

погрешностью оценок  $\tau$ ,  $\beta_{\text{эф}}$ ,  $S_{\text{сп}}$ , используемых при расчете зависимости (1). Из выражений (5), (6) получим параметр  $\tau\beta_{\text{эф}} = (1,4 \pm 0,2)10^{-10}$  с. Если зафиксировать расчетную эффективную долю запаздывающих нейтронов  $\beta_{\text{эф}} = 0,00216 \pm 0,00007$  (см. таблицу) как наиболее достоверную оценку из числа  $\tau$  и  $\beta_{\text{эф}}$ , то получим время жизни мгновенных нейтронов  $\tau = (6,5 \pm 0,2)10^{-8}$  с. Исследование флуктуации энергии импульсов ИБР-2М позволяет оценить также абсолютную мощность реактора. Как следует из уравнения (5), на мощности в интервале 1—100 Вт флуктуации энергии импульсов обратно пропорциональны скорости делений в реакторе

$$(\sigma_Q/\bar{Q}^2) = \delta_0^2 + \frac{\Gamma}{2\tau\beta_{\text{эф}}F}.$$

Для мощности можно записать  $W = bN = F/L$ , где  $b$  — коэффициент перевода показаний детектора  $N$  (скорость счета или амплитуда импульса тока камеры) в мощность. Отсюда

$$(\sigma_Q/\bar{Q}^2) = \delta_0^2 + \Gamma/2bNL\beta_{\text{эф}}\tau = \delta_0^2 + P/N, \quad (7)$$

$P = \Gamma/2bL\beta_{\text{эф}}\tau$  — коэффициент в уравнении (7).

Линейная аппроксимация зависимости (7) при использовании одного из штатных каналов контроля мощности имеет вид

$$(\sigma_Q/\bar{Q}^2) = 1,7 \cdot 10^{-3} + \frac{0,029 \pm 0,009}{N},$$

отсюда  $P = 0,029 \pm 0,009$ ,  $b = 3,1 \pm 0,2$  и абсолютная мощность реактора с показаниями штатных измерительных каналов связана как  $W = bN = (3,1 \pm 0,2)N$ , что в пределах ошибки совпадает с оценкой мощности, определенной

по тепловыделению в активной зоне  $W = (3,0 \pm 0,15)N$ . При изучении стохастических флуктуаций на верхней границе области мощности, когда в источнике доминируют нейтроны спонтанного деления ( $W = 0,01$  Вт), оценка относительной дисперсии флуктуаций энергии импульсов  $(\sigma_Q/\bar{Q})^2 = \delta_0^2 + 2,99 \pm 0,09$ , соответственно параметр  $M = \nu\Gamma/2\tau S_{\text{сп}} = 2,99 \pm 0,09$ . Отсюда интенсивность источника нейтронов спонтанного деления составляет  $S_{\text{сп}} = \nu\Gamma/5,98\tau \leq (6,7 \pm 0,1)10^6 \text{ с}^{-1}$ .

Экспериментальная оценка источника нейтронов спонтанного деления, определенная при загрузке активной зоны,  $S_{\text{сп}} = (5,3 \pm 0,2)10^6 \text{ с}^{-1}$  [5], расчетная равна  $S_{\text{сп}} = (7,1 \pm 0,2)10^6 \text{ с}^{-1}$  [5]. Таким образом, оценка источника нейтронов по стохастическим шумам мощности достаточно близка к расчетной и экспериментальной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ананьев В.Д., Виноградов А.В., Долгих А.В.** Реактор ИБР-2 — эксплуатация и перспективы развития. — В сб.: 11-е ежегодное рос. сов. по безопасности исследовательских ядерных установок. Димитровград, 2009, с. 69 — 77.
2. **Шабалин Е.П.** Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1976. 248 с.
3. **Пепельшев Ю.Н.** Метод экспериментальной оценки эффективной доли запаздывающих нейтронов и времени жизни поколения нейтронов реактора ИБР-2: Препринт ОИЯИ Р13-2007-96, 2007.
4. **Мехтиева Р.Н., Пепельшев Ю.Н., Рогов А.Д. и др.** Расчет эффективной доли запаздывающих нейтронов и времени жизни мгновенных нейтронов в реакторе ИБР-2М: Препринт ОИЯИ Р13-2010-89, 2010.
5. **Ананьев В.Д., Виноградов А.В., Долгих А.В. и др.** Физический пуск модернизированного реактора ИБР-2: Сообщения ОИЯИ Р13-2012-41, 2012.

Поступила в Редакцию 28.02.12

УДК 621.039.553.34

## РОЛЬ МЕЖЪЯЧЕЕЧНОЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В РЕАКТОРАХ БАССЕЙНОВОГО ТИПА

*Гатауллина Г.Д., Узиков В.А., Осипова Т.А. (ОАО ГНЦ НИИАР, г. Димитровград)*

Преимуществами реакторов бассейнового типа РБТ-6 и РБТ-10/2 являются высокая надежность, обусловленная отрицательными эффектами реактивности, и невозможность осушения активной зоны [1], к недостаткам можно

отнести отсутствие герметичной защитной оболочки и непосредственный контакт теплоносителя первого контура с атмосферным потоком, направляемым в вентиляцию. Именно поэтому особое внимание уделяется теплотехнической

надежности реактора как при нормальной эксплуатации, так и в случае развития предаварийных ситуаций.

Одной из возможных аварий является ухудшение теплоотвода от активной зоны. В проектах была предусмотрена специальная система охлаждения, основанная на принципах развития естественной циркуляции по отдельному контуру. В реакторной установке РБТ-6 на участках подводящего и отводящего трубопровода, примыкающих к бассейну, создана перемычка (байпас) с задвижкой, в случае открытия которой образуется укороченный контур естественной циркуляции. Подобная задача на РБТ-10/2 решалась установкой на гаситель кислородной активности, находящийся в бассейне, клапана естественной циркуляции. Ни в том ни в другом случае межъячеечная естественная циркуляция не рассматривалась в качестве самостоятельного элемента безопасности.

Отрицательным моментом внедрения дополнительных элементов является увеличение возможных отказов, в частности, появилась опасность байпасирования активной зоны РБТ-10/2 через открытый или приоткрытый клапан естественной циркуляции. В РБТ-6 опасность представляет байпасный участок трубопровода, соединяющий входной и выходной патрубки и создающий термические напряжения из-за разности температуры в трубопроводах первого контура, а не задвижка.

С помощью теплогидравлического кода RELAP5/Mod3.2 был проведен расчетный анализ развития предаварийных ситуаций, связанных с нарушением принудительной циркуляции для наиболее опасных исходных событий, в качестве которых для РБТ-6 рассматривалось полное прекращение принудительной циркуляции за короткий промежуток времени, для РБТ-10/2 — несанкционированное открытие клапана естественной циркуляции при работе на мощности [2].

**Расчетная модель.** Особенности рассматриваемых реакторов являются гидравлическая эквивалентность ячеек активной зоны, неравномерность энерговыделения по сечению и высоте, развитая поверхность твэлов, отсутствие газовых зазоров между оболочкой и топливной матрицей.

В режимах с малой скоростью циркуляции, например, при разогреве, расхолаживании, пе-

реходных и аварийных режимах установок с однофазным теплоносителем в первом контуре и при их работе в режимах с естественной циркуляцией распределение температуры теплоносителя в смесительных камерах может существенно отличаться от равномерного [3]. Это возможно, когда инерционные силы струи теплоносителя, поступающего в камеру, становятся соизмеримыми с гравитационными силами, обусловленными разностью плотности теплоносителя в камере и втекающей струи. В этих случаях возможно образование резкой границы раздела холодного и горячего теплоносителя, перемещающейся во времени по высоте камеры. Распределение по высоте температуры теплоносителя по обе стороны от этой границы может определяться или вихревыми движениями, способствующими перемешиванию теплоносителя, или его устойчивым движением, что соответствует условиям транспортного запаздывания.

Особенностью нестационарного теплопереноса в камере в условиях существенного влияния гравитационных сил является неустойчивая стратификация плотности [3]. Если в переходном процессе реализуются условия неустойчивой стратификации плотности, то предполагаются достаточно четкие границы, разделяющие области с нагретым и холодным теплоносителем. По мере подпитки верхней области нагретыми струями граница раздела этих областей смещается вниз. Подобное расслоение теплоносителя экспериментально наблюдали в условиях свободно-конвективной струи, поднимающейся от расположенного снизу линейного источника в большом объеме жидкости. Всплытие нагретых струй без перемешивания с окружающей более холодной жидкостью возможно лишь при числе Фруда  $Fr < 1$ . Такие числа Фруда для струи, поступающей в камеру, возможны при отсутствии вынужденного движения, когда горячая струя представляет собой свободно-конвективный поток, поднимающийся от нагревателя за счет естественной конвекции.

Условие  $Fr \ll 1$  не является характерным для реакторных установок и реализуется только при отсутствии циркуляции в контуре, например, в начальный период разогрева реактора на естественной циркуляции из холодного состояния. Кроме того, необходимо учитывать, что теплоноситель поступает в смесительные камеры в виде большого числа близко расположен-

ных струй, что приводит к их быстрому смыканию из-за инжекционного эффекта и также способствует перемешиванию теплоносителя.

Исходя из модели неустойчивой стратификации плотности теплоносителя, можно сделать предположение, что при развитии естественной циркуляции в бассейне от центральной части активной зоны будет подниматься столб (факел) прогретой воды, причем с приближением к центру столба как скорость подъема, так и температура теплоносителя будет увеличиваться. Согласно этой модели предполагается, что теплые восходящие потоки теплоносителя от ТВС активной зоны, не смешиваясь или смешиваясь в определенной пропорции, поднимаются в верхнюю часть бассейна, где объединяются и постепенно ее прогревают (неустойчивая стратификация). Общий характер распределения остаточного энерговыделения по ячейкам активной зоны позволяет сделать предположение, что для центральной части зоны будет характерен восходящий поток теплоносителя, для периферийной — нисходящий.

Изменяя гидравлические параметры каналов, можно моделировать степень смешения (массообмена) потоков теплоносителя в диапазоне от полного отсутствия обмена до интенсивного перемешивания по всему объему, что позволяет уточнить предложенную модель по экспериментальным данным.

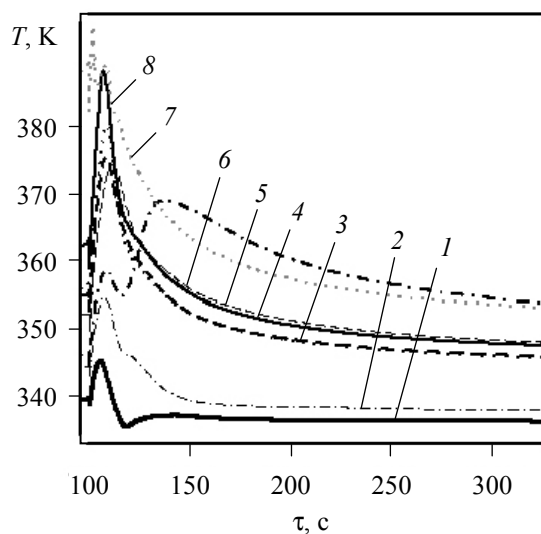
Модель активной зоны была верифицирована на экспериментальных данных о развитии межъячеечной естественной циркуляции в РБТ-6.

**Расчетный анализ предаварийной ситуации с полным прекращением принудительного расхода теплоносителя через активную зону РБТ-6.** Предаварийная ситуация с самопроизвольным закрытием заслонки первого контура рассматривается при работе реактора на номинальной мощности 6 МВт. Анализировали наиболее тяжелую ситуацию закрытия заслонки, находящейся на выходном патрубке бассейна реактора, при механической неисправности. В этом случае будет наблюдаться резкое уменьшение принудительного расхода теплоносителя через активную зону вплоть до полного прекращения за 1 с. При самопроизвольном закрытии заслонки укороченный контур естественной циркуляции не образуется даже при открытии задвижки на участке трубопровода, предназна-

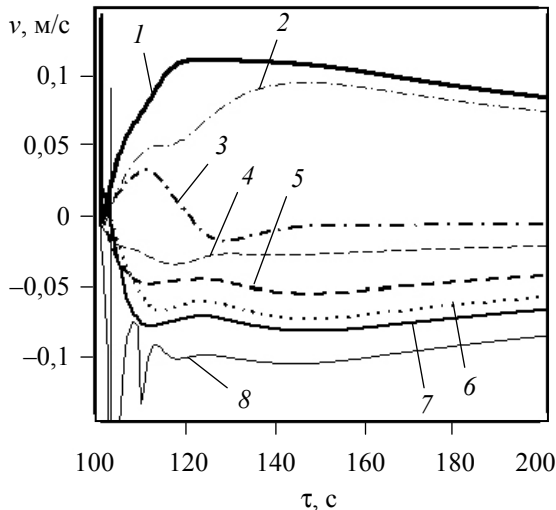
ченного для расхолаживания активной зоны путем естественной циркуляции, и возникновение контура естественной циркуляции в ТВС возможно лишь непосредственно внутри активной зоны.

Механизм возникновения межъячеечной естественной циркуляции обусловлен наличием большой неравномерности энерговыделения в активной зоне. Прекращение принудительного расхода теплоносителя приведет к неравномерному росту температуры в рабочих ТВС, так как мощность остаточного энерговыделения в периферийных рядах ТВС ниже, чем в ТВС, находящихся в центральной части активной зоны (рис. 1). Это определяет контур межканальной естественной циркуляции и устанавливающееся направление движения теплоносителя в группах ТВС (рис. 2). Подъемный участок контура естественной циркуляции включает в себя группы ТВС, находящиеся в центре активной зоны, опускной участок — периферийные группы ТВС.

Динамика развития естественной циркуляции такова, что только на начальном этапе наблюдается кратковременное кипение на поверхности наиболее теплонапряженной ТВС с всплытием пузырьков и ускорением потока до 1 м/с. Кипение теплоносителя с всплытием пузырьков пара в канале с максимально теплонапряженным твэлом происходит в первые 17 с после начала исходного события, далее через ТВС протекает однофазный поток. Аналогично в случае прекращения принудительного расхода



Р и с. 1. Изменение температуры оболочек твэлов групп ТВС 1—8 в центральной плоскости активной зоны после срабатывания аварийной защиты

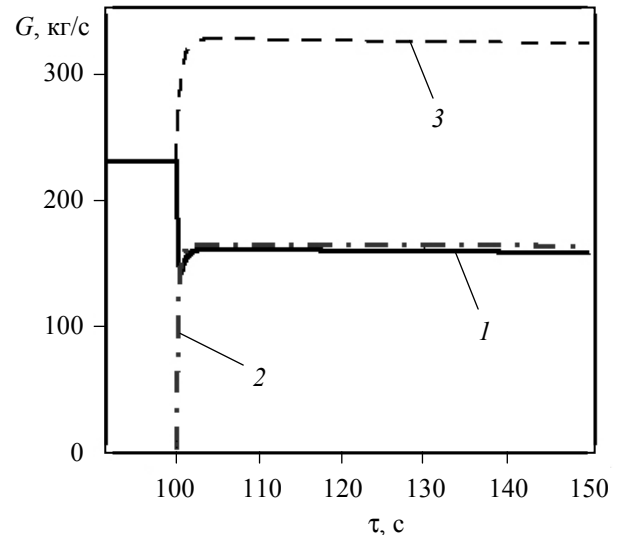


Р и с. 2. Изменение скорости теплоносителя через центральные и периферийные группы ТВС 1—8 при полном прекращении принудительной циркуляции

развивается межъячеечная естественная циркуляция и в РБТ-10/2.

Расчетный анализ позволяет обосновать отказ от байпасного участка контура циркуляции, что решает проблему превышения допустимых температурных напряжений трубопроводов первого контура.

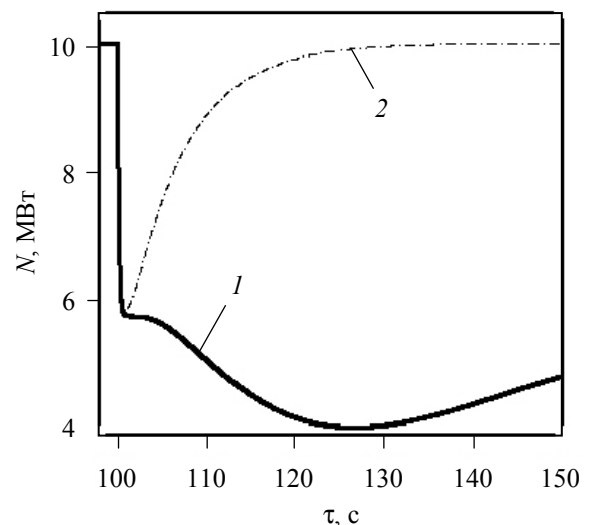
**Расчетный анализ предаварийной ситуации с несанкционированным открытием клапана естественной циркуляции при работе РБТ-10/2 на мощности.** Открытие клапана естественной циркуляции на работающем реакторе приводит к созданию тракта байпасирования активной зоны и существенному уменьшению расхода теплоносителя через рабочие ТВС. В контуре циркуляции образуются две параллельные линии: линия циркуляции теплоносителя через активную зону и байпасная линия циркуляции, включающая клапан естественной циркуляции. В результате исходного события (создания байпасного участка через клапан естественной циркуляции) будет оказано существенное воздействие на активную зону, так как снижение расхода теплоносителя через рабочие ТВС приведет к уменьшению интенсивности теплоотвода и соответственно росту температуры твэлов и теплоносителя (рис. 3). В рассматриваемой ситуации повышение температуры теплоносителя на выходе из бассейна, соответствующее аварийному сигналу ( $\sim 350$  K), не достигается, поскольку температура общего потока после смешения с байпасным даже снижается.



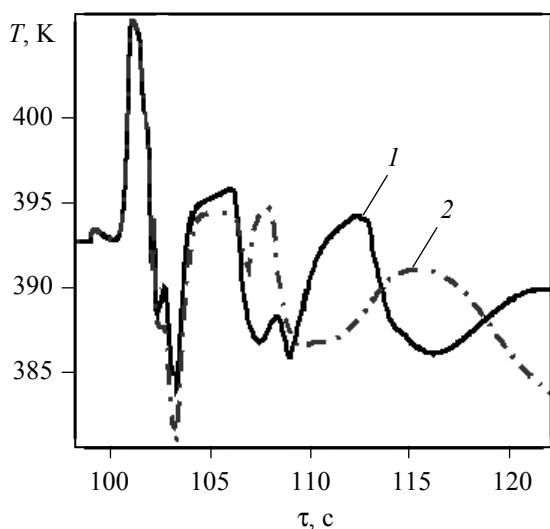
Р и с. 3. Динамика изменения расхода теплоносителя через активную зону (1), клапан К-2 (2), всасывающий трубопровод на выходе из бака реактора (3)

Автоматический регулятор компенсирует плотностной эффект реактивности при повышении температуры в активной зоне, поэтому аварийная защита по периоду, превышению мощности и снижению расхода теплоносителя не срабатывает, следовательно, остановка реактора не происходит. Это приводит к тому, что появляется несоответствие между реальной тепловой мощностью реактора и рассчитанной по перепаду температуры и расходу в первом контуре, что, в свою очередь, обуславливает снижение теплотехнической надежности (рис. 4).

Открытие клапана естественной циркуляции в случае предаварийной ситуации в РБТ-10/2, связанной с полным прекращением принудительного расхода теплоносителя через активную



Р и с. 4. Изменение мощности реактора, фиксируемое приборами (1), и реальное (2)



Р и с. 5. Динамика изменения температуры топлива при открытии (1) и несрабатывании открытия клапана К-2 (2)

зону, не влияет на температуру топлива, так как определяющую роль в охлаждении ТВС на первых секундах процесса играет межъячеечная циркуляция, а не циркуляция по укороченному контуру (рис. 5). Отсюда можно сделать вывод о нецелесообразности проектирования в бассейновых реакторных установках специальных контуров естественной циркуляции.

**Заключение.** Анализ показал, что межъячеечная естественная циркуляция играет опреде-

ляющую роль в обеспечении теплоотвода от активной зоны в реакторных установках РБТ при развитии предаварийных ситуаций. Специально предусмотренные в них контуры естественной циркуляции увеличивают число предаварийных ситуаций, а также дополнительные риски, что снижает безопасность. Обоснование механизма теплоотвода от ТВЭЛов посредством межъячеечной естественной циркуляции позволило отказаться от линии естественной циркуляции в контуре охлаждения реакторной установки РБТ-6 и клапана естественной циркуляции в бассейне реакторной установки РБТ-10/2, в связи с чем проводится модернизация первых контуров охлаждения реакторных установок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойцов А.А., Куприенко В.А., Маркина Н.В., Рязанов Д.К. Сравнительные измерения флюенса нейтронов в реакторе РБТ-6. — Атомная энергия, 1990, т. 68, вып. 6, с. 452—454.
2. RELAP5/Mod3.2 Code Manual. V. I—VII. NUREG/CR-5535. INEL-95/0174, 1995.
3. Малкин С.Д., Хабенский Д.Б., Мигров Ю.А., Ефимов В.К. Исследование перемешивания теплоносителя в смесительной камере. — Теплофизика выс. темпер., 1983, т. 21, № 2, с. 349—357.

Поступила в Редакцию 23.11.11

УДК 669.017:539.4

### АНАЛИЗ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО СЛУЧАЙНОГО НАГРУЖЕНИЯ

*Евротин С.В., Филатов В.М. (ОАО «НИКИЭТ», г. Москва)*

Вибрационные нагрузки, неизбежно возникающие в элементах конструкций под действием потока теплоносителя, а также вращающихся механизмов, являются одним из факторов, который может ограничивать назначенный срок службы, но не может быть в полной мере учтен на стадии проектирования. Код ASME содержит лишь рекомендацию о минимизации вибраций на стадии пусконаладочных работ. Нормы [1] рекомендуют отстройку на стадии проектирования собственных частот элемента конструкции от частот вынужденных колебаний на 30% для первых трех по их возрастанию и на 10% для последующих. Учитывая, что эта рекомендация

не всегда может быть выполнена и, кроме того, задача о колебаниях конструкций в потоке теплоносителя не всегда имеет точное решение, нормы [1] регламентируют методический подход учета экспериментальной вибрационной составляющей эксплуатационного нагружения при оценке циклической прочности конструкций. Нормативная методика, основанная на использовании амплитудно-частотных характеристик узко- (рис. 1, а) или широкополосного спектра (рис. 1, б) вибрационного процесса [2—5], используется до настоящего времени, хотя современные вычислительные средства схематизации случайных процессов позволяют при-