная зона состоит всего из шести элементов, имеющих одинаковый размер и, следовательно, одинаковые собственные частоты. Поэтому слияние одного элемента на систему в целом здесь самое большое из всех рассмотренных установок. Однотипность элементов и единственная собственная частота упрощает спектральный анализ и снимает проблему разрешения близкорасположенных частот элементов.

2. Старая активная зона реактора БР-1

Старая активная зона, официально именуемая реактором БР-1, состоит из 19 элементов: 10 элементов в верхнем неподвижном блоке, 7 элементов в нижнем подвижном блоке и 2 элемента в регулировочном и импульсном блоках (рис. 8).

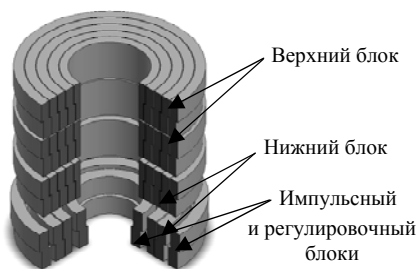


Рис. 8. Старая активная зона БР-1

В рамках данной работы проводилось моделирование неповрежденной активной зоны и активной зоны с заданным числом дефектов в виде сквозной вертикальной трещины (см. рис. 9). В качестве проверочных экспериментальных данных были использованы результаты физического пуска для неповрежденной активной зоны и результаты опытов по установке поврежденных элементов. Сравнение расчетных и экспериментальных данных в случае неповрежденного реактора выявило хорошее совпадение характеристик импульсов (см. табл. 1).

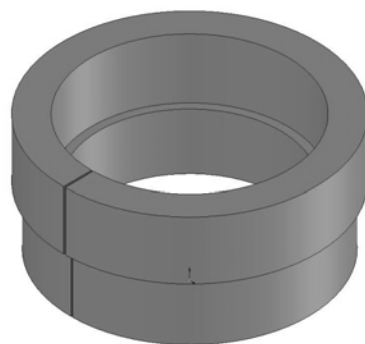


Рис. 9. Топливный элемент с исследуемым типом дефекта – сквозной вертикальной трещиной

Таблица 1

Расчетные и экспериментальные характеристики быстрой части импульса

	Расчет 1	Опыт 1	Расчет 2	Опыт 2
Начальный период, мкс	49	48,8	32	31,8
Длительность импульса на половине амплитуды максимальной мощности, мкс	136	138	85	88
Максимальная мощность, 10^{21} дел/с	0,36	0,43	1,48	1,40

После подтверждения адекватности результатов для неповрежденного реактора был проведен расчет импульса поврежденного реактора с несколькими вариантами расположения дефектных элементов (см. рис. 10). Результаты расчетов подтвердили теоретические предположки и результаты опытов по установке поврежденных элементов в реактор: колебания мощности на хвосте импульсов стали сглаживаться, а сам импульс стал немного мощнее и шире (см. рис. 11). В то же время ряд явлений, наблюдавшихся в эксперименте, например исчезновение линий спектра, соответствующих некоторым элементам в силу заневольвания их колебаний соседними элементами не наблюдалось в силу особенностей моделирования. Поскольку колебания элементов рассматривались по отдельности, а единичное изменение температуры не столь больших колебаний, как в реаль-

ном импульсе, эффекты, связанные со взаимодействиями между элементами в реальной установке, не проявились при моделировании.

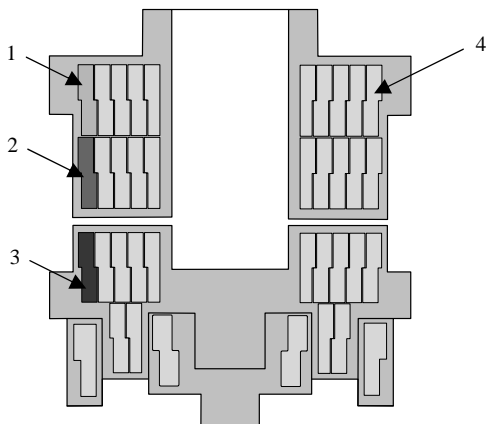


Рис. 10. Схема реактора БР-1 с различными вариантами дефектов: 1 – № 1; 2 – № 2; 3 – № 3; 4 – № 4

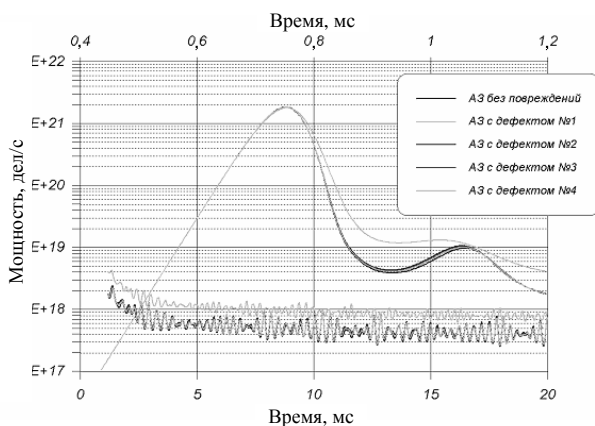


Рис. 11. Расчетные зависимости мощности реактора от времени при введении различных вариантов дефектов

3. Новая активная зона реактора БР-1М

Новая активная зона реактора БР-1, далее именуемая БР-1М, отличается тем, что высота элементов верхнего и нижнего блока уменьшена вдвое и число колец элементов соответственно увеличено вдвое (см. рис. 12). Регулировочный и импульсный блоки, а также два нижних кольца нижнего блока реактора остались без изменений.

Был проведен расчет колебаний элементов АЗ, вызванных квазигнотвенным единичным изменением температуры без дефектов и со сквозной вертикальной трещиной. Был сделан спектральный анализ их колебаний, выявивший их основные частоты. Полученные значения собственных частот близки к частоте колебаний цилиндрической оболочки эквивалентного диаметра, что еще раз подтверждает точность проведенных расчетов (см. рис. 13). На основании полученных функций Грина был рассчитаны импульсы реактора с различным числом дефектных элементов наибольшего размера в нем.

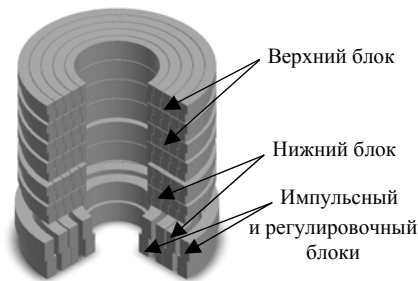


Рис. 12. Новая активная зона реактора БР-1М

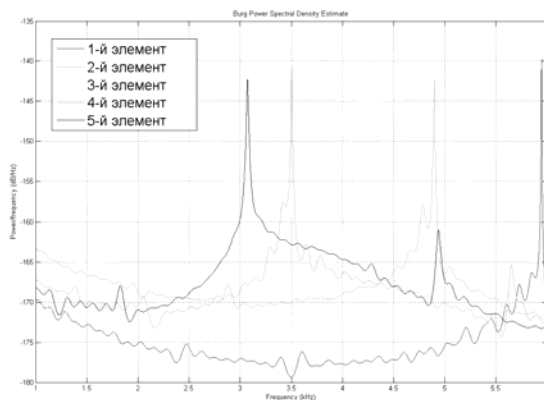


Рис. 13. Собственные частоты колебаний элементов различного размера

Проведенные расчеты подтвердили теоретические предпосылки. Из них ясно, что заметные изменения в колебаниях мощности на хвосте импульса наблюдаются в случае, если повреждены 2–3 элемента, а не 1, как в старой АЗ. При постепенном износе активной зоны это не столь важно, однако в случае, если в силу особенностей структуры разрушается только единственный элемент, его повреждения могут остаться незамеченными (см. рис. 14–16). Также необходимо отметить, что собственные частоты колебаний элементов очень близки и при анализе импульсов могут возникнуть затруднения в том, чтобы определить, какой из элементов поврежден, если это не элементы с самым большим либо самым малым радиусом.

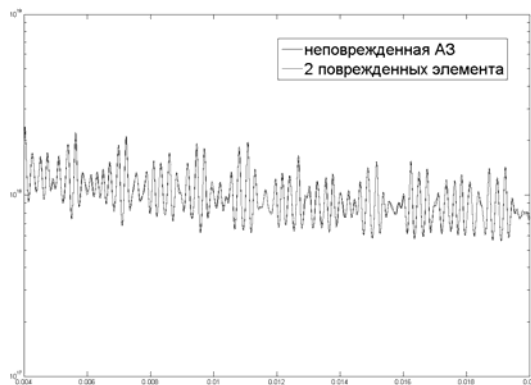


Рис. 14. Колебания мощности на хвосте импульса для неповрежденной АЗ и двух поврежденных элементов наибольшего размера

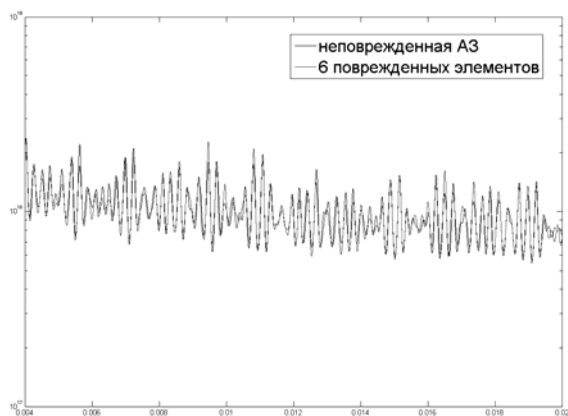


Рис. 15. Колебания мощности на хвосте импульса для неповрежденного реактора и шести поврежденных элементов наибольшего размера

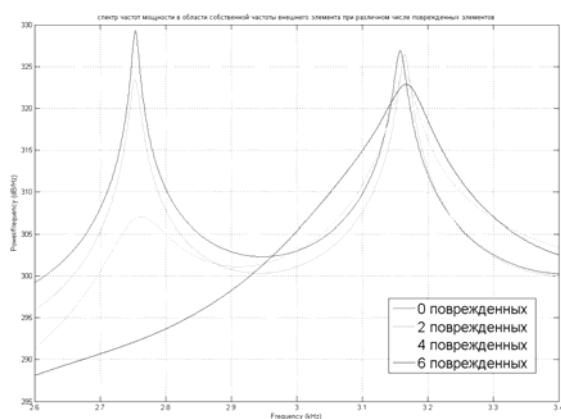


Рис. 16. Спектр частот колебаний мощности на хвосте импульса для различного числа поврежденных элементов в нем

4. Планы и заключение

В настоящий момент в рамках работ по данной тематике производятся расчеты с дефектами в виде азимутальных трещин, распространяющихся по периметру элемента вдоль уступа на половине высоты в реакторах БР-1 и БР-1М. Данный тип дефекта был

наиболее распространенным в активной зоне, достигшей предельного износа в процессе эксплуатации. Как показали предварительные расчеты, появление дефекта протяженностью до половины периметра вызывает постепенное размывание и снижение пика на частотном спектре, а дальнейшее увеличение длины дефекта приводит к разделению пика на два зубца, предположительно соответствующих собственным частотам верхней и нижней частей элемента. Данный дефект в большинстве случаев вызывает менее заметные изменения в колебаниях элемента и более чувствителен к параметрам моделирования колебаний, а его эффект сильно зависит от протяженности трещины. В связи с этим требуется значительно больше расчетов, чтобы точно оценить его влияние на реактор и возможность его обнаружения методами неразрушающего контроля.

В настоящий момент приводятся уточняющие расчеты с целью количественно оценить влияние дефектов различной длины на работу реактора в целом и сделать окончательный вывод о возможности их обнаружения. Также планируется проведение расчетов кольца элементов в целом для учета соударений между элементами и оценка изменения реактивности в результате разрушения элемента по азимуту и падения кольца на нижележащие элементы.

Литература

1. Колесов В. Ф. Аперриодические импульсные реакторы. Т. 2. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007.
2. Девяткин А. А., Костарев А. Г., Борисенок В. А. и др. Разработка методики диагностики состояния топливных элементов аперриодического импульсного реактора с металлической активной зоной // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2000. Вып. 2/3. С. 123–126.
3. Девяткин А. А., Колесов В. Ф., Хоружий В. Х. и др. Методика диагностики состояния тепловыделяющих элементов аперриодических импульсных реакторов с металлической активной зоной // Там же. 2008. Вып. 1. С. 12–17.
4. Петрин С. В., Колесов В. Ф. К вопросу об оценке ресурса топливных элементов аперриодических импульсных реакторов // Там же. 1996. Вып. 2. С. 71–75.