

радиолиза в пар. Путем подбора параметров конденсации пара можно сравнять скорости образования и разложения радиолитических газов и добиться установления динамического стационарного состояния, при котором концентрация образовавшихся водорода и кислорода выходит на постоянное значение.

Таким образом, в контуре пассивной системы возможно установление саморегулируемого водно-химического и газового режима посредством дозирования избыточного водорода и соответствующего каждому случаю количества водорода и кислорода, скопившихся в элементах установки.

Сформулированные необходимые и достаточные условия наступления динамического стационарного физико-химического состояния в контуре с двухфазным теплоносителем при учете совместного протекания в нем взаимовлияющих водно-химического и теплогидродинамического режимов будут в одинаковой мере правомерны для всех замкнутых контуров с кипящим теплоносителем, имеющих области облучения теплоносителя и области с наличием раздела фаз.

Показана возможность достижения стационарного газового состояния в контуре пассивной системы не только при всех дозируемых избытках водорода, но и при наличии в контуре избытка водорода, образующегося при коррозии

оборудования, что позволит отказаться от необходимости добавления в контур водорода извне в виде аммиака или газа для регулирования водно-химического и газового режима.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 08-08-00070-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахметьев А.М., Большухин М.А., Вахрушев В.В. и др. Экспериментальное обоснование контура охлаждения системы пассивного отвода тепла из защитной оболочки проекта АЭС-2006 для площадки Ленинградской АЭС. — Атомная энергия, 2009, т. 106, вып. 3, с. 148—152.
2. Лукашенко М.Л., Буланов А.В., Верховская А.О. и др. Моделирование водно-химического режима первого контура ЯЭУ с двухфазным водным теплоносителем. — Там же, 2006, т. 100, вып. 1, с. 19—24.
3. RELAP5/Mod3.2 Code Manual. V. VI. Validation of Numerical Techniques in RELAP5/MOD3.2. Washington, Dec. 2001.
4. Архипов О.П., Бугаенко В.Л., Кабакчи С.А. Аннотации программ, аттестованных Госатомнадзором РФ. Программное средство МОРАВА Н2. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2005, вып. 3, с. 65—70.
5. Герасимов В.В., Монахов А.С. Коррозия реакторных материалов. М.: ЦНИИатоминформ, 1994.

Поступила в Редакцию 13.11.09

УДК 621.039.566

КОНТРОЛЬ РАСХОДА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КАНАЛЕ РБМК НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ ОБ АКТИВНОСТИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Загребаяев А.М., Костанбаев С.В., Овсянникова Н.В. (НИЯУ МИФИ, г. Москва), Егоров М.И., Полянских С.А., Речкиман А.Э. (Курская АЭС, филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом», г. Курчатова), Жуков И.В., Потапов А.А. (ОАО «НИКИЭТ им. Н.А. Доллежалева», г. Москва)

Расход теплоносителя через технологический канал является одним из важных параметров, определяющих безопасную работу энергоблока с РБМК. Штатный контроль расхода осуществляют шариковые расходомеры ШТОРМ-32М, расположенные на трубопроводах водяных коммуникаций, по которым теплоноситель поступает на вход в каждый техноло-

гический канал [1]. В процессе эксплуатации расходомеров возрастает погрешность определения расхода вследствие механического износа шарика и дорожки качения, изменения режима течения и др. [2]. В практике эксплуатации РБМК возникают ситуации, когда расходомеры выходят из строя или их показаниям нельзя доверять. Это накладывает дополнительные огра-

ничения на режим эксплуатации реактора, в том числе при перегрузках топлива или повышении мощности после кратковременных остановок.

Представляется актуальным определение расхода в технологическом канале независимым от штатного способом, например, основанным на активации водного теплоносителя быстрыми нейтронами по реакциям $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}_7$ и $^{17}\text{O}(n, p)^{17}\text{N}_7$.

Наведенная активность воды в активной зоне зависит от плотности потока быстрых нейтронов, т.е. мощности канала, в точке измерения радиоактивности — от времени доставки теплоносителя, т.е. при известном расстоянии до точки измерения — от расхода. Таким образом, активность теплоносителя несет в себе информацию и о мощности, и о расходе. Этот факт привлек внимание исследователей применительно к корпусным реакторам с водой под давлением [3], и в настоящее время радиационный метод успешно реализован за рубежом в качестве штатной и дополнительной систем контроля. Успешное использование информации об активности однофазного теплоносителя PWR инициировало исследования возможности применения аналогичного подхода к РБМК с кипящим теплоносителем [4].

Численные исследования на математической модели показали слабую зависимость концентрации азота от мощности технологического канала, но существенную от расхода теплоносителя. Это дало основание говорить о принципиальной возможности определения расхода на основе информации об активности теплоносителя [5].

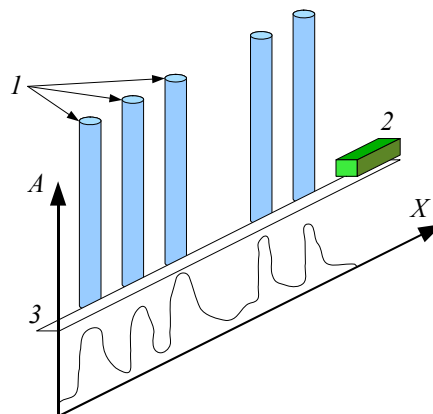
Согласно технологическому регламенту эксплуатации АЭС с РБМК качественный контроль расхода в канале с неисправным расходомером ведется с помощью штатной системы контроля герметичности оболочек твэлов. Конструктивно система состоит из восьми сдвоенных коллиматоров с блоками детектирования, установленных на тележках и с помощью системы перемещения передвигающихся в восьми коробах, которые расположены вдоль вертикальных рядов трубопроводов пароводяных коммуникаций. С каждой стороны короба расположено до 120 трубопроводов. Коллимационные отверстия детекторов направлены в противоположные стороны, поэтому каждый детектор может контролировать по одному ряду трубопроводов. Коллимационные отверстия расположены таким

образом и имеют такую конфигурацию, что при движении детектора вдоль рядов трубопроводов на кристалл каждого блока детектирования попадают γ -кванты только от трубопровода, напротив которого находится в данный момент отверстие коллиматора.

При движении тележки расположенный на ней датчик регистрирует γ -излучение через равные промежутки времени (рис. 1). Максимальный сигнал соответствует суммарной активности теплоносителя и окружающего оборудования (барабана-сепаратора, металлоконструкций и др.). Сигналы с блоков детектирования по высокочастотным кабелям подаются на сигнально-измерительную аппаратуру.

Таким образом, система контроля герметичности оболочек твэлов РБМК регистрирует активность теплоносителя лишь в одной точке каждой пароводяной коммуникации. По этой причине неприменимы методы контроля расхода по времени спада активности, используемые на реакторах водо-водяного типа, а корреляционные методы требуют конструктивных изменений в расположении детекторов. Конструктивные особенности системы регистрации активности и кипение теплоносителя в технологическом канале требуют разработки новых подходов к восстановлению расхода в каналах РБМК. В первую очередь это относится к разработке математической модели активации теплоносителя, поскольку если есть связь между измеряемой активностью и теплотехническими параметрами канала, то существует принципиальная возможность решения поставленной задачи.

Расчетные исследования показали принципиальную возможность использовать систему



Р и с. 1. Схема измерения активности теплоносителя в трубопроводах пароводяных коммуникаций: 1 — пароводяные коммуникации; 2 — тележка с датчиком; 3 — рельсы

контроля герметичности оболочек твэлов для количественной оценки расхода теплоносителя. Метод контроля основывается на измерении детектором γ -излучения теплоносителя в трубопроводе пароводяных коммуникаций. Наибольший вклад в активность теплоносителя вносит пороговая реакция $^{16}\text{O}_8 + {}^1_0n \rightarrow {}^{16}\text{N}_7 + {}^1_1p$ с участием нейтронов энергией более 9,638 МэВ. Образуемый ^{16}N ($T_{1/2} = 7,11$ с) испускает при β -распаде $^{16}\text{N}_7 \rightarrow {}^{16}\text{O}_8 + \beta + \gamma$ γ -кванты энергией 6,13—7,11 и 2,75 МэВ, которые регистрируются системой контроля герметичности оболочек твэлов. Сечение активации, усредненное по спектру деления, равно $0,19 \cdot 10^{-31} \text{ м}^2$ [4].

Несмотря на принципиальную возможность определения расхода теплоносителя на АЭС с РБМК, до настоящего времени:

не исследовано влияние погрешности исходных данных на восстановление расхода;

не изучены алгоритмы восстановления расхода;

не создано универсальной математической модели активации теплоносителя, позволяющей рассчитывать радиоактивность теплоносителя в различных стационарных и переходных режимах работы реактора.

Частично перечисленные недостатки были сняты в работе [5], однако отсутствовало программное обеспечение, адаптированное к реальным информационным каналам АЭС. Вместе с тем отметим, что на некоторых АЭС с РБМК, например, Курской сбор информации системой контроля герметичности оболочек твэлов автоматизирован [7]. Это в существенной степени влияет на практическую возможность определения расхода теплоносителя по измеренной активности, поскольку позволяет использовать современную вычислительную технику, следовательно, и мощные математические модели и алгоритмы.

В настоящей работе приводятся результаты опытной эксплуатации на первом энергоблоке Курской АЭС расчетно-измерительного комплекса контроля расхода теплоносителя (РИК КРТ), осуществляющего сбор необходимой технологической информации, ее хранение и обработку. Комплекс привязан к базе данных автоматизированной системы контроля герметичности оболочек твэлов и файлам состояния системы СКАЛА-микро.

Математическая модель активации теплоносителя в канале РБМК, используемая в РИК КРТ, представляет собой систему дифференциальных уравнений:

активная зона

$$\frac{d(SN\omega)}{dz} = A(W + \alpha \bar{W}_0)S(z)\rho(z) - \lambda N(z)S(z), \quad (1)$$

пароводяная коммуникация

$$\frac{d(N'S'\omega')}{dz} = -\lambda N'S'(z). \quad (2)$$

Условие однозначности — концентрация азота на входе в активную зону (при $z = 0$)

$$N(0) = 0. \quad (3)$$

Условие непрерывности потока ядер азота на границе активной зоны и пароводяной коммуникации (при $z = H$)

$$NS\omega = N'\omega'S. \quad (4)$$

Здесь S — проходное сечение технологического канала, м^2 ; N — плотность ядер азота в активной зоне, м^{-3} ; ω — скорость смеси в активной зоне, м/с ; z — координата по высоте активной зоны и пароводяной коммуникации, м ; A — нормированный коэффициент; W — мощность канала, МВт ; α — вклад каналов окружения технологического канала в плотность потока быстрых нейтронов; $\bar{W}_0$ — средняя мощность каналов окружения рассматриваемого технологического канала, МВт ; ρ — плотность пароводяной смеси, кг/м^3 ; $\lambda = 0,101 \text{ с}^{-1}$ — постоянная радиоактивного распада ядер азота; N' — плотность ядер азота в пароводяной коммуникации, м^{-3} ; S' — проходное сечение пароводяной коммуникации, м^2 ; ω' — скорость смеси в пароводяной коммуникации, м/с ; H — высота активной зоны, м ; L — длина пароводяной коммуникации от активной зоны до места расположения системы контроля герметичности оболочек твэлов, м .

Функции $\omega(z)$, $\rho(z)$ определяются в результате теплогидравлического расчета [8]. Показания датчика системы контроля герметичности оболочек твэлов пропорциональны концентрации азота в трубопроводе в месте регистрации, равной $N'(L)$.

Физический смысл уравнений следующий.

В активной зоне изменение потока ядер азота между сечениями $S(z)$ и $S(z + dz)$ обусловлено увеличением их количества за счет активации ядер кислорода быстрыми нейтронами самого технологического канала и каналов окружения и убылью вследствие радиоактивного распада. В пароводяной коммуникации изменение потока ядер азота обусловлено только их радиоактивным распадом.

Математическая модель не может учесть все индивидуальные особенности канала, например, изменение проходных сечений за счет разных отложений, поэтому она настраивается на технологический канал при каждом измерении активности азота в пароводяной коммуникации.

При настройке модели в момент времени t для каждого технологического канала предполагаются известными измеренная активность $N_3(t)$, мощность $W(t)$, длина пароводяной коммуникации, расход по штатной системе ШТОРМ-32М $G_{\text{шт}}(t)$. Для каждого канала определяется индивидуальный коэффициент $\xi(t) = N_3(t) / [N'(W(t), G_{\text{шт}}(t), L)]$, который считается постоянным в течение промежутка времени Δt . Отметим, что плотность ядер азота N' определяется по формулам (1)–(4).

После настройки модели по решению уравнения

$$\frac{N_3(t + \Delta t)}{\xi(t)} = N'(W(t + \Delta t), G(t + \Delta t), L)$$

находится расход $G(t + \Delta t)$ в момент времени $t + \Delta t$.

Таким образом, если в течение промежутка времени Δt после настройки модели происходит отказ штатного расходомера, то расход теплоносителя через технологический канал может быть определен по известной мощности и измеренной системой контроля герметичности оболочек твэлов активности теплоносителя в пароводяной коммуникации этого канала. Настройка модели проводится при каждом сканировании активной зоны. Анализ экспериментов, при которых система контроля герметичности оболочек твэлов контролировала расход теплоносителя в каналах постоянно в течение 20 мин, показывает, что относительная погрешность измерения активности азота составляет ~5%.

В 2008–2009 гг. были проведены испытания и опытная эксплуатация РИК КРТ на первом

энергоблоке Курской АЭС, в результате которых:

отработана методика РИК КРТ;

определен диапазон расхождений между показаниями штатной системы ШТОРМ-32М и рассматриваемой РИК КРТ;

уточнены метрологические характеристики исходных экспериментальных данных, необходимых для определения расхода теплоносителя через технологический канал с помощью РИК КРТ (погрешность измерения активности теплоносителя);

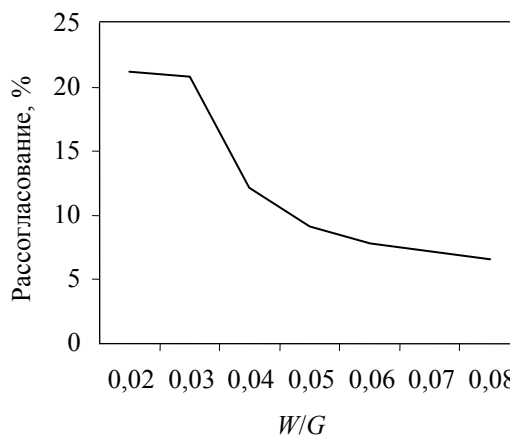
набран статистически значимый объем измерений для метрологической аттестации расчетно-измерительного комплекса.

Анализ результатов опытной эксплуатации РИК КРТ показывает:

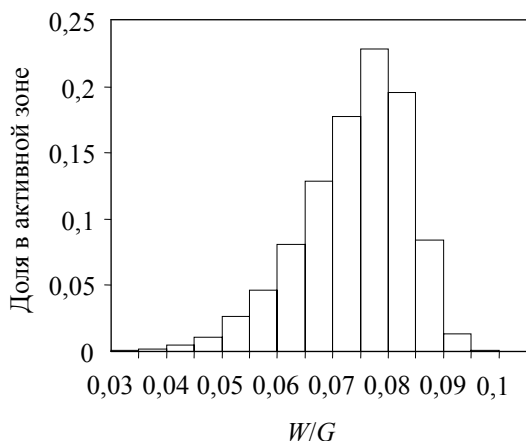
рассогласование между показаниями штатного расходомера и РИК КРТ зависит от отношения мощности данного канала к расходу теплоносителя через него, причем оно уменьшается с ростом отношения W/G , т.е. чем больше паросодержание в канале, тем меньше расхождение (рис. 2). Например, при $W/G > 0,04$ (объемное паросодержание более 50%) рассогласование не превышает 10%. Таких каналов в активной зоне большинство, о чем свидетельствует их распределение по отношению W/G (рис. 3);

рассогласование не превышает 10% и в том случае, если в интервале времени между настройкой модели и последующим восстановлением персонал изменял расход теплоносителя в канале;

модель необходимо настраивать заново для каналов, в которых после настройки произошла перегрузка топлива;



Р и с. 2. Зависимость относительного рассогласования показаний ШТОРМ-32М и РИК КРТ от технологических параметров канала



Р и с. 3. Распределение числа технологических каналов по отношению мощности к расходу теплоносителя

относительная погрешность определения расхода в технологическом канале при работе реактора на энергетическом уровне мощности не превышает 15% в диапазоне отношения мощности канала к расходу теплоносителя через него не менее 0,04 МВт/(м³/ч) согласно свидетельству об аттестации межведомственных испытаний, выданному ОАО «НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала».

В настоящее время РИК КРТ используется следующим образом. Три раза в неделю активная зона сканируется системой контроля герметичности оболочек твэлов, информация об активности теплоносителя в технологических каналах через внешний носитель передается в локальную сеть. При этом на время начала и окончания сканирования из локальной сети извлекаются данные о мощности и расходе теплоносителя в каналах реактора. Полученный

массив данных обрабатывается с помощью РИК КРТ.

Авторы выражают признательность сотрудникам Курской АЭС А.Ф. Шевелеву и В.В. Бубнову.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доллежал Н.А., Емельянов И.Я. Канальный ядерный энергетический реактор. М.: Атомиздат, 1980.
2. Лысков Б.В., Прозоров В.К. Термометрия и расходомерия ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Лысенко В.В., Мусорин А.И., Рымаренко А.И., Цыпин С.Г. Определение ядерно-физических и теплофизических характеристик ВВЭР с помощью радиационных измерителей. М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Ашурков В.К., Гарусов Ю.В., Загребяев А.М. Исследования возможности использования математической модели активации азота для уточнения данных систем КГО. — В сб.: Цифровая обработка измерительной информации. М.: Энергоатомиздат, 1987, с. 15—20.
5. Загребяев А.М., Овсянникова Н.В., Артемьев А.Е., Миронов Н.И. Математическое обеспечение идентификации расхода теплоносителя в топливном канале реактора РБМК на основе информации об азотной активности. — Известия вузов. Ядерная энергетика-2004, № 1, с. 69—76.
6. Физические величины. Справочник. Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991.
7. Алексаков Г.Н., Кудрявцев А.В., Лапшиков С.М. и др. Опыт эксплуатации системы автоматизации измерений «Кентавр-6К» на энергоблоках Курской АЭС. Тезисы докл. IX сем. по проблемам физики реакторов. Т. 1. М., МИФИ, 1995, с. 96—97.
8. Методика теплогидравлического расчета сборок тепловыделяющих элементов ядерных реакторов РБМК РТМ 95 1181-83 (НИКИЭТ).

Поступила в Редакцию 13.11.09

УДК 621.039.021

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ПАРОГЕНЕРИРУЮЩЕМ ОБОРУДОВАНИИ АЭС И ТЭС

Горбуров В.И., Иванов С.В., Горбуров Д.В. (МЭИ (ТУ), г. Москва),

Зройчиков Н.А. (ТЭЦ-23 ОАО «Мосэнерго», г. Москва), Будько И.О. (НИЦЭ «Центрэнерго», г. Москва)

В настоящее время на современных парогенерирующих установках АЭС и ТЭС количество входящих примесей всегда больше количества выходящих с паром, влагой и продувочной водой. Следовательно, примеси либо откладываются на теплопередающей поверхности, либо накапливаются в парогенерирующем объеме.

Примеси, вносимые в парогенерирующее оборудование, могут быть хорошо растворимы в

Для понимания распределения различных примесей приведем следующую классификацию:

макрораспределение — распределение примесей по объему рабочей среды, для барабанных котлов ТЭС — по длине барабанов;

микрораспределение — изменение концентрации примесей в пристенном кипящем слое. воде и нерастворимы в паре, хорошо растворимы