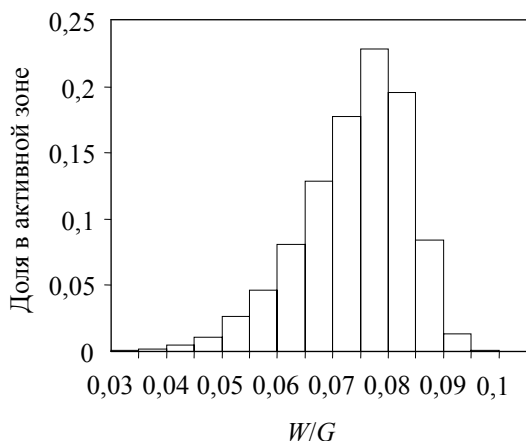




Р и с. 3. Распределение числа технологических каналов по отношению мощности к расходу теплоносителя

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. Доллежалю».

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. Доллежалю 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

мы как в воде, так и в паре, нерастворимы ни в воде, ни в паре.

Наиболее изученным является макрораспределение растворимой в воде и нерастворимой в паре примеси. Типичным примером может служить поведение натриевых солей (фосфатирование котловой воды барабанных котлов). Из элементарных уравнений материального и солевого балансов следует, что концентрация такой примеси определяется по формуле

$$S_{\text{пр}}/S_{\text{п.в}} = (1 + P)/P, \quad (1)$$

где $S_{\text{пр}}$, $S_{\text{п.в}}$ — концентрация примеси в продувке и питательной воде соответственно, мг/кг; $P = G_{\text{пр}}/G_0$ — относительная продувка (отношение расхода продувки к паропроизводительности).

Выражение (1) не всегда справедливо. Так, если точка продувки выбрана не оптимально, то в объеме кипящего рабочего тела могут возникать зоны, концентрация примесей в которых больше концентрации в продувке.

В барабанных котлах в силу особенности гидравлических связей есть плохо продуваемый элемент, концентрация примесей в котором может быть в 100 раз больше концентрации примеси в продувке (котлы типа ТП-87). И тем не менее можно считать, что примесь, хорошо растворимая в воде и нерастворимая в паре, изменяет свою концентрацию при $P = 0,01$ в пределах $1 < S < 100$.

Распределение хорошо растворимых в воде и паре примесей может существенно отличаться. Материально-солевой баланс для такой примеси выражается в виде соотношения $S_{\text{пр}}/S_{\text{п.в}} = (1 + P)/(P + K_p)$, где K_p — коэффициент распределения.

Примем, что примесь хорошо растворима в паре, если $K_p \geq P$. Так, при $K_p = 0,033$ (для кремниевой кислоты при давлении 15 МПа и pH ~ 9) кратность концентрирования будет уже не 100, а всего $\sim 1/K_p$, так как $P \ll 1$, $K_p > P$.

Окончательно $1 < S < 1/K_p$.

Содержание железа и меди в отложениях на теплопередающих поверхностях составляет 60—80% на ТЭС и 70—90% на АЭС. Примеси железа и меди следует разделить на растворенные в воде, мелко- (эквивалентный диаметр меньше 1—3 мкм) и крупнодисперсный (эквивалентный диаметр больше 1—3 мкм) железомедистый шлам, поскольку поведение последнего существенно

отличается. Хотя для шлама $K_p \equiv 0$ и его поведение должно совпадать с поведением примеси, хорошо растворимой в воде и нерастворимой в паре, еще и потому, что скорость осаждения частиц шлама значительно меньше скорости циркуляции. Но многочисленные эксперименты на барабанных котлах ТЭС и парогенераторах АЭС свидетельствуют, что содержание железа в продувке всего в несколько раз больше, чем в питательной воде. Но так как расход продувки, как правило, в 100 раз меньше паропроизводительности, то в нее попадает не более 10% железа, вносимого с питательной водой. Часть железозоксидных соединений, растворенных в паре, уносится с паром, и это количество соизмеримо с количеством железа, выводимым с продувкой, так как общий расход пара превышает расход продувки в 100 раз. Количество железа в объеме парогенерирующего устройства, рассчитанное как произведение средней концентрации в воде (по результатам химического анализа проб) на ее массу, в несколько раз (в некоторых случаях в 10 раз) меньше реального количества, полученного в период отмывки. Это свидетельствует о том, что большая часть железа находится не в общем объеме парогенерирующего устройства, а концентрируется в вязком пограничном слое, где измерить концентрацию технически невозможно из-за его малой толщины.

Рассмотрим микрораспределение примесей вблизи теплопередающей поверхности в вязком пограничном слое. Толщина этого слоя [1]

$$\delta = \lambda/\alpha_{\text{кип}},$$

где λ — теплопроводность жидкой фазы, Вт/(м·К); $\alpha_{\text{кип}}$ — коэффициент теплоотдачи при кипении, Вт/(м²·К).

Поскольку коэффициент теплоотдачи является функцией давления и удельного теплового потока, то и толщина пограничного слоя определяется этими же параметрами, а также зависит от состояния поверхности (ее шероховатости) и составляет 1—100 мкм.

Концентрацию примесей в вязком подслое можно рассчитать на основе конвективно-диффузионной модели. Жидкая фаза с концентрацией примесей $S_{\text{ж}}$ подтекает к поверхности со скоростью $w'_r = q/rp'$. Отток примесей может происходить двумя путями: за счет диффузии со скоростью $w_D = D/\delta$ и с паром $w''_r = q/rp''$, если примесь растворима в нем. Здесь q — удельная

тепловая нагрузка, кВт/м²; r — скрытая теплота парообразования, кВт/кг; ρ' , ρ'' — плотность жидкой и паровой фазы соответственно, кг/м³; D — коэффициент диффузии, м²/с. По уравнению материального и солевого балансов между вязким подслоем $S_{ст}$ и ядром потока $S_{я}$ можно определить концентрацию примеси по формуле

$$S_{ст}/S_{я} = (1 + q\delta/r\rho'D)/(1 + q\delta K_p/r\rho'D). \quad (2)$$

Выражение (2) также может быть проанализировано с позиций трех видов примесей.

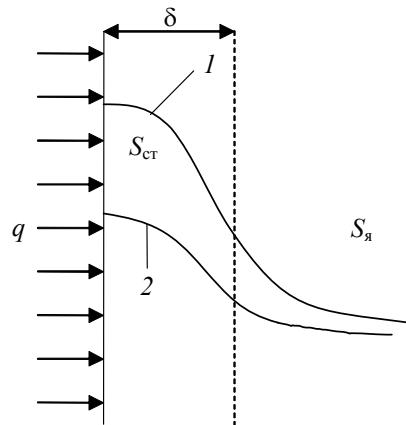
Для примеси, хорошо растворимой в воде и нерастворимой в паре с $K_p = 0$, выражение (2) принимает вид

$$S_{ст}/S_{я} = 1 + q\delta/r\rho'D \approx (q/r\rho')/(D/\rho) = w'_r/w_D.$$

Величина $q\delta/r\rho'D = 10^2\text{—}10^4$ значительно больше единицы, и если $K_p \neq 0$ (примесь, хорошо растворимая в воде и нерастворимая в паре), то $S_{ст}/S_{я} \approx 1/K_p$. Так, при фосфатировании котловой воды барабанов концентрация фосфатов на стенке больше, чем в объеме, примерно в 1000 раз, при тех же условиях для кремниевой кислоты — всего лишь в 30 раз.

Сопоставление показывает, что нерастворимые в паре примеси концентрируются значительно сильнее как в объеме, так и возле стенки. Примеси, растворимые в воде и паре, при $K_p \geq P$ концентрируются значительно слабее (на $1/K_p$ в обоих случаях). Еще один важный вывод заключается в том, что соотношение концентрации различных примесей в питательной воде, объеме кипящей воды и особенно на стенке существенно различается. С этих позиций объясняется скапливание и выброс примесей в переходных процессах. Это не что иное, как перераспределение концентрации между ядром потока и пристенной областью. Причем из-за разной концентрации при $K_p \approx 0$ наблюдается больший выброс примесей (рис. 1). Время изменения концентрации в значительной степени зависит от эквивалентного диаметра частицы и толщины слоя и составляет от нескольких секунд до нескольких часов — $\tau = \delta/w_D = \delta^2/D$.

Представляет интерес микрораспределение нерастворимых ни в воде, ни в паре (шлам) примесей. Как и при макрораспределении, поведение частиц в двухфазном потоке — задача гидромеханики. В начале 1970-х годов исследование распределения паросодержания по сечению



Р и с. 1. Распределение растворимых в воде примесей при $K_p = 0$ (1) и $K_p \neq 0$ (2)

обогреваемого канала показало, что концентрация пузырьков пара максимальна на расстоянии, сопоставимом с размером отрывного диаметра. Уже тогда этот эффект объяснялся наличием в вязком подслое большого градиента скорости — от нуля до $\approx 0,9w_{я}$, и любая частица в этом слое испытывает выталкивающую силу (сила Магнуса), направленную от парогенерирующей поверхности.

На границе вязкого подслоя

$$F_m = \pi\rho'd^3 w_{сл}^2 / 16\delta,$$

где d — диаметр частицы шлама, м; $w_{сл}$ — скорость жидкости на границе вязкого подслоя δ , м/с.

Приравняв силу Магнуса силе сопротивления частицы, получаем скорость вывода частицы из вязкого подслоя:

$$w_m = d^2 w_{сл}^2 / 48\delta\nu,$$

где ν — кинематическая вязкость, м²/с.

Это уравнение получено в предположении о сферичности частицы, что позволяет использовать для расчета сопротивления выражение Стокса.

С учетом этого же предположения можно рассчитать и скорость осаждения частицы шлама, приравняв силу сопротивления силе тяжести:

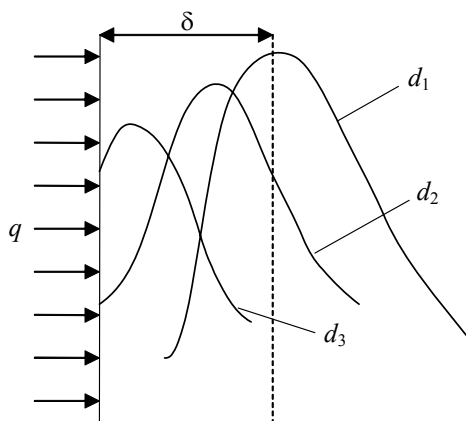
$$w_{ос} = (gd^2/18\nu) (\rho_d/\rho'),$$

где ρ_d — плотность шлама, кг/м³.

Если скорость подтока жидкой фазы w_r примерно равна скорости вывода частицы из слоя за счет силы Магнуса w_m , то скорость осаждения $w_{ос}$ в 100—1000 раз меньше, что важно для дальнейших рассуждений и выводов.

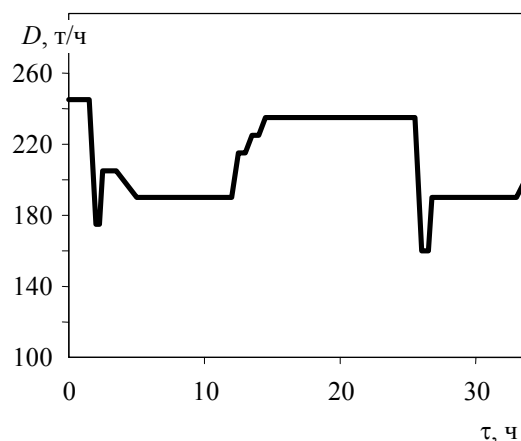
По немногочисленным данным характерный размер частиц шлама $d = 1\text{--}20$ мкм, толщина вязкого пограничного слоя $\delta = 1\text{--}100$ мкм для диаметра трубы $d_{\text{тр}} = 10\text{--}70$ мм и скорости циркуляции $w_0 = 0,6\text{--}2,5$ м/с. Это соотношение свидетельствует о том, что шлам не может достичь теплопередающей поверхности и в отличие от растворимых в воде примесей накапливается на границе вязкого подслоя с турбулентным ядром. И тем не менее шлам может достичь поверхности посредством двух механизмов. Если размер частицы очень мал (<1 мкм), то скорость выталкивания за счет силы Магнуса меньше скорости подтока жидкости, и шлам данной крупности ведет себя как растворимая примесь и осаждается на поверхности. Второй причиной может быть насыщение шламом зоны с максимальной концентрацией до тех пор, пока расстояние между частицами не будет сравнимо с их размерами. Вращение частиц шлама в одну сторону становится невозможным, и процесс осаждения на поверхность носит лавинообразный характер именно в зоне максимальных тепловых нагрузок. Это явление может приводить к образованию свищей или разрыву трубопроводов.

Из соотношения скоростей подтока жидкости к стенке и оттока за счет силы Магнуса следует, что чем меньше размер частицы шлама, тем глубже она проникает в слой δ ($d_1 > d_2 > d_3$) (рис. 2).

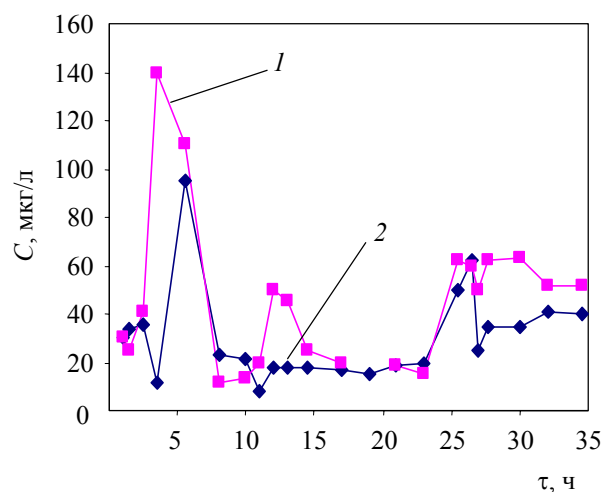


Р и с. 2. Распределение частиц шлама вблизи границы вязкого подслоя $d_1 > d_2 > d_3$

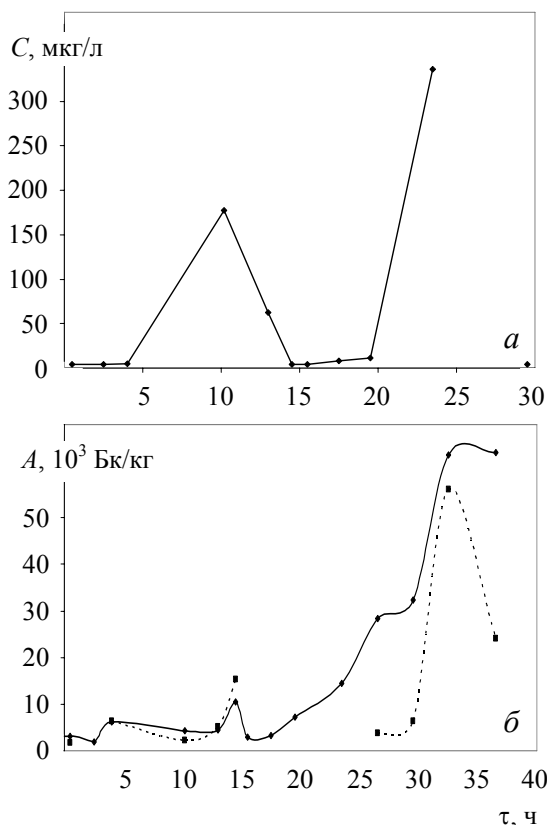
В экспериментах на АЭС и ТЭС наблюдали увеличение концентрации и активности примеси в объеме рабочего тела в несколько раз при снижении мощности и в десятки раз при сбросе мощности до нуля (рис. 3—7). Это свидетельствует о локальной концентрации примесей вблизи поверхности, так как при останове блока скорость циркуляции как в барабанных котлах, так и в парогенераторах АЭС уменьшается со временем до нуля и смыва с теплопередающей поверхности или вымывания из застойных зон не происходит. Появление шлама в объеме рабочего тела возможно только из зон его максимального накопления в вязком подслое за счет диффузии. В процессе работы парогенерирующего устройства нет шлама и на нижних образующих его элементов из-за существенно меньшей скорости осаждения по сравнению со скоростью циркуляции рабочей среды.



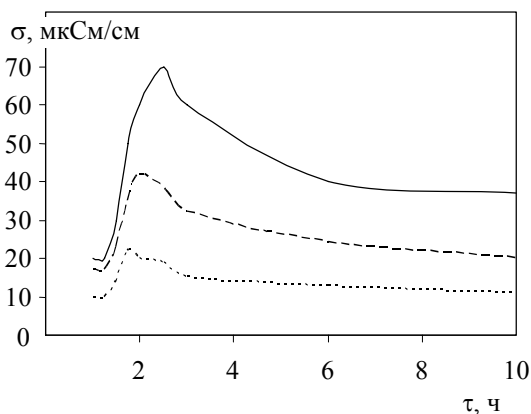
Р и с. 3. Паропроизводительность ВК-50 при изменении нагрузки и постоянной продувке 12 т/ч



Р и с. 4. Содержание железа в пробах продувочной (1) и питательной воды (2) ВК-50 при изменении нагрузки

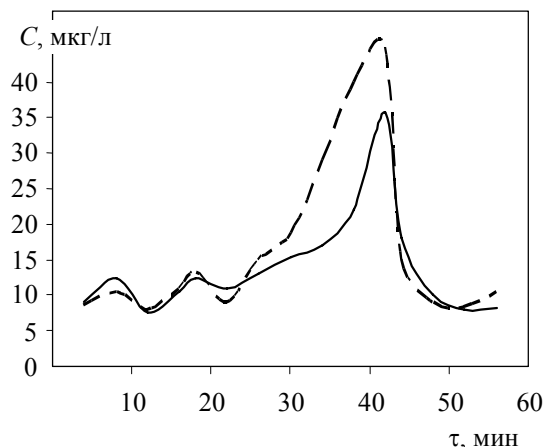


Р и с. 5. Изменение массового содержания железа (а) и активности ^{54}Mn (—), ^{59}Fe (---) в реакторной воде перед входом в СВО-1 РБМК-1000 Смоленской АЭС в момент времени 0 ч — снижение мощности на 50%, 15 ч — полное снижение мощности



Р и с. 6. Изменение электропроводности котловой воды ТГМЕ-464 в чистом отсеке барабана (---), полусолевом левом (—) и правом циклоне (---) после снижения паропроизводительности с 420 до 300 т/ч

Вносимые в парогенерирующий объем железо и медь необходимо разделять на растворимую и шламовую формы, определять распределение шлама по крупности. Так, крупность является параметром, который определяет как проникновение и отложение на теплопередающей поверхности, так и скорость осаждения после останова блока. Необходимо учитывать



Р и с. 7. Изменение содержания железа в котловой воде ТГМ-96 после снижения паропроизводительности с 220 до 130 т/ч 12 декабря 2006 г. (---), 27 февраля 2007 г. (—)

скорость и соответственно время осаждения шлама после останова блока для вывода его максимального количества путем изменения регламента ведения продувки.

Периодическая продувка позволяет выводить нерастворимые примеси. Скорость осаждения существенно меньше скорости циркуляции. Скорость естественной циркуляции жидкой фазы изменяется в диапазоне $0,1 < S_{\text{ц}} < 1$ м/с. Поэтому периодическая продувка выводит только тот шлам, который попал в продувочный трубопровод. Периодическую продувку нижних образующих парогенерирующего оборудования проводить нецелесообразно, поскольку при работе оборудования шлама там нет. В номинальном режиме работы парогенерирующего оборудования (без нарушения норм водного режима) периодическую продувку следует осуществлять крайне редко и только из зон возможного скопления шлама. Эффективность периодической продувки возрастает только при ее совмещении по времени со снижением мощности.

Теоретическое обоснование поведения железа подтверждается экспериментами на ВК-50, РБМК-1000 и котлах типа ТГМЕ-464, ТГМ-96 ТЭЦ-23 [2, 3]. Экспериментальные данные свидетельствуют, что в парогенерирующих устройствах с высокой удельной тепловой нагрузкой (ВК-50 и газоплотный котел ТГМЕ-464) увеличение концентрации железа в объеме рабочего тела значительно больше, чем в парогенерирующих устройствах с меньшей удельной тепловой нагрузкой (котел ТГМ-96) (см. рис. 3—7).

В заключение следует отметить, что если макрораспределение увеличивает концентрацию примесей по сравнению с концентрацией в питательной воде в 10—100 раз, микрораспределение в 100—1000 раз, то концентрация в вязком пограничном слое определяется обоими процессами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джахан Фарниа Голам Реза. Моделирование пространственного распределения примесей в парогенери-

рующих каналах оборудования АЭС и ТЭС. Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. М., 2005 (МЭИ).

2. Хлебников А.А. Пространственное распределение примесей в парогенерирующем оборудовании АЭС и ТЭС в стационарных и переходных процессах. Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. М., 2001 (МЭИ).

3. Зройчиков Н.А., Галас И.В., Чернов Е.Ф. и др. Особенности распределения примесей в барабанных котлах ТГМ-96 ТЭЦ-23 в стационарных и переходных режимах. — Теплоэнергетика, 2006, № 11, с. 33—38.

Поступила в Редакцию 3.11.09

УДК 621.039.548

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

*Доровской В.М., Тутнов И.А. (ИЯР РНЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва),
Кудрявцев Е.М., Родионов В.Я. (НИЯУ МИФИ, г. Москва)*

Надежность и функциональную безопасность ядерных энергетических установок часто обосновывают посредством имитационных моделей, основанных на описании физических процессов разрушения материалов во время эксплуатации. До настоящего времени точность расчетного моделирования разрушения тонкостенных конструкций ядерных энергетических установок считалась удовлетворительной. Долговечность большинства таких конструкций рассчитывалась для относительно небольшого срока эксплуатации при значительном запасе прочности. Для описания процессов разрушения в таких конструкциях использовались полуэмпирические или феноменологические модельные зависимости параметров разрушения от условий внешнего термосилового воздействия на исследуемую конструкцию.

В настоящее время надежность и ресурс ядерных энергетических установок требуется прогнозировать на длительный период эксплуатации, до 60 лет и более. Поэтому все большую актуальность приобретают экспериментальные исследования, которые составляют основу построения имитационных моделей, необходимых для прогнозирования долговечности конструкций. Это также связано с тем, что по мере усложнения и удорожания конструкций, расширения многокомпонентной неопределенности необходимых исходных данных и условий будущей длительной эксплуатации возрастают требования к точности прогнозов расчетной

долговечности этих конструкций. Результаты прогнозов необходимо контролировать в течение времени работы ядерных энергетических установок и уточнять их гарантированный ресурс эксплуатации.

Сложность моделирования заключается в том, что разрушение материалов тонкостенных и мембранных изделий ядерных энергетических установок начинается на микроуровне, где используются закономерности атомной и молекулярной физики и механики разрушения, а заканчивается на макроуровне, где уже необходимы соотношения континуальной механики и термодинамики. Макропроцессы разрушения материала успешно контролируются имеющимися средствами измерений и неразрушающего контроля. Но такие результаты неразрушающего контроля разрушения материалов могут быть использованы только для краткосрочного прогноза показателей долговечности и ресурса названных изделий.

Микропроцессы разрушения имеют фундаментальное значение для моделирования и прогнозирования долговечности изделий на длительный период эксплуатации ядерных установок, но их имитационное представление достаточно сложно. Сложна и экстраполяция результатов моделирования микропроцессов разрушения материалов на макроуровень времени предполагаемого разрушения конструкций.

Вместе с тем в последнее время появилось множество новых имитационных моделей для