

М. Н. Заразовский¹, М. В. Бородий¹,
В. Я. Козлов²

¹ Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко
НАН Украины, г. Киев, Украина

² Научно-технический центр Национальной атомной
энергогенерирующей компании «Энергоатом»,
г. Киев, Украина

Риск-ориентированный подход к прогнозированию целостности и оптимизации контроля теплообменного оборудования с большой статистикой дефектов

Разработан физически и статистически обоснованный риск-ориентированный подход к оценке целостности теплообменных трубок (ТОТ) парогенератора, который базируется на вероятностном законе распределения размеров дефектов с учетом их роста, модели вязкого разрушения трубы с дефектом и статистике глушения ТОТ. Исходя из истории глушения трубок каждого парогенератора, определяются три статистических параметра: начальное количество, начальный размер и скорость роста дефектов. Разработанный метод использовался для предсказания количества разрушений/течей ТОТ, а также для оценки снижения давления гидравлических испытаний (ГИ) первого контура АЭС Украины. Показано, что снижение давления ГИ практически не увеличивает вероятность разрушения ТОТ во время эксплуатации.

Ключевые слова: теплообменная трубка, парогенератор, данные статистики, дефект, риск-ориентированный подход, эксплуатационный контроль.

М. М. Заразовський, М. В. Бородій, В. Я. Козлов

Ризик-орієнтований підхід до прогнозування цілісності та оптимізації контролю теплообмінного обладнання з великою статистикою дефектів

Розроблено фізично й статистично обґрунтований ризик-орієнтований підхід до оцінки цілісності теплообмінних трубок (ТОТ) парогенератора, що базується на ймовірнісному законі розподілу розмірів дефектів з урахуванням їх зростання, моделі в'язкого руйнування труби з дефектом та статистики глушіння ТОТ. Виходячи з історії глушіння трубок кожного парогенератора, визначаються три статистичні параметри: початкова кількість, початковий розмір і швидкість зростання дефектів. Розроблений метод використовувався для прогнозування кількості руйнувань/протікань ТОТ, а також для оцінки зниження тиску гідралічних випробувань першого контуру АЕС України. Показано, що зниження тиску гідралічних випробувань практично не збільшує ймовірність руйнування ТОТ під час експлуатації.

Ключові слова: теплообмінна трубка, парогенератор, дані статистики, дефект, ризик-орієнтований підхід, експлуатаційний контроль.

© М. Н. Заразовский, М. В. Бородий, В. Я. Козлов, 2016

Одной из основных практических проблем, ограничивающих ресурс парогенераторов (ПГ) АЭС, в настоящее время является дефектность теплообменных трубок (ТОТ), о чем свидетельствует обширная статистика дефектов ТОТ на украинских АЭС [1]. Эта проблема относится также и к ПГ западных АЭС типа PWR [2, 3].

Механизмы повреждения ТОТ ПГ детально описаны в документе ИАЕА [4]. Показано, что главной причиной повреждений ТОТ являются общая коррозия, питтинги, коррозионное растрескивание под напряжением, сочетание питтингов и коррозионного растрескивания.

В большинстве случаев деградация начинается с точечной коррозии, через некоторое время, при одновременном увеличении растягивающих напряжений в поперечном сечении трубы; на эту часть трубы дополнительно влияет коррозионное растрескивание (рис. 1 [1]).

Зарождение и интенсивный рост дефектов ТОТ в условиях нормальной эксплуатации (НЭ) может приводить к течам из первого контура во второй [5]. Такие течи являются одним из основных факторов выброса радиоактивности за пределы защитной оболочки с возможностью реализации предельной проектной аварии. Обычно, если критерии течей не удовлетворяются, блок останавливают для глушения сваркой или механической заглушкой дефектных ТОТ, что приводит как к значительным финансовым потерям, так и к снижению эффективности эксплуатации блоков за счет уменьшения теплообменной поверхности ПГ.

Изначально на отечественных АЭС в качестве превентивных мероприятий для недопущения разрывов ТОТ во время эксплуатации использовался различный периодический эксплуатационный контроль ТОТ: гидравлические испытания, испытание методом флуоресцентной воды, пузырьковый тест, испытание гелием. После массовых случаев обнаружения дефектов ТОТ в 90-е годы стало ясно, что традиционные методы контроля недостаточно эффективны. Поэтому с 1998 года на украинских АЭС начал внедряться вихретоковый контроль (ВТК) металла ТОТ ПГ, который широко применялся на западных атомных станциях. ВТК позволяет обнаруживать дефекты ТОТ с учетом их размеров. Это гораздо предпочтительнее, чем испытания на протечки, поскольку при ВТК несквозные дефекты, которые потенциально могут привести к течам, могут быть обнаружены и заглушены заранее.

На сегодняшний день в Украине каждый год, по крайней мере, 12,5 % ТОТ ПГ контролируется с использованием ВТК, дефектные ТОТ глушатся в соответствии с критерием глушения (в большинстве случаев — потеря металла

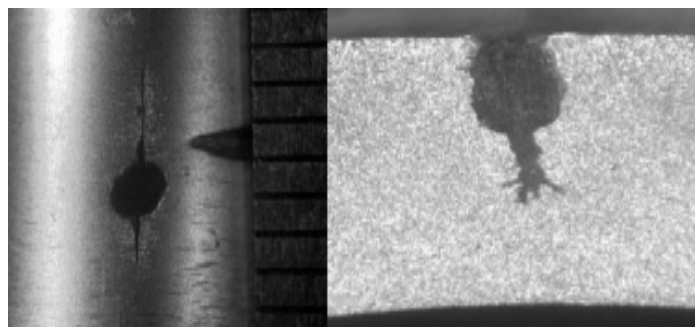


Рис. 1. Коррозионное растрескивание, исходящее от питтинга

Таблица 1. Процент заглушенных ТОТ ПГ на АЭС Украины на 2014 год

№ блока	№ ПГ			
	1	2	3	4
<i>Запорожская АЭС</i>				
1	0,18	0,15	0,14	0,30
2	0,19	0,21	0,25	0,26
3	0,73	0,38	0,35	0,09
4	0,61	0,58	0,58	0,40
5	0,89	0,82	0,68	1,14
6	1,56	0,72	0,18	1,35
<i>Южно-Украинская АЭС</i>				
1	0,14*	0,16*	0,16*	2,01
2	0,55**	5,23	0,11**	1,59
3	2,17	1,76	1,52	1,92
<i>Ривненская АЭС</i>				
3	2,62	1,60	5,90	1,22
4	0,13	1,13	0,45	0,15
<i>Хмельницкая АЭС</i>				
1	0,49	0,45	0,43	0,70
2	0,19	0,14	0,57	0,07

* В 2007 году три ПГ (№№ 1, 2, 3) были заменены на блоке № 1.

** В 2003 году два ПГ (№№ 1 и 3) были заменены на блоке №2.

стенки трубки более 65 % [6]). Таким образом, каждый ПГ имеет собственную историю глушения ТОТ (табл. 1).

Наряду с ВТК, с начала 2000-х годов начали внедряться мероприятия по улучшению водно-химического режима второго контура. Они были направлены на минимизацию отложений шлама или его удаления из ПГ и, как следствие,

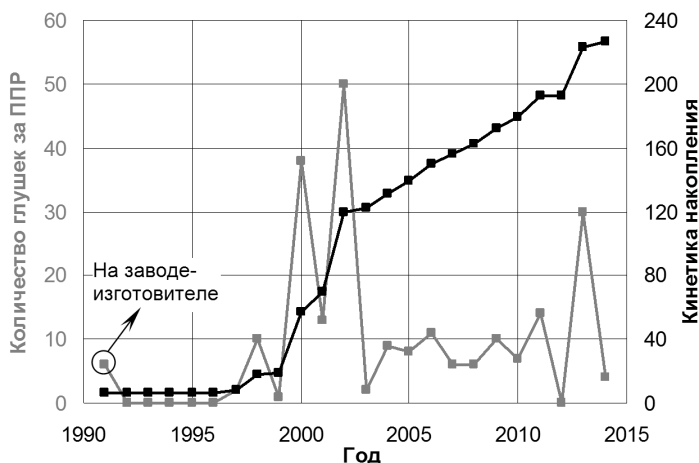


Рис. 2. Статистика глушения ТОТ ПГ № 4 энергоблока № 1 Южно-Украинской АЭС

на сокращение коррозии ТОТ. Эти улучшающие мероприятия, а также внедрение ВТК значительно уменьшили скорость повреждения ТОТ (рис. 2). Но, к сожалению, даже после проведения ВТК конструкционная целостность ТОТ не гарантируется, поэтому проблема остается актуальной.

Цель статьи — поиск путей решения этой проблемы: разработка физически и статистически обоснованного риск-ориентированного метода для обеспечения целостности теплообменного оборудования и оптимизации его контроля на основе статистики повреждений и глушений ТОТ.

Разработка метода

Физическое обоснование метода. В настоящее время на украинских АЭС используются два основных метода контроля ТОТ ПГ: вихрековый и гидроиспытание (ГИ). Принцип построения критерия глушения ТОТ, основанный на результатах контроля, является общим для обоих указанных методов и базируется на анализе в рамках механики разрушения. Рассмотрим этот принцип подробно на примере контроля методом ГИ.

На рис. 3 показана принципиальная схема процедуры ГИ для выявления дефектов до того, как они могут привести к разрушению во время эксплуатации. Поскольку давление при ГИ превышает эксплуатационное давление, то в режиме ГИ будут выявляться критические дефекты меньших размеров (рис. 3, линия 1), чем в режиме нормальной эксплуатации (рис. 3, линия 2). Основным преимуществом ГИ является то, что критический дефект, обнаруженный при ГИ, будучи устраненным, уже не даст течь/разрыв в режиме эксплуатации. Кроме того, если ГИ проводить достаточно часто, возможные не выявленные при ГИ дефекты меньших размеров не вырастут в период эксплуатации до критических размеров до следующего ГИ (рис. 3, линия 3).

Существует только одно различие между ВТК и ГИ, а именно: ГИ приводит к течам ТОТ, содержащих дефект, и по факту течи ТОТ глушатся, в то время как ВТК позволяет определить размер еще несквозного дефекта, решение по глушению которого принимается на основе анализа в рамках механики разрушения.

С практической точки зрения представляют интерес следующие вопросы: произойдет ли выход из строя ТОТ

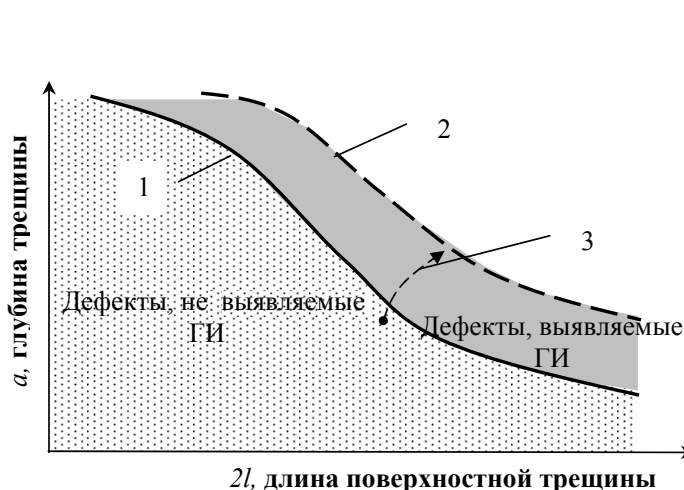


Рис. 3. Принципиальная схема процедуры ГИ

во время эксплуатации в период до следующего останова блока или нет (если да — сколько трубок дадут течь); какова вероятность такого события; какова скорость роста дефекта? Ответы на эти вопросы позволяют повысить эффективность эксплуатационного контроля ТОТ, а также усовершенствовать критерии глушения последних.

Вероятность возникновения какого-либо события может быть определена с использованием двух различных подходов — статистического или физического. Статистический подход основан на анализе больших выборок данных, характеризующих возникновение отказа. Для ТОТ ПГ он применим из-за достаточно большой статистики отказов (глушек). Физический подход является полным аналогом детерминистических расчетов, в которых исходные данные представляются вероятностными характеристиками.

Основной целью данного исследования является разработка смешанного физически и статистически обоснованного инженерного метода для прогнозирования течей ТОТ ПГ и его внедрение на практике в рамках использования риск-ориентированных подходов принятия решений.

Критические размеры дефектов. ТОТ ПГ изготовлены из аустенитной нержавеющей стали 08X18H10T с небольшим количеством дельта-феррита. Поэтому вязкость разрушения материала ТОТ достаточно велика (особенно с учетом того, что они работают при повышенных температурах), а значит, хрупкого механизма разрушения при наличии на ТОТ стресс-коррозионных трещин под напряжением или питтингов не следует ожидать. Для проверки этого допущения проведен сравнительный анализ использования подходов хрупкой и вязкой прочности при определении критических размеров дефектов. Показано, что для пластичных материалов и условий нагружения в режимах НЭ и ГИ критические размеры дефекта, вычисленные с использованием подходов вязкой прочности, меньше, чем по моделям хрупкого разрушения [7].

Для определения критических размеров дефектов используем критерий вязкой прочности $\sigma_r = \sigma_B$, где σ_r — ссылочное напряжение, которое определяется на основе моделей предельного пластического анализа трубы с дефектом [8]; σ_B — минимальный предел прочности материала.

Критический размер дефекта легко получить из выражения для определения ссылочных напряжений в толстостенном цилиндре с осевой трещиной на внутренней поверхности под действием внутреннего давления p :

$$\sigma_r = \frac{pR_m}{s\alpha_p}, \quad (1)$$

где p — внутреннее давление; R_m — средний радиус трубки; s — толщина стенки; α_p — коэффициент снижения прочности при наличии дефекта, который определяется согласно модели [9].

Кривые критических размеров дефектов для ТОТ ПГ при регламентном (24,5 МПа) и пониженном (19,6 МПа) давлениях ГИ, а также при эксплуатационном давлении (15,7 МПа) с учетом противодействия второго контура 6,4 МПа показаны на рис. 4. Там же приведена кривая (серый цвет), которая разделяет графики на подобласти по характеру разрушения — течью или разрывом. Эта кривая получена из условия равенства коэффициентов пластического ослабления для поверхностного α_p [10] и сквозного

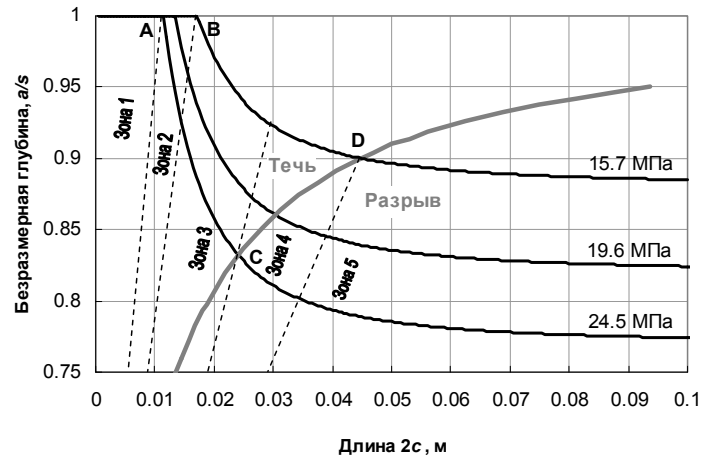


Рис. 4. Критические размеры дефектов ТОТ ПГ в режимах ГИ и НЭ

α_{th} [11] дефектов. Последний определялся через безразмерную длину дефекта λ как

$$\alpha_{th} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,61\lambda^2}}. \quad (2)$$

Отметим, что в данном анализе используются следующие консервативные допущения: все дефекты ТОТ являются полуэллиптическими поверхностными трещинами; все трещины полагаются осевой ориентации, о чем свидетельствует реальная статистика дефектов (см. рис. 1).

Статистические распределения параметров дефектов. Поскольку исследования по статистическому анализу размеров дефектов ТОТ ПГ в Украине не проводились, вероятностные законы распределения глубин и форм (отношения длины к глубине) дефектов могут быть взяты из литературы, например [12].

Для описания плотности распределения глубин дефектов использовался экспоненциальный закон

$$f(x) = \frac{1}{a_0} \exp\left(-\frac{x}{a_0}\right), \quad (3)$$

где α_0 — параметр экспоненциального распределения.

Функция плотности распределения формы дефектов $\beta = c/a$ (отношение полудлины к глубине) описывается логнормальным законом в соответствии с [13]:

$$f(\beta) = \begin{cases} 0, & \beta < 1, \\ \frac{C}{\lambda\beta\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2\lambda^2}(\ln \beta / \beta_m)^2\right], & \beta \geq 1, \end{cases} \quad (4)$$

где безразмерные параметры логнормального распределения приняты следующими: $\lambda = 0,5382$; $C = 1,419$; $\beta_m = 1,136$. Распределение формы дефектов (4) получено на основе статистики обнаруженных дефектов трубопроводов АЭС класса 1.

Для дефектов с параметром $\beta > 2,5$ (вытянутые дефекты) распределение (4) дает большую вероятность по сравнению с реальными данными на основе статистики [7]. Поэтому использование выражения (4) ведет к консервативным вероятностным оценкам — наличие длинных дефектов увеличивает вероятность разрушения.

Закон скорости роста дефектов. В вероятностном анализе использовался неравномерный закон роста дефектов. Консервативно предполагается, что скорость роста дефектов пропорциональна глубине дефекта:

$$\frac{da}{dt} = \mu \cdot a, \quad (5)$$

где μ — параметр скорости роста; t — время эксплуатации. Решение уравнения (5) представляется в виде

$$a(t) = a_0 \exp(\mu \cdot t). \quad (6)$$

Тогда выражение (3) в зависимости от времени можно записать в виде

$$f(x, t) = \frac{1}{a(t)} \exp\left(-\frac{x}{a(t)}\right). \quad (7)$$

Определение неизвестных параметров вероятностных законов. Согласно формуле (7), вероятность разрыва одной трубки по истечении определенного периода времени t при режиме эксплуатации ПГ

$$P(t) = \exp\left[-\frac{k_{гг} \cdot s}{a_0 \exp(\mu \cdot t)}\right], \quad (8)$$

где $k_{гг}$ — коэффициент критерия глушения ТОТ, который равен 0,65 для ВТК и 1 для ГИ и других перечисленных ранее методов контроля.

С другой стороны, в период эксплуатации в результате контроля было проведено n глушений ТОТ. Тогда вероятность разрыва одной трубки может быть выражена как

$$P(t) = \frac{n/P_{обн}}{N}, \quad (9)$$

где $P_{обн}$ — вероятность обнаружения дефекта, которая равна 0,8 для ВТК (среднее значение согласно [6]) и 1 для ГИ и других методов контроля; N — начальное количество дефектов.

Очевидно, что вероятности (8) и (9) должны быть приравнены, тогда

$$\exp\left[-\frac{k_{гг} \cdot s}{a_0 \exp(\mu \cdot t)}\right] = \frac{n/P_{обн}}{N}. \quad (10)$$

Таким образом, получено одно уравнение с тремя неизвестными параметрами — a_0 , μ и N , — которые необходимы для вероятностного анализа. Но если разделить реальную статистику глушений ТОТ конкретного ПГ на три временных интервала ($i = 3$), можно собрать систему из трех уравнений с тремя неизвестными:

$$\exp\left[-\frac{k_{гг i} \cdot s}{a_0 \exp(\mu \cdot t_i)}\right] = \frac{n_i/P_{обн i}}{N}. \quad (11)$$

После простых математических операций получаем трансцендентное уравнение с одним неизвестным параметром μ

$$\frac{\frac{k_{гг 2} \cdot s}{a_0 \exp(\mu \cdot t_2)} - \frac{k_{гг 1} \cdot s}{a_0 \exp(\mu \cdot t_1)}}{\frac{k_{гг 3} \cdot s}{a_0 \exp(\mu \cdot t_3)} - \frac{k_{гг 2} \cdot s}{a_0 \exp(\mu \cdot t_2)}} = \frac{\ln\left(\frac{n_1 \cdot P_{обн 2}}{n_2 \cdot P_{обн 1}}\right)}{\ln\left(\frac{n_2 \cdot P_{обн 3}}{n_3 \cdot P_{обн 2}}\right)}, \quad (12)$$

которое решается численными методами. По известному параметру μ легко находятся остальные параметры — a_0 и N .

Результаты и обсуждение

Настоящая методика реализована на практике в рамках проекта по обоснованию снижения давления периодических ГИ на прочность первого контура АЭС [7]. В данной статье рассматривается только один аспект этого проекта — оценка изменения показателей риска ТОТ ПГ.

Диаграммы критических размеров дефектов ТОТ (см. рис. 4) были разбиты точками A, B, C на четыре диапазона форм дефектов, которые перечислены в табл. 2. Зона 4 и зона 5 объединены в одну. В табл. 2 также приведены значения критических глубин дефектов в начальный момент времени (начальное состояние ТОТ) и условные вероятности V форм дефектов в соответствии с распределением (4) для рассматриваемых диапазонов форм.

Поскольку вероятность разрушения в режиме нормальной эксплуатации после проведения контроля определяется суммированием вероятностей как отношений количества событий превышения дефектами критической глубины в режиме НЭ к количеству дефектов, допущенных/пропущенных в период до следующего контроля, для вычисления вероятности течи/разрыва ТОТ следует знать

Таблица 2. Критические глубины дефектов и условная вероятность формы для различных диапазонов форм дефектов для ТОТ ПГ ВВЭР-1000 и ВВЭР-440

Давление ГИ	Зона	Диапазон форм дефектов	a_{cr} , мм		V
			ГИ	НЭ	
ВВЭР-1000					
Регламентное давление ГИ 24,5 МПа	1	$\beta < 4,06$	1,500	1,500	0,983709
	2	$4,06 < \beta < 5,85$	1,400	1,500	0,014618
	3	$5,85 < \beta < 9,8$	1,286	1,434	0,0016284
	4	$\beta > 9,8$	1,218	1,374	$4,46 \cdot 10^{-5}$
Пониженное давление ГИ 19,6 МПа	1	$\beta < 4,5$	1,500	1,500	0,991125
	2	$4,5 < \beta < 5,85$	1,454	1,500	$7,201 \cdot 10^{-3}$
	3	$5,85 < \beta < 12$	1,329	1,410	$1,663 \cdot 10^{-3}$
	4	$\beta > 12$	1,274	1,360	$9,99 \cdot 10^{-6}$
ВВЭР-440					
Регламентное давление ГИ 19,1 МПа	1	$\beta < 4,46$	1,400	1,400	0,991100
	2	$4,46 < \beta < 7,5$	1,310	1,400	0,008490
	3	$7,5 < \beta < 14$	1,200	1,347	$3,793 \cdot 10^{-4}$
	4	$\beta > 14$	1,167	1,314	$3,067 \cdot 10^{-5}$
Пониженное давление ГИ 15,7 МПа	1	$\beta < 5$	1,400	1,400	0,995030
	2	$5 < \beta < 7,5$	1,340	1,400	0,004584
	3	$7,5 < \beta < 14$	1,250	1,347	$3,793 \cdot 10^{-4}$
	4	$\beta > 14$	1,210	1,314	$6,67 \cdot 10^{-6}$

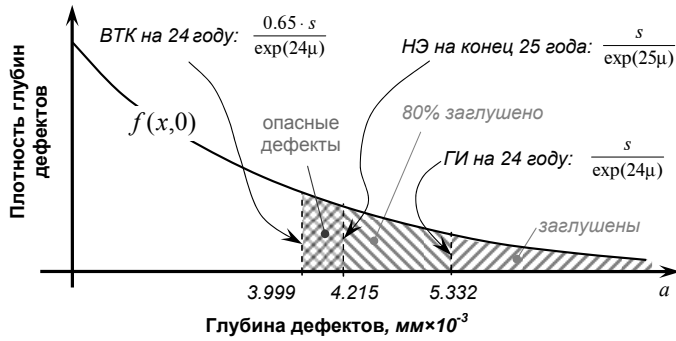


Рис. 5. Критические глубины дефектов ТОТ в режимах ГИ и НЭ в определенное время эксплуатации

историю (последовательность) контроля ТОТ. ВТК проводится ежегодно, ГИ — с периодичностью в четыре года. В качестве объекта исследования будем рассматривать ПГ № 4 энергоблока № 1 Южно-Украинской АЭС после 24 лет работы. Для него согласно (12) определены вероятностные параметры: $a_0 = 0,07$ мм, $\mu = 0,235$, $N = 277$. Для простоты в качестве примера рассмотрим только те диапазоны дефектов, форма которых равна или меньше формы, соответствующей точке А, для которой критическая глубина дефектов соответствует сквозному дефекту в режимах ГИ и НЭ. Пусть на 24-й год работы проводится ГИ; оно вызывает течи тех ТОТ, глубина дефектов которых равна или больше критической при ГИ. Используя формулу (6), можно найти эту глубину дефектов для начального состояния ПГ, которая после 24 лет работы прорастет до сквозного, а именно $s/\exp(24\mu)$, что составляет $5,332 \cdot 10^{-3}$ мм (рис. 5).

После проведения ВТК происходит глушение 80 % (вероятность обнаружения дефекта при ВТК) тех дефектных ТОТ, глубина которых равна или больше критической при ВТК, т. е. $0,65s/\exp(24\mu)$, что равно $3,999 \cdot 10^{-3}$ мм. По крайней мере, дефекты, которые до конца следующего года эксплуатации дорастут до критических размеров в режиме эксплуатации, имеют начальную глубину $s/\exp(25\mu)$, равную $4,215 \cdot 10^{-3}$ мм.

Распределение плотности глубин дефектов и определенные значения критических глубин дефектов иллюстрирует рис. 5. Очевидно, что условная вероятность течи одного дефекта в режиме эксплуатации, которая представляет собой отношение соответствующих площадей, умноженных на соответствующие условные вероятности формы дефекта, позволяет определить вероятность течи/разрыва ТОТ:

$$P_1 = V_1 \cdot \frac{\int_{s/\exp(24\mu)}^{s/\exp(25\mu)} f(x, 0) \cdot dx}{\int_{0,65s/\exp(24\mu)}^{s/\exp(24\mu)} f(x, 0) \cdot dx}, \quad (13)$$

где индекс «1» обозначает принадлежность к первому диапазону форм дефектов.

Следовательно, количество течей равно вероятности P_1 , умноженной на количество невыявленных дефектов при ВТК, а это 20 % дефектов в интервале глубин $[0,65s/\exp(24\mu); s/\exp(24\mu)]$, т. е.

$$V_1 \cdot \frac{\int_{s/\exp(25\mu)}^{s/\exp(24\mu)} f(x, 0) \cdot dx}{\int_{0,65s/\exp(24\mu)}^{s/\exp(24\mu)} f(x, 0) \cdot dx} \cdot 0,2N \int_{0,65s/\exp(24\mu)}^{s/\exp(24\mu)} f(x, 0) \cdot dx = 0,2V_1N \cdot \int_{s/\exp(25\mu)}^{s/\exp(24\mu)} f(x, 0) \cdot dx. \quad (14)$$

В общем случае вероятность течи/разрушения ТОТ во время работы после проведенного контроля определяется суммированием вероятностей для каждого диапазона формы дефекта j :

$$P = \sum_{j=1}^m P_j, \quad (15)$$

где m — количество диапазонов форм дефектов (см. рис. 4).

Результаты расчета вероятности течи/разрыва ТОТ для ПГ № 4 энергоблока № 1 Южно-Украинской АЭС на 25-й год эксплуатации приведены в табл. 3. Прогнозируемое количество дефектов, которые приводят к течи/разрыву ТОТ на 25-й год эксплуатации после

Таблица 3. Результаты вероятностной оценки целостности ТОТ ПГ энергоблоков с наибольшим количеством заглушенных ТОТ

Зона	Условная вероятность разрушения течью/разрывом		Вероятность течи/разрыва ТОТ	
	Регламентное ГИ	Пониженное ГИ	$P_{рег}$	$P_{пон}$
ПГ № 4 ЮУАЭС-1 на 25-й год эксплуатации				
1	$8,3636 \cdot 10^{-1}$	$8,3636 \cdot 10^{-1}$	$8,2273 \cdot 10^{-1}$	$8,2893 \cdot 10^{-1}$
2	$7,7741 \cdot 10^{-1}$	$8,1369 \cdot 10^{-1}$	$1,1364 \cdot 10^{-2}$	$5,8594 \cdot 10^{-3}$
3	$9,4575 \cdot 10^{-1}$	1	$1,5401 \cdot 10^{-3}$	$1,6632 \cdot 10^{-3}$
4	1	1	$4,46 \cdot 10^{-5}$	$9,99 \cdot 10^{-6}$
		Σ	$8,3568 \cdot 10^{-1}$	$8,3647 \cdot 10^{-1}$
ПГ № 4 ЗАЭС-1 на 25-й год эксплуатации				
1	$4,1211 \cdot 10^{-2}$	$4,1211 \cdot 10^{-2}$	$4,0539 \cdot 10^{-2}$	$4,0844 \cdot 10^{-2}$
2	$1,4349 \cdot 10^{-2}$	$3,0367 \cdot 10^{-2}$	$2,098 \cdot 10^{-4}$	$2,186 \cdot 10^{-4}$
3	0	$2,0243 \cdot 10^{-2}$	0	$4,045 \cdot 10^{-5}$
4	0	$2,0245 \cdot 10^{-2}$	0	$2,448 \cdot 10^{-7}$
		Σ	$4,0749 \cdot 10^{-2}$	$4,1104 \cdot 10^{-2}$
ПГ № 1 РАЭС-1 на 35-й год эксплуатации				
1	$4,012 \cdot 10^{-2}$	$4,012 \cdot 10^{-2}$	$3,9763 \cdot 10^{-3}$	$3,9921 \cdot 10^{-3}$
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
		Σ	$3,9763 \cdot 10^{-3}$	$3,9921 \cdot 10^{-3}$

Таблица 4. Результаты расчетов показателей изменения риска

Блок	ΔP	УВПЗ	$\Delta ЧПАВ$	УВПАВ	$\Delta ЧПАВ$
ЗАЭС-1	$-8,848 \cdot 10^{-5}$	$1,290 \cdot 10^{-4}$	$-1,141 \cdot 10^{-8}$	$7,353 \cdot 10^{-5}$	$-6,506 \cdot 10^{-9}$
ЮУАЭС-1	$-4,070 \cdot 10^{-5}$	$1,537 \cdot 10^{-5}$	$-6,256 \cdot 10^{-10}$	$1,014 \cdot 10^{-5}$	$-4,129 \cdot 10^{-10}$
РАЭС-1	0	—	0	—	0

регламентного ГИ и ГИ с пониженным давлением, соответственно равно 3,204 и 3,209. Представленный метод также использован для прогнозирования течей/разрывов ТОТ ПГ для других энергоблоков — № 1 Запорожской АЭС и № 1 Ривненской АЭС (см. табл. 3).

Для оценки снижения давления ГИ используем критерии принятия решений по допустимому изменению риска [14]. Согласно им, следует убедиться, что изменения частоты повреждения активной зоны ($\Delta ЧПАЗ$) и частоты предельного аварийного выброса ($\Delta ЧПАВ$) удовлетворяют условиям

$$\Delta ЧПАЗ \leq 1 \cdot 10^{-7}; \quad (16)$$

$$\Delta ЧПАВ \leq 1 \cdot 10^{-8}. \quad (17)$$

Изменение риска рассчитывается как

$$\Delta ЧПАЗ = \Delta P \cdot УВПЗ; \quad (18)$$

$$\Delta ЧПАВ = \Delta P \cdot УВПАВ, \quad (19)$$

где ΔP — изменение вероятности течи/разрыва ТОТ ($\Delta P = P_{\text{рег}} - P_{\text{пон}}$), вызванное изменением давления ГИ (отрицательное значение означает снижение надежности); УВПЗ и УВПАВ — условные вероятности повреждения зоны и предельного аварийного выброса, соответственно. Величины УВПЗ и УВПАВ определяются в рамках вероятностного анализа безопасности блока.

Если для каждого ПГ условия (18) и (19) выполняются, снижение давления ГИ допустимо по критериям допустимого изменения риска; в противном случае наряду с уменьшением давления ГИ должны быть назначены компенсирующие мероприятия, например увеличен объема контроля ТОТ.

Моделирование и количественная оценка частот аварийных сценариев были проведены компанией ООО «Аналитический центр «Альгиз»» с использованием компьютерного кода SAPHIRE для модели ВАБ первого уровня. Анализировались два связанных с ТОТ события, влияющие на величины ЧПАЗ и ЧПАВ, а именно течи эквивалентным диаметром более 13 мм при разрыве одной или трех ТОТ. В настоящем анализе рассматривалось только первое событие, так как вероятность второго события чрезвычайно мала. Для согласованности результатов изменения риска и расчетных параметров ВАБ диапазоны форм дефектов, которые приводят к течам с условным диаметром менее 13 мм, были исключены из рассмотрения. Дополнительные оценочные расчеты площади раскрытия берегов трещины ТОТ в соответствии с методологией [15]

$$A = \frac{4\pi l^2}{E} \frac{\rho R_1}{s} \left(\sqrt{1 + 0,52 \left(\frac{1}{\sqrt{R_m s}} \right) + 1,29 \left(\frac{1}{\sqrt{R_m s}} \right)^2 + 0,07 \left(\frac{1}{\sqrt{R_m s}} \right)^3} - 0,5 \right), \quad (20)$$

где R_1 и R_m — соответственно внутренний и средний радиус ТОТ, показали, что течь для формы дефекта $\beta = 6$ составляет только 1/20 от течи с эквивалентным диаметром 13 мм. Поэтому диапазоны 1 и 2 форм дефектов обоснованно были исключены из расчетов изменения риска.

Результаты вероятностной оценки конструкционной целостности ПГ с наибольшим количеством заглушенных ТОТ на энергоблоках № 1 Запорожской, Южно-Украинской и Ривненской АЭС представлены в табл. 4. Они свидетельствуют, что критерии (16) и (17) удовлетворяются.

Выводы

До настоящего времени все прогнозы глушения ТОТ ПГ в Украине выполнялись на основе простой линейной экстраполяции. Анализ литературы, в том числе работ ОКБ «Гидропресс» в рамках международных семинаров по горизонтальным парогенераторам, показывает, что разработанный метод является единственным, который количественно физически и статистически обоснован.

Результаты анализа свидетельствуют, что вероятность течи/разрыва ТОТ парогенераторов АЭС с реакторами типа ВВЭР-440 намного меньше, чем на АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000. Это еще раз подтверждает тот факт, что в парогенераторах АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000 гораздо большая повреждаемость теплообменных трубок.

В общем случае снижение давления ГИ увеличивает вероятность течи/разрыва ТОТ, но незначительно (на два и более порядков меньше базового значения) и пренебрежимо мало с практической точки зрения.

Показано, что критерии допустимого изменения риска выполняются и, следовательно, снижение давления периодических ГИ на прочность первого контура применительно к ТОТ ПГ оправдано.

Наряду с обновлением базы данных ТОТ по состоянию конкретного ПГ после очередного контроля ТОТ, параметры распределения глубин дефектов и законы их роста следует повторно переоценить, и на следующий эксплуатационный год может быть выполнен уточненный прогноз течей/разрывов ТОТ до следующего контроля. Основываясь на этих результатах с учетом аналогичных результатов по всем ПГ может быть принято риск-обоснованное решение о дополнительных глушениях и/или контроле ТОТ каждого конкретного ПГ. В целом непрерывно обновляемые данные по всем ПГ позволяют реализовать более гибкую стратегию оптимизации программы периодического контроля ТОТ ПГ и критериев их глушения.

Список использованной литературы

1. Власенко Н. И. Эффективность внедренных мероприятий по повышению надежности парогенераторов ПГВ-1000М АЭС Украины / Н. И. Власенко, В. Я. Козлов // Сб. трудов 7-го Международного семинара по горизонтальным парогенераторам. Подольск, 3–5 октября. 2006. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/seminar7/seminar7/section3.htm>
2. Steam Generator Tube Integrity Program : Annual Report : October 1997 — September 1998. — Washington : U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1999. — 109 p. — (NUREG/CR-6511, Vol. 6, ANL-99/8).
3. IAEA-TECDOC-1668. Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: Steam Generators. — Vienna : IAEA, 2011. — 273 p.
4. IAEA-TECDOC-1577. Strategy for Assessment of WWER Steam Generator Tube Integrity. — Vienna : IAEA, 2007. — 93 p.
5. Бергункер В. Д. Анализ состояния труб парогенераторов на основе данных вихретокового контроля / В. Д. Бергункер, Н. Б. Трунов, В. В. Денисов // Доклады 6-го Междунар. семинара по горизонтальным парогенераторам. Подольск, 22–24 марта, 2004. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/seminar6/index.htm>
6. Zarazovskii, M. The Method for Structural Reliability Estimation of the Heat Exchanger Tubes of Steam Generator of WWER NPPs / Zarazovskii, M., Orynyak, I., Borodii, M. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : PVP2016-63710, ASME 2016, Pressure Vessels & Piping Conference, Vancouver, BC, July 17–21, 2016.
7. Orynyak, I. Application of the Structural Reliability Methods for Justification of Pressure Reduction of Periodic Hydrostatic Test for Primary Circuit of NPP WWER-1000 / Orynyak, I., Kozlov, V., Borodii, M., Zarazovskii, M. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : PVP2015-45573, ASME 2015, Pressure Vessels & Piping Conference, Boston, Massachusetts, 2015.
8. Orynyak I. V. A ductile fracture model for a pipe with an axial surface crack / I. V. Orynyak, M. V. Borodii // Eng. Frac. Mech. — 1994. — V 49, N 2. — P. 287–294.
9. Orynyak, I. V. Modelling The Limiting Plastic State Of Heavy-Walled Pipes With Axial Surface Defects / I. V. Orynyak, S. M. Ageiev // J. Mach. Manuf. Reliab. — 2009. — 38 (4) — P. 407–413.
10. Local and Global Reference Stress for Circumferential Irregular-Shaped Defects in Pipes / Orynyak, I., Ageiev, S., Radchenko, S. // J. Pressure Vessel Technol. — 2015. — 137(4):041203–041203-10. — (PVT-14–1098, doi: 10.1115/1.4028680)
11. Fracture Stress Levels of Flaws in Pressurized Cylinders, Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing / Kiefner, J. F., Maxey, W. A., Eiber, R. J., Duffy, A. R. // ASTM STP 536. — 1973. — P. 461–481.
12. Characterization of Flaws in U.S. Reactor Pressure Vessels. Density and Distribution of Flaw Indications in PVRUF. — Washington : U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2008. — 130 p. — (NUREG/CR-6471, Vol. 1).
13. Evaluations of Structural Failure Probabilities and Candidate Inservice Inspection Programs. — Washington : U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2009. — (NUREG/CR-6986). [Электронный ресурс]. — Режим доступа : www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/.../cr6986/
14. Revised Risk-Informed Inservice Inspection Evaluation Procedure(PWRMRP-05) : Topical Report TR-112657 Rev. B-A. / Electric Power Research Institute. — Palo Alto, California. 1999. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : www.nrc.gov/docs/ML0134/ML013470102.pdf
15. The Application of the Combined Method of Weight Functions for the Determination of a Through-Wall Crack Opening Area in a Shell / Orynyak, I. V., Yakovleva, E. S., Dubik Ya. R. // Strength of Materials. — 2012. — 44, N. 6. — Pp. 600–616.

References

1. Vlasenko, N.I., Kozlov, V.Ya. (2006), “Effectiveness of Implemented Measures on Improving Reliability of PGV-1000M Steam Generators of Ukrainian NPPs” [Effektivnost vnedrionnykh meropriyatii po povysheniiu nadiozhnosti parogeneratorov PGV-1000M AES Ukrainy], Collected Works of the Seventh International Workshop on Horizontal Steam Generators, Podolsk, 3-5 October, available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/seminar7/seminar7/section3.htm> (Rus)
2. “Steam Generator Tube Integrity Program”, Annual Report, October 1997, September 1998, Washington, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1999, 109 p. (NUREG/CR-6511, Vol. 6, ANL-99/8).
3. IAEA-TECDOC-1668. Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: Steam Generators, Vienna, IAEA, 2011, 273 p.
4. IAEA-TECDOC-1577. Strategy for Assessment of WWER Steam Generator Tube Integrity, Vienna, IAEA, 2007, 93 p.
5. Bergunker, V.D., Trunov, N.B., Denisov, V.V. (2004), “Analysis of Steam Generator Tubes Based on Eddy Current Testing Data” [Analiz sostoianii trub parogeneratorov na osnove dannykh vikhretokovogo kontroliia], Reports of the Sixth International Steam Generators, Podolsk, 22-24 March, available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/seminar6/index.htm>
6. Zarazovskii, M., Orynyak, I., Borodii, M. (2016), “The Method for Structural Reliability Estimation of the Heat Exchange Tubes of Steam Generator of VVER NPP”, PVP2016-63710, ASME 2016, Pressure Vessels & Piping Conference, Vancouver, BC, July 17–21, 2016.
7. Orynyak, I., Kozlov, V., Borodii, M., Zarazovskii, M., “Application of the Structural Reliability Methods for Justification of Pressure Reduction of Periodic Hydrostatic Test for Primary Side of NPP WWER-1000”, available at: PVP2015-45573, ASME 2015, Pressure Vessels & Piping Conference, Boston, Massachusetts, 2015.
8. Orynyak, I.V., Borodii, M.V. (1994), “Ductile Fracture Model for a Pipe with an Axial Surface Crack”, Eng. Frac. Mech., V. 49, No. 2, pp. 287-294.
9. Orynyak, I.V., Ageiev, S.M. (2009), “Modelling the Limiting Plastic State of Heavy-Walled Pipes with Axial Surface Defects”, J. Mach. Manuf. Reliab., 38 (4), pp. 407-413.
10. Orynyak, I., Ageiev, S., Radchenko, S. (2015), “Local and Global Reference Stress for Circumferential Irregular-Shaped Defects in Pipes”, J. Pressure Vessel Technol., 137(4):041203-041203-10, (PVT-14-1098, doi: 10.1115/1.4028680).
11. Kiefner, J.F., Maxey, W.A., Eiber, R.J., Duffy, A.R. (1973), “Fracture Stress Levels of Flaws in Pressurized Cylinders, Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing”, ASTM STP 536, pp. 461-481.
12. “Characterization of Flaws in U.S. Reactor Pressure Vessels, Density and Distribution of Flaw Indications in PVRUF”, Washington, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2008, 130 p. (NUREG/CR-6471, Vol. 1).
13. “Evaluations of Structural Failure Probabilities and Candidate In-Service Inspection Programs”, Washington, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2009 (NUREG/CR-6986), available at: www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/.../cr6986/
14. “Revised Risk-Informed In-Service Inspection Evaluation Procedure” (PWRMRP-05), Topical Report TR-112657 Rev. B-A., Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, available at: www.nrc.gov/docs/ML0134/ML013470102.pdf
15. Orynyak, I.V., Yakovleva, E.S., Dubik Ya.R. (2012), “The Application of the Combined Method of Weight Functions for the Determination of a Through-Wall Crack Opening Area in a Shell”, Strength of Materials, 44, No. 6, pp. 600-616.

Получено 25.07.2016.