

УДК 621.039.55:621.039.5.001.24:621.039.566

АНАЛИЗ ШУМОВ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА, ВЫЗВАННЫХ ФЛЮКТУАЦИЯМИ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ВВЭР*Семченков Ю.М., Мильто В.А. (РНЦ «Курчатовский ин-т»), Пинегин А.А., Шумский Б.Е. (МИФИ)*

На основе анализа шумов различных параметров активной зоны ядерного реактора получила развитие внутриреакторная шумовая диагностика. Анализ шумов нейтронного потока — одно из ее направлений, основными целями которого являются обнаружение и локализация места кипения теплоносителя в объеме активной зоны реактора. Контроль момента возникновения кипения теплоносителя позволяет уточнить реальные условия теплосъема в активной зоне и точнее определить проектные пределы. Для решения задачи инструментального контроля кипения теплоносителя были проведены расчетные и экспериментальные работы, описанные в настоящей статье.

Штатными датчиками внутриреакторного контроля, распределенными по объему активной зоны, являются датчики прямой зарядки с эмиттером из родия [1]. Расчеты и эксперименты подтвердили, что такие датчики позволяют регистрировать флуктуации нейтронного потока в широком диапазоне частот за счет мгновенной составляющей тока [2], которая обусловлена эффектом Комптона. Мгновенная составляющая тока пропорциональна основной (активационной) составляющей тока датчика. При одинаковых флуктуациях плотности теплоносителя амплитуда флуктуации тока датчика пропорциональна нейтронному потоку или основной составляющей тока датчика. В качестве характеристического параметра состояния теплоносителя выбрано среднеквадратичное отклонение переменной составляющей тока датчика, приведенное к его усредненному основному току, — безразмерный параметр Δ .

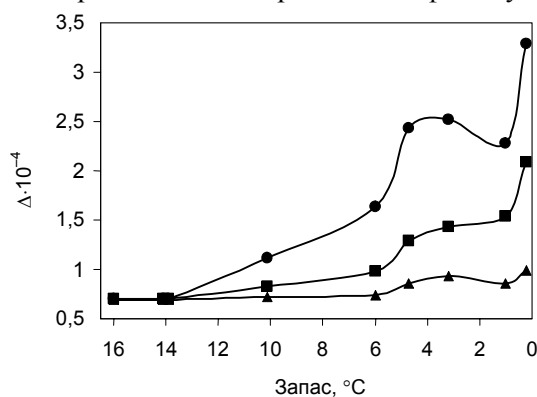
Флуктуации нейтронного потока зависят от флуктуации плотности теплоносителя, которая влияет на изменение замедляющих свойств теплоносителя и возникает из-за флуктуаций температуры, расхода, давления теплоносителя в реакторе. При возникновении парообразования увеличивается нелинейность зависимости плотности теплоносителя от амплитуды флуктуации параметров теплоносителя на входе в ТВС. В результате увеличивается амплитуда флуктуации плотности теплоносителя, что приводит к

росту амплитуды шума нейтронного потока в области кипения.

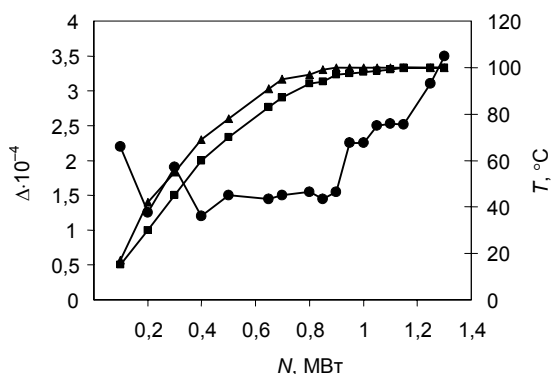
Экспериментальные результаты. Эксперименты подтвердили, что родиевые датчики позволяют зафиксировать момент возникновения и развития локального кипения теплоносителя. Возможность фиксации начала кипения была показана при проведении экспериментов с диагностической кассетой на АЭС «Рейнсберг» (Германия). На рис. 1 видно, что при переходе недогрева с 14 до 10 °С произошло заметное увеличение параметра Δ датчика E11. Этот момент приближен к расчетному началу поверхностного пузырькового кипения.

В РНЦ «Курчатовский ин-т» на ВВР-2 был проведен эксперимент с изучением кипения на поверхности специального твэла, содержащего примерно 90% ^{235}U . В стенку твэла были внедрены кабельные термодпары диаметром 0,5 мм, вдоль него расположили родиевые датчики. На рис. 2 видно значительное увеличение параметра Δ при достижении температуры насыщения на стенке твэла. Разброс значений параметра Δ на малой мощности обусловлен малым током датчика и неустойчивостью реактора в этих режимах.

Расчетное моделирование шума нейтронного потока. Для анализа характеристик шума нейтронного потока были проведены динамические, сопряженные нейтронно-физические и теплогидравлические расчеты флуктуации



Р и с. 1. Зависимость параметра Δ от запаса до температуры насыщения теплоносителя на выходе из диагностической ТВС, зарегистрированная датчиками E11 (●), E10 (■), E8 (▲), расположенными на координате 0,7, 0,6, 0,5 высоты ТВС соответственно

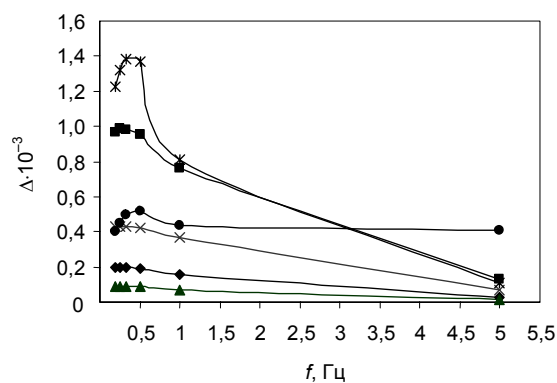


Р и с. 2. Зависимость температуры стенки твэла на середине высоты (■) и в верхней части ТВС (▲), параметра Δ (●) от мощности реактора

нейтронного потока в зависимости от флуктуаций давления, расхода и температуры теплоносителя без кипения. Расчеты проводили с помощью программы NOSTRA [3], разработанной совместно специалистами МИФИ и РНЦ «Курчатовский ин-т» для трехмерного моделирования нейтронно-физических и теплогидравлических процессов в активной зоне ВВЭР, включая неравновесное кипение.

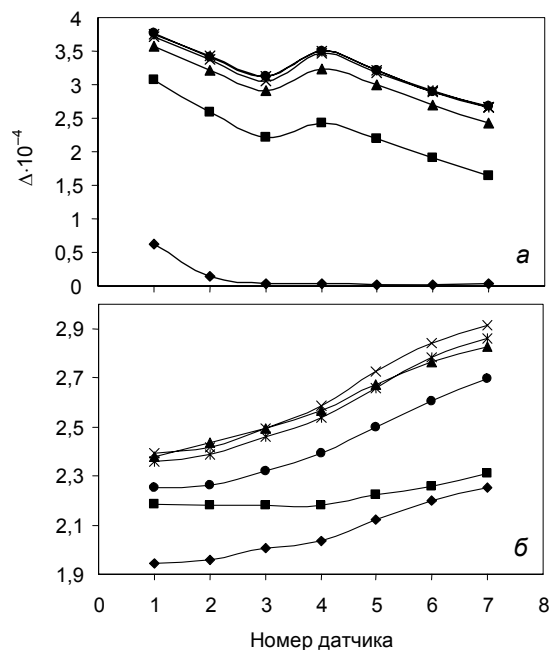
Флуктуации моделировали в виде гармонических колебаний параметров теплоносителя на входе в активную зону реактора. Параметры теплоносителя (температура, давление, расход) возмущали по отдельности с частотой от 0,2 до 5 Гц. Исследования проводили для состояния реактора, соответствующего номинальной мощности и номинальным параметрам теплоносителя. Рассматривали два характерных по коэффициенту реактивности момента кампании: непосредственно после перегрузки и на конец борного регулирования.

Анализ результатов позволил оценить амплитуду шума нейтронного потока в местах расположения датчиков и ее изменение по высоте активной зоны при флуктуациях отдельных параметров теплоносителя. Получены расчетные амплитудно-частотные характеристики шума нейтронного потока, регистрируемого датчиками при колебаниях различных параметров теплоносителя. На рис. 3 видно, что все графики имеют максимум в районе частоты теплофизического резонанса твэла (0,3—0,4 Гц) и ослабление амплитуды флуктуации тока датчиков при возрастании частоты колебаний задаваемых параметров выше резонансной.



Р и с. 3. Зависимость максимальных значений параметра Δ от частоты колебаний температуры теплоносителя на входе в семь ТВС с амплитудой 0,2 (♦), 1 °C (■), одну ТВС с амплитудой 0,2 (▲), 1 °C (x), расхода с амплитудой 175 кг/с (*), давления с амплитудой 0,079 МПа (●) на конец кампании

Расчетные значения параметра Δ каждого датчика отдельной ТВС (высотный профиль) при колебаниях температуры теплоносителя на входе в ТВС (рис. 4, а) свидетельствуют, что зависимость нейтронного потока от флуктуаций этого параметра уменьшается по мере продвижения теплоносителя по высоте ТВС (с увеличением номера датчика). Спад параметра Δ по высоте характерен для всех частот. Следует отметить существенное ослабление амплитуды шума нейтронного потока при высоких (более 5 Гц) частотах модуляции, связанное с теплофизическими свойствами твэлов. В отличие от слу-

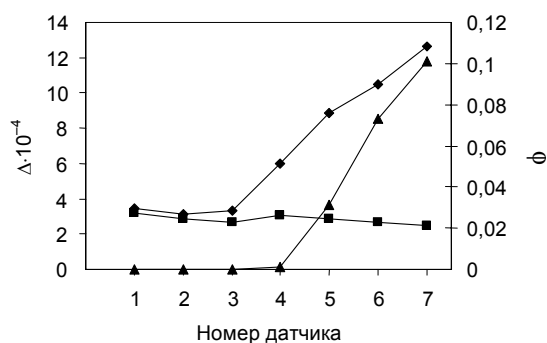


Р и с. 4. Высотные профили расчетного параметра Δ при колебаниях температуры теплоносителя с амплитудой 1 °C (а), давления (б) с амплитудой 0,079 МПа с частотой 5 (♦), 1 (■), 0,5 (▲), 0,33 (x), 0,25 (*), 0,2 Гц (●)

чая колебаний температуры при колебаниях давления теплоносителя характерно равномерное увеличение параметра Δ по высоте ТВС (рис. 4, б). Высотный профиль параметра Δ при колебаниях расхода теплоносителя имеет такой же характер. Имеет значение также тот факт, что вид высотного профиля не зависит от момента кампании.

Таким образом, по характеру высотного распределения параметра Δ можно идентифицировать, флюктуация какого параметра теплоносителя вносит основной вклад в шум нейтронного потока. Характерное увеличение параметра Δ по высоте ТВС имеет место при флюктуациях расхода и давления, уменьшение — при флюктуации температуры. Следует отметить, что в реальных условиях работы реактора колебания температуры, расхода, давления теплоносителя зависимы одно от другого и влияют совместно (зачастую противофазно) на колебания нейтронного потока.

Для оценки изменения чувствительности шума нейтронного потока к колебаниям параметров теплоносителя при наступлении поверхностного пузырькового кипения с помощью программы NOSTRA был проанализирован следующий процесс. На номинальной мощности реактора, но с существенно пониженным для инициирования процесса кипения давлением (13 МПа) моделировали колебание с частотой 0,33 Гц температуры теплоносителя с амплитудой 1 °С на входе в ТВС с максимальным энерговыделением. Температура насыщения при этом не достигалась, максимальное истинное объемное паросодержание составляло 0,1. На рис. 5 приведены высотные профили параметра Δ в двух случаях: при давлении 13 МПа с поверхностным кипением, начавшимся в середине



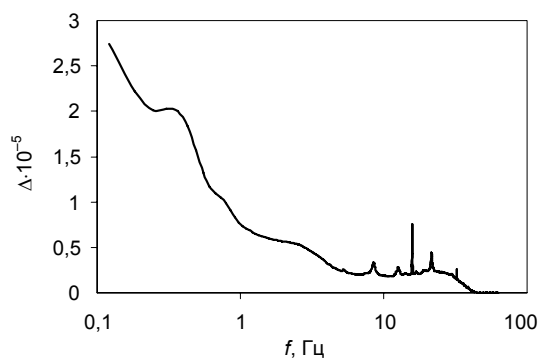
Р и с. 5. Высотные профили параметра Δ при колебании температуры теплоносителя на входе в ТВС с амплитудой 1 °С и частотой 0,33 Гц при давлении на входе в реактор 15,9 МПа (■), 13 МПа (◆); ▲ — истинное объемное паросодержание в ТВС при давлении 13 МПа

активной зоны, и при давлении 15,9 МПа без парообразования. Сравнение позволяет сделать вывод, что парообразование в верхней части ТВС превращает аксиальный профиль шума из ниспадающего в возрастающий по высоте ТВС, а амплитуда параметра Δ в районе датчиков, расположенных в верхней части ТВС, значительно возрастает (в данном случае до 5 раз). Таким образом, подтверждается, что чувствительность шума нейтронного потока к колебаниям параметров теплоносителя в случае парообразования значительно возрастает, что позволяет идентифицировать кипение с помощью датчиков нейтронного потока.

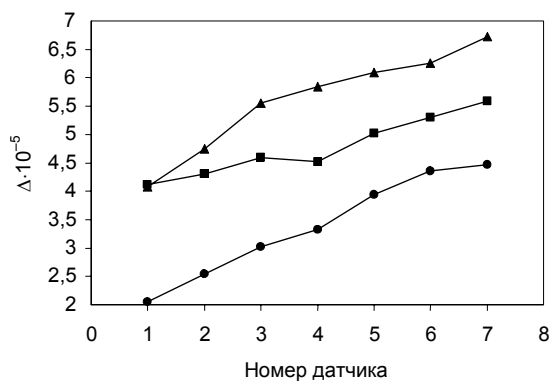
Все расчетные величины согласуются с экспериментальными данными. Следовательно, исходя из модельных расчетов можно оценить экспериментальные значения параметра Δ при различных состояниях теплоносителя.

Некоторые результаты работы системы внутриреакторной шумовой диагностики. На основании обработки и анализа большого количества экспериментальных и расчетных данных, часть которых приведена в настоящей статье, были разработаны соответствующие технические средства и программное обеспечение для системы внутриреакторной шумовой диагностики. В настоящее время такие системы находятся в опытно-промышленной эксплуатации на 3-м энергоблоке Калининской, Тяньваньской АЭС (КНР) и анализируют в автоматическом режиме 378 шумовых сигналов родиевых датчиков.

На рис. 6 видно, что спектральный состав шумового компонента усредненного по активной зоне сигнала датчика на номинальной мощности реактора монотонно спадает из области нижних частот и не имеет значительных «выгибов» в области больше 5 Гц. Характер спада спектра согласуется с графиками, приведенными



Р и с. 6. Зависимость усредненного по всем датчикам активной зоны параметра Δ от частоты на номинальной мощности реактора



Р и с. 7. Характерные высотные распределения параметра Δ на номинальной мощности реактора

на рис. 3.

Значения параметра Δ и монотонный характер высотного распределения, показанные на рис. 7, лежат в пределах, ожидаемых для нормальной эксплуатации реактора, и согласуются с расчетными значениями, представленными на рис. 4 для малых флуктуаций параметров теплоносителя без кипения. Исходя из характера высотного распределения экспериментальных значений параметра Δ , полученных при работе четырех петель реактора, в сравнении с расчетными данными можно предположить, что флуктуации показаний датчиков, в основном, определяются флуктуациями расхода и давления. При возникновении кипения ожидается существенное приращение параметра Δ в низкочастотной области по сравнению с ситуацией без кипения.

Выводы. Анализ результатов расчетного моделирования и экспериментальных данных выявил характерные особенности шума нейтронного потока, обусловленного флуктуациями параметров теплоносителя в активной зоне

ВВЭР. Исходя из этих особенностей, на стадии опытно-промышленной эксплуатации системы внутриреакторной шумовой диагностики выбран наиболее простой метод контроля состояния теплоносителя на основе анализа флуктуа-

ций нейтронного потока. В этом методе кипение диагностируется по увеличению чувствительности шума нейтронного потока в диапазоне 0,1—3 Гц к флуктуациям параметров теплоносителя, превышению параметра Δ более заданного предела, рассчитанного для каждого родиевого датчика. Пределы рассчитывают с учетом амплитуды флуктуации параметров теплоносителя на входе в каждую контролируемую ТВС и высотного профиля параметра Δ .

При использовании метода в системе внутриреакторной шумовой диагностики на 3-м блоке Калининской АЭС в течение двух кампаний и первой кампании 1-го блока Тяньваньской АЭС были показаны устойчивые и достоверные результаты. После набора необходимых статистических данных система внутриреакторной шумовой диагностики будет переведена в промышленную эксплуатацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мительман М.Г., Роземблюм Н.Д. Зарядовые детекторы ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1982.
2. Митин В.И., Шикалов В.Ф., Цимбалов С.А. Экспериментальное исследование токообразования в детекторах прямой зарядки с эмиттером из родия. — Атомная энергия, 1973, т. 34, вып. 4, с. 301—304.
3. Программа NOSTRA (версия 5.0). Аттестационный паспорт программного средства. Рег. номер паспорта аттестации ПС № 167 от 23.12.2003. Фед. надзор России по ядерной и радиационной безопасности. М., 2003.

Поступила в Редакцию 15.05.07

УДК 621.039.53

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ В КАНАЛЕ РЕАКТОРА МИР ФРАГМЕНТА ТВС ВВЭР-1000 В РЕЖИМЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОЕКТНОЙ АВАРИИ

Алексеев А.В., Горячев А.В., Киселева И.В., Шулимов В.Н. (ГНЦ РФ НИИАР)

Для обоснования безопасности действующих и проектирования новых реакторов необхо-

димо изучить поведение твэлов и ТВС в режимах проектных аварий. Одной из наиболее тя-