

Оценка показателей долговечности теплообменных труб парогенераторов АЭС с ВВЭР на основе континуальной модели коррозионного растрескивания

Рассматривается оценка показателей долговечности теплообменных труб парогенераторов АЭС с ВВЭР на основе континуальной модели коррозионного растрескивания с учетом случайности эксплуатационных факторов. Выполнено сравнение расчетных показателей долговечности теплообменных труб парогенераторов ПГВ-1, ПГВ-213 и ПГВ-1000.

Ключевые слова: долговечность, коррозионное растрескивание, теплообменная труба, парогенератор АЭС с ВВЭР.

Ю. В. Ромашов

Оцінка показників довговічності теплообмінних труб парогенераторів АЕС з ВВЕР на основі континуальної моделі корозійного розтріскування

Розглянуто оцінку показників довговічності теплообмінних труб парогенераторів АЕС з ВВЕР на основі континуальної моделі корозійного розтріскування з урахуванням імовірності експлуатаційних факторів. Виконано порівняння розрахункових показників довговічності теплообмінних труб парогенераторів ПГВ-1, ПГВ-213 та ПГВ-1000.

Ключові слова: довговічність, корозійне розтріскування, теплообмінна труба, парогенератор АЕС з ВВЕР.

В настоящее время 15 энергоблоков украинских АЭС, находящихся в промышленной эксплуатации, выработывают около 50 % общего объема электроэнергии в Украине, причем все они оснащены реакторными установками ВВЭР [1, 2]. Развитие атомной энергетики связано, в частности, с обеспечением показателей долговечности оборудования АЭС на уровне, который гарантирует, что частота нарушений нормальной работы, способных привести к тяжелым последствиям, не будет выше установленной. В реакторных установках ВВЭР стенки теплообменных труб (ТОТ) парогенераторов (ПГ) являются границей между теплоносителем первого и второго контуров, и их повреждения могут приводить к течи из первого контура во второй. Одной из распространенных причин разрушения стенок ТОТ является хлоридное коррозионное растрескивание (КР), которое происходит при совместном действии механических растягивающих напряжений и коррозионно-активных компонентов (хлоридов), содержащихся в питательной воде второго контура ПГ [3, 4]. Проблема КР ТОТ является актуальной как для эксплуатирующихся, так и для проектируемых ПГ из-за сложностей прогнозирования и учета в расчетах концентрирования на теплопередающих поверхностях хлоридов, вызывающих КР ТОТ при эксплуатации ПГ. При проектировании новых типов ПГ АЭС с ВВЭР актуальность проблемы КР ТОТ обусловлена также более жесткими условиями эксплуатации вследствие интенсификации теплообменных процессов за счет повышения температуры и давления теплоносителя первого контура.

Основные исследования и публикации. На этапе проектирования ПГ проблему КР ТОТ решают подбором материалов для их изготовления (хромоникелевые нержавеющие стали) и водно-химического режима для питательной воды второго контура [3, 4]. При эксплуатации ПГ текущее состояние металла ТОТ оценивают методами неразрушающего контроля, по результатам которого принимают решение о необходимости глушения ТОТ в соответствии с установленными критериями глушения [4].

Наиболее систематизированные данные о КР сталей на АЭС с водным теплоносителем представлены в работе [3], где рассмотрены преимущественно качественные физико-химические и механические закономерности КР: влияние состава и температуры воды, механических напряжений, состава сталей. Опасность КР ТОТ состоит в том, что хлориды, содержащиеся в питательной воде второго контура ПГ и вызывающие КР, концентрируются с течением времени на теплопередающих поверхностях, поэтому КР может происходить в процессе длительной эксплуатации даже при малой концентрации хлоридов в самой питательной воде [3, 4]. Количественные закономерности КР, необходимые для определения показателей долговечности конструкций, в литературе представлены ограниченно. Например, в [4] приведена зависимость времени КР от концентрации хлор-иона и кислорода, которую можно использовать для оценки стойкости нержавеющих аустенитных сталей против КР; растягивающее напряжение не входит явно в эту зависимость, справедливую, очевидно, для некоторого заданного напряжения, значение которого не уточняется. В [5] из предположения, что зарождение трещины КР связано с образованием плоского скопления большого числа дислокаций, получены удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными данными соотношения, связывающие время КР, растягивающее напряжение и концентрации коррозионно-активных компонентов. В [6] на основе механики рассеянного разрушения предложена феноменологическая континуальная модель КР, позволяющая прогнозировать время КР образцов и элементов конструкций.

Цель статьи. Концентрация хлоридов на теплопередающих поверхностях является одним из основных факторов, определяющих время КР ТОТ ПГ. Целью данной работы является определение показателей долговечности ТОТ с учетом неопределенного из-за переменности во времени в процессе эксплуатации ПГ значения концентрации коррозионно-активных компонентов на теплопередающих поверхностях. Для оценки показателей долговечности ТОТ предлагается использовать общий подход [7], в котором разрушение конструкции при заданных эксплуатационных воздействиях описывается детерминистической моделью, а сами эти воздействия для учета их неопределенности рассматриваются как случайные. В качестве детерминистической модели используется предложенная ранее [6] континуальная модель КР, позволяющая прогнозировать время КР при заданном напряжении и концентрации коррозионно-активного компонента. Случайной принимается концентрация коррозионно-активного компонента, значение которой априори не определено из-за ее переменности во времени в процессе эксплуатации ПГ.

Континуальная модель коррозионного растрескивания и детерминистические оценки долговечности ТОТ. Идея предложенной в [6] континуальной модели КР состоит в описании процесса роста длины коррозионной микротрещины от поверхности, взаимодействующей с агрессивной средой, начиная с начальной длины $l = l_0$ микротрещины, которая априори присутствует в момент времени $t = 0$, и заканчивая моментом времени $t = t_*$, когда микротрещина достигнет критической длины $l = l_*$, отвечающей образованию на поверхности макроскопического дефекта. Для этого вводится параметр растрескивания [6]

$$\omega = \frac{l - l_0}{l_* - l_0}, \quad 0 \leq \omega \leq 1, \quad (1)$$

где $\omega = 0$ отвечает длине $l = l_0$, а $\omega = 1$ — длине $l = l_*$ микротрещины.

Опираясь на известный факт механики разрушения, что скорость роста длины трещины определяется коэффициентом интенсивности напряжений, который, в свою очередь, представляет собой произведение множителя, зависящего от внешней нагрузки (напряжения), и множителя, зависящего от геометрических характеристик трещины (длины) [8], приходим к представлению скорости параметра растрескивания (1) в виде [6]

$$\frac{d\omega}{dt} = S(\sigma; \chi_1, \chi_2, \dots, T) \cdot W(\omega), \quad \omega(0) = 0, \quad \omega(t_*) = 1, \quad (2)$$

где σ — растягивающее напряжение; χ_1, χ_2, \dots — характеристики свойств; T — температура среды; S и W — функции, определяемые обработкой экспериментальных кривых длительной коррозионной прочности [6].

Соотношения (2), рассматриваемые в каждой точке на взаимодействующей с агрессивной средой поверхности тела, приводят к системе распределенных на этой поверхности микротрещин, что дает возможность учитывать многоочаговость КР на начальной стадии. Проинтегрировав (2) с разделением переменных, получаем время до появления первого макроскопического дефекта

$$t_*(\sigma; \chi_1, \chi_2, \dots, T) = \frac{1}{S(\sigma; \chi_1, \chi_2, \dots, T)} \int_0^1 \frac{d\omega}{W(\omega)}. \quad (3)$$

Время до появления макроскопического дефекта (3) можно приближенно считать временем КР, поскольку продолжительность инкубационной стадии КР часто может составлять 85—97 % полного времени, захватывающего еще и стадию развития макротрещины [9].

Континуальная модель (1)—(3) позволяет прогнозировать время КР образцов из нержавеющей хромоникелевых сталей в концентрированных растворах $MgCl_2$ в зависимости от растягивающего напряжения и концентрации $MgCl_2$, если принять [6]

$$S = S(\sigma; \chi) = A \cdot 10^{n\sigma + m\chi}, \quad W(\omega) = (1 - \omega)^{-k}, \quad (4)$$

где χ — процентная концентрация $MgCl_2$; численные значения констант получены обработкой экспериментальных данных в виде [6]

$$A \cong 1,644 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}, \quad n \cong 6,133 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}^{-1}, \\ m \cong 9,306 \cdot 10^{-2} \%^{-1}, \quad k = 1. \quad (5)$$

Подставив (4) в (3), определим время КР образцов

$$t_*(\sigma; \chi) = \frac{1}{(k+1)A} 10^{-n\sigma - m\chi}. \quad (6)$$

Для элементов конструкций растягивающее напряжение σ , вызывающее КР, следует определять по компонентам тензора напряжений в точках поверхности, соприкасающейся с агрессивной средой, как показано в [6].

Используемые в ПГ ТОТ (табл. 1) следует рассматривать как толстостенные цилиндры, поскольку отношение толщины стенки к радиусу срединной поверхности составляет 1/6,5...1/4,5, что значительно больше величины 1/20, рекомендуемой в качестве максимума для тонких оболочек [10]. На основе континуальной модели КР вида (1)—(6) в работе [6] рассмотрены оценки долговечности ТОТ (табл. 1), которые схематизировались в виде толстостенного длинного цилиндра, находящегося под внутренним давлением p теплоносителя первого контура, с учетом действия на наружную поверхность агрессивной рабочей среды второго контура. Напряжения в таком цилиндре определяют по формулам теории упругости [11] и получают напряжение σ , совпадающее с окружным напряжением $\sigma_{\theta\theta}$ на внешнем радиусе [6]:

$$\sigma = \sigma_{\theta\theta}, \quad \sigma_{\theta\theta} = \frac{2\alpha^2}{1 - \alpha^2} p, \quad \alpha = r_1 / r_2, \quad (7)$$

где r_1 и r_2 — внутренний и наружный радиусы ТО, соответственно.

Таблица 1. Характеристики ТОТ ПГ АЭС с ВВЭР

Тип ПГ	r_1 , мм	R_2 , мм	α	p , МПа
ПГВ-1000	6,5	8	0,8125	16
ПГВ-213	6,6	8	0,825	12,5
ПГВ-1	9	10,5	0,8571	10

Подставив (7) в (6), получим зависимость от давления p теплоносителя первого контура и от концентрации χ на теплопередающей поверхности хлорида (основного

коррозионно-активного компонента питательной воды второго контура ПГ, вызывающего КР) времени КР ТОТ:

$$t_*(p; \chi) = \frac{1}{(k+1)A} 10^{-\frac{2\alpha^2}{1-\alpha^2} p - m\chi} \quad (8)$$

Результат (8), полученный на основе данных испытаний образцов в растворах $MgCl_2$, можно без дополнительной экспериментальной проверки использовать лишь для ориентировочной оценки КР ТОТ ПГ АЭС с ВВЭР [3]. Соотношение (8) представлено на рис. 1 для ТОТ ПГ типов ПГВ-1000 и ПГВ-213, которые в настоящее время эксплуатируются соответственно на тринадцати и двух энергоблоках украинских АЭС [1, 2], а также ПГВ-1, эксплуатировавшихся с 1964 по 1984 гг. на Нововоронежской АЭС (табл. 1) [4].

Полученные результаты (рис. 1, а) показывают, что время растрескивания ТОТ в растворах $MgCl_2$ с концентрацией $\chi = 5 \div 10\%$ удовлетворительно согласуется с опытом эксплуатации ПГ. Действительно, по данным [4] отдельные ПГ типа ПГВ-1000 уже через 10 лет эксплуатации имеют почти 9 % заглушенных ТОТ, ПГВ-213 — почти 6 % только через 25 лет эксплуатации, а ПГВ-1 удовлетворительно отработали в течение 20 лет и были сняты с эксплуатации. Это подтверждается расчетными данными для времени растрескивания ТОТ в растворах $MgCl_2$ с концентрацией $\chi = 8 \div 10\%$ (рис. 1, а).

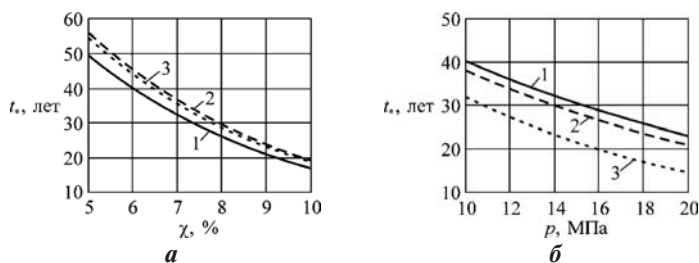


Рис. 1. Зависимость времени растрескивания ТОТ парогенераторов:

а — от процентной концентрации χ коррозионно-активного компонента на теплопередающих поверхностях при фиксированных давлениях p теплоносителя, отвечающих условиям эксплуатации ПГ (табл. 1); б — от давления p теплоносителя при фиксированном значении $\chi = 7,5\%$ концентрации коррозионно-активного компонента на теплопередающих поверхностях; 1 — ПГВ-1000; 2 — ПГВ-213; 3 — ПГВ-1

В то же время отмечается возможность продления эксплуатации ПГ типа ПГВ-213 сверх проектного срока даже при наличии некоторой части заглушенных ТОТ [4]. Это подтверждается расчетами времени растрескивания в растворах $MgCl_2$ с концентрацией $\chi = 5 \div 6\%$ (рис. 1, а). Таким образом, данные о КР материала ТОТ в растворах $MgCl_2$ с концентрацией $\chi = 5 \div 10\%$ можно использовать для имитационного моделирования КР при ориентировочной оценке долговечности ТОТ ПГ АЭС с ВВЭР. При таком имитационном моделировании возможность концентрирования хлоридов на теплопередающих поверхностях ТОТ, существенно ускоряющая КР, учитывается подбором «эффективной» концентрации хлоридов $\chi = 5 \div 10\%$ в эквивалентном растворе $MgCl_2$, которая существенно превышает концентрацию хлоридов в питательной воде второго контура.

Меньшее время КР ТОТ ПГ типа ПГВ-1000 по сравнению с ПГ более ранних типов ПГВ-213 и ПГВ-1 (рис. 1, а) связано с более жесткими условиями эксплуатации: расчетная

паропроизводительность ПГ на среднюю длину одной ТОТ составляет 12,1 кг/ч для ПГВ-1000, и только 8,8 кг/ч для ПГВ-213 [4]. Более высокая расчетная паропроизводительность ПГ типа ПГВ-1000 по сравнению с ПГВ-213 и ПГВ-1 достигнута благодаря интенсификации теплообменных процессов, в частности за счет более высокого давления p теплоносителя первого контура (см. табл. 1). При одинаковом давлении p теплоносителя и концентрации χ коррозионно-активного компонента на теплопередающих поверхностях наименьшее время КР имеют ТОТ ПГ типа ПГВ-1, большее — ПГВ-213 и самое большое — ПГВ-1000 (рис. 1, б).

Определение показателей долговечности ТОТ. Показателями долговечности являются: γ -процентный ресурс t_γ (наработка, в течение которой не будет достигнуто предельное состояние с вероятностью γ) и средний ресурс $\langle t_* \rangle$ (математическое ожидание ресурса) [7]. Показатели долговечности можно определить, если известна плотность распределения $f(t_*)$ времени t_* достижения предельного состояния (КР) [7, 12]:

$$\int_0^{t_\gamma} f(t_*) dt_* = 1 - \gamma, \quad \langle t_* \rangle = \int_0^\infty t_* f(t_*) dt_* \quad (9)$$

В дополнение можно определить также показатель безотказности — вероятность достижения предельного состояния (КР) за заданное время t [7]:

$$P_t = \int_0^t f(t_*) dt_* \quad (10)$$

Трудно поддающееся прогнозированию концентрирование коррозионно-активного компонента на теплопередающих поверхностях — одна из причин КР ТОТ, наблюдаемого в процессе эксплуатации ПГ [3, 4]. Для учета неопределенности концентрации можно рассмотреть ее как случайную функцию времени $\chi = \chi(t)$. Тогда задача Коши (2) с учетом (4), (7) примет вид

$$\frac{d\omega}{dt} = A \cdot 10^{\frac{2\alpha^2}{1-\alpha^2} p + m\chi(t)} (1-\omega)^{-k}, \quad \omega(0) = 0, \quad \omega(t_*) = 1 \quad (11)$$

Случайную функцию $\chi = \chi(t)$ представим каноническим разложением [12]:

$$\chi(t) = m_\chi(t) + \sum_{i=1}^N \Phi_i \varphi_i(t), \quad (12)$$

где $m_\chi(t)$ — математическое ожидание; N — количество базисных функций; $\varphi_i(t)$ — заданные базисные функции; Φ_i — некоррелированные случайные величины с равными нулю математическими ожиданиями.

Подбор параметров канонических разложений (12), адекватных условиям эксплуатации, представляет собой самостоятельную задачу, которую можно решать, например, обработкой опытных данных. Для ориентировочной оценки показателей долговечности ТОТ целесообразно использовать наиболее простой случай, который отвечает стационарному процессу и одной базисной функции в разложении (12):

$$m_\chi(t) = m_\chi = \text{const}, \quad N = 1, \quad \varphi_1(t) = 1 \quad (13)$$

Решив задачу Коши (11) с учетом разложения (12) и принятых допущений (13), получим решение вида (8), в котором давление p является заданной, а концентрация χ — случайной величиной. Рассмотрев при заданном давлении p время растрескивания t_* как монотонную функцию $t_* = t_*(\chi)$ случайного аргумента — концентрации χ с заданной плотностью распределения $g(\chi)$, получим плотность распределения времени растрескивания в виде [12]

$$f(t_*) = g(\chi(t_*)) \left| \frac{d\chi(t_*)}{dt_*} \right|, \quad 0 < t_* < \infty, \quad (14)$$

где $\chi = \chi(t_*)$ — функция, обратная функции $t_* = t_*(\chi)$, получаемой из (8) при фиксированном давлении p :

$$\chi(t_*) = -\frac{1}{m} \left(n \frac{2\alpha^2}{1-\alpha^2} p + \lg((k+1)At_*) \right). \quad (15)$$

Для расчета показателей долговечности ТОТ ПГ АЭС с ВВЭР в качестве распределения $g(\chi)$ концентрации χ коррозионно-активного компонента на теплопередающих поверхностях можно приближенно принимать известные в теории вероятностей распределения случайных величин [13], обосновывая выбор вида таких распределений применительно к рассматриваемой задаче. Далее для концентрации χ принимаем не допускающее отрицательных значений случайной величины (концентрации и времени растрескивания) распределение Вейбулла—Гнеденко, широко используемое при построении статистических теорий прочности [13, 14]:

$$g(\chi) = \begin{cases} \beta\lambda\chi^{\beta-1}e^{-\lambda\chi^\beta}, & \chi > 0; \\ 0, & \chi \leq 0, \end{cases} \quad (16)$$

где β , λ — параметры распределения, которые связаны с математическим ожиданием m_χ и дисперсией D_χ концентрации χ соотношениями [13]

$$\lambda^{\frac{1}{\beta}} \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) = m_\chi, \quad \lambda^{\frac{2}{\beta}} \left[\frac{2}{\beta} \Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \frac{1}{\beta^2} \Gamma^2\left(\frac{1}{\beta}\right) \right] = D_\chi, \quad (17)$$

где $\Gamma(x)$ — гамма-функция.

Как отмечалось ранее, данные о КР материала ТОТ в растворах $MgCl_2$ с концентрацией $\chi = 5 \div 10\%$ можно использовать для ориентировочной оценки долговечности ТОТ. С учетом этого параметры распределения (16) подберем так, чтобы они отвечали заданным математическому ожиданию и дисперсии, которые для определенности далее примем в виде

$$m_\chi = 7,5\%, \quad \sqrt{D_\chi} = 1\%. \quad (18)$$

Решив графически нелинейные уравнения (17) относительно параметров β , λ для заданных значений (18), в результате получим

$$\beta \cong 8,9662, \quad \lambda \cong 8,7326 \cdot 10^{-9}. \quad (19)$$

Плотность распределения (16) для значений (19) представлена на рис. 2, а; вероятность того, что концентрация $5\% \leq \chi \leq 10\%$, составляет приблизительно 98,37%. Подставим (15) и (16) с параметрами (19) в выражение (14)

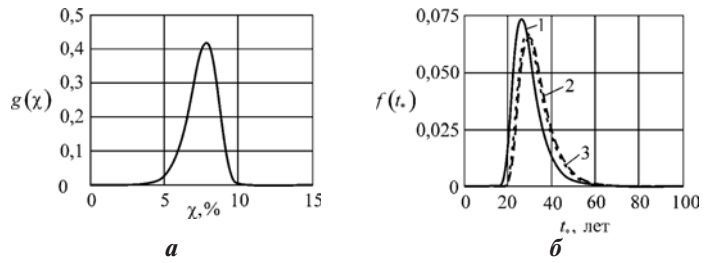


Рис. 2. Плотность распределения концентрации χ (а) и отвечающие ей плотности распределения времени растрескивания t_* (б) ТОТ ПГ типа: 1 — ПГВ-1000; 2 — ПГВ-213; 3 — ПГВ-1

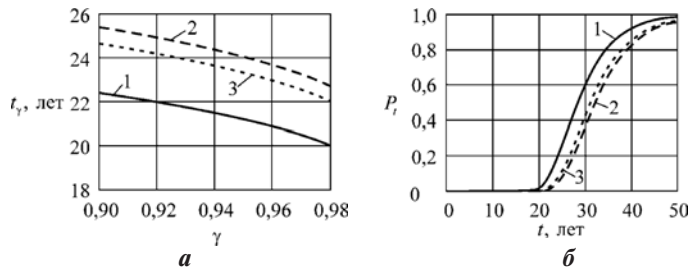


Рис. 3. Гамма-процентный ресурс (а) и вероятность растрескивания (б) ТОТ ПГ типа: 1 — ПГВ-1000; 2 — ПГВ-213; 3 — ПГВ-1

и получим плотность распределения времени растрескивания. Задав значения констант (5), значения коэффициента α и давления p в соответствии с данными табл. 1, построим плотности распределения времени разрушения ТОТ ПГ типа ПГВ-1000, ПГВ-213 и ПГВ-1 (рис. 2, б). Полученные плотности распределения времени растрескивания ТОТ ПГ позволяют определять показатели долговечности (9) и безотказности (10) ТОТ. Результаты соответствующих расчетов, представленные на рис. 3 и ниже, показывают, что ТОТ ПГ наиболее современного типа ПГВ-1000 характеризуются несколько худшими показателями долговечности и безотказности, чем ПГ более раннего типа ПГВ-213 и ПГВ-1:

Тип ПГ	Средний ресурс ТОТ ПГ АЭС с ВВЭР $\langle t_* \rangle$, лет
ПГВ-1000	29,6291
ПГВ-213	33,5876
ПГВ-1	32,6133

Наилучшими значениями показателей долговечности и безотказности характеризуются ТОТ ПГ типа ПГВ-213, что подтверждается опытом эксплуатации [4]. Наихудшие показатели долговечности ТОТ ПГ типа ПГВ-1000 объясняются более жесткими условиями эксплуатации за счет высокого давления p теплоносителя первого контура (табл. 1), что обсуждалось ранее.

Полученные расчетные показатели долговечности ТОТ ПГ типа ПГВ-213 (рис. 3, а) согласуются с опытом эксплуатации, в соответствии с которым через 25 лет можно ожидать растрескивания до 6% ТОТ [4]. При этом расчетные показатели долговечности ТОТ ПГ типа ПГВ-1000 (рис. 3, а) являются оптимистичными, поскольку не указывают на установленную опытом эксплуатации возможность растрескивания 1–9% ТОТ уже после 10 лет [4]. Такой характер согласования и расхождения результатов расчета объясняется тем, что значения (18), используемые

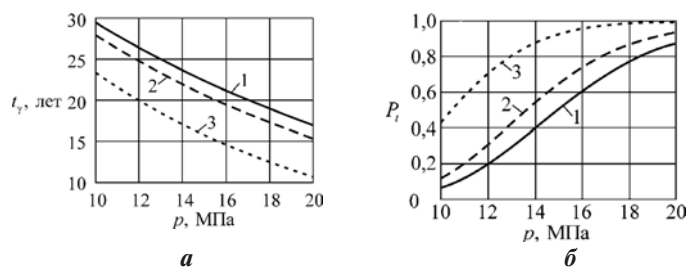


Рис. 4. Гамма-процентный ресурс для $\gamma = 0,95$ (а) и вероятность растрескивания за 30 лет (б) ТОТ ПГ типа: 1 — ПГВ-1000; 2 — ПГВ-213; 3 — ПГВ-1

для определения параметров (19) плотности распределения (16) концентрации, принятые для предварительных ориентировочных оценок показателей долговечности, лучше отражают процессы концентрирования коррозионно-активного компонента на теплопередающих поверхностях ТОТ ПГ типа ПГВ-213. Коррозионно-активные компоненты на теплопередающих поверхностях ТОТ ПГ типа ПГВ-1000 концентрируются быстрее. Оценки вероятности растрескивания ТОТ за время, превышающее 20 лет (рис. 3, б), следует считать пессимистическими, поскольку не учитывается влияние периодических промывок теплопередающих поверхностей ТОТ при техническом обслуживании ПГ на плотность распределения концентрации коррозионно-активного компонента.

Существенные упрощения (13) канонического разложения случайной функции (12) и присутствующий произвол выбора значений (18), характеризующих разброс значений концентрации χ , заставляют рассматривать полученные количественные оценки показателей долговечности как предварительные ориентировочные, на что указывалось ранее. В связи с этим наибольший интерес представляют не сами абсолютные значения показателей долговечности ТОТ, а, в первую очередь, соотношения между такими показателями, полученными для ПГ различных типов. Чтобы оценить конструкции ТОТ ПГ различных типов, сопоставим их показатели долговечности и безотказности, полученные при одинаковом давлении p и плотности распределения величины концентрации χ , принятой в виде (16), (19). Результаты соответствующих расчетов, представленные на рис. 4, показывают, что при одинаковых условиях эксплуатации ТОТ более современных ПГ типа ПГВ-1000 характеризуются наилучшими показателями долговечности по сравнению ПГ более ранних типов ПГВ-213 и ПГВ-1.

Выводы

На основе ранее предложенной континуальной модели КР рассмотрена оценка показателей долговечности ТОТ ПГ АЭС с ВВЭР с учетом случайности эксплуатационных факторов, которые приводят к неопределенности концентрации на теплопередающих поверхностях коррозионно-активных компонентов рабочей среды второго контура ПГ. Полученные детерминистические и вероятностные показатели долговечности и показатели безотказности ТОТ ПГ типа ПГВ-1000, ПГВ-213 и ПГВ-1 удовлетворительно согласуются с известными в литературе данными опыта эксплуатации ПГ.

Теоретическое значение полученных результатов состоит в предложенном методе, позволяющем оценивать показатели долговечности ТОТ ПГ с учетом нескольких, в том числе случайных, эксплуатационных факторов.

Практическое значение имеют результаты сопоставления показателей долговечности ТОТ существующих ПГ, а также возможность сопоставления этих показателей для ПГ перспективных конструкций.

В дальнейших исследованиях можно рассмотреть долговечность криволинейных участков ТОТ; использовать более полное каноническое разложение случайной функции, характеризующей изменение во времени концентрации коррозионно-активного компонента на теплопередающих поверхностях; учесть нестационарную компоненту давления теплоносителя первого контура.

Список использованной литературы

1. К вопросу о переназначении допустимого числа циклов нагружения тепломеханического оборудования / А. П. Шугайло, С. П. Костенко, Ал-др П. Шугайло, В. Б. Крицкий, Д. М. Рыжов, Л. В. Хамровская // Ядерная та радіаційна безпека. — 2009. — № 2. — С. 19—22.
2. Аналіз порушень в роботі АЕС України, які сталися протягом 2008 року / М. Х. Гашев, О. І. Лігоцький, Л. М. Печериця, А. В. Носовський // Ядерная та радіаційна безпека. — 2009. — № 3. — С. 3—8.
3. Богдавленский В. П. Коррозия сталей на АЭС с водным теплоносителем / В. П. Богдавленский. — М.: Энергоиздат, 1984. — 167 с.
4. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций / Б. И. Лукасевич, Н. Б. Трунов, Ю. Г. Драгунов, С. Е. Давиденко. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. — 391 с.
5. Герасимов В. В. Прогнозирование коррозии металлов / В. В. Герасимов. — М.: Металлургия, 1989. — 152 с.
6. Морачковский О. К. Континуальная модель роста трещин коррозионного растрескивания для расчета ресурса конструкций / О. К. Морачковский, Ю. В. Ромашов // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2010. — № 2. — С. 111—116.
7. Надежность технических систем: Справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др.; под ред. И. А. Ушакова. — М.: Радио и связь, 1985. — 608 с.
8. Романив О. Н. Механика коррозионного разрушения конструкционных сплавов / О. Н. Романив, Г. Н. Никифорчин. — М.: Металлургия, 1986. — 294 с.
9. Ажогин Ф. Ф. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей / Ф. Ф. Ажогин. — М.: Металлургия, 1974. — 256 с.
10. Новожилов В. В. Линейная теория тонких оболочек / В. В. Новожилов, К. Ф. Черных, Е. И. Михайловский. — Л.: Политехника, 1991. — 656 с.
11. Лурье А. И. Теория упругости / А. И. Лурье. — М.: Наука, 1970. — 940 с.
12. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. — М.: Наука, 1969. — 576 с.
13. Справочник по теории вероятностей / В. С. Королук, Н. И. Портенко, А. В. Скороход, А. Ф. Турбин. — М.: Наука, 1985. — 640 с.
14. Лебедев А. А. Определение повреждаемости конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости / А. А. Лебедев, Н. Р. Музыка, Н. Л. Волчек // Проблемы прочности. — 2002. — № 4. — С. 5—11.

Получено 07.05.2012.