

УДК 539.375

© 2006 г. В.А. ГРИГОРЬЕВ

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТОДОВ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА РИСКА НАРУШЕНИЯ КРИТЕРИЕВ БЕЗОПАСНОСТИ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В мировой практике обоснования прочности, надежности и безопасности энергоблоков получило развитие направление, связанное с определением риска нарушения критериев их безопасности. В России понятие “риск” нашло отражение в Законе Российской Федерации “О техническом регулировании”. В настоящей статье под риском нарушения безопасности реакторной установки понимается произведение вероятности возникновения отказа или предельного состояния (инициирующего события) оборудования реакторной установки на условную вероятность нарушения критериев безопасности (последствия) при возникновении этого инициирующего события.

Создание и применение методологии риска для анализа безопасной работы энергоблока приводит к построению классификации оборудования реакторной установки по вероятности влияния инициирующих событий на его безопасность, т.е. классификации оборудования по величине риска нарушения безопасности. При этом могут быть рассмотрены влияния отказов и предельного состояния оборудования на нарушения критериев безопасности, ведущие к: разрушению корпуса реактора, тяжелому повреждению активной зоны, выбросу активности за пределы защитной оболочки, распространению активности в окружающей среде.

При реализации методологии риска особое место занимают задачи, связанные с развитием дефектов в металле оборудования и трубопроводов. В данной статье представлены основные положения применения вероятностных методов механики разрушения для анализа надежности оборудования и риска нарушения критериев безопасности реакторной установки, которые реализованы при анализе вероятности разрушения корпуса реактора и теплообменных труб парогенераторов.

1. Введение. В настоящее время имеются достаточные практические и теоретические предпосылки для создания и внедрения методологии риска, как при обосновании безопасной эксплуатации действующих энергоблоков, так и при создании новых проектов: имеется большая исходная информация по характеристикам и контролю металла на действующих энергоблоках, накапливается опыт обработки этой информации, разрабатываются и модернизируются программные средства по анализу вероятности разрушения корпусов оборудования и трубопроводов, выполняются вероятностные анализы безопасности. Анализ вероятности возникновения отказа и предельного состояния оборудования проводится на основе опыта эксплуатации аналогов или на основе построения физико-механической модели появления этого инициирующего события. Анализ влияния инициирующего события в оборудовании на нарушения критериев безопасности проводится при выполнении вероятностного анализа безопасности.

При построении физико-механической модели возникновения инициирующего события, связанного с возникновением течи через сквозные дефекты и разрывом корпусов

оборудования, рассматриваются три стадии развития дефектов: зарождение, усталостный и критический рост. Развитие дефектов зависит от: их начальных размеров и их количества, механических свойств, характеристик разрушения материала, водно-химического состояния теплоносителя, режимов эксплуатации и соответствующих им напряжений. Как известно, механические свойства, полученные в результате стандартных испытаний, размеры и количество дефектов, обнаруженные в результате контроля металла, а также характеристики критического роста трещин, определенные в результате экспериментальных исследований, имеют статистический разброс. В этом случае наиболее эффективным и точным методом анализа возникновения отказа и предельного состояния, связанных с развитием дефектов, является метод, основанный на использовании вероятностных методов механики разрушения.

2. Основные положения концепции применения вероятностных методов механики разрушения. Развитие вероятностных методов механики разрушения привело к созданию концепции применения вероятностных методов механики разрушения для анализа надежности оборудования и риска нарушения критериев безопасности реакторной установки [1–5].

Основные положения этой концепции заключаются в следующем:

- уровень надежности реакторной установки зависит от уровня надежности оборудования, находящегося под давлением первого и второго контуров;
- показатели надежности (безотказность, долговечность, коэффициент готовности) оборудования, находящегося под давлением первого и второго контуров, определяются по интенсивностям отказов и предельного состояния, включая интенсивности, полученные на основе развития дефектов в металле их элементов;
- интенсивности возникновения отказов и предельного состояния, связанные с развитием дефектов в металле элементов оборудования, находящегося под давлением первого и второго контуров, определяются на основе применения вероятностных методов механики разрушения;
- критерий надежности оборудования определяется на основе обеспечения критериев безопасности реакторной установки и с учетом дополнительных требований к их эксплуатации;
- обеспечение критерия надежности оборудования в случае, если определяющим является развитие дефектов в металле их элементов, осуществляется за счет разработки рекомендаций к характеристикам проведения контроля металла и последующего его ремонта и, при необходимости, к их конструкциям и условиям их работы.

Построение физико-механической модели появления инициирующего события в оборудовании реакторной установки сводится к построению объединенной модели разрушения [1, 2, 6], включающей все стадии разрушения при механических, температурных, радиационных и коррозионных воздействиях. Суть этой модели заключается в следующем. Перед началом эксплуатации в элементе составной единицы могут существовать дефекты, которые были пропущены при проведении контроля металла, и зародыши будущих дефектов. В процессе эксплуатации могут происходить процессы зарождения новых дефектов и развитие уже имеющихся с начала эксплуатации дефектов. Соотношение скоростей этих процессов может быть различным и зависит от условий, в которых происходит эксплуатация оборудования.

При этом используются следующие термины. Составная единица – составная часть оборудования. Составная единица разбивается на элементы. Элемент – составная часть, на которые разбивается составная единица для анализа роста дефектов. Элемент разбивается на ячейки. Ячейка – составная часть, на которые разбивается элемент для анализа зарождения дефектов.

При определении интенсивности отказов или перехода элемента составной единицы оборудования в предельное состояние применен комбинированный подход; так как при

решении задачи по каждой процедуре используются в комбинации или отдельно как численные и аналитические методы, так и методы статистического моделирования (метод Монте-Карло). При подготовке структурной модели составная единица оборудования или трубопровода разбивается на элементы, выделенные по признакам конструкции (зона патрубков, сварные швы, гибы, прямолинейные участки и т.д.) с учетом значений параметров нагружения: давления, температуры, по признакам постоянства напряженно-деформированного состояния, степени дефектности и свойств материалов.

Для построения вероятностной модели зарождения новых дефектов должны быть решены четыре задачи: выявлены факторы, которые влияют на зарождение дефектов, построены математические модели влияния факторов на зарождение дефектов, определена вероятность зарождения одного дефекта от выявленных факторов, построена математическая модель, объединяющая зарождение всех дефектов в элементе.

В основу математической модели зарождения дефектов положена повреждаемость a_d как характеристика накопления повреждений, приводящих к образованию дефектов. При этом критерием зарождения дефектов является условие

$$a_d = 1 \quad (2.1)$$

Для определения механических усталостных повреждений используется модель линейного суммирования. В этом случае a_{md} определяется по формуле

$$a_{md} = \sum_{i=1}^I \frac{N_i}{[N_{0i}]} \quad (2.2)$$

где $[N_{0i}]$ – разрушающее число циклов, N_i – число циклов при i -м типе расчетного режима изменения напряжений.

Повреждаемости для коррозионных факторов определяются по формуле

$$a_{cd} = \int_0^{\tau} \frac{d\tau}{\tau_c} \quad (2.3)$$

где τ_c – время до зарождения дефектов при коррозионных воздействиях.

Предполагается, что совместное воздействие механических и коррозионных факторов приводит к повреждаемости, определяемой нелинейным суммированием повреждаемостей от каждого фактора [7]. При этом повреждаемости ранжируются в порядке убывания. Исходя из этого повреждаемость от совместного действия всех факторов определяется по формуле

$$a_d = \frac{a_{d1}}{1 - a_{d2}/(1 - a_{d3}/(1 - a_{d4}/\dots))} \quad (2.4)$$

где $a_{d1}, a_{d2}, a_{d3}, a_{d4}$ – ранжированные повреждаемости от каждого фактора.

Таким образом, формулы (2.1) и (2.4) определяют условия, при которых может произойти зарождение дефектов от совместного действия механических и коррозионных факторов.

Вероятность P_c зарождения дефектов в соответствии с критерием (1) определяется следующим образом:

$$P_c = P(a_c \geq 1) \quad (2.5)$$

где $P(\cdot)$ – вероятность события, указанного в скобках. Учитывая большое количество характеристик с соответствующими статистическими распределениями и нелинейность

зависимостей, по которым определяются повреждаемости, вероятность зарождения оценивается методом статистического моделирования (методом Монте-Карло) [8].

Для решения задачи об определении количества зарождаемых дефектов в зависимости от времени эксплуатации элементы разбивают на ячейки, предполагая, что в каждой ячейке может находиться зародыш для будущего дефекта. Учитывая, что в каждой ячейке может зародиться дефект, размеры этой ячейки должны соответствовать размерам зарождающегося дефекта. В общем случае выбираются кубические элементы, площадь одной грани которых равна площади, соответствующей чувствительности контроля металла F_s . При этом ячейки в рамках одного элемента по-разному подвергнуты воздействию различных факторов, влияющих на зарождение дефектов. Поэтому для анализа количества зарождающихся дефектов ячейки группируются в группы ячеек, находящихся в одинаковых условиях при эксплуатации. Вероятность образования одного дефекта в любой ячейке каждой из групп ячеек определяется по формуле (2.5).

Допустим, что i -й элемент конструкции разделяется на J ячеек. Ячейки сгруппированы в JJ групп с количеством $n = L_{jj}^i$ ячеек в каждой группе. Для каждой группы определена вероятность $P_{jj}^i(\tau_l)$ зарождения одного дефекта в любой ячейке в момент времени τ_l . Для определения количества k зародившихся дефектов в jj -й группе ячеек предполагается, что зарождение дефектов в группе описывается биномиальным распределением

$$P_{jj, k, n}^i(\tau_l) = C_n^k [P_{jj}^i(\tau_l)]^k [1 - P_{jj}^i(\tau_l)]^{n-k} \quad (2.6)$$

где $P_{jj, k, n}^i(\tau_l)$ – вероятность зарождения k дефектов в jj -й группе i -го элемента в момент времени τ_l , C_n^k – биномиальные коэффициенты.

Если дефект зародился в ячейке, удаленной от других ячеек, то размеры (глубина и длина) зародившегося дефекта соответствуют чувствительности контроля металла [9]:

$$a_{0.05} = 0.54 \sqrt{F_s}, \quad l_{0.05} = 5a_{0.05} \quad (2.7)$$

Если дефекты зародились в соседних ячейках, то предполагается, что эти дефекты сливаются в один. При этом среднее значение размеров зародившихся и слившихся дефектов за промежуток времени $\Delta\tau_l$ определяется как

$$a_{0.5} = 0.54 \sqrt{F_{0.5}}, \quad l_{0.5} = 5a_{0.5}, \quad F_{0.5} = k_{0.5}^i(\Delta\tau_l)F_s \quad (2.8)$$

где $k_{0.5}^i(\Delta\tau_l)$ – параметр, соответствующий среднему размеру зародившегося дефекта и зависящий от разбиения элемента на ячейки, от количества ячеек и от вероятности зарождения дефекта в i -м элементе. Распределения глубин и длин зародившихся дефектов характеризуются математическим ожиданием и дисперсией, которые определяются с использованием формул (2.7) и (2.8).

При корректировке распределений глубин, длин и количества дефектов, имевшихся в металле элемента оборудования, из-за зарождения новых дефектов за промежуток времени $\Delta\tau_l$, рассматриваются два случая: зарождение новых дефектов происходит в удалении от дефектов, имевшихся в металле элемента, и в непосредственной близости к этим дефектам, что приводит к их слиянию.

Для первого случая корректировка плотности распределения глубин дефектов проводится следующим образом:

$$p_{\text{cor}}[a^i(\tau_l)] = \frac{v^i(\tau_{l-1})p_{\text{cor}}[a^i(\tau_{l-1})] + v_c^i(\Delta\tau_l)p_c[a^i(\Delta\tau_l)]}{v^i(\tau_l)}$$

где $v^i(\tau_i) = v^i(\tau_{i-1}) + v_c^i(\Delta\tau_i)$ – математическое ожидание числа дефектов в i -м элементе в момент времени τ_i с учетом зародившихся дефектов. Корректировка распределения длин дефектов происходит аналогично корректировке распределения глубин дефектов.

Для второго случая зарождение новых дефектов происходит в непосредственной близости к дефектам, имеющимся в металле элемента оборудования, что приводит к их слиянию. Рассматриваются две схемы слияния: дефекты, зарождающиеся в ячейках, расположенных в поверхностных или подповерхностных слоях металла элемента оборудования, сливаются с имеющимися дефектами, в результате чего увеличивается длина дефектов (первая схема); дефекты, зарождающиеся в ячейках, расположенных во внутренних слоях металла элемента оборудования, сливаются с имеющимися дефектами, в результате чего увеличивается глубина дефектов (вторая схема).

При проведении контроля металла могут быть выявлены дефекты, которые не удовлетворяют требованиям к качеству металла. На последующей стадии ремонта эти дефекты устраняются. Это приводит к необходимости корректировать распределения размеров и количества дефектов в металле элемента оборудования.

При анализе образования сквозных дефектов рассматриваются три причины их возникновения: коррозионно-механическое зарождение новых дефектов, коррозионно-усталостный и критический рост поверхностных и подповерхностных дефектов. При этом условная вероятность возникновения течи через сквозной дефект длиной, находящейся в диапазоне $l_j^i \leq l^i(\tau_i) \leq l_{j+1}^i$, определяется следующим образом:

$$P_{|TC|PC_k}^i[l_j^i \leq l^i(\tau_i) \leq l_{j+1}^i] = P_{|th|PC_k}^i(\tau_i) \int_{l_j^i}^{l_{j+1}^i} p_d[l^i(\tau_i)] \{1 - F[l_{cr}^i(\tau_i)]\} dl^i$$

Условная вероятность образования сквозных дефектов или крупномасштабного разрушения i -го элемента при возникновении расчетного события PC_k (инициирующее событие или режимы нормальной эксплуатации) находится по формуле

$$P_{|PC_k}^i(\tau_i) = \sum_n P_{n|PC_k}^i(\tau_i) P_n^i(\tau_i)$$

где $P_n^i(\tau_i)$ – вероятность наличия в эталонном объеме i -го элемента n дефектов, определяемая по закону Пуассона. Определение полной вероятности разрушения (образования сквозных дефектов или крупномасштабного разрушения) элемента составной единицы сводится к суммированию произведений условных вероятностей разрушения $P_{|PC_k}^i(\tau_i)$ на вероятности возникновения соответствующих расчетных событий P_{PC_k} :

$$P^i(\tau_i) = \sum_{k=1}^{N_{PC}} P_{|PC_k}^i(\tau_i) P_{PC_k}$$

где N_{PC} – количество расчетных событий PC_k .

Для оценки показателей надежности определяются функции распределения времени до отказа $F_I^i(\tau)$ и функции распределения времени до перехода в предельное состояние $F_{II}^i(\tau)$. После определения этих функций распределения соответствующие им интенсивности отказов и перехода в предельное состояние определяются следующим образом [10]:

$$\lambda_I^i(\tau) = \frac{1}{1 - F_I^i(\tau)} \frac{dF_I^i(\tau)}{d\tau}, \quad \lambda_{II}^i(\tau) = \frac{1}{1 - F_{II}^i(\tau)} \frac{dF_{II}^i(\tau)}{d\tau}$$

3. Критерий надежности. На основе обеспечения критериев безопасности энергоблоков устанавливается недопустимый риск нарушения этих критериев для реакторной установки. На основе обеспечения непревышения недопустимого риска нарушения критериев безопасности реакторной установки устанавливаются требования к надежности ее оборудования. Критерий надежности оборудования формируется на основе обеспечения требований по безопасности, а также с учетом дополнительных требований к их эксплуатации [4, 5, 11]. Критерий надежности обеспечен, если одновременно обеспечены четыре принципа надежности: работа оборудования должна обеспечивать безопасную работу активной зоны и энергоблока в целом; перевод элемента в безопасное состояние при возникновении отказа в нем; необходимое значение коэффициента готовности; оптимальные затраты на проведение ремонтных работ, связанных с его отказом.

На основе первого принципа допустимый уровень показателей надежности определяется по данным вероятностного анализа безопасности конкретного энергоблока и обобщенным данным. Если при этих показателях надежности: вероятность разрушения корпуса реактора не превышает 10^{-7} на реактор в год, вероятность повреждения активной зоны не превышает 10^{-5} на реактор в год, а вероятность превышения предельного аварийного выброса в атмосферу не превышает 10^{-7} на реактор в год [12], то эти показатели надежности соответствуют такому (допустимому) уровню надежности, при котором происходит безопасная работа реакторной установки и энергоблока в целом. Первый принцип сводится к проверке непревышения недопустимого риска нарушения критериев безопасности.

На основе второго принципа определяется допустимый уровень показателей надежности с точки зрения обеспечения перевода оборудования в безопасное состояние при возникновении отказа в нем.

Третий принцип рассматривается исходя из коэффициента готовности энергоблока и реакторной установки. Т.е. коэффициенты готовности оборудования должны обеспечивать требуемый коэффициент использования установленной мощности для энергоблока.

Четвертый принцип устанавливает взаимосвязь между допустимыми показателями надежности и необходимым коэффициентом экономической эффективности эксплуатации оборудования, реакторной установки и энергоблока в целом.

Если полученный уровень показателей надежности оборудования не удовлетворяет критерию надежности и определяющим является развитие дефектов в металле их элементов, то его обеспечение осуществляется, например, за счет изменения периодичности контроля металла, разработки требований к дефектоскопическому контролю, в части допустимых размеров и количества дефектов, или уточнения срока его службы.

4. Анализ корпуса реактора (оценка риска разрушения корпуса реактора). В рамках проведения работ для продления срока эксплуатации реактора энергоблоков выполняется анализ вероятности разрушения его корпуса. Анализ вероятности разрушения корпуса реактора в соответствии с разработанным подходом [13] включает решение следующих задач: анализ исходной информации, группирование расчетных режимов в расчетные события, подготовка структурной модели, подготовка исходных данных для каждого элемента корпуса (основной металл, сварные швы), анализ вероятности разрушения элементов корпуса реактора, определение полной вероятности разрушения корпуса реактора, проверка обеспечения критерия безопасности – непревышение вероятности разрушения 10^{-7} на реактор в год, разработка рекомендаций по эксплуатации корпуса реактора для обеспечения непревышения недопустимого риска нарушения критерия безопасности. Для корпуса реактора обеспечение непревышения недопустимого риска, равного 10^{-7} на реактор в год, означает обеспечение всех четырех принципов надежности и, соответственно, обеспечение критерия надежности.

В результате проведенного анализа расчетные режимы сгруппированы в восемь расчетных событий. Суммарные вероятности возникновения каждого расчетного события

Таблица 1

Наименование расчетного события	Обозначение расчетного события	Суммарная вероятность возникновения расчетного события
Гидроиспытания на плотность	I	1
Гидроиспытания на плотность	II	1
Последовательность расчетных режимов НУЭ и ННУЭ	III	1
Малая течь	IV	$1.81 \cdot 10^{-2}$
Средняя течь	V	$8.30 \cdot 10^{-4}$
Разрыв паропровода ПП	VI	$1.12 \cdot 10^{-2}$
Непреднамеренное срабатывание ИПУ КД	VII	$3.63 \cdot 10^{-2}$
Непреднамеренное срабатывание ИПУ ПГ	VIII	$3.86 \cdot 10^{-1}$

Таблица 2

Уровень дефектности	Глубина дефекта			Длина дефекта		
	α_a	β_a	a^{**}	α_l	β_l	l^{**}
Сварные швы						
1	0.676	0.989	35.0	2.286	1.100	210.0
2		0.700	26.2		0.778	157.2
3		0.469	15.4		0.547	92.2
4		0.279	7.3		0.366	43.9
5		0.150	4.3		0.229	25.8
6		0.121	3.6		0.200	21.6
7		0.067	2.7		0.144	16.5
Основной металл						
1	0.535	1.077	35.0	2.145	1.188	210.0
2		0.761	26.3		0.839	158.0
3		0.532	15.9		0.61	95.3
4		0.343	8.3		0.43	49.6
5		0.221	4.8		0.294	29.0
6		0.186	4.1		0.265	24.6
7		0.132	3.2		0.209	19.1

за год, полученные суммированием частот всех объединенных событий, приведены в табл. 1.

Параметры логнормального закона распределения глубин и длин расчетных трещин, определенные в соответствии с [13], представлены в табл. 2 (α_a, α_l – параметр масштаба, β_a, β_l – параметр формы, a^{**}, l^{**} – размер дефекта [мм] с вероятностью его превышения 10^{-7} , соответственно для глубины и длины дефекта). Результаты трех оценок плотности дефектов: сверху (консервативной оценки), снизу (оптимистической оценки), реалистической, для сварных швов [шт./м] и основного металла [шт./м²] представлены в табл. 3. При определении плотности дефектов для сварных швов и основного металла учтены результаты эксплуатационного контроля, с точки зрения распределения дефектов по элементам корпуса реактора.

Таблица 3

Элемент	Оценка плотности дефектов	Уровни дефектности						
		1	2	3	4	5	6	7
Сварные швы № 4-7	Сверху				7.15			
	Снизу				0.09			
	Реалистическая	0.51	0.65	1.05	1.99	3.38	3.94	5.20
Сварные швы № 1-3	Сверху				71.5			
	Снизу				0.09			
	Реалистическая	4.37	5.74	9.76	19.30	33.38	39.00	51.75
Основной металл	Сверху				17			
	Снизу				0.04			
	Реалистическая	1.20	1.58	2.67	5.27	9.11	10.64	14.11

В соответствии с концепцией “Master curve” [14] и концепцией “Базовой кривой” [15] статистический разброс критического коэффициента интенсивности напряжений корпусной стали для каждой фиксируемой температуры описывается трехпараметрическим распределением Вейбулла

$$P_f = 1 - \exp\left[-\left(\frac{K_{1C} - K_{\min}}{K_0 - K_{\min}}\right)^4\right] \quad (4.1)$$

Анализ имеющихся данных по критическим коэффициентам интенсивности напряжений [13] показал, что параметры в формуле (4.1) определяются следующим образом: K_0 [МПа · м^{0.5}] при толщине образцов, равной 150 мм, можно представить в виде

$$K_0 = 26.3 + 100.9 \exp(0.019(T - T_k)) \quad (4.2)$$

K_{\min} [МПа · м^{0.5}] является монотонной функцией от температуры и представляется в следующем виде:

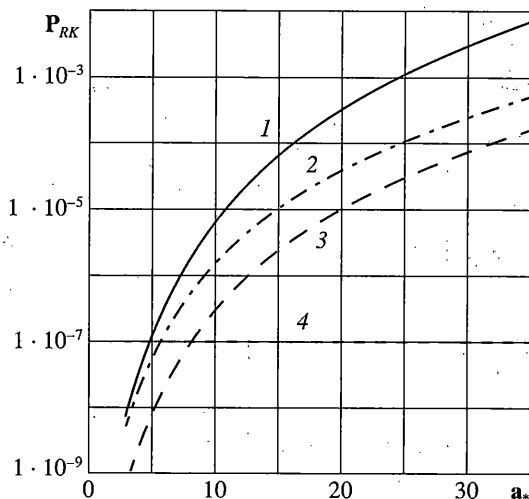
$$K_{\min} = 20.6 + 10.1 \exp(0.019(T - T_k)) \quad (4.3)$$

Зависимость медианных значений K_{IC} ($P_f = 0.5$) [МПа · м^{0.5}] от приведенной температуры имеет следующий вид:

$$K_{IC_{med}} = 25.8 + 92.9 \exp(0.019(T - T_k)) \quad (4.4)$$

Для выполнения анализов вероятности разрушения корпус реактора был структурно разбит на восемь элементов: сварные швы ниже активной зоны (сварные швы № 1–3), основной металл ниже активной зоны (средняя и нижняя цилиндрические обечайки и днище), сварной шов № 4, основной металл напротив активной зоны (верхняя цилиндрическая обечайка), сварной шов № 5, основной металл зоны патрубков (нижняя и верхняя обечайки зоны патрубков), сварной шов № 6, сварной шов № 7.

Анализы вероятностей разрушения элементов корпуса реактора выполнены для разных последовательностей инициирующих событий, представленных в табл. 1. Графические зависимости суммарного риска разрушения корпуса реактора P_{RK} для трех оценок плотности дефектов от глубины дефекта с вероятностью превышения 10^{-7} в зависимости от характерной глубины дефекта a_* [мм] приведены на фиг. 1 (кривая 1 – оценка сверху (консервативная оценка), кривая 2 – реалистическая оценка, кривая 3 – оценка



Фиг. 1

снизу (оптимистическая оценка), прямая 4 – допустимый уровень вероятности разрушения 10^{-7} на реактор в год).

Разработка рекомендаций к эксплуатации корпуса реактора для обеспечения непревышения недопустимого риска нарушения критерия безопасности включает процедуру определения максимально допустимых размеров дефектов [13]. Эта процедура состоит в следующем: выполняются анализы вероятности разрушения для рассматриваемых уровней дефектности (табл. 2, 3), строятся зависимости вероятностей разрушения от уровня дефектности, определяется допустимый уровень дефектности, обеспечивающий выполнение критерия безопасности, выявляются по два диапазона изменения глубин и длин трещин допустимого уровня дефектности (не вносящих и вносящие вклад в вероятность разрушения), определяются максимальные допустимые размеры (глубина a_{*p} [мм] и длина l_{*p} [мм]) дефектов, как общие границы вышеуказанных диапазонов изменения глубин и длин трещин. Результаты определения максимальных допустимых размеров дефектов a_{*p} , l_{*p} в корпусе реактора представлены в табл. 4.

Система контроля металла, применяемая на энергоблоках и имеющая чувствительность 38 мм^2 , позволяет обеспечить выполнение рекомендаций, представленных в табл. 4, и тем самым обеспечить непревышение недопустимого риска нарушения критерия безопасности для корпуса реактора, равный 10^{-7} на реактор в год.

5. Анализ теплообменных труб парогенераторов (оценка риска выброса активности за пределы защитной оболочки). В настоящее время для оценки состояния металла теплообменных труб парогенераторов энергоблоков применяется вихретоковый контроль.

Таблица 4

Размер дефекта	Оценка сверху	Реалистическая оценка	Оценка снизу	Рекомендуемый максимальный допустимый размер
a_{*p}	4.5	5.5	7.5	5.5
l_{*p}	27.0	33.0	45.0	33.0

Допустимая периодичность и объемы этого контроля, а также максимальные допустимые размеры дефектов в металле теплообменных труб определяются на основе обеспечения критерия надежности. Первый принцип надежности теплообменных труб сводится к проверке непревышения недопустимого риска тяжелого повреждения активной зоны и превышения предельного аварийного выброса.

Оценка допустимой периодичности вихретокового контроля металла теплообменных труб парогенераторов включает решение следующих задач: оценку характеристики достоверности результатов контроля металла: чувствительность, вероятность обнаружения, точность определения размера дефектов, анализ результатов контроля, выбор критерия надежности для оценки построенных зависимостей, оценку максимальных допустимых размеров дефектов (критерия глушения теплообменных труб), оценку величины вероятности разрушения при наличии одного дефекта для соответствующего критерия глушения, оценку допустимого количества дефектов для соответствующего критерия глушения, оценку допустимых объемов контроля и периодов между контролем металла.

Анализ результатов вихретокового контроля в разные годы показал, что зависимость количества дефектов от периода времени между моментами контроля аппроксимируется в виде кусочно-линейной функции:

$$k(t + \Delta t) = k(t) + \Delta k_m(t)\Delta t \quad (5.1)$$

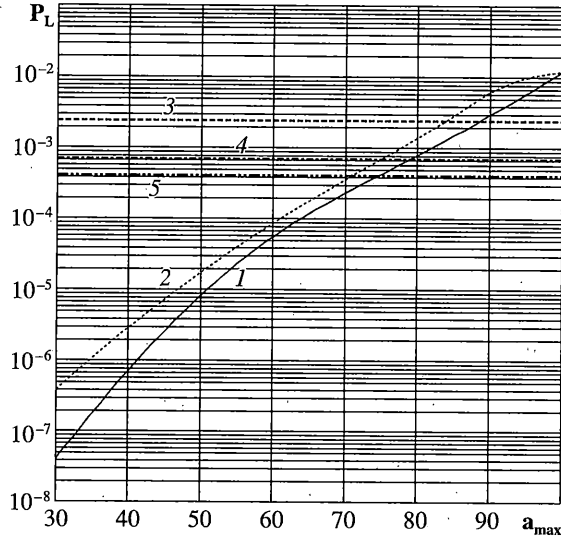
где $k(t + \Delta t)$, $k(t)$ – количество дефектов в теплообменных трубах в разные моменты времени [шт.], $\Delta k_m(t)$ – прирост количества дефектов за 1 год [шт./год], Δt – интервал времени между моментами контроля [год].

Оценки допустимых вероятностей разрушения теплообменных труб на основе критерия надежности приведены в [16]. Анализ вероятности разрушения теплообменных труб при выявленной дефектности при вихретоковом контроле и оценка максимальных допустимых размеров дефектов проводятся на основе разработанного подхода [17]. Теплообменная труба структурно разбивается на четыре элемента: прямая труба вне дистанционирующих элементов, гибы, зоны заделок, участки, находящиеся под дистанционирующими элементами. При выполнении анализа вероятности разрушения теплообменных труб парогенераторов предполагается, что повреждения группы теплообменных труб могут быть описаны биномиальным распределением при условии, если теплообменные трубы находятся в одинаковых условиях воздействия режимов эксплуатации и среды второго контура и, если разрушение одной трубы не влияет на разрушения других труб. Модель Пуассона, описывающая распределение количества дефектов для элемента теплообменной трубы, позволяет установить пропорциональную взаимосвязь между количеством дефектов и вероятностью его разрушения. Установив ограничение на допустимый уровень вероятности разрушения на основе критерия надежности, можно установить ограничение на количество дефектов в теплообменных трубах для обеспечения необходимого уровня их надежности.

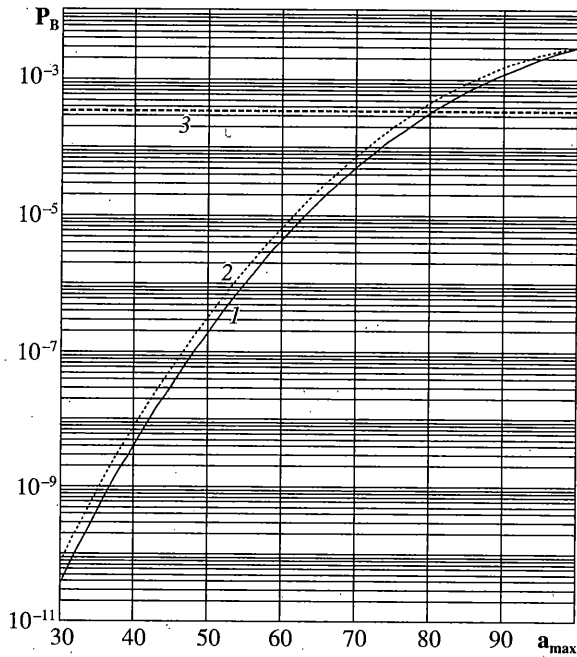
На основе равенства допустимого количества дефектов и количества дефектов, которое может существовать в данный момент в теплообменных трубах (5.1), определяются допустимые зависимости количества дефектов от их прироста для разного периода времени между вихретоковым контролем: 1 год, 4 года, 8 лет, 12 лет:

$$k(t) = [k] - \Delta k_m(t)\Delta t, \quad [k] = \min\{[k]_1, [k]_2, [k]_3, [k]_4\} \quad (5.2)$$

где $[k]$ – допустимое количество дефектов в теплообменных трубах, определяемое из критерия надежности. Допустимое количество дефектов в теплообменных трубах (5.2) зависит от величины критерия глушения.



Фиг. 2



Фиг. 3

В соответствии с разработанным подходом проведен анализ вероятности разрушения теплообменных труб парогенераторов. Примеры оценки вероятности течи P_L и крупномасштабного разрушения P_B теплообменной трубы в зависимости от максимальной глубины дефектов a_{\max} [мм] показаны на фиг. 2, 3 (кривая 1 – реалистическая оценка, кривая 2 – консервативная оценка, на фиг. 2: прямые 3, 4 – допускаемые уровни, соответ-

Таблица 5

Максимальная допустимая глубина дефекта	Вероятность течи одной трубы	Вероятность крупномасштабного разрушения
60%	$2.1 \cdot 10^{-2}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$
70%	$3.3 \cdot 10^{-2}$	$2.6 \cdot 10^{-2}$

Таблица 6

Максимальная допустимая глубина дефекта	Средняя допустимая плотность дефектов в одной теплообменной трубе	Допустимое количество дефектов для разных типов парогенераторов	
		ПГВ-440	ПГВ-1000
60%	0.083	460	916
70%	0.054	300	594

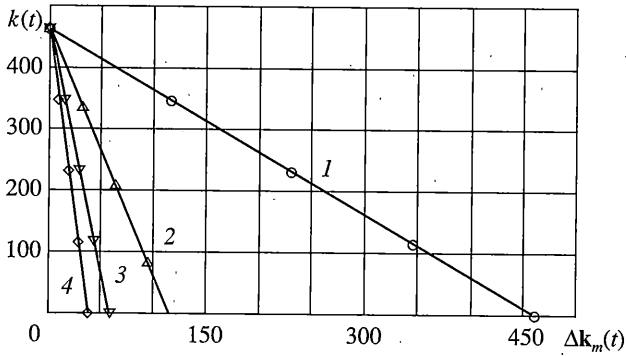
венно для 10% и 5% резерва теплообменной поверхности, прямая 5 – допускаемый уровень по коэффициенту готовности, на фиг. 3 прямая 3 – допускаемый уровень исходя из обеспечения критериев безопасности). На основе выполненных анализов вероятности разрушения теплообменных труб разных парогенераторов определены оценки средних величин вероятности образования течи за год и вероятности крупномасштабного разрушения на парогенератор в год при наличии в трубе хотя бы одной трещины для критериев глушения 60% и 70% от толщины стенки теплообменной трубы. Эти оценки приведены в таб. 5.

На основе сравнения средних расчетных вероятностей разрушения теплообменных труб при наличии в трубе хотя бы одного дефекта со средними допустимыми значениями определены средние допустимые плотности дефектов на одну теплообменную трубу и допустимое количество дефектов для парогенераторов ПГВ-440 и ПГВ-1000 (табл. 6).

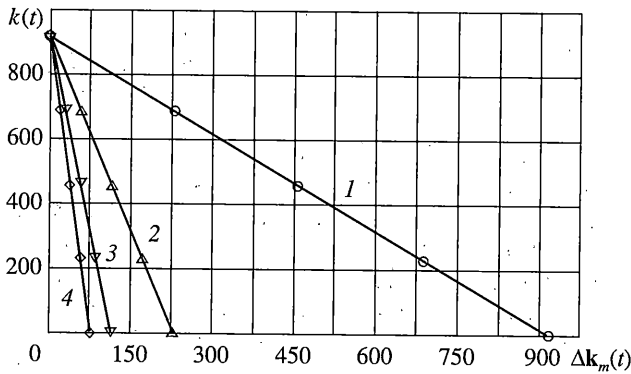
На основе сравнения функции изменения количества дефектов во время эксплуатации (11) с допустимым количеством дефектов для критериев глушения 60% и 70% от толщины стенки теплообменной трубы построены обобщенные диаграммы “количество дефектов $k(t)$ – прирост количества дефектов в год $\Delta k_m(t)$ ” для периодов между ВТК: 1 год, 4 года, 8 лет, 12 лет. Эти обобщенные диаграммы для ПГВ-440 и ПГВ-1000 для критерия глушения 60% от толщины стенки теплообменной трубы соответственно показаны на фиг. 4, 5 (прямые 1 – 4 – период между ВТК, соответственно, 1 год, 4 года, 8 лет, 12 лет).

Для определения допустимого периода между ВТК одного ПГВ для соответствующего критерия глушения теплообменных труб необходимы две величины: количество дефектов в теплообменных трубах этого ПГВ и прирост количества дефектов за год по данным предыдущих ВТК. По этим величинам определяется положение точки на диаграмме “количество дефектов – прирост количества дефектов в год”.

Ближайшая, прямая линия, которая проходит выше точки, соответствует допустимой периодичности ВТК. Если точка расположена выше всех прямых на диаграмме “количество дефектов – прирост количества дефектов в год”, то необходимо рассмотреть вопрос о замене парогенератора.



Фиг. 4



Фиг. 5

6. Выводы. Создание методологии риска нарушения критериев безопасности энергоблока совместно с критерием надежности позволяет разработать мероприятия по обеспечению надежной и безопасной эксплуатации энергоблока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984. 312 с.
2. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1990. 448 с.
3. Тутнов А.А., Ткачев В.В. Расчет вероятности начала хрупкого разрушения сосудов под давлением // Атомная энергия. Т. 64. Вып.3. 1988. С. 188 – 194.
4. Григорьев В.А. Концепция применения вероятностных методов механики разрушения для анализа надежности оборудования и трубопроводов РУ с ВВЭР // 2-я Всерос. научно-техн. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”, г. Подольск, Московская область, 2001 / Сб. тр. ОКБ “Гидропресс”, 2001. Т. 1. С. 132–147.
5. Григорьев В.А. Глава 8. Вероятностный анализ разрушения элементов реакторной установки // Шарый Н.В., Семишкин В.П., Пиминов В.А., Драгунов Ю.Г. “Прочность основного оборудования и трубопроводов реакторных установок ВВЭР”. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2004. С. 320–407.

6. Григорьев В.А. Объединенная модель разрушения для анализа надежности оборудования РУ с ВВЭР // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. Вып. 7. Реакторные установки с ВВЭР. Подольск, 2004. С. 49–60.
7. Горбатьх В.П. Влияние сочетания аммиака и медьсодержащих сплавов на коррозионное растрескивание трубных пучков парогенераторов из аустенитных сталей // Материалы регионального семинара МАГАТЭ. Удомля, 2000. М.: ЭНИЦ ВНИИАЭС, 2001. С. 123–130.
8. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. М.: Наука, 1973. 311 с.
9. Методические рекомендации. МР 125–02–95. Правила составления расчетных схем и определение параметров нагруженности элементов конструкций с выявленными дефектами. М.: ЦНИИТМАШ, 1995. 52 с.
10. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.
11. Григорьев В.А. Прикладное значение критерия надежности при оценке ресурса элементов реакторных установок // Тр. 7-й междунар. конф. “Материаловедческие проблемы при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС”. СПб., 2002. Т. 3. С. 150–162.
12. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ–88/97), ПНАЭ Г-01–011–97. М.: Атомиздат, 1997. 41 с.
13. Григорьев В.А. Разработка подхода к определению вероятности разрушения корпуса реактора ВВЭР–440 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. Вып. 1. Реакторные установки с ВВЭР. Подольск, 2002. С. 10–25.
14. Wallin K. The scatter in K_{IC} result // Eng – ing Fracture Mech. 1984. V. 19. № 6. P. 1085 – 1093.
15. Методика определения ресурса корпусов атомных реакторов ВВЭР в процессе эксплуатации (МРК – СХР – 2000). РД ЭО 0353–02. СПб.; М.: Росэнергоатом, 2000. 51 с.
16. Давиденко С.Е., Трунов Н.Б., Григорьев В.А., Денисов В.В. Совершенствование контроля и ремонта теплообменных труб ПГ АЭС с ВВЭР // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. Вып. 9. Реакторные установки с ВВЭР. Подольск, 2005. С. 55–63.
17. Григорьев В.А. Метод анализа работоспособности теплообменных труб парогенераторов типа ПГВ // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. Вып. 5. Реакторные установки с ВВЭР. Подольск, 2004. С. 47–57.

Москва

Поступила в редакцию
25.11.2005