

ПОДХОД К ВЕРОЯТНОСТНОМУ ОБОСНОВАНИЮ УСЛОВИЯ ТПР И ИСКЛЮЧЕНИЯ РАЗРЫВА ТРУБОПРОВОДОВ ВТОРОГО КОНТУРА РУ ВВЭР

Алексеев А.Т., Алексеев П.В., Лоскутов О.Д., Тутнов А.А.
(НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия)

Подходы к обоснованию безопасности эксплуатации ЯЭУ постоянно совершенствуются. В последнее время немалое внимание было уделено проблематике вероятностного подхода к обоснованию безопасности, а также к известной концепции «течь перед разрушением» (ТПР). В Российской Федерации это привело к введению норм НП-001-15[1], в которых разработка документации по вероятностному анализу безопасности прописана (ВАБ-1 и ВАБ-2) как обязательное требование к эксплуатирующим организациям. Также в 2018 году был введен ГОСТ Р58328-2018, который закрепил методику расчетов применимости концепции ТПР. Кроме того, можно отметить, что и Международное агентство по атомной энергетике выпустило руководящие документы SSG-3 и SSG-4[2-3], которые описывают требования к документации по обоснованию вероятностного анализа безопасности первого и второго уровня соответственно. Поскольку ВАБ-1 касается непосредственно активной зоны, исторически сложилось так, что ему уделялось большее внимание, чем ВАБ-2. Однако с ростом вычислительных мощностей и требований по безопасности, а также после инцидента на АЭС Фукусима в 2011 году повышенное внимание стало уделяться и ВАБ-2, в том числе элементам второго контура теплоносителя.

Одной из особенностей расчетного анализа прочностной надежности элементов РУ и обоснования условия концепции ТПР в частности является необходимость учета статистического разброса большинства исходных данных. Как правило, это обстоятельство при детерминированном подходе учитывается путем введения коэффициентов запаса на ключевые параметры. В данной работе приведены примеры обоснования условия ТПР и условия исключения разрыва (ИР) для трубопроводов второго контура с заданием ряда исходных данных вероятностным образом.

Приняты следующие условия выполнения ТПР и ИР трубопроводов питательной воды и острого пара:

- за проектный срок эксплуатации вероятность разрыва не превысит 10^{-3} от вероятности образования течи;
- среднегодовая вероятность разрыва не превышает 10^{-7} .

Первое условие считается вероятностным аналогом обоснования концепции ТПР, второе – условием ИР. Выполнение обоих условий практически обеспечивает исключение ситуации «разрушение перед течью» при эксплуатации рассматриваемых элементов РУ. Отметим, что возможность события «разрушение перед течью», нормативными методиками детерминистического расчетного обоснования концепции ТПР вообще не рассматривается. При этом никаких аргументов в обоснование такого подхода не приводится.

Вероятность 10^{-7} принята по аналогии с допустимой вероятностью разрыва для корпуса ВВЭР, которая, согласно требованиям документа [1], не должна превышать 10^{-7} на реактор в год. В этом случае разрыв корпуса относится к гипотетическим событиям и не включается в число исходных событий при обосновании безопасности. Логично принять, что разрыв элементов оборудования по причине пропуска течи из трещины критической длины или ситуации «разрыв перед течью» также можно исключить при обосновании безопасности, если вероятность разрыва меньше 10^{-7} на

реактор в год. Поскольку обоснование условия ТПР проводится на определенный срок службы, допустимая вероятность пропуска течи принимается равной произведению этого срока на 10^{-7} .

Расчет вероятности течи и разрыва трубопроводов проводился с использованием программы МАВР-2.1 [4].

1. Исходные данные

Для анализа вероятности разрушения проектируемых установок следует пользоваться как данными по реальной дефектности материала трубопроводов, прежде всего сварных соединений, полученными на аналогичных работающих объектах, так и постулируемой дефектностью. Под дефектностью понимаются результаты статистической обработки данных НК по размерам и числу дефектов материала, которые интерпретируются как полуэллиптические поверхностные или эллиптические подповерхностные трещины.

Ввиду отсутствия статистических данных по реальной дефектности сварных соединений и основного металла трубопроводов второго контура, использовались распределения, полученные ОКБ «ГИДРОПРЕСС» для трубопроводов первого контура. Расчеты вероятности разрушения проводились при поперечном (кольцевом) и продольном расположении дефектов на внутренней поверхности трубопроводов. Характеристики распределения дефектов для элементов трубопроводов второго контура приведены в табл. 1. Закон распределения дефектов – логнормальный.

Таблица 1

Характеристики постулированного распределения дефектов

Ориентация дефектов	Характеристика дефекта	Параметры распределения		Плотность дефектов
Кольцевые	Глубина	0,11	0,85	5,7 на 0,2 м
	Длина	0,55	1,13	
Продольные	Глубина	0,29	0,96	5,5 на 0,2 м
	Длина	0,84	1,20	

Чувствительность контроля для сварных швов принималась равной 0,7 мм [5]. Эффективность средств контроля задавалась пятизвенной кусочно-линейной зависимостью вероятности обнаружения дефекта $P_{НК}$ от его глубины a [6]:

$$P_{НК}(a) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq a \leq 0,7 \text{ мм} \\ 0,5 \frac{a - 0,7}{5,3} & \text{при } 0,7 \text{ мм} \leq a \leq 6 \text{ мм} \\ 0,5 + 0,3 \frac{a - 6}{8} & \text{при } 6 \text{ мм} \leq a \leq 14 \text{ мм} \\ 0,8 + 0,2 \frac{a - 14}{a_4 - 14} & \text{при } 14 \leq a \leq a_4 \\ 1 & \text{при } a \geq a_4 \end{cases} \quad (1)$$

где для трубопроводов питательной воды $a_4 = 24 \text{ мм}$, для трубопроводов острого пара $a_4 = 25 \text{ мм}$.

Максимальный размер дефекта в глубину, не подлежащего ремонту, определяется как максимальная ширина крупного включения и для основного металла и сварных швов в соответствии с [5] составляет 2 мм для труб и переходников, 2,5 мм для колен.

Расчеты вероятности разрушения проводились для срока эксплуатации 60 лет при условии проведения раз в четыре года неразрушающего контроля (НК) дефектов и ремонта обнаруженных дефектов. Рассматривался также вариант отсутствия НК и, соответственно, ремонта дефектов при ППР. В этом случае считалось, что устраняются только сквозные дефекты, которые обнаруживаются при гидроиспытании.

Вероятности течи и разрыва для поперечных (кольцевых) трещин рассчитывались при нормальных к плоскости трещины напряжениях, составляющих 0,4; 0,6; 0,8 и 1,0 от номинального допускаемого напряжения, определяемого в соответствии с [7]. Предполагалось, что тангенциальные напряжения при этом равны соответственно 0,53; 0,78; 1,04 и 1,3 от номинального допускаемого напряжения. Для продольных трещин нормальные к плоскости трещины задавались напряжения 0,53; 0,8; 1,04 и 1,3 от номинального допускаемого напряжения. Предполагалось, что осевые напряжения при этом достигают соответственно 0,4; 0,6; 0,8 и 1,0 от номинального допускаемого напряжения.

Основные параметры механических и прочностных характеристик, использовавшиеся при вероятностных расчетах приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Характеристики распределений исходных данных
по механическим и прочностным свойствам**

Свойство	Закон распределения	Параметры закона					
		16ГС		15ГС		Сталь 20	
		300 °С		300 °С		250 °С	
R_m , МПа	Д.з.*	373	–	412	–	373	–
R_{p02} , МПа	Нормальный	248	17,4	–	–	248	17,4
Параметры в формуле Париса: – коэффициент – показатель степени	Логнормальный Д.з.	–24,92 3,1	0,3 –	–24,92 3,1	0,3 –	–24,92 3,1	0,3 –
Критическое раскрытие несквозной трещины δ_{IC} , мм	Нормальный	0,205	0,034	0,205	0,034	0,205	0,034
Критическое раскрытие сквозной трещины δ_{IC} , мм	Нормальный	0,1464	0,024	0,1464	0,024	0,1464	0,024
E , МПа	Нормальный	195000	10000	195000	10000	185000	9500
* детерминированное задание							

Вероятность разрушения по хрупкому механизму рассчитывалась с использованием обобщенной зависимости от температуры допускаемых коэффициентов интенсивности напряжений для сталей перлитного класса и их сварных соединений [7].

Число и последовательность циклов силовых нагрузок за срок эксплуатации, используемые при расчете подраста трещин, принималось на основании данных по проектной цикличности режимов работы РУ ЛАЭС-2 при НУЭ, ННУЭ и АС.

2. 2 Результаты расчетов

2.1 Трубопроводы питательной воды

На рисунках 1 и 2 приведены вероятности образования течи и разрыва трубопроводов питательной воды за срок эксплуатации 60 лет для продольных трещин.

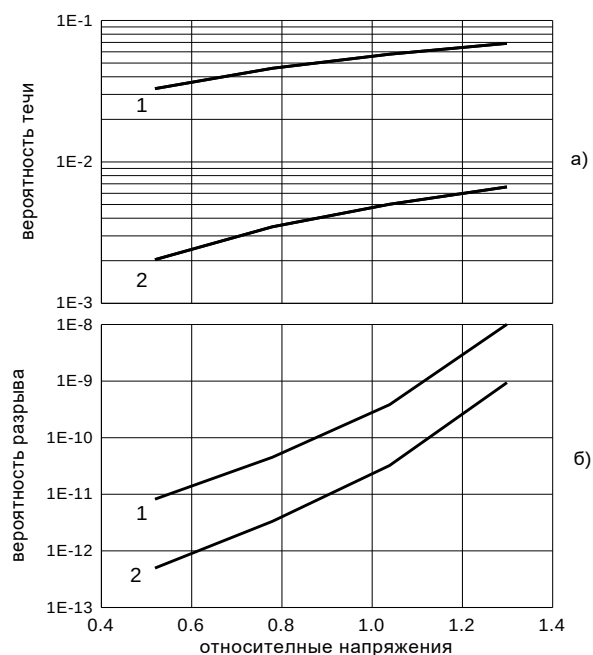


Рис. 1. Зависимости вероятности течи (а) и разрыва (б) от напряжений, измеряемых в долях от номинальных допускаемых напряжений; кривые 1 – без учета НК и ремонта дефектов, кривые 2 – НК и ремонт дефектов при ППР

На рисунке 2 представлены распределения вероятности течи разного условного диаметра. Кривые 1, 2, 3 и 4 соответствуют относительным напряжениям 1,3; 1,04; 0,78 и 0,53. Нижняя группа кривых получена при условии НК и ремонта выявленных дефектов. Верхняя группа кривых – без учета НК.

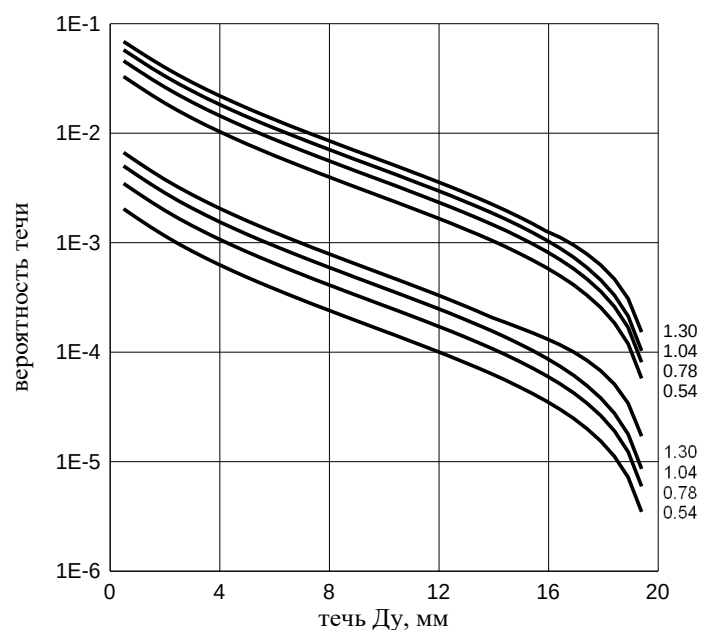


Рис. 2. Вероятность течи разных размеров от продольных трещин: шифры кривых – относительные напряжения; нижняя группа кривых получена при условии НК и ремонта выявленных дефектов; верхняя группа кривых – при отсутствии НК

Согласно расчетам, напряжения при НУЭ составляют около 0,6 от номинальных допускаемых. Оценки течи из сквозной трещины, длина которой равна половине критической длины, показали, что для участков трубопроводов питательной воды, удовлетворяющих условию ТПР, условный диаметр (D_u) не превышает 4 мм. Из результатов расчетов, представленных на рис. 2, следует, что при напряжениях 0,6 от номинальных допускаемых, вероятность возникновения ситуации ТПР за 60 лет эксплуатации при условии проведения НК и ремонта дефектов не превышает $8 \cdot 10^{-4}$ и достигает $1,2 \cdot 10^{-2}$ при отсутствии НК.

Расчет вероятности течи и разрыва при заданной начальной дефектности показал, что для трещин продольной ориентации:

- отношение вероятности разрыва к вероятности течи за 60 лет эксплуатации меньше 10^{-3} ;
- вероятность разрыва за 60 лет эксплуатации не превышает 10^{-9} .

На рисунках 3 и 4 приведены вероятности образования течи и разрыва трубопроводов питательной воды за срок эксплуатации 60 лет для поперечных (кольцевых) трещин.

На рисунке 4 представлены распределения вероятности течи разного условного диаметра при относительных напряжениях, равных 1,0; 0,8; 0,6 и 0,4 от номинальных допускаемых. Нижняя группа кривых получена при условии проведения НК и ремонта выявленных дефектов. Верхняя группа кривых – без учета НК и ремонта дефектов.

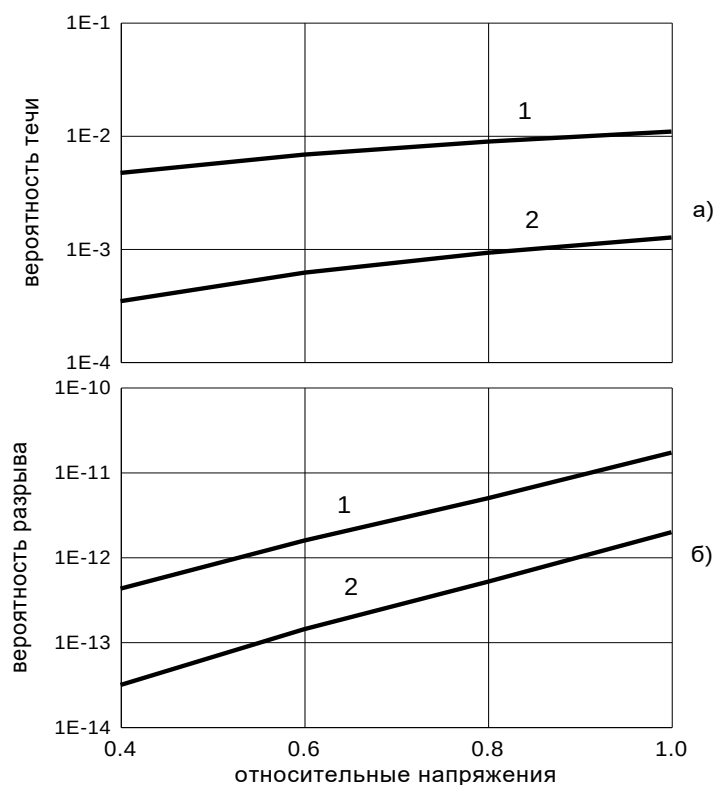


Рис. 3. Зависимости вероятности течи (а) и разрыва (б) от напряжений, измеряемых в долях от номинальных допускаемых напряжений:
 кривые 1 – без учета НК и ремонта дефектов;
 кривые 2 – НК и ремонт дефектов при ТПР

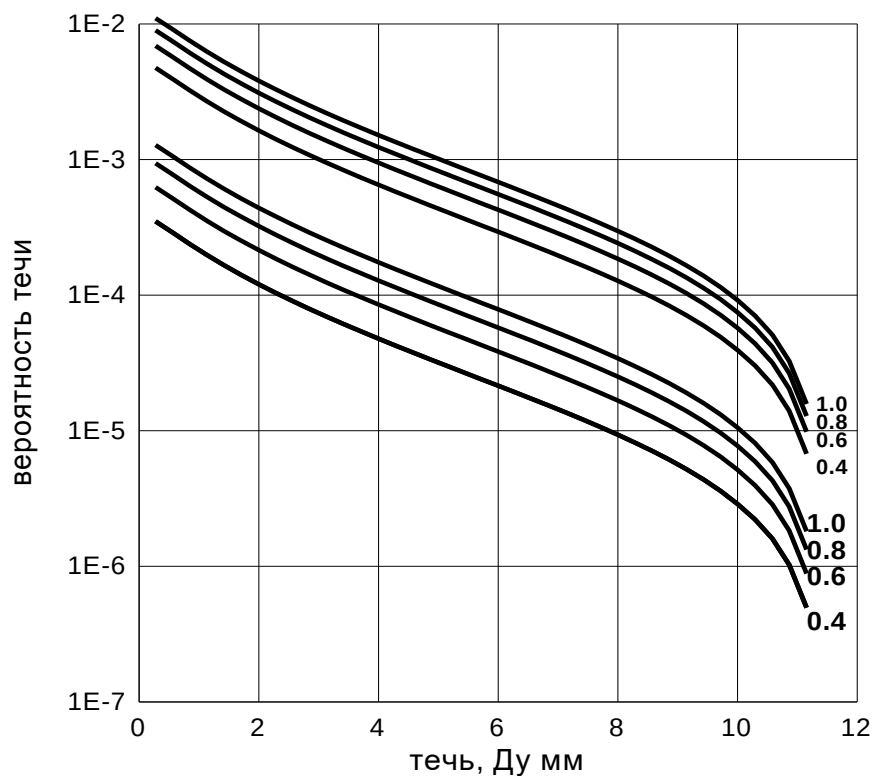


Рис. 4. Кольцевые трещины. Вероятность течи разных размеров: шифры кривых – относительные напряжения; нижняя группа кривых получена при условии НК и ремонта выявленных дефектов; верхняя группа кривых – при отсутствии НК

С учетом данных по напряжениям и оценок Ду течи, на основании расчетов, представленных на рис. 4, следует, что для кольцевых трещин вероятность возникновения ситуации ТПР за 60 лет эксплуатации при регулярном НК и ремонте дефектов не превышает $8 \cdot 10^{-5}$ и достигает $9 \cdot 10^{-3}$ в отсутствие НК.

Расчет вероятности течи и разрыва при заданной начальной дефектности показал, что для кольцевых трещин:

- отношение вероятности разрыва к вероятности течи за 60 лет эксплуатации меньше 10^{-3} в заданных пределах изменения напряжений;
- вероятность разрыва за 60 лет эксплуатации не превышает $2 \cdot 10^{-12}$.

2.2 Трубопроводы острого пара

На рисунках 5 и 6 приведены вероятности образования течи и разрыва трубопроводов острого пара за срок эксплуатации 60 лет для продольных трещин.

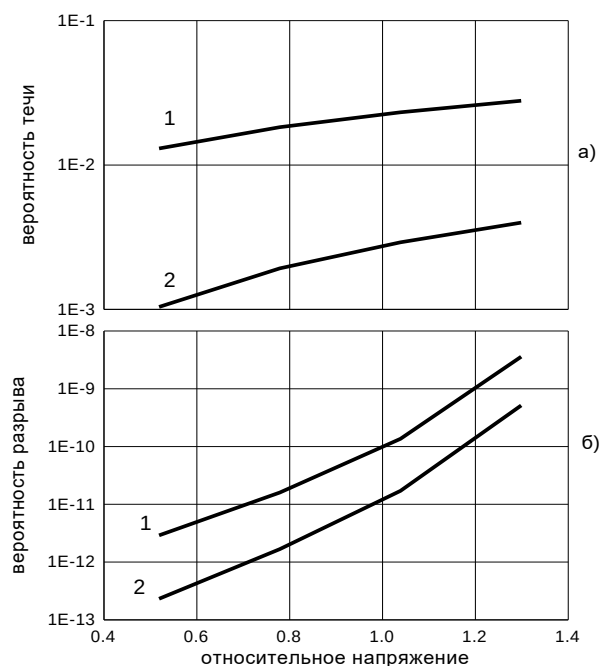


Рис. 5. Зависимости вероятности течи (а) и разрыва (б) от напряжений, измеряемых в долях от номинальных допускаемых напряжения:
кривые 1 – без учета НК и ремонта дефектов; кривые 2 – НК и ремонт дефектов при ППР

На рисунке 6 представлены распределения вероятности течи разного условного диаметра. Кривые 1, 2, 3 и 4 соответствуют относительным напряжениям 1,3; 1,04; 0,78 и 0,53. Нижняя группа кривых получена при условии проведения регулярного НК и ремонта выявленных дефектов. Верхняя группа кривых – при отсутствии НК.

С учетом данных по напряжениям и оценок D_u течи, на основании расчетов, представленных на рис. 6, следует, что для продольных трещин вероятность возникновения ситуации ТПР за 60 лет эксплуатации при регулярном НК не превышает $4 \cdot 10^{-4}$ и достигает $5 \cdot 10^{-3}$ в отсутствие НК.

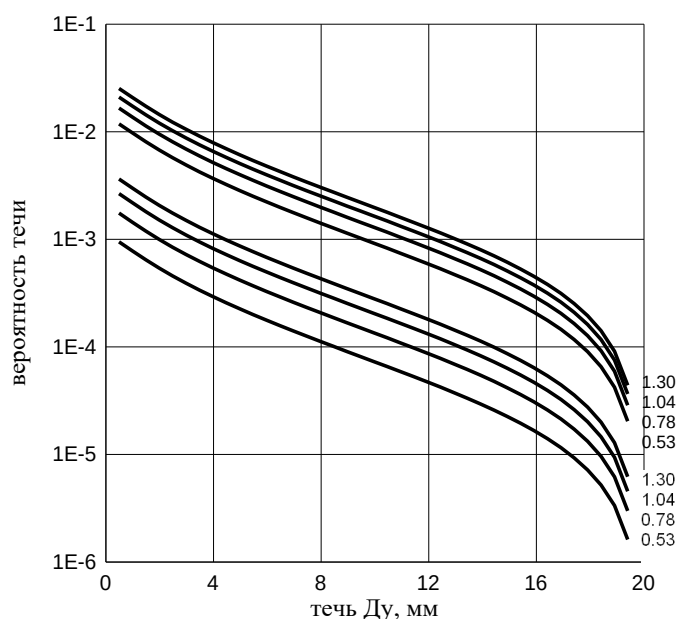


Рис. 6. Продольные трещины. Вероятность течи разных размеров:
цифры кривых – относительные напряжения; нижняя группа кривых получена при условии НК и ремонта выявленных дефектов; верхняя группа кривых – без учета НК и ремонта

Расчет вероятности течи и разрыва при заданной начальной дефектности показал, что для трещин продольной ориентации трубопроводов острого пара:

- отношение вероятности разрыва к вероятности течи за 60 лет эксплуатации меньше 10^{-3} в заданных пределах изменения напряжений,
- вероятность разрыва за 60 лет эксплуатации не превышает $6 \cdot 10^{-10}$.

На рисунках 7 и 8 приведены вероятности образования течи и разрыва трубопроводов острого пара за срок эксплуатации 60 лет для поперечных (кольцевых) трещин.

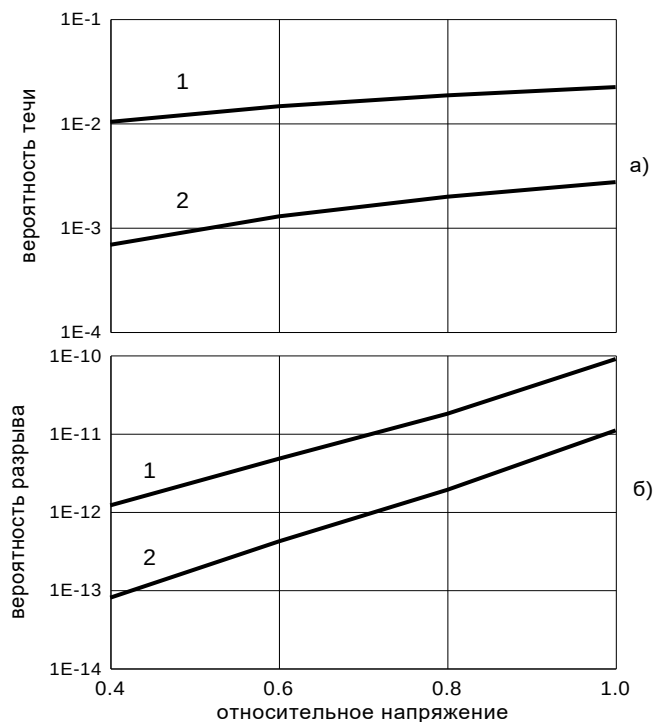


Рис. 7. Зависимости вероятности течи (а) и разрыва (б) от напряжений, измеряемых в долях от номинальных допускаемых напряжений: кривые 1 – НК и ремонт дефектов; кривые 2 – отсутствие НК

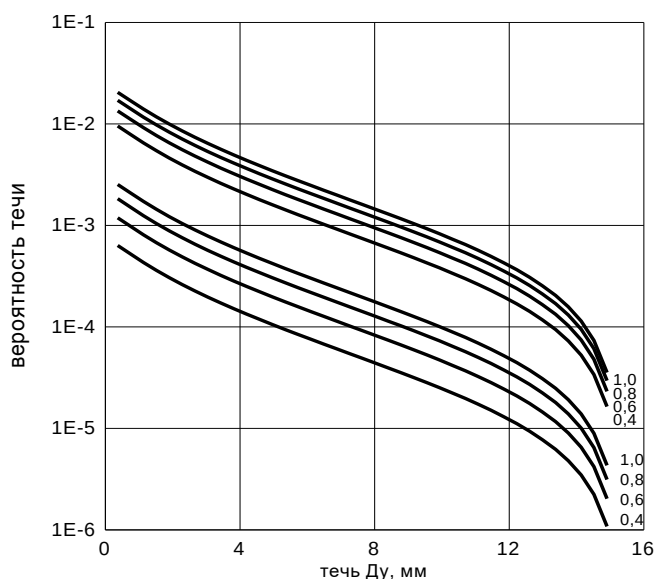


Рис. 8. Кольцевые трещины. Вероятность течи разных размеров: шифры кривых – относительные напряжения; нижняя группа кривых получена при условии НК и ремонта выявленных дефектов; верхняя группа кривых – без учета НК и ремонта

На рисунке 8 представлены распределения вероятности течи разного условного диаметра при относительных напряжениях, равных 1,0; 0,8; 0,6 и 0,4 номинальных допускаемых. Нижняя группа кривых получена при условии проведения НК и ремонта выявленных дефектов. Верхняя группа кривых – при отсутствии НК.

Расчет вероятности течи и разрыва при заданной начальной дефектности показал, что для кольцевых трещин трубопроводов острого пара:

- отношение вероятности разрыва к вероятности течи за 60 лет эксплуатации меньше 10^{-4} в заданных пределах изменения напряжений;
- вероятность разрыва за 60 лет эксплуатации не превышает 10^{-11} .

Из расчетов, представленных на рис. 8, с учетом данных по напряжениям и оценок Ду течи, следует, что для кольцевых трещин вероятность возникновения ситуации ТПР за 60 лет эксплуатации при регулярном НК не превышает $2 \cdot 10^{-4}$ и достигает $3 \cdot 10^{-3}$ в отсутствие НК.

На основании расчетов вероятности течи и разрыва трубопроводов питательной воды и трубопроводов острого пара РУ АЭС-2006 с использованием экспертных данных по постулированной дефектности можно сделать следующие выводы:

- отношение вероятности разрыва к вероятности течи за 60 лет эксплуатации не превышает 10^{-4} при уровнях напряжений, в пределах номинальных допускаемых;
- среднегодовая вероятность гильотинного разрыва по кольцевым дефектам аналогичного по размерам разрыва по продольным дефектам за 60 лет эксплуатации не превышает 10^{-9} ;
- проведение НК с четырехлетним циклом и ремонта выявленных дефектов вероятность образования течи и разрыва приблизительно на порядок;
- вероятностные критерии условия ТПР и ИР, указанные выше, выполняются;
- выполнение этих условий обеспечивает практическое исключение ситуации «разрушение перед течью».

Приведенные результаты получены с использованием характеристик дефектности трубопроводов первого контура. В случае набора статистики по дефектам в трубопроводах второго контура (например, при ППР) возникнет вопрос допустимости этих дефектов с позиции ТПР и ИР. Для решения задачи был построен графический материал на результатах расчетов 384 вариантов для каждого трубопровода в широких интервалах изменения напряжений, числа и длины трещин, при фиксированной начальной глубине постулированных трещин и при условии НК и ремонта дефектов.

Дефектность в районе сварных швов, как правило, выше, чем в основном металле. Поэтому характеристики дефектности постулировались из соображений достаточно полного охвата реально возможной дефектности в эксплуатации и обеспечения необходимых запасов для выполнения условия ТПР:

- начальная глубина дефекта составляла 0,67 толщины стенки трубопровода;
- начальная длина дефектов варьировалась от 20 до 800 мм;
- принималось число дефектов 1, 10, 100 на трубопровод.

Считалось, что все поперечные дефекты расположены в кольцевых швах и распределены статистически равномерно, а продольные дефекты распределены статистически равномерно по продольному шву, при его наличии, или по внутренней поверхности трубопровода.

Пример графиков – рис. 9 и 10.

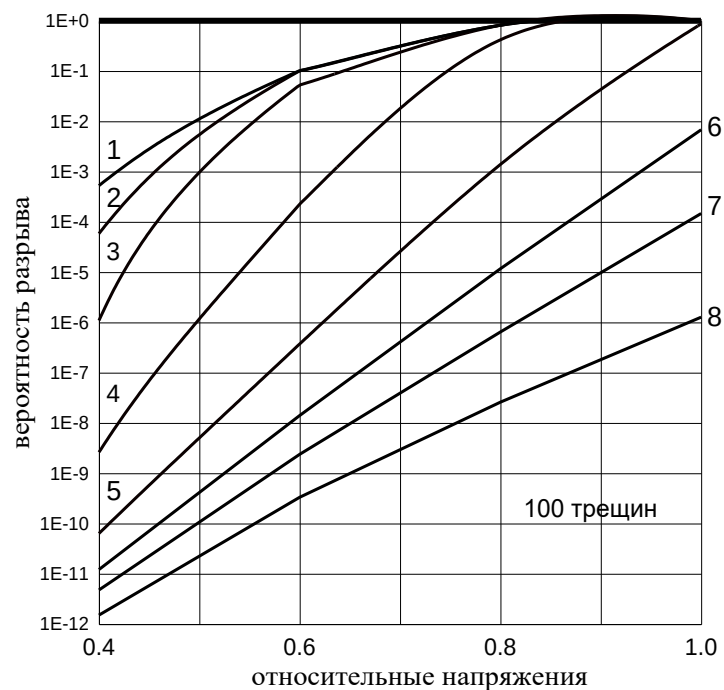


Рис. 9. Трубопровод питательной воды. Зависимость вероятности разрыва от напряжений, измеряемых в долях от номинальных допускаемых напряжений, при заданной длине начальных трещин:

1 – длина трещины 800 мм; 2 – 600 мм; 3 – 400 мм; 4 – 200 мм;
5 – 100 мм; 6 – 60 мм; 7 – 40 мм; 8 – 20 мм.

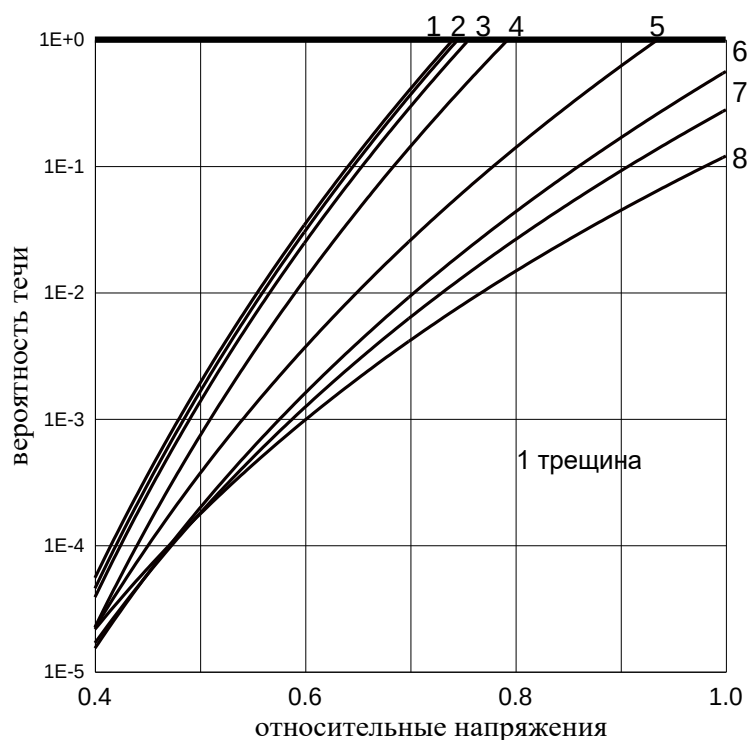


Рис. 10. Трубопровод острого пара. Зависимость вероятности течи от напряжений, измеряемых в долях от номинальных допускаемых напряжений, при заданной длине начальной трещины:

1 – длина трещины 800 мм; 2 – 600 мм; 3 – 400 мм; 4 – 200 мм;
5 – 100 мм; 6 – 60 мм; 7 – 40 мм; 8 – 20 мм.

Для расчета вероятности течи и разрыва при отсутствии НК и ремонта дефектов следует использовать следующую зависимость:

$$P^0 = 1 - (1 - P^{НК})^{\frac{1}{1 - P_{НК}}}, \quad (2)$$

где P^0 – вероятность течи или разрыва в отсутствие контроля и ремонта дефектов,

$P^{НК}$ – вероятность течи или разрыва при условии проведения НК и ремонта дефектов,

$P_{НК}$ – вероятность обнаружения дефекта заданного размера средствами НК.

Начальная глубина постулированного дефекта принималась равной 2/3 толщины стенки трубопровода, т. е. 16 мм для трубопроводов питательной воды и 16,67 мм для паропроводов. В соответствии с принятой кусочно-линейной зависимостью вероятности обнаружения дефектов при НК, $P_{НК} = 0,84$ для трубопроводов питательной воды и $P_{НК} = 0,8534$ для паропроводов.

Используя эти значения $P_{НК}$ и значения $P^{НК}$, представленные на графиках, по формуле (1) получим вероятности разрушения для соответствующих вариантов (по напряжениям, числу дефектов и т. д.) при начальной глубине дефектов, равной 2/3 толщины стенки.

Для оценки вероятности течи и разрыва при глубине постулированных трещин меньше 2/3 толщины стенки трубопровода следует использовать следующую зависимость:

$$P(x) = 1 - \exp \left[-A \left(\frac{1,11 + 5x^4}{0,8 - x} x \right) \right] \quad (3)$$

где $x = \frac{a}{h} \leq \frac{2}{3}$ – относительная глубина дефекта, h – толщина стенки трубопровода,

A – параметр, зависящий от напряжений, механических и прочностных свойств материала, определяется из (3) при $x = 2/3$, $A = -0,095 \ln[1 - P(2/3)]$, $P(2/3)$ – вероятность течи или разрыва при начальной глубине дефекта в 2/3 от толщины стенки.

Таким образом, графический материал и формулы (2) и (3) позволяют оценивать вероятности течи и разрыва с учетом и без учета НК в зависимости таких характеристик, как напряжения, число и размеры дефектов в диапазоне изменения этих характеристик, охватывающем практически все возможные в эксплуатации значения указанных параметров.

Список литературы

- 1 НП-001-15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций ОПБ – 2016 г.
- 2 SSG-3. Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants. IAEA publications. 2014
- 3 SSG-4. Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants. IAEA publications. 2014
- 4 Аннотация программы МАВР-2.1. ВАНТ, сер. Физика ядерных реакторов. 1995. вып. 3.

- 5 Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля. ПН АЭ Г-7-010-89. Москва, Энергоатомиздат, 1991.
- 6 S. Crutzen, H. Herkenrath & other. The contribution of PISC to NDT performance demonstration. In: the CEC/OECD Programme on the inspection of Steel Components. Vol.1. No 4. April. 1993.
- 7 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-89. Москва, Энергоатомиздат, 1989.