ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 58328— 2018

ТРУБОПРОВОДЫ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Концепция «течь перед разрушением»

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2018

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Акционерным обществом «Концерн Росэнергоатом»

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 322 «Атомная техника»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 декабря 2018 г. № 1133-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Стандартинформ, оформление, 2018

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения ... 1
2 Нормативные ссылки ... 1
3 Термины и определения ... 2
4 Сокращения ... 4
5 Основные положения ... 4
5.1 Назначение и цели ... 4
5.2 Применение методологии «течь перед разрушением» ... 4
6 Порядок обоснования применимости концепции «течь перед разрушением» ... 5
6.1 Общие требования ... 5
6.2 Оценка эффективности системы контроля течи ... 5
6.3 Техническое обоснование применимости концепции «течь перед разрушением» ... 6
7 Детерминистическое обоснование применимости концепции «течь перед разрушением» ... 6
7.1 Общие требования ... 6
7.2 Формирование исходных данных ... 6
7.3 Расчетная процедура обоснования применимости концепции «течь перед разрушением» ... 8
7.4 Оценка выполнения условий применимости концепции «течь перед разрушением» ... 10
7.5 Особенности применения методологии концепции «течь перед разрушением» на стадиях проектирования и эксплуатации ... 11
8 Документирование и отчетность ... 11
Приложение А (обязательное) Оценка применимости концепции «течь перед разрушением» ... 13
Приложение Б (обязательное) Требования к системам контроля течи ... 15
Приложение В (обязательное) Исходные данные для расчета ... 17
Приложение Г (рекомендуемое) Расчет величины подрастания дефекта при циклическом нагружении ... 20
Приложение Д (рекомендуемое) Анализ стабильности трещин ... 23
Приложение Е (рекомендуемое) Определение размеров выявляемой трещины течи ... 30
Приложение Ж (рекомендуемое) Метод граничных расчетных кривых ... 38
Приложение И (рекомендуемое) Обоснование целостности трубопроводов при наличии эксплуатационных дефектов ... 40
Библиография ... 45

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ТРУБОПРОВОДЫ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Концепция «течь перед разрушением»

Piping of nuclear power plants. «Leak before break» concept

Дата введения — 2019—01—01

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт устанавливает критерии, определяющие возможность применения концепции «течь перед разрушением» к трубопроводам атомных станций, а также требования к обоснованию применимости этой концепции для трубопроводов контура теплоносителя реактора проектируемых, сооружаемых и действующих атомных станций.

1.2 Настоящий стандарт распространяется на трубопроводы с водяным теплоносителем (включая сварные соединения приварки трубопроводов к оборудованию), удовлетворяющие следующим условиям:

1) наружный диаметр трубопровода не менее 150 мм;

2) рабочее давление и рабочая температура в режимах нормальной эксплуатации не ниже 1,9 МПа или не ниже 95 °С, соответственно;

3) значение ударной вязкости металла KCV (основного и сварных соединений) на образцах вида V по ГОСТ 9454 при температуре нормальной эксплуатации не менее 80 Дж/см^2 в исходном состоянии и/или не менее 60 Дж/см^2 на конец срока оценки.

1.3 Перечень трубопроводов, входящих в состав контура теплоносителя реактора для каждого блока атомной станции, определяет генеральный проектировщик блока с участием главного конструктора реакторной установки.

1.4 По решению разработчика проекта атомной станции настоящий стандарт может быть использован для обоснования применимости концепции «течь перед разрушением» к трубопроводам, не входящим в контур теплоносителя реактора атомной станции в случае удовлетворения условий пункта 1.2.

1.5 Положения настоящего стандарта могут распространяться на исследовательские ядерные установки при условии включения требований стандарта в проектную и конструкторскую документацию.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 9454 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах

ГОСТ Р 8.563 Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений

ГОСТ Р 8.654 Государственная система обеспечения единства измерений. Требования к программному обеспечению средств измерений. Основные положения

ГОСТ Р 8.932 Государственная система обеспечения единства измерений. Требования к методикам (методам) измерений в области использования атомной энергии. Основные положения

ГОСТ Р 50.04.03 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме испытаний. Аттестационные испытания технологий сварки (наплавки)

Издание официальное

ГОСТ Р 50.04.07 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме испытаний. Аттестационные испытания систем неразрушающего контроля

ГОСТ Р 50.05.15 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Неразрушающий контроль. Термины и определения

ГОСТ Р 51901.1 Менеджмент риска. Анализ технологических систем

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ Р 50.05.15, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **анализ механики разрушения:** Расчет, который связывает значения напряжений в окрестности вершины трещины, возникающих от эксплуатационных нагрузок в трубопроводах вследствие внешних и внутренних воздействий, с размером трещины, которая могла бы вызвать ее стабильный или нестабильный рост, или определяет площадь раскрытия сквозной трещины.

3.2 **анализ стабильности трещины:** Определение условий, при которых расчетная нагрузка, приложенная к трубопроводу с постулируемой трещиной, еще не вызывает нестабильное (происходящее без увеличения нагрузки) быстрое распространение трещины.

3.3 **верификация:** Процесс, имеющий целью определить, правильно ли предсказывают расчетная модель, метод или программное средство, применяемые в технических анализах, искомое решение посредством сравнения полученных результатов с результатами проведенных различных проверочных процедур, таких как прямые испытания или расчеты с использованием аттестованных программных средств или обоснованные круговые тестовые расчеты.

3.4 **деградация:** Необратимые негативные структурные изменения конструкционных материалов или самих конструкций оборудования и трубопроводов, происходящие под воздействием механических нагрузок, температуры и/или окружающей среды.

3.5 **интенсивность течи:** Расход теплоносителя, приведенный к единице площади истечения и времени.

3.6 **контрольная зона:** Любая зона (сечение-кандидат) трубопровода, характеризуемая неблагоприятным сочетанием максимальных растягивающих напряжений и минимальных прочностных свойств материала.

3.7 **коэффициенты запаса:** Необходимые для подтверждения выполнения условий «течь перед разрушением» расчетные коэффициенты запаса на чувствительность системы контроля течи и длину постулируемой сквозной трещины по отношению к ее предельной длине, учитывающие неопределенности в обеспечении надежного обнаружения течи, а также при определении максимальной расчетной нагрузки, расчетных характеристик свойств материала, описании морфологии трещины и погрешностей используемых методов расчета.

3.8 **максимальная проектная нагрузка;** МПН: Нагрузка, вызывающая максимальные, нормальные к плоскости постулируемой трещины напряжения в контрольной зоне трубопровода при наиболее неблагоприятном расчетном режиме нагружения, учитываемая при проектировании (конструировании) трубопровода.

3.9 **максимальная расчетная нагрузка;** МРН: Суммарная нагрузка, вызывающая максимальные, нормальные плоскости постулируемой трещины напряжения в контрольной зоне трубопровода при наиболее неблагоприятной комбинации расчетных режимов нагружения, внешних и внутренних силовых воздействий.

3.10 **методология «течь перед разрушением»:** Техническое доказательство методами механики разрушения и термогидравлического анализа реализации сценария «течь перед разрушением»

применительно к рассматриваемому трубопроводу, означающего, что даже в случае, когда скрытый начальный дефект (поверхностная трещина, анализируемая методами механики разрушение) способен каким-то образом при эксплуатации развиваться по толщине стенки трубопровода и превратиться в сквозную трещину, то эта трещина произведет обнаруживаемую течь в режиме нормальной эксплуатации, оставаясь стабильной при максимальной расчетной нагрузке.

3.11 **микрокампания (блока):** Период работы блока атомной станции между ближайшими во времени остановками блока для частичной или полной перегрузки топлива и/или технического обслуживания и ремонта.

3.12 **морфология трещины:** Геометрические особенности и характеристики сквозной трещины, влияющие на скорость истечения теплоносителя через нее, такие как форма, степень извилистости и ветвление трещины, шероховатость смоченной поверхности трещины, отклонение траектории потока теплоносителя внутри стенки от прямолинейного направления.

3.13 **напряжения вторичные:** Контролируемые смещениями и самоуравновешенные по сечению напряжения (температурные, местные, остаточные), которые не могут вызвать пластическое разрушение элемента конструкции, но влияют на накопление неупругих деформаций, образование и подрастание трещин в процессе эксплуатации.

3.14 **напряжения первичные:** Напряжения, обусловленные приложенными механическими нагрузками (давление, силы и моменты) и сейсмическим воздействием, которые могут вызвать пластическое разрушение элемента конструкции.

3.15 **начальный дефект:** Условный одиночный дефект в виде поверхностной полуэллиптической трещины, постулируемый в контрольной зоне трубопровода.

3.16 **нормальная нагрузка:** Нормальная к плоскости трещины суммарная нагрузка, определяемая по правилу алгебраического суммирования нагрузок от давления, веса и температуры в режиме нормальных условий эксплуатации.

3.17 **повреждение:** Событие, заключающиеся в нарушении исправного состояния объекта, вследствие механического, физического или химического воздействия на него, при сохранении работоспособного состояния и приводящее к уменьшению ее ресурса.

3.18 **постулируемый дефект (трещина):** Сквозная или поверхностная трещина заданных размеров, наличие которой предполагается в контрольной зоне трубопровода.

3.19 **предельная пластическая нагрузка;** ППН: Нагрузка, при достижении которой сечение трубопровода с трещиной целиком охвачено пластическими деформациями, а напряжения в нем достигают напряжения пластической нестабильности материала.

3.20 **предельный размер трещины:** Рассчитанный методами механики разрушения размер трещины нормального отрыва: [поверхностной (длина, глубина) или сквозной (длина), постулируемой в контрольной зоне трубопровода], при котором происходит ее нестабильный рост при максимальной расчетной нагрузке.

3.21 **расход течи:** Массовый расход (или объемный расход, приведенный к нормальным условиям по ГОСТ 2939) теплоносителя через сквозную трещину в трубопроводе.

3.22 **система контроля течи;** СКТ: Совокупность технических устройств, элементов, приборов, датчиков, обеспечивающих обнаружение течи по заданному физическому параметру, а также возможность с требуемой точностью определять ее месторасположение и расход теплоносителя.

3.23 **течь идентифицируемая:** Утечка теплоносителя через подвижные и неподвижные уплотнения в границах давления контура теплоносителя реактора, местоположение которых заранее определено.

3.24 **течь неидентифицируемая:** Утечка теплоносителя (рабочей среды) через сквозную трещину в трубопроводе, возникающая под воздействием перепада давления по толщине стенки и не имеющая заранее определенного местоположения.

3.25 **трещина с выявляемой течью:** Сквозная стабильная трещина в трубопроводе, размер которой достаточен для ее обнаружения системой контроля течи с проектной чувствительностью.

3.26 **трубопроводная система** (*трубопровод*): Совокупность деталей и сборочных единиц из труб с относящимися к ним элементами (коллекторами, тройниками, переходами, отводами, арматурой и т. п.), предназначенная для транспортирования рабочей среды от одного оборудования к другому.

3.27 **целостность элемента:** Состояние элемента, для которого выполнены заданные технические критерии надежности с точки зрения прочности, сопротивления разрушению и плотности.

3.28 **чувствительность системы контроля течи:** Нижний предел диапазона измерения расхода течи установленного для системы контроля течи.

4 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

АС — атомная станция;
ВХР — водно-химический режим;
ГРК — граничная расчетная кривая;
ДУ — диаметр условный;
КИН — коэффициент интенсивности напряжений;
КМПЦ — контур многократной принудительной циркуляции;
КСРТ — коррозионно-статический рост трещины;
ЛРН — локальное разрушающее напряжение;
МКРПН — межкристаллитное коррозионное растрескивание под напряжением;
МКЭ — метод конечных элементов;
МРЗ — максимальное расчетное землетрясение;
НК — неразрушающий контроль;
НН — нормальная нагрузка в режиме нормальных условий эксплуатации;
ННУЭ — нарушение нормальных условий эксплуатации;
НСС — назначенный срок службы;
НУЭ — нормальные условия эксплуатации;
РБМК — реактор большой мощности канальный;
РУ — реакторная установка;
СКТ ВУ — система контроля течи верхнего уровня;
СС — сварное соединение;
ТПР — течь перед разрушением;
УЗК — ультразвуковой контроль;
ФНП — федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии.

5 Основные положения

5.1 Назначение и цели

5.1.1 Применение концепции ТПР для трубопроводов контура теплоносителя реактора, проектируемых, сооружаемых и действующих, блоков АС, обусловлено требованиями [1] (пункты 3.3.3, 3.4.3.2), [2] (пункт 2.5.13), [3] (пункт 52), а также необходимостью компенсации отсутствия герметичного ограждения РУ на блоках АС, имеющих отклонения от требований [4] (пункт 21).

5.1.2 Концепция ТПР направлена на предотвращение разрывов трубопроводов контура теплоносителя реакторов АС (атомная энергетическая установка по области применения [3]) полным сечением и состоит в обосновании того факта, что разрыву трубопроводов контура теплоносителя предшествует образование стабильной сквозной трещины, выявляемой предусмотренными средствами контроля течи[1)] теплоносителя, обеспечивающими своевременное обнаружение сквозной трещины и перевод реакторной установки в безопасное состояние до достижения трещиной критических размеров.

5.1.3 Предпосылками для применения ТПР к трубопроводам контура теплоносителя (далее — трубопроводов), обеспечивающими также их конструкционную целостность на весь срок эксплуатации, являются:

- принцип А — принцип качества, достигаемый на стадиях проектирования, изготовления и монтажа систем трубопроводов;
- принцип Б — принцип контролируемой эксплуатации;
- принцип В — принцип рассмотрения всех возможных условий нагружения и эксплуатации;
- принцип Г — принцип расчетно-экспериментального подтверждения ТПР.

Выполнение первых трех принципов (предпосылок), рассмотренных в пунктах А.3–А.5 (приложение А), базовыми из которых являются принципы А и Б, позволяет применить методологию ТПР к рассматриваемому трубопроводу.

5.2 Применение методологии «течь перед разрушением»

5.2.1 Соответствие трубопроводов положениям концепции ТПР, указанным в 5.1.2, должно подтверждаться техническим обоснованием выполнимости принципа Г (см. 5.1.3).

---

1) В дальнейшем под термином «течь» подразумевается неидентифицируемая течь теплоносителя через сквозную трещину, которая заранее не имеет специфического места расположения.

5.2.2 Для применения методологии ТПР требуется обосновать, что:

а) дополнительные (специфические) нагрузки, косвенные воздействия или любые значимые механизмы деградации с учетом реализованных компенсирующих мероприятий не могут вызвать разрушение трубопроводов или неконтролируемое возникновение и развитие трещин, приводящих к внезапному разрыву трубопроводов;

б) отдельные СКТ являются достаточными, аппаратно обеспеченными, обладают требуемой чувствительностью и используют различные физические принципы выявления течи теплоносителя реактора;

в) с точки зрения механики разрушения существует запас на обнаружение сквозной трещины, стабильной при МРН.

5.2.3 К дополнительным специфическим нагрузкам, в том числе внутренним, относятся гидроудары, температурные нагрузки от стратификации, нагрузки от блокировки или выхода из строя опорных конструкций.

5.2.4 К значимым механизмам деградации относятся высоко- и малоцикловая усталость, коррозия, эрозия, коррозионное растрескивание под напряжением, эрозионно-коррозионный износ, растрескивание под действием окружающей среды, охрупчивание металла.

5.2.5 Методология ТПР может быть применена для трубопроводов, при эксплуатации которых предусмотрены меры, указанные в А.5.4–А.5.6 (приложение А), минимизирующие влияние возможных механизмов деградации и воздействий специфических нагрузок на трубопроводы, обеспечивая целостность границ давления контура теплоносителя при эксплуатации.

5.2.6 Соответствие требованиям, установленным в 5.1.3, 5.2.1—5.2.2, 5.2.5 и обеспечение конструкционной целостности трубопроводов при эксплуатации позволяют обосновать внедрение концепции ТПР на блоки АС.

Примечание — Применение концепции ТПР на блоках АС позволяет:

- не рассматривать последствия локальных динамических воздействий, относящихся к маловероятным постулируемым разрывам и большим течам трубопроводов контура теплоносителя реактора, таким как волны давления внутри оборудования и трубопроводов, воздействия на близко расположенные системы, оборудование и трубопроводы в виде реактивных усилий, биений и соударений труб, летящих осколков, а также воздействия на опоры оборудования и трубопроводов, и окружающие строительные конструкции;

- внести изменения в анализ последствий отказов конкретного оборудования при постулировании исходного события, связанного с разрывом трубопровода контура теплоносителя реактора, вместо которого становится возможным рассматривать исходное событие с постулируемой ограниченной течью.

6 Порядок обоснования применимости концепции «течь перед разрушением»

6.1 Общие требования

6.1.1 Обоснование применимости концепции ТПР для рассматриваемых систем трубопроводов включает в себя: этап 1 — предварительную оценку их пригодности с точки зрения обеспечения принципов А–В (см. 5.1.3) с учетом требований 1.2 и перечислений а) и б) 5.2.2 и этап 2 — техническое доказательство применимости подхода ТПР на основе методологии ТПР после получения положительных результатов предварительной оценки пригодности на этапе 1.

6.1.2 Состав работ, выполняемых на этапе 1, представлен в приложении А.

6.1.3 Требования к оценке эффективности проектной или уже установленной СКТ представлены в 6.2, общие и технические требования к СКТ — в приложении Б.

6.1.4 Состав работ, выполняемых на этапе 2 на основе расчетной процедуры (см. раздел 7), представлен в 6.3, требования к исходным данным — в приложении В, описание методов механики разрушения — в приложениях Г–Д, методов термогидравлического анализа — в приложении Е, метода граничных расчетных кривых — в приложении Ж.

6.2 Оценка эффективности системы контроля течи

6.2.1 Помещения, в которых располагаются кандидатные трубопроводы для применения концепции ТПР, должны быть оснащены СКТ в соответствии с проектной документацией.

6.2.2 Класс безопасности СКТ, в соответствии с [1], назначается главным конструктором РУ и согласовывается с генпроектировщиком блока АС.

6.2.3 В проектной документации на СКТ должны быть приведены: описание применяющихся способов определения утечек теплоносителя, чувствительность, время срабатывания и минимальная величина утечки, которая должна быть обнаружена с помощью применяемых способов.

6.2.4 Кроме выполнения общих требований к оснащению средствами СКТ помещений блока АС, в которых расположены элементы контура теплоносителя реактора (например, по [1] 3.4.3.2 и [2] 2.5.13), необходимо выполнить специфические требования к СКТ, представленные в приложении Б.

6.2.5 В технологическом регламенте и инструкции по эксплуатации блока АС должен быть определен порядок действий оперативного персонала при выявлении признаков течи по показаниям СКТ с учетом требований [3] [перечисление а) 252].

6.3 Техническое обоснование применимости концепции «течь перед разрушением»

6.3.1 Техническое доказательство применения положений концепции ТПР с позиций механики разрушения на основе расчетной процедуры (см. раздел 7) должно подтвердить достаточные коэффициенты запаса по отношению к длине стабильной при МРН сквозной трещины, через которую происходит утечка теплоносителя, длины сквозной трещины, надежно фиксируемой СКТ в режиме НУЭ (с коэффициентом запаса на чувствительность СКТ).

6.3.2 Дополнительно к 6.3.1 рекомендуется выполнить испытания на разрушение полноразмерных моделей труб, результаты которых должны продемонстрировать вязкий характер их разрушения.

6.3.3 Экспериментальное подтверждение поведения по сценарию ТПР не является обязательным в случаях ранее выполненных испытаний на моделях-аналогах, а также при условии демонстрации достаточных коэффициентов запаса по результатам расчетного детерминистического обоснования согласно требованиям 6.3.1.

7 Детерминистическое обоснование применимости концепции «течь перед разрушением»

7.1 Общие требования

7.1.1 Детерминистическое обоснование применимости концепции ТПР для проектируемых, сооружаемых и действующих блоков АС выполняется индивидуально для каждой системы трубопроводов или петли трубопровода от одного его неподвижного конца (жесткой опоры, заделки, проходки, патрубка оборудования) до другого, включая швы приварки трубопроводов к патрубкам оборудования.

7.1.2 Расчетное обоснование проводится по процедуре, изложенной в 7.3. Для подтверждения выполнения условий ТПР согласно 6.3.1 вводятся коэффициенты запаса на чувствительность СКТ и размеры постулируемых трещин.

7.2 Формирование исходных данных

7.2.1 Для трубопроводов, потенциально пригодных для применения методологии ТПР, формируют исходные данные, необходимые для расчетного обоснования ТПР, включающие в себя:

- конструктивные и технологические особенности;
- условия эксплуатации и нагружения;
- характеристики материалов;
- чувствительность СКТ;
- морфологические параметры трещины.

Перечень исходных данных приведен в приложении В.

7.2.2 Для вводимых в эксплуатацию и действующих блоков необходимо проверить соответствие фактических исходных данных данным, указанным в проектно-конструкторской документации.

7.2.3 Оцениваемые конструктивные и технологические особенности представлены в В.1 (приложение В), условия эксплуатации и нагружения — в В.2.1 (приложение В), характеристики материалов — в В.3 (приложение В), чувствительность СКТ — в Б.2.5 (приложение Б), морфологические параметры трещины — в Е.2.4 (приложение Е).

7.2.4 В соответствии с расчетной процедурой необходимо определить значения номинальных напряжений S_n (расчетные напряжения в трубопроводе без учета концентратов напряжений) при НН и максимальных напряжений S_{max} при МРН для каждого сечения трубопровода в соответствии с В.2.2—В.2.10 (приложение В).

7.2.5 Следует определить контрольные зоны трубопровода, где возможно появление и развитие трещин при эксплуатации. К ним относятся максимально нагруженные сварные швы в сочетании с минимальными прочностными характеристиками материала.

При этом из дальнейшего рассмотрения должны быть исключены зоны, для которых номинальные напряжения S_n, действующие по нормали к плоскости сварных швов, менее 50 МПа.

7.2.6 В контрольных зонах с наихудшей комбинацией максимальных осевых или кольцевых напряжений S_{max} и минимальных свойств материала, дающих в результате наименьшую длину предельной сквозной трещины при МРН, постулируют сквозную трещину $2c_{LD}$ и начальный дефект в виде поверхностный трещины полуэллиптической формы глубиной a_0, протяженностью $2c_0$.

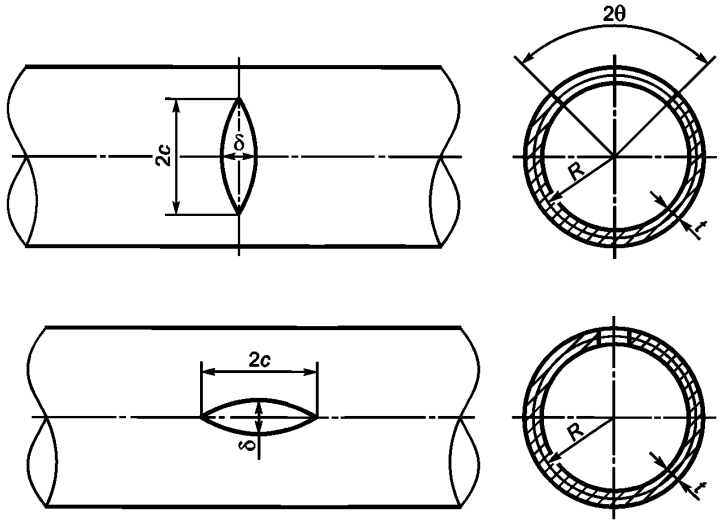
Схемы расположения расчетных дефектов с указанием характерных размеров и условных обозначений приведены на рисунках 1 — 3.

7.2.7 Сквозную трещину размером $2c_{LD}$ и начальный дефект полуэллиптической формы (a_0, $2c_0$) определяют как одиночную окружную или осевую трещину и располагают в поперечных и продольных плоскостях сечения трубы по нормали к действию максимальных растягивающих напряжений S_{max}.

7.2.8 Размер сквозной трещины $2c_{LD}$ определяется по постулируемому расходу течи из нее Q_{LD} в режиме НУЭ, обнаруживаемой СКТ с установленной чувствительностью Q_0 в соответствии с Б.2.5 (приложение Б), где величина установленной чувствительности Q_0 =1,9 — 3,8 кг/мин.

Расход течи Q_{LD} определяется введением запаса n_Q на чувствительность СКТ: $Q_{LD} = n_Q \cdot Q_0$.

7.2.9 При расчетах размеров циклического подрастания дефекта в качестве начального дефекта принимают поверхностную полуэллиптическую усталостную трещину (a_0, $2c_0$) на внутренней поверхности трубы глубиной $a_0 = 0{,}2\,t$, длиной $2c_0 = 6a_0$ с соотношением полуосей $a_0/c_0 = 1/3$, где t — толщина стенки трубы, но размером не менее 4×24 мм и не более 8×48 мм.



δ — раскрытие берегов сквозной трещины; $2c$ — длина трещины; θ — угловой размер трещины; R — средний радиус трубы; t — толщина стенки

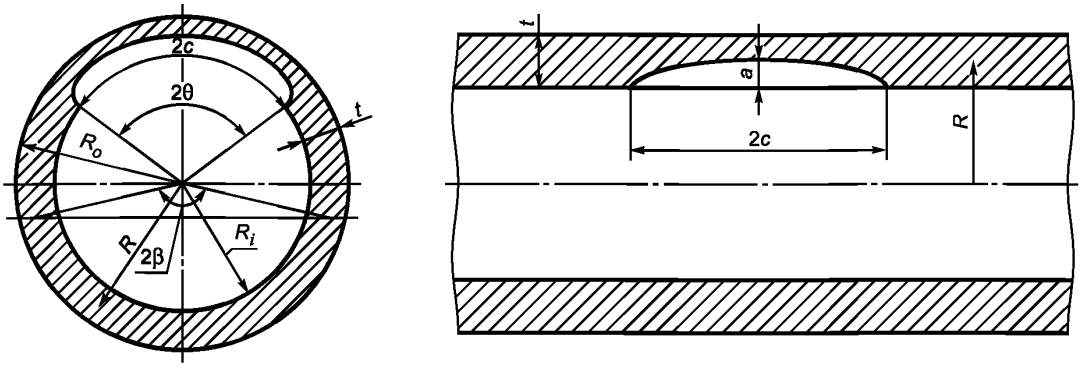
Рисунок 1 — Поперечная (кольцевая) и продольная (осевая) сквозная трещина в трубе с указанием характерных размеров

7.2.10 Для выбранных согласно 7.2.5 контрольных зон в расчетных сечениях анализируемого трубопровода формируют группы циклов нагружения до конца установленного срока эксплуатации в соответствии с В.2.11 (приложение В), определяют характеристики материала [константы C_f и m_f согласно перечислению а) В.3.2 (приложение В)], устанавливающие зависимость циклического подрастания трещины для заданных параметров нагружения и среды.

При формировании групп циклов следует придерживаться последовательности циклического нагружения при переходных режимах эксплуатации до конца установленного срока эксплуатации.

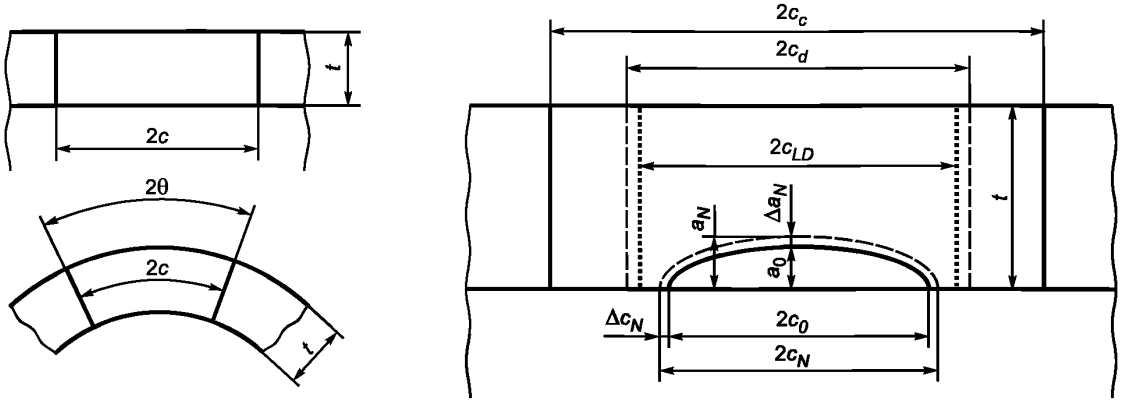
7.2.11 Оценивают суммарное число циклов нагружения за расчетный период эксплуатации N и размахи эффективного КИН I типа ΔK_{eff} в каждом цикле в соответствии с Г.10 (приложение Г).

7.2.12 Расчет величины циклического подрастания постулируемого дефекта (a_0, $2c_0$) выполняют, если суммарное число циклов N превышает $2 \cdot 10^4$ при ΔK_{eff} от 10 МПа$\sqrt{\text{м}}$ и выше.



β — угол, характеризующий положение нейтральной оси; R_i — внутренний радиус трубы; R_o — наружный радиус трубы

Рисунок 2 — Схема поперечной и продольной поверхностной трещины в сечении трубы с указанием характерных размеров



$2c_c$ — предельная длина сквозной трещины при МРН; $2c_d$ — допускаемая длина сквозной трещины; $2c_{LD}$ — размер обнаруживаемой трещины по расходу Q_{LD}; a_0, $2c_0$ — размеры начального дефекта; Δa_N, Δc_N — величины подрастания начального дефекта при циклическом нагружении; a_N, $2c_N$ — размеры трещины в результате циклического подрастания начального дефекта

Рисунок 3 — Схема сквозной трещины и поверхностного дефекта

7.3 Расчетная процедура обоснования применимости концепции «течь перед разрушением»

7.3.1 Расчетное обоснование ТПР базируется на процедуре, предполагающей постулирование в контрольных зонах кольцевых и продольных трещин: начального поверхностного дефекта (a_0,$2c_0$) и сквозной трещины $2c_{LD}$ с обнаруживаемой течью приведенных на рисунке 3.

7.3.2 Согласно процедуре, приведенной в виде блок-схемы на рисунке 4, необходимо продемонстрировать выполнение следующих условий:

- величина циклического подроста начального дефекта (a_0, $2c_0$) за весь период эксплуатации, определенная с учетом условий, указанных в пункте 7.2.13, будет в пределах допускаемых значений;
- постулируемая сквозная трещина $2c_{LD}$, течь через которую составляет величину Q_{LD} при НН, должна быть обнаружена СКТ с чувствительностью Q_0 в режиме НУЭ, оставаясь стабильной при МРН.

Выполнение данных условий определяется расчетными критериями ТПР, использующими реалистичные коэффициенты запаса.

7.3.3 Расчетное обоснование проводится в следующем порядке:

а) оценивают исходные данные согласно 7.2.1—.2.3;

б) последовательно выполняют требования 7.2.4—.2.12;

в) в каждой контрольной зоне постулируют начальный поверхностный дефект (a_0,$2c_0$) и сквозную трещину $2c_{LD}$;

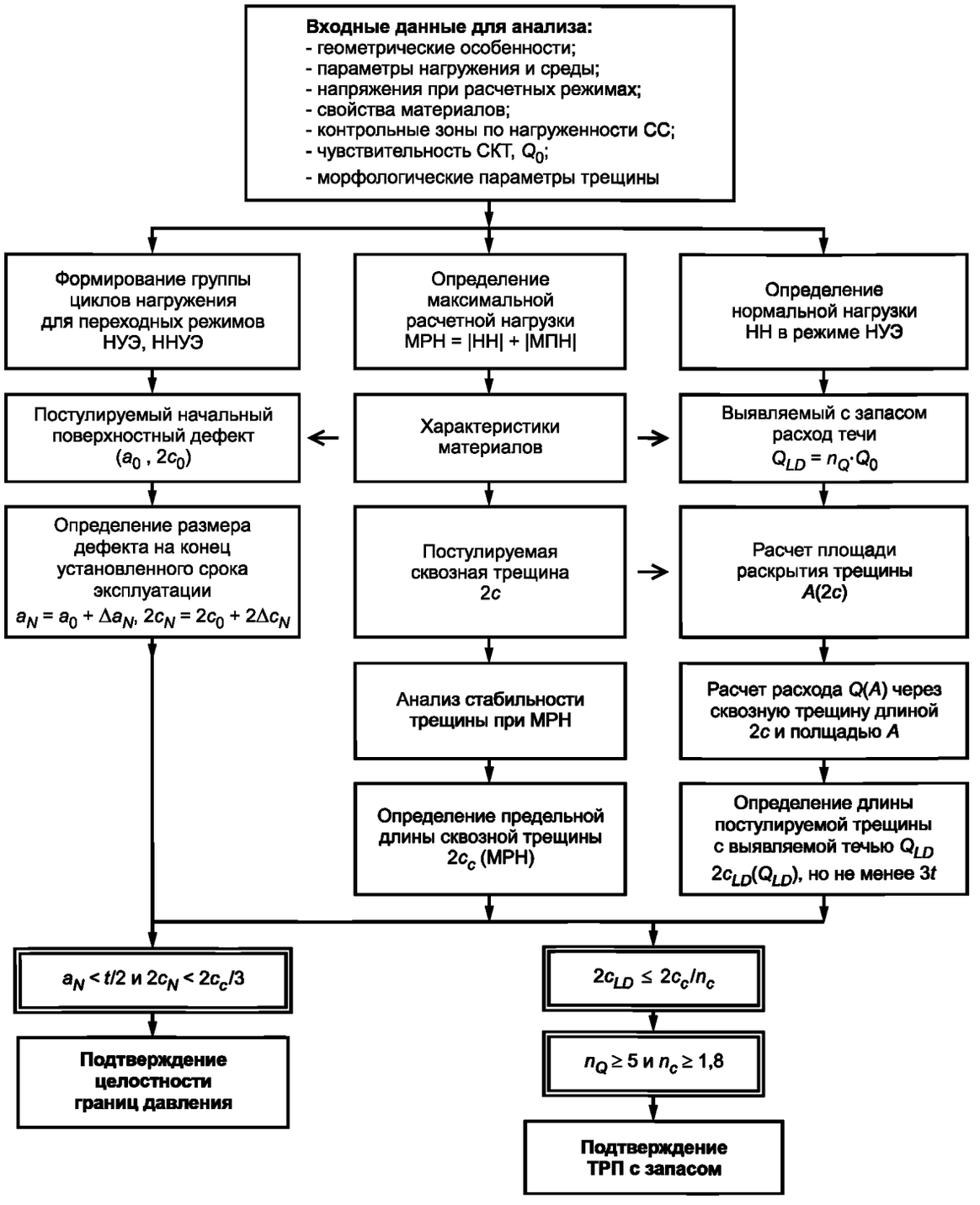


Рисунок 4 — Блок-схема расчетного обоснования целостности границ давления и течи перед разрушением для трубопроводов

г) рассчитывают величины подроста Δa_N и $2\Delta c_N$ начального дефекта (a_0, $2c_0$) на конец НСС при циклическом нагружении в соответствии с 7.2.11—7.2.12 и приложением Г (с учетом 7.2.13). Определяют финальные размеры дефекта (a_N,$2c_N$) на конец НСС: глубина $a_N = a_0 + \Delta a_N$, длина $2c_N = 2c_0 + 2\Delta c_N$ (см. рисунок 3);

д) рассчитывают предельную длину сквозной трещины $2c_c$ при МРН. Рекомендуемые методы расчета приведены в приложении Д;

е) определяют длину постулируемой сквозной трещины с выявляемой течью $2c_{LD}$ при НН в режиме НУЭ.

Расчет величины $2c_{LD}$ выполняют в следующей последовательности:

1) рассчитывают площадь раскрытия сквозной трещины A ($2c$) в зависимости от ее длины $2c$ согласно Е.1 (приложение Е);

2) рассчитывают расход теплоносителя Q ($2c$) через сквозную трещину в зависимости от ее длины $2c$ и площади раскрытия A ($2c$) согласно Е.2 (приложение Е);

3) определяют расчетную длину постулируемой трещины течи $2c_{LD}$ из условия $Q(2c_{LD}) = Q_{LD} = n_Q \cdot Q_0$.

Если размер $2c_{LD} < 3t$, то принимают $2c_{LD} = 3t$ (где t — толщина стенки);

ж) проводят анализ стабильности поверхностной трещины (a_N,$2c_N$) и сквозной трещины с обнаруживаемой течью $2c_{LD}$ и оценивают выполнение условий ТПР в соответствии с 7.4.1 — 7.4.3.

7.4 Оценка выполнения условий применимости концепции «течь перед разрушением»

7.4.1 Целостность границ давления обеспечена, если в результате циклического подрастания начального поверхностного дефекта (a_0,$2c_0$) за весь период эксплуатации его размеры a_N и $2c_N$ не превысят значений:

$$a_N = a_0 + \Delta a_N \le t/2, \quad (1)$$

$$2c_N = 2c_0 + 2\Delta c_N \le 2c_c/3, \quad (2)$$

где Δa_N и Δc_N — соответственно величины подрастания размеров начального дефекта в глубину и длину за один НСС при заданных условиях циклического нагружения (рисунок 3), мм.

7.4.2 Стабильность постулируемой сквозной трещины $2c_{LD}$ с выявляемой течью $Q_{LD} = n_Q \cdot Q_0$ обеспечена при выполнении условия

$$2c_{LD} \le 2c_c / n_c, \quad (3)$$

где $2c_c$ — предельная длина сквозной трещины при МРН, мм;

n_Q — коэффициент запаса на чувствительность Q_0 проектной СКТ;

n_c — коэффициент запаса на размер сквозной трещины.

Если длина сквозной трещины течи $2c_{LD}$, рассчитанная по расходу утечки Q_{LD} при НН в режиме НУЭ меньше $3t$, то принимают $2c_{LD} = 3t$.

7.4.3 Для данной расчетной процедуры рекомендуется применять следующие коэффициенты запаса:

- коэффициент запаса не менее 5 на чувствительность СКТ:

$$n_Q = Q_{LD}/Q_0 \ge 5; \quad (4)$$

- коэффициент запаса не менее 1,8 на длину постулируемой сквозной трещины с выявляемой течью Q_{LD}

$$n_c = 2c_c / 2c_{LD} \ge 1{,}8. \quad (5)$$

7.4.4 При выполнении критериев (1) – (5) анализируемый трубопровод удовлетворяет расчетным условиям применимости ТПР.

7.4.5 В случае невыполнения условия (1) по отношению к глубине полуэллиптической трещины a_N необходимо определить предельную глубину поверхностной трещины a_c при длине трещины $2c_N$, приводящей к появлению локальной течи при $a_N = a_c$.

Анализ локальной нестабильности перемычки между фронтом трещины и тыльной поверхностью трубы выполняют с использованием рекомендаций Д.2—Д.3 (приложение Д), при этом предельная глубина дефекта a_N не должна превышать $0{,}75t$.

7.4.6 Если по результатам расчета рекомендованные коэффициенты запаса на чувствительность СКТ ($n_Q = 5$) и критический размер сквозной трещины ($n_c = 1{,}8$) не могут быть достигнуты, то первоначальные требования к чувствительности Q_0 должны быть ужесточены, с тем чтобы обеспечить расчетные критерии (3) — (5) выполнения условий ТПР в соответствии с 7.4.2–7.4.3.

7.4.7 Представленные в приложениях Г–Е методы механики разрушения и термогидравлического анализа, включая методы расчета подрастания размеров начального дефекта (приложение Г), анализа стабильности трещин (приложение Д), расчета площади течи и расчета расхода теплоносителя (приложение Е) имеют рекомендательный характер. Допускается использовать иные методы расчета с соответствующим обоснованием их применимости, которые обеспечивают наименьший предельный размер постулируемой сквозной трещины и минимальную скорость истечения теплоносителя для последующей проверки или определения требований к СКТ.

7.5 Особенности применения методологии концепции «течь перед разрушением» на стадиях проектирования и эксплуатации

7.5.1 Для проектов новых блоков АС расчетное обоснование ТПР выполняют на этапе проектирования. На всех стадиях проектирования обоснование ТПР может быть проведено с использованием ГРК, что позволяет при проектировании быстро модифицировать конфигурацию трубопроводов при одновременном удовлетворении критериев ТПР.

Данный подход представлен в приложении Ж.

Примечание — В результате, на стадии проектирования и прочностного обоснования трубопроводных систем новых блоков АС, анализируемые трубопроводы могут быть квалифицированы для применения ТПР и отвечать требованиям [1] при условии последующего подтверждения после монтажа проектной конфигурации трубопроводов и условий их закрепления к фактической трассировке и расположению опор.

7.5.2 При вводе блока АС в эксплуатацию принятые в расчетах на стадии проектирования проектные нагрузки и напряжения для режимов НУЭ должны быть в соответствии с требованиями [1] подтверждены по результатам пуско-наладочных работ и освоения мощности путем проверки соответствия фактического расположения опор, трассировки трубопроводов, монтажных натягов, максимальных перемещений оборудования и трубопроводов, определяющих уровень напряженно-деформированного состояния.

7.5.3 Принимая во внимание заложенные в расчет ТПР коэффициенты запаса, включающие в себя также неопределенность по отношению к нагрузке в режиме НУЭ+МРЗ, и учитывая существенный вклад сейсмического воздействия в расчет предельной длины сквозной трещины, детерминистское обоснование ТПР, выполненное на стадии проектирования, не требует переработки для стадии ввода в эксплуатацию, а полученные результаты считаются пригодными и после ввода блока в эксплуатацию, если для рассматриваемых трубопроводов выявленные отклонения не приводят к возрастанию проектных силовых нагрузок в режимах пуска и работы на номинальной мощности более чем на 20%.

7.5.4 Для действующих блоков АС расчетное обоснование ТПР выполняется для существующей конфигурации трубопроводов с учетом:

- результатов выполненных работ по модернизации и реконструкции;
- ранее выбранных материалов (свойства которых, включая вязкость разрушения, могут отличаться от исходных);
- фактических значений нагрузок в режимах НУЭ, подтвержденных результатами мониторинга нагрузок (перемещений);
- значений нагрузок от внешних воздействий (уточненных по результатам микросейсморайонирования, расчета с применением аттестованных программных средств ([1] пункт 1.2.9, [2] пункт 2.1.15) для уточнения поэтажных акселерограмм и спектров ответа) и оценки нагруженности трубопроводов с учетом указанных актуализированных данных);
- истории нагружения в процессе эксплуатации;
- анализа опыта эксплуатации существующих аналогов.

7.5.5 При выполнении расчетного обоснования ТПР согласно 6.3 и разделу 7 на стадии продления срока службы также следует учитывать выполненные ранее ремонты и конструктивные модификации, фактические параметры нагружения (если имеются основания) и прогнозируемые служебные характеристики свойств используемых материалов с учетом тенденции их изменения на конец срока оценки.

7.5.6 Особенности применения методологии ТПР на стадии эксплуатации для обоснования целостности трубопроводов при наличии дефектов приведены в И.1 (приложение И), для обоснования предотвращения разрывов аустенитных трубопроводов РУ канального типа в И.2—И.3, включая пример расчета — в И.4 (приложение И).

8 Документирование и отчетность

Техническая документация по обоснованию и внедрению концепции ТПР для трубопроводов контура теплоносителя рассматриваемого блока АС должна содержать:

- перечень и описание рассмотренных систем трубопроводов, входящих в состав контура теплоносителя реактора;
- результаты оценки пригодности анализируемых систем трубопроводов для применения методологии ТПР в соответствии с приложением А и учетом требований 5.1.3, перечисление а) 5.2.2;

− результаты оценки эффективности СКТ в соответствии с требованиями 6.2, перечисление б) 5.2.2, и приложения Б;

− результаты технического обоснования применимости ТПР, выполненного в соответствии с 6.3 и разделом 7;

− заключительный отчет по обоснованию применимости концепций ТПР с общими выводами и рекомендациями для дальнейшего внедрения.

Приложение А
(обязательное)

Оценка применимости концепции «течь перед разрушением»

А.1 Общие требования

А.1.1 Необходимые условия применимости концепции ТПР к действующим, сооружаемым и проектируемым блокам АС базируются на подтверждении качества трубопроводных систем в течение всего срока эксплуатации (включая дополнительный срок эксплуатации), обеспечиваемым, главным образом, за счет выполнения требований действующих ФНП, а также обязательных к применению документов по стандартизации, относящихся к проектированию, изготовлению, монтажу трубопроводов и оборудования, вводу блока АС в эксплуатацию и его эксплуатации [включая требования к системам мониторинга условий эксплуатации, нагрузок (перемещений), параметров ВХР, контроля течей, контроля состояния металла и технического обслуживания оборудования и трубопроводов].

А.1.2 Обоснование возможности применимости ТПР к анализируемым трубопроводам включает в себя два этапа.

На первом этапе проводится оценка выполнения ограничивающих условий согласно 1.2, главным из которых является гарантированное вязкое состояние металла в течение всего срока эксплуатации определяемое по характеристике *KCV* согласно перечислению в) 1.2 и отсутствие значимого механизма деградации согласно 5.2.4.

На втором этапе оценивается выполнение технических и организационных предпосылок, представленных в 5.1.3 в виде принципов А–В.

А.2 Исходные данные

А.2.1 Основными исходными данными, используемыми для оценки возможности применения ТПР к анализируемым трубопроводам, являются:

- классификация трубопроводов и оборудования (включая класс безопасности согласно [1], группу согласно [3], категорию сейсмостойкости согласно [5], категории сварных соединений согласно [6] или вновь вводимому ФНП);
- параметры рабочей среды (теплоносителя);
- проектные особенности рассматриваемой системы трубопроводов (трассировка, компоновка, чертежи, размеры);
- информация обо всех отступлениях от проекта, ремонтах и исправлениях в процессе монтажа или по результатам контроля, оформленных техническими решениями;
- перечень используемых материалов (основные, сварочные, наплавочные), их свойства;
- проектные условия нагружения с учетом возможных их отклонений в эксплуатации;
- нагрузки для всех расчетных режимов, включая предельные нагрузки, число циклов нагружения при переходных режимах;
- специфические нагрузки и воздействия, возможные механизмы деградации, которые могут возникнуть при эксплуатации;
- результаты расчетов напряжений и прочностного обоснования;
- программы эксплуатационного контроля металла для действующих блоков АС;
- методы и результаты предэксплуатационного и эксплуатационного контроля состояния металла для действующих блоков АС;
- ограничения при проведении эксплуатационного НК сварных соединений (при их наличии);
- характеристики СКТ;
- результаты имеющихся испытаний полномасштабных моделей труб из аналогичных материалов на разрушение.

А.2.2 Для действующих АС перечень основных исходных данных при необходимости может быть расширен.

А.3 Оценка качества трубопроводов

А.3.1 Для подтверждения качества трубопроводов на стадии до начала эксплуатации требуется провести оценку полноты выполнения требований проектной документации в соответствии с требованиями [3] и действующей системой обеспечения качества.

А.3.2 Необходимо проверить соответствие реальной трассировки и геометрии трубопроводов, условий их закрепления в проектной документации.

А.4 Оценка мониторинга условий эксплуатации

А.4.1 Для действующих блоков АС мониторинг эксплуатационных параметров, ВХР, нагрузок (перемещений) и вибраций, неразрушающий контроль металла, контроль течей, техническое обслуживание трубопроводов, а также порядок и организация их проведения должны отвечать требованиям ГОСТ Р 8.563, ГОСТ 8.932, ГОСТ Р 50.04.07,

ГОСТ Р 50.05.15, [1]—[5], [7]—[9] и других обязательных для АС документов по стандартизации, относящихся к технологическим регламентам, инструкциям по эксплуатации, инспекционным программам, типовым и рабочим программам контроля металла, методикам НК, методам и средствам измерений.

А.4.2 Для действующих блоков АС оценке соответствия подлежат системы:

- система сбора и обработки данных об условиях эксплуатации (давление, температура, циклы нагружения, вибрации, ВХР);
- система контроля фактической нагруженности трубопроводов [контроль перемещений элементов контура теплоносителя реактора согласно [3] (пункт 230)];
- система эксплуатационного НК трубопроводов, нацеленная на выявление и фиксацию несплошностей основного металла и сварных соединений, выявление и фиксацию изменений геометрических размеров; выявление и фиксацию изменений механических характеристик и структуры металла;
- эффективность СКТ.

А.4.3 Для действующих и находящихся на продленном сроке эксплуатации блоков АС должны учитываться требования [11], [6], [7], [12], программ контроля, методик НК, методов и средств измерений.

А.4.4 Обработанные данные об условиях эксплуатации оборудования и трубопроводов блока подлежат документированию и хранению.

А.5 Порядок рассмотрения всех возможных условий нагружения и эксплуатации

А.5.1 Анализу подлежат все проектные и возможные эксплуатационные нагрузки, включая косвенные воздействия и специфические нагрузки (см. 5.2.3), формирующие в целом граничные условия нагружения на трубопроводы.

А.5.2 Проектные нагрузки оценивают по результатам прочностного обоснования в соответствии с требованиями [5] и [12] с учетом соответствия фактических условий эксплуатации и фактической нагруженности трубопроводов проектным параметрам и нагрузкам (перемещениям).

А.5.3 Для действующих АС оценку нагруженности и состояния трубопроводов на стадии эксплуатации или продления ресурса выполняют в соответствии с требованиями ГОСТ Р 50.04.03, ГОСТ Р 8.563, ГОСТ Р 8.654, ГОСТ Р 8.932, ГОСТ Р 50.04.07, ГОСТ Р 50.05.15, ГОСТ Р 51901.1, [1], [3], [8]—[10] и обязательных для АС иных документов по стандартизации, относящихся к инспекционным программам оценки состояния трубопроводов, включая контроль толщины стенок трубопроводов, методам и средствам измерений, типовым и рабочим программам эксплуатационного контроля, методикам НК, оценке ресурсных характеристик металла трубопроводов.

А.5.4 Оценке подлежат возможные механизмы деградации (см. 5.2.4), которые могут дать неучтенные в проекте значимые повреждения металла и неверно предсказанный (неконсервативный) предельный размер трещины со стороны внутренней поверхности трубопровода, например коррозионной трещины в аустенитном сварном шве, трудно поддающейся контролю и аналитической оценке.

А.5.5 Выделяют трубопроводы, для которых отсутствуют непроектные механизмы повреждений, и трубопроводы, для которых существует потенциальная склонность к непроектным механизмам повреждения.

Для последних оценивается обеспеченность и эффективность предпринятых компенсирующих мер (конструкторских, эксплуатационных, технологических) по удержанию этих повреждений в приемлемых границах, обеспечивающих конструкционную целостность трубопроводов.

А.5.6 Для проектируемых блоков АС следует проанализировать опыт эксплуатации трубопроводов-аналогов на действующих блоках АС и удостовериться в том, что наряду с учтенными в проекте неблагоприятными воздействиями не следует ожидать чрезмерных специфических нагрузок или механизмов деградации.

Для действующих блоков АС на основании оценки опыта эксплуатации рассматриваемых трубопроводов следует убедиться в том, что предпринятые компенсирующие меры являются достаточными.

А.6 Результаты оценки, выполненной согласно А.3—А.5, включая оценку эффективности предпринятых компенсирующих мер, должны быть документированы.

Приложение Б
(обязательное)

Требования к системам контроля течи

Б.1 Общие требования

Б.1.1 СКТ контура теплоносителя реактора должна осуществлять обнаружение и идентификацию течей оборудования и трубопроводов при работе блока в режимах пуска(останова) и работе в энергетическом режиме.

Б.1.2 СКТ контура теплоносителя реактора должна строиться как интегральная система и состоять не менее чем из двух отдельных, независимых, дополняющих друг друга систем, основанных на мониторинге и измерении различных физических параметров (влажность, температура, акустическое давление), а также СКТ ВУ, объединяющего отдельные системы в единую интегральную СКТ.

Б.1.3 В интегральной СТК должен выполняться контроль течи по параметру радиационной активности на основе измерительной информации, поступающей от штатной системы радиационного контроля энергоблока АС. Контроль течи по параметру радиационной активности может быть реализован на базе программно-технических средств СКТ ВУ.

Б.1.4 Характеристики применяемых в СКТ независимых дополняющих друг друга систем и виды измеряемых при мониторинге физических параметров устанавливаются в техническом задании на СКТ или определяются и обосновываются в проектно-конструкторской документации на СКТ при ее разработке с учетом особенностей объекта контроля.

Б.1.5 Каждая из систем интегральной СКТ должна быть независима, т. е. осуществлять все свои функции вне зависимости от функционирования других систем. Допускается применять методы контроля течи, основанные на измерении одних и тех же параметров, но с принципиально различными конструктивными решениями и алгоритмами контроля.

Б.1.6 Каждая из систем интегральной СКТ, кроме штатной системы радиационного контроля, должна в автоматизированном режиме выполнять следующие основные функции при работе АС на номинальной мощности:

- измерение контролируемых физических параметров с нормированной погрешностью, устанавливаемой при испытаниях СКТ в целях утверждения типа средств измерений;
- измерение параметров течи с характеристиками, необходимыми для выполнения требований, предъявляемых к измерению параметров течи на СКТ ВУ;
- накопление и хранение информации об измеряемых значениях контролируемых физических параметров;
- самодиагностика составных частей и элементов;
- передача результатов мониторинга течи на СКТ ВУ.

Б.1.7 СКТ ВУ должна в автоматизированном режиме производить совокупный анализ данных и результатов контроля течи теплоносителя реактора в помещениях блока АС от всех отдельных систем интегральной СКТ и выполнять следующие основные функции при работе АС на номинальной мощности:

- обработка данных от всех СКТ и формирование сигнала об обнаружении течи;
- измерение параметров (расход и координаты местоположения) обнаруженной течи с нормированной погрешностью;
- выдача информации о расходе и координатах местоположения обнаруженной течи оперативному персоналу АС (на блочный пульт управления) для принятия соответствующих действий по подтверждению наличия течи и принятию компенсирующих мер;
- накопление и хранение результатов мониторинга течи (информацию об обнаружении течи, значения расхода и координат местоположения течи) в течение не менее трех последних микрокампаний блока АС.

Б.2 Технические требования

Б.2.1 Техническая документация на СКТ, содержащая метрологические требования, включая описание методики измерения, должна пройти метрологическую экспертизу в установленном порядке. Методика измерений параметров течи должна быть разработана в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.932 и пройти аттестацию в соответствии с требованиями законодательства Российской Федерации по обеспечению единства измерений.

Б.2.2 Программные средства в составе СКТ, реализующие алгоритмы математической обработки результатов измерений физических величин с целью определения параметров течи, должны быть верифицированы и пройти процедуру подтверждения соответствия требованиям ГОСТ Р 8.654.

Б.2.3 В том случае, когда и в проекте СКТ и в специальных расчетных обоснованиях ТПР по отношению к контролируемому оборудованию не сформулированы конкретные требования к СКТ, определяющие значения чувствительности, погрешности, временного интервала и диапазона измерения расхода течи, рекомендуется обеспечить следующие значения характеристик СКТ ВУ на номинальной мощности РУ:

- чувствительность по расходу течи не хуже

1,9 кг/мин (114 кг/ч) для трубопроводов ДУ от 150 до 750 мм;

3,8 кг/мин (228 кг/ч) для трубопроводов ДУ от 750 мм и более;

- верхний диапазон измерения расхода течи не менее 19,0 кг/мин;
- временной интервал обнаружения и измерения параметров течи не более одного часа;
- относительная погрешность измерения расхода течи не более ±50 %;
- погрешность измерения координат местоположения течи ±3 м, но не более половины шага расстановки первичных преобразователей.

Б.2.4 Установленные для СКТ характеристики должны подтверждаться в ходе испытаний в целях утверждения типа средства измерений и при периодической поверке в течение всего периода эксплуатации СКТ.

Приложение В
(обязательное)

Исходные данные для расчета

В.1 Конструктивные и технологические особенности

В.1.1 К конструктивным и технологическим особенностям анализируемых трубопроводов относятся:
- конструктивное и технологическое исполнение трубопроводов;
- трассировка и компоновка трубопроводов;
- тип присоединения трубопроводов к патрубкам оборудования и арматуре, тройникам;
- технология изготовления колен и прямолинейных участков трубопроводов (наплавка, вид сварных соединений, термообработка, сертификатные данные на основной металл и сварочные материалы);
- количество и местоположение сварных швов с указанием их идентификационного номера, категории (заводской, монтажный, однородный, разнородный), типа (кольцевой, продольный), его особенности («труба-труба», «труба-двойник», «труба-колено», «труба-патрубок», «полукорыта колен» и т. д.);
- разделка сварных швов, технология сварки, спецификация, карты контроля, идентификационные номера.

В.1.2 К геометрическим характеристикам трубопроводов относятся: наружный диаметр и толщина стенки с учетом допусков, толщина наплавки, радиус, длина и конфигурация отводов гнутых, колен с указанием утонений и овальности, геометрия трубопровода (трассировка, компоновка, чертежи, размеры).

В.1.3 Необходимые сведения и размеры элементов трубопроводов принимают в соответствии с конструкторской документацией.

В.2 Анализ нагрузок и напряжений

В.2.1 К условиям эксплуатации и нагружения относятся:
- параметры теплоносителя (ВХР, теплофизические характеристики, давление, температура);
- параметры окружающей среды (давление, температура);
- перечень и число расчетных и переходных режимов эксплуатации;
- условия силового и температурного нагружения на всех расчетных режимах, включая переходные режимы, распределения температур и напряжений в сечениях трубопроводов по всей их длине;
- число циклов нагружения N для каждого расчетного режима.

В.2.2 Расчет нагрузок и напряжений следует выполнять для всех проектных и выявленных в процессе эксплуатации режимов с использованием аттестованных программных средств.

В.2.3 При расчете нагрузок и напряжений принимают во внимание внутреннее давление, весовые нагрузки, усилия и моменты от реакции опор и присоединенных элементов, температурные нагрузки, вызванные тепловым расширением трубопроводов, сейсмическое воздействие.

В.2.4 Для определения МРН на рассматриваемые участки трубопровода необходимо проанализировать все проектные условия нагружения для всех расчетных режимов эксплуатации, включая экстремумы температуры и давления, специфические нагрузки, которые могут возникать при эксплуатации в результате различных внешних и внутренних воздействий.

В.2.5 Путем перебора различных комбинаций по максимальному значению суммарной статической и динамической нагрузки определяют наиболее нагруженные зоны и сечения трубопровода по всей его протяженности от одной его жесткой заделки (проходки) до другой.

В.2.6 Выделяют НН, МПН и МРН:
- НН, необходимую для определения расхода утечки через постулируемую сквозную трещину, определяют по правилу алгебраического суммирования нагрузок от давления, веса и температуры в режиме НУЭ на номинальной мощности РУ: НН = давление + вес + температурные (100 %-ная мощность);
- МРН, требуемая для расчета предельной длины сквозной трещины, определяется по правилу суммирования абсолютных величин НН и МПН: МРН = |НН| + |МПН|.

В.2.7 Значение МПН для кольцевых сварных швов, как правило, определяется величиной МРЗ: МПН = МРЗ. Тогда МРН = |НН| + |МРЗ|.

Значение МПН и МРН для продольных сварных швов в трубопроводах и отводах гнутых (коленах) обычно определяется расчетным давлением p_{max} в режимах ННУЭ, тогда МРН = МПН = p_{max}.

В.2.8 Используя комбинацию рассчитанных сил и моментов для всей системы трубопроводов от каждого типа нагружения, определяют растягивающие и изгибные напряжения для всех расчетных режимов.

В.2.9 В результате расчета напряжений должны быть получены данные о распределении напряжений по различным сечениям и толщине стенки трубопровода, из которых затем для расчетных зон следует выделить «первичные» напряжения от механических нагрузок и «вторичные» самоуравновешенные напряжения.

В.2.10 Для каждого трубопровода определяют сечения с нормальным S_n и максимальным S_{max} растягивающим напряжением, действующим по нормали к плоскости поперечного сечения трубопровода.

Для анализа стабильности поперечной трещины в трубе (см. рисунки 1 и 2) суммарное нормальное напряжение S_n в режиме НУЭ определяют в виде $S_n = \sigma_m+\sigma_b+\sigma_k$ *(в запас),* максимальное напряжение S_{max} для режима НУЭ+МРЗ определяют по сумме абсолютных величин: $S_{max} = |S_n| + |\sigma_{sse}|$, где σ_m — общее мембранное напряжение, σ_b — общее изгибное напряжение, σ_k — напряжение компенсации, σ_{sse} — суммарное напряжение от сейсмической нагрузки при МРЗ.

Для продольных трещин в прямой трубе и коленах нормальное напряжение $S_n = \sigma_m(p)$ в режиме НУЭ и $S_{max} = \sigma_m(p_{max})$ в режимах ННУЭ (без учета изгибных и крутящих моментов).

В.2.11 Оценивают основные механизмы, приводящие к накоплению повреждений и возможному росту скрытых дефектов в сварных швах трубопроводов, в частности, циклическое нагружение, происходящее при смене режимов работы РУ. Для стационарных и переходных режимов с переменными давлением и/или температурой теплоносителя, а также для условий гидравлических (пневматических) испытаний определяют группы циклов с одинаковыми параметрами нагружения, подсчитывают суммарное число циклов N за один НСС.

В.2.12 На основании данных эксплуатационного НК сварных соединений аустенитных трубопроводов для рассматриваемого блока оценивают возможность развития коррозионных трещин по механизму МКРПН и необходимость расчета скоростей подрастания таких трещин по толщине стенки и периметру сварного соединения за межконтрольный интервал с учетом И.2.3 — И.2.6 (приложение И).

В.3 Характеристики материалов

В.3.1 Характеристики материалов, используемые при расчетном обосновании ТПР, включают в себя данные о свойствах основного металла и сварных соединений при соответствующих эксплуатационных температурах с учетом возможной анизотропии свойств материалов и их изменения в процессе эксплуатации.

В.3.2 Для диапазона рабочих температур должны быть представлены следующие характеристики материалов:

- физико-механические характеристики:

E — модуль упругости, ГПа;

ν — коэффициент Пуассона;

R_m — минимальное значение предела прочности, МПа;

$R_{p0.2}$ — минимальное значение предела текучести, МПа;

σ_B — предел прочности материала, МПа;

$\sigma_{0.2}$ — условный предел текучести, определяемый по истинной диаграмме деформирования материала по остаточной пластической деформации 0,2%, МПа;

α, ε_0, σ_0, n — параметры аппроксимации истинной диаграммы деформирования материала $\sigma(\varepsilon)$ при одноосном растяжении;

- характеристики трещиностойкости:

C_V — ударная вязкость по Шарпи KCV (по ГОСТ 9454), Дж/см^2;

C_f, m_f — постоянные материала в уравнении циклического роста трещины при нагружении $\frac{dl}{dN} = C_f(\Delta K_{eff})^{m_f}$, мм/цикл, где l — характерный размер трещины (a, $2c$), мм, N – число циклов, ΔK_{eff} — размах эффективного КИН типа I в цикле, МПа$\sqrt{\text{м}}$;

C_{st}, m_s — постоянные материала в уравнении КСРТ $\frac{da}{dt} = C_{st}K_{st}^{m_s}$, мм/с, где t — время, с, K_{st} — КИН при статическом нагружении, МПа$\sqrt{\text{м}}$;

$JR(\Delta l)$ — J_R-кривая сопротивления росту трещины при упругопластическом нагружении, зависит от обобщенной нагрузки P, подрастания трещины Δl и температуры T, кН/м;

J_c, $J_{0.2}$ — значения J на J_R-кривой, определяемые соответственно в момент начала стабильного роста трещины и после стабильного подроста трещины Δl на 0,2 мм, кН/м;

K_c — вязкость разрушения, $K_c = \sqrt{\frac{EJ_c}{1-\nu^2}}$, МПа$\sqrt{\text{м}}$;

T_{mat} — модуль разрыва $\left(\frac{dJ_R}{dl}\right)\frac{E}{\sigma_{0.2}^2}$, н/м.

Примечание — Некоторые характеристики материалов [например, истинная диаграмма деформирования $\sigma(\varepsilon)$ и J_R-кривые] могут быть излишними, если расчет предельной длины трещины выполняют с использо-

ванием инженерных методов механики разрушения (ППН и ЛРН) или отсутствует коррозионно-статический рост трещины, для описания которого используются константы C_{sc}, m_s, поэтому могут не предоставляться.

В.3.3 Используемые в расчетах характеристики материалов должны быть оценены на конец НСС с учетом влияния технологии изготовления и монтажа трубопроводов, технологии сварки, деформационного и температурного старения в процессе эксплуатации.

В.3.4 Консервативность расчетов методами механики разрушения обеспечивается за счет использования минимальных значений характеристик механических свойств и трещиностойкости металла при расчете предельной длины постулируемой сквозной трещины и максимальных значений характеристик механических свойств металла при расчете площади раскрытия трещины.

Приложение Г
(рекомендуемое)

Расчет величины подрастания дефекта при циклическом нагружении

Г.1 Расчет проводится применительно к начальному дефекту (a_0, $2c_0$), охарактеризованному в 7.2.12—7.2.13 и схематически изображенному на рисунке Г.1 в виде поверхностной трещины полуэллиптической формы, расположенной с внутренней стороны трубы.

Г.2 Целью расчета является определение величин подрастания размеров дефекта в глубину Δa_N и длину $2\Delta c_N$ за один НСС при заданных условиях циклического нагружения.

Г.3 Условия циклического нагружения определяются размахом КИН типа I (ΔK), коэффициентом асимметрии цикла R и продолжительностью нагружения — числом циклов N.

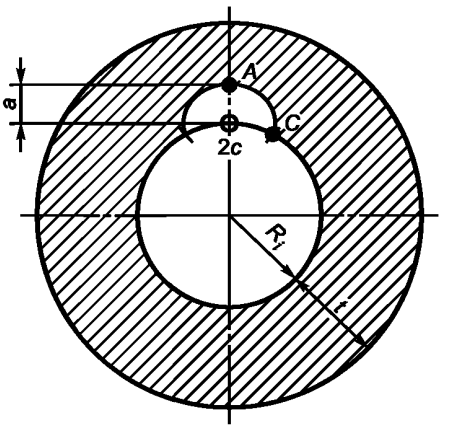


Рисунок Г.1 — Полуэллиптическая поверхностная трещина в сечении трубы на внутренней поверхности окружного сварного шва

Г.4 Расчет величины подрастания дефекта в глубину Δa_N и длину $2\Delta c_N$ проводят методами линейной механики разрушения.

Расчет не проводится, если не выполнены условия для циклического роста трещины в соответствии с 7.2.13, когда заранее известно, что незначительным циклическим подрастанием начального дефекта с установленными в 7.2.10 размерами можно пренебречь.

Г.5 Скорость роста усталостной трещины $\frac{da}{dN}$ (или $\frac{dA}{dN}$) определяется зависимостью от ΔK при заданном значении R

$$\frac{dl}{dN} = C_f \left(\Delta K_{eff}\right)^{m_f} \text{ при } \Delta K_{eff} > \Delta K_{th}(R, T), \qquad (Г.1)$$

где $\frac{dl}{dN}$ измеряется в м/цикл;

l — характерный размер трещины (полуось a или полуось c), м;

C_f, m_f — характеристики материала, зависящие от условий нагружения;

$\Delta K_{eff} = \left(\frac{\Delta K}{(1-R)^{0,25}}\right)^{m_f}$ — размах эффективного КИН в цикле, МПа$\sqrt{\text{м}}$;

$\Delta K = K_{max} - K_{min}$ при $K_{max} < K_c$ — размах КИН типа I, МПа$\sqrt{\text{м}}$;

K_{max} — максимальное значение КИН в цикле, МПа$\sqrt{\text{м}}$;

K_{min} — минимальное значение КИН в цикле, МПа$\sqrt{\text{м}}$;

K_c — критическое значение КИН (вязкость разрушения), МПа$\sqrt{\text{м}}$;

$R = K_{min}/K_{max}$ — коэффициент асимметрии цикла: $0 \le R < 0,95$;

$\Delta K_{th}(R, T)$ — пороговая величина при температуре T, при $\Delta K_{eff} \le \Delta K_{th}$ циклический рост трещины не учитывается.

Г.6 Для циклов нагружения, которые характеризуются $K_{min} < 0$ ($R < 0$), полагают, что $R = 0$ и $\Delta K = K_{max}$; если $R \ge 0,75$, то полагают, что $R = 0,75$ и $\Delta K_{eff} = 1,414\,\Delta K$.

Г.7 Значение ΔK_{th} рассчитывают по формуле

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th}^{(0)}(1-0{,}7R), \qquad (Г.2)$$

где $\Delta K_{th}^{(0)} = 6{,}5$ МПа$\sqrt{\text{м}}$ при $T \le 450$ °С.

Г.8 Рекомендованные расчетные значения величин C_f и m_f для расчета циклического подрастания трещины в сварных соединениях из углеродистых сталей и сталей аустенитного класса типа 188 в условиях воздействия водяной (пароводяной) кислородосодержащей среды при температуре до 350 °С приведены в таблице Г.1.

Для обескислороженной водной среды допускается принимать менее консервативные значения коэффициентов C_f, m_f.

Таблица Г.1 — Рекомендованные значения величин C_f и m_f

Класс материала	m_f	C_f, м/(МПа·м^{0,5})^{mf}
Углеродистые стали и их сварные соединения	3,1	$1{,}5\cdot10^{-10}$
Легированные стали типа Cr-Mo-V, Cr-Ni-Mo-V и их сварные соединения	2,7	$8{,}4\cdot10^{-11}$
Хромоникелевые коррозионно-стойкие стали аустенитного класса 18-8 и их сварные соединения	3,3	$5{,}2\cdot10^{-11}$
Примечание — Указанные значения используют при $10^{-5} \ge \frac{dl}{dN} \ge 10^{-11}$ м/цикл.		

Г.9 Значение КИН для i-го режима нагружения определяют для постулируемой поверхностной трещины в крайних точках фронта А и С (см. рисунок Г.1, где точка А соответствует росту дефекта в направлении малой полуоси, точка С — в направлении большой полуоси) по формуле

$$K_I = K_I^p + K_I^s = \left(\sigma_m f_m + \sigma_b f_b \sqrt{\pi l}\right) + \left(\sigma_m^s f_{ms} + \sigma_b^s f_{bs}\right)\sqrt{\pi l}, \qquad (Г.3)$$

где K_I^p — КИН типа I от распределенных по толщине стенки суммарных «первичных» напряжений σ^p (мембранных σ_m и изгибных σ_b) от механических нагрузок (сил и моментов);

K_I^s — КИН от уравновешенных по толщине стенки суммарных «вторичных» напряжений σ^s (местных мембранных σ_m^s и изгибных σ_b^s);

l — характерный размер трещины (глубина a, длина 2c);

f_m, f_b, f_{ms}, f_{bs} — табулированные геометрические функции.

Г.10 Расчет размахов КИН для i-го цикла проводят при фиксированных значениях $R_i = \left(\frac{K_{\min}}{K_{\max}}\right)_i$ с использованием откорректированной зависимости КИН от размера растущего дефекта.

Величины $\Delta K_{(A)}^{(i)}$, $\Delta R_{(A)}^{(i)}$, $\Delta K_{(C)}^{(i)}$, $\Delta R_{(C)}^{(i)}$ для i-го цикла нагружения определяют из упругого расчета напряжений в отсутствии дефекта.

Величины $\Delta K_{(A)}^{(i)}$, $\Delta K_{(C)}^{(i)}$ — размахи КИН типа I в точках A и C расчетного дефекта (см. рисунок Г.1). Величины $\Delta R_{(A)}^{(i)}$, $\Delta R_{(C)}^{(i)}$ — коэффициенты асимметрии цикла в точках A и C.

Г.11 Рассчитывают подросты дефекта Δa_i и Δc_i за i-й цикл

$$\Delta a_i = C_f \left(\frac{\Delta K_{(A)}^{(i)}}{\left(1 - R_{(A)}^{(i)}\right)^{0,25}} \right)^{m_f}; \qquad (Г.4)$$

$$\Delta c_i = C_f \left(\frac{\Delta K_{(C)}^{(i)}}{\left(1 - R_{(C)}^{(i)}\right)^{0,25}} \right)^{m_f}. \qquad (Г.5)$$

Текущие размеры расчетного дефекта на конец i-цикла составляют

$$a_i = a_{i-1} + \Delta a_i, \qquad (Г.6)$$

$$2c_i = 2c_{i-1} + 2\Delta c_i. \qquad (Г.7)$$

Далее расчет повторяют, пока не будут учтены все циклы нагружения за рассматриваемый период эксплуатации.

Г.12 Рассчитывают подросты дефекта Δa_N и $2\Delta c_N$ на конец периода эксплуатации при циклическом нагружении, определяются финальные размеры дефекта (Δa_N, $2\Delta c_N$) в глубину и длину

$$a_N = a_0 + \Delta a_N, \quad (Г.8)$$

$$2c_N = 2c_0 + 2\Delta c_N. \quad (Г.9)$$

Г.13 В случае, если для описания истории нагружения в хронологическом порядке сложно сформировать циклы нагружения и их последовательность выполняют консервативный расчет, при котором сначала рассматривают циклы, вызывающие ускоренный рост дефекта по уравнению (Г.1), затем — последовательно циклы, вызывающие наименьшее приращение дефекта.

Г.14 В расчете роста усталостной трещины не учитывается торможение (ускорение) роста трещин от перегрузок различного знака, а также вследствие пересечения линий сплавления сварных швов, наплавок, границ слоев в многослойных материалах.

Приложение Д
(рекомендуемое)

Анализ стабильности трещин

Д.1 Методы расчета

Д.1.1 Для анализа стабильности постулируемых поверхностных и сквозных трещин и определения их предельных размеров применяют различные методы механики разрушения, разделенные на два уровня по мере возрастания сложности проведения таких расчетов:

а) Инженерные методы анализа локальной и общей пластической нестабильности сечения трубы с трещиной (коллапс нетто-сечения), использующие только прочностные характеристики материала:

1) расчет по методу ППН;

2) расчет по методу ЛРН;

б) Методы упругопластической механики разрушения, основанные на прямом вычислении или расчетной оценке упругопластического *J*/*T*-интеграла с использованием J_R-кривых и истинных диаграмм деформирования материала $\sigma(\varepsilon)$ при одноосном растяжении, позволяющих учесть стабильный докритический подрост трещины:

1) *J*/*T*-анализы с использованием прямого 3D МКЭ-расчета;

2) Методы оценки *J*-интеграла.

Д.1.2 Второй уровень анализа, как более точный, следует применять в случае, если по результатам первого уровня анализа не удалось подтвердить необходимые коэффициенты запаса.

Выбор уровня анализа и метода расчета определяется также наличием или отсутствием всех необходимых данных по свойствам материалов, аттестованных или верифицированных программных средств.

Д.1.3 С целью определения наименьших размеров постулируемых трещин в контрольных зонах следует учитывать основные требования, предъявляемые к расчетам:

- при любом уровне анализа стабильности трещины используется МРН — наиболее неблагоприятная комбинация нагрузок в режиме НУЭ+МПН в соответствии с В.2.4—В.2.7 в сочетании с нижними огибающими свойствами материалов сварного соединения;

- для однородных сварных соединений используют прочностные свойства основного металла, даже в случае, когда трещина постулируется в сварном шве (консервативно), и нижняя огибающая J_R-кривой и наименьшая вязкость разрушения по сварному соединению (основной металл, металл шва, околошовная зона);

- при использовании методов первого уровня не учитывают самоуравновешенные местные напряжения, включая остаточные;

- для плакированных изнутри труб не учитывают толщину наплавки.

Д.2 Инженерные методы

Д.2.1 Общие требования

Д.2.1.1 К первому уровню анализа стабильности трещин относится группа верифицированных инженерных методов механики разрушения, которая может быть применена только для трубопроводов, изготовленных из сталей, обладающих высоким сопротивлением хрупкому разрушению и находящихся в вязком состоянии при расчетной температуре (величина *KCV* не менее 80 Дж/см^2 в исходном состоянии и/или не менее 60 Дж/см^2 на конец срока оценки).

Д.2.1.2 Инженерные методы расчета не требуют получения и описания диаграмм деформирования $\sigma(\varepsilon)$ и J_R-кривых, достаточно располагать фактическими или проектными данными по таким характеристикам, как предел текучести $R_{p0.2}$ и предел прочности R_m.

Д.2.1.3 При расчете предельного состояния трубы с постулируемой трещиной в качестве расчетной характеристики материала используется характеристика пластической нестабильности (или напряжение течения) материала σ_f, определяемая как величина между $R_{p0.2}$ и R_m при расчетной температуре ($R_{p0.2} \le \sigma_f \le R_m$).

Величина σ_f зависит от типа материала, метода расчета, ориентации трещины: поперечная (кольцевая) или продольная (осевая).

Д.2.1.4 Данные методы расчета предельных состояний используют только «первичные» мембранные и изгибные напряжения и не используют «вторичные» самоуравновешенные напряжения [см. В.2.9 (приложение В)].

Компоненты растягивающих напряжений, нормальные поперечному сечению трубы с трещиной, определяют из комбинации напряжений σ_m и σ_b, к которым следует добавить напряжение компенсации σ_k от теплого расширения трубопроводов (в запас).

Д.2.2 Прямая труба с кольцевой трещиной

Д.2.2.1 Расчет выполняется для трубы с кольцевой сквозной (см. рисунок 1) или поверхностной трещиной (см. рисунок Д.1), подверженной комбинированному нагружению растягивающим усилием N_z и изгибающим моментом M_b. Общее мембранное напряжение σ_m и напряжение изгиба σ_b, действующее в осевом направлении по нормали к плоскости ослабленного сечения с трещины, рассчитывают по формулам

$$\sigma_m = \frac{N_z}{F}\ , \qquad (Д.1)$$

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_M}\ , \qquad (Д.2)$$

где F — площадь поперечного сечения трубы без трещины;

W_M — модуль сопротивления изгибу поперечного сечения трубы.

При расчете силы N_z и изгибающего момента M_b используется комбинация нагрузок от давления, веса и температурной нагрузки.

Д.2.2.2 Расчет ППН по методу МР-125

Предельный размер сквозной трещины определяется по условию наступления общей пластической нестабильности сечения трубы с трещиной (коллапс нетто-сечения на рисунке Д.1*а*), поверхностной трещины — по условию наступления локальной пластической нестабильности перемычки между поверхностным дефектом и наружной поверхностью трубы из следующих уравнений:

- общая пластическая нестабильность:

$$\sigma_m = \sigma_f\left(1-2\frac{\beta}{\pi}-\frac{a}{t}\frac{\theta}{\pi}\right), \qquad (Д.3)$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{a}{t}\cdot\frac{\sin\theta}{2}+\frac{\pi}{4}\cdot\frac{\sigma_b}{\sigma_f}\cdot\frac{1+\dfrac{t}{2R}}{1+\left(\dfrac{t}{2R}\right)^2}\right); \qquad (Д.4)$$

- локальная нестабильность (разрыв перемычки):

$$\sigma_m = \sigma_f\left(k_f-\frac{\beta}{\pi}(1+k_f)\right), \qquad (Д.5)$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{\pi}{2}\cdot\frac{\sigma_b}{\sigma_f}\cdot\frac{1+\dfrac{t}{2R}}{1+\left(\dfrac{t}{2R}\right)^2}\cdot\frac{1}{1+k_f}\right), \qquad (Д.6)$$

$$k_f = 1-\frac{a}{tG_n}\ , \qquad (Д.7)$$

$$G_n = 1+\frac{2t}{\pi c}\left(1-\frac{a}{t}\right)^{0,1}\ , \qquad (Д.8)$$

где a — глубина трещины;

t — толщина стенки;

R — средний радиус трубы;

β — угол, характеризующий положение нейтральной оси.

Напряжение течения принимают равным $\sigma_f = 0{,}42(R_m + R_{p0.2})$.

Д.2.2.3 Расчет ЛРН по методу KWU

Согласно концепции ЛРН предполагается, что вязкое разрушение трубы с кольцевой поверхностной или сквозной трещиной, характеризующейся угловым размером 2θ и глубиной a, происходит локально (рисунок Д.1*б*) при следующем условии:

$$k_a\sigma_m + k_b\sigma_b = \sigma_f\ . \qquad (Д.9)$$

Здесь коэффициенты k_a и k_b для растягивающих σ_m и изгибных σ_b напряжений соответственно представляются в виде зависимостей от размеров трещины и геометрии ослабленного сечения:

$$k_a = \frac{1-f\left(\dfrac{\theta}{\pi}+\dfrac{\sin 2\theta}{2\pi}-\dfrac{2\sin\theta}{\pi}\cos\alpha\right)}{\left(1-f\dfrac{\theta}{\pi}\right)\left(1-f\left(\dfrac{\theta}{\pi}+\dfrac{\sin 2\theta}{2\pi}\right)-f^2\dfrac{2\sin^2\theta}{\pi^2}\right)}, \qquad (Д.10)$$

$$k_b = \frac{f\frac{\sin\theta}{\pi} + \left(1 - f\frac{\theta}{\pi}\right)\cos\alpha}{\left(1 - f\frac{\theta}{\pi}\right)\left(1 - f\left(\frac{\theta}{\pi} + \frac{\sin 2\theta}{2\pi}\right) - f^2\frac{2\sin^2\theta}{\pi^2}\right)}, \quad (Д.11)$$

где $\sigma_f = \begin{cases} R_m \text{ для перлитных сталей} \\ 0{,}5\left(R_m + R_{p0.2}\right) \text{ для аустенитных сталей;} \end{cases}$

$f = a / t$ — относительная глубина поверхностной трещины;

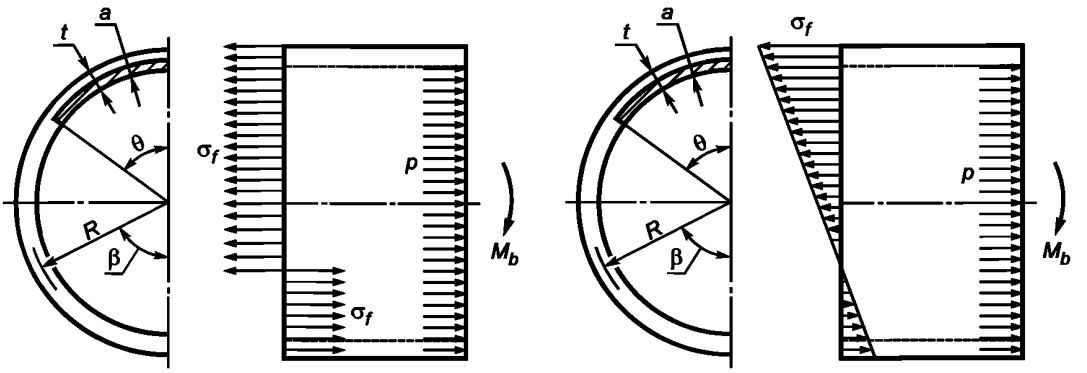
$\alpha = 0$ для точки А на рисунке В.1 (распространение трещины в направлении толщины) для расчета локальной нестабильности;

$\alpha = \theta$ для точки В на рисунке В.1 (распространение трещины в окружном направлении) для расчета глобальной нестабильности;

2θ — угловой размер трещины длиной $2c$ ($\theta = c/R$).

Область применения уравнений (Д.3) —(Д.8):

- $\theta + \beta \le \pi$ и $0 \le \beta \le \pi/2$ при комбинированном нагружении;
- $2\theta \le \pi$ при $\sigma_b = 0$ или при $\sigma_m = 0$.



а – концепция ППН **б – концепция ЛРН**

Рисунок Д.1 — Предельное состояние сечения трубы с окружной трещиной

Д.2.3 Прямая труба с осевой трещиной

Д.2.3.1 При нагружении прямой трубы с осевой трещиной внутренним давлением p (см. рисунки 1—3), мембранное напряжение σ_m есть окружное напряжение, действующее по нормали к плоскости трещины:

$$\sigma_m = \frac{pR_i}{t}, \quad (Д.12)$$

где R_i — внутренний радиус трубы;

t — толщина стенки.

Д.2.3.2 Предельную длину продольной сквозной трещины $2c$ или поверхностной трещины (размерами a, $2c$) рассчитывают с использованием методов теории пластической нестабильности по следующим уравнениям:

а) Метод BMI расчета глобальной нестабильности

$$\sigma_m = \frac{\sigma_f}{M}, \quad (Д.13)$$

где $\sigma_f = \max\left(R_{p0.2},\ R_{p0.2}\left(1{,}7 - 1{,}2\cdot\frac{R_{p0.2}}{R_m}\right)\right)$

$M = M_t$ для сквозной трещины, где M_t определяют по формуле

$$M_t = \sqrt{1 + 1{,}61\frac{c^2}{Rt}} \text{ при } 0 \le \frac{2c}{\sqrt{Rt}} \le 10, \quad (Д.14)$$

$M = M_p$ для поверхностной трещины, где M_p определяют по формуле

$$M_p = \frac{1 - \frac{a}{tM_t}}{1 - \frac{a}{t}}, \quad (Д.15)$$

где a — глубина трещины;

R — средний радиус трубы.

б) Метод МР-125 расчета глобальной и локальной нестабильности

$$\sigma_m = k_f \sigma_f \eta, \qquad (Д.16)$$

где $\sigma_f = 0{,}42(R_m + R_{p0.2})$ для углеродистых и аустенитных сталей (в запас);

- глобальная нестабильность сквозной трещины:

$k_f = \frac{1}{M_t}$ и $\eta = 1$ — при расчете глобальной нестабильности сквозной трещины;

$k_f = \frac{1}{M_p}$ и $\eta = 1$ — при расчете глобальной нестабильности поверхностной трещины;

$k_f = 1 - \frac{a}{tG_n}$ и $\eta = \frac{R_m}{\sigma_f} - \left(\frac{R_m}{\sigma_f} - 1\right)\cdot\left(1 - k_f\right)^{0,2}$, где $G_n = 1 + \frac{2t}{\pi c}\left(1 - \frac{a}{t}\right)^{0,1}$ — при расчете локальной нестабильности поверхностной трещины;

в) Метод МРА расчета глобальной и локальной нестабильности, учитывающий величину ударной вязкости KCV при расчете:

1) глобальной нестабильности сквозной трещины:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_f}{M_t}\frac{2}{\pi}\arccos\left[\exp\left(-\frac{3{,}1EC_V\pi}{2c\sigma_f^2}\right)\right]; \qquad (Д.17)$$

2) локальной нестабильности поверхностной трещины:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_f}{M_p}\arccos\left[\exp\left(-\frac{3{,}1EC_V\pi}{2c\sigma_f^2}\right)\right], \qquad (Д.18)$$

где $\sigma_f = \begin{cases} 0{,}5\left(R_m + R_{p0.2}\right) \text{для углеродистых сталей} \\ 0{,}42\left(R_m + R_{p0.2}\right) \text{для аустенитных сталей;} \end{cases}$

E — модуль упругости материала;

C_V — ударная вязкость KCV по Шарпи, Дж/см^2;

M_p и M_t — параметры формы трещины определены в Д.2.3.2.

Д.2.4 Отвод гнутый с продольной трещиной

Д.2.4.1 Для отводов гнутых и сварных колен со сквозной продольной трещиной по внутреннему или наружному обводу (радиусу колена) предельные длины трещин рассчитывают по формулам:

$$M^*\sigma_{eqv} = \sigma_f, \qquad (Д.19)$$

$$M^* = \begin{cases} \sqrt{1{,}718 + 2{,}137\lambda^{*2} - 0{,}0569\lambda^{*4}} \text{ вдоль внутреннего обвода} \\ \sqrt{0{,}736 + 1{,}285\lambda^{*2} + 0{,}0276\lambda^{*4}} \text{ вдоль наружного обвода,} \end{cases} \qquad (Д.20)$$

$$\lambda^* = \frac{c}{\sqrt{Rt}}, \qquad (Д.21)$$

$$\sigma_f = 0{,}42(R_m + R_{p0.2}). \qquad (Д.22)$$

Область применимости $\lambda^* < 6{,}2$. Практическое ограничение $2c < D$ для трещины вдоль внутреннего обвода (радиуса) и $2c < 2D$ для трещины вдоль наружного обвода (радиуса), где наружный D — диаметр колена.

Здесь окружное напряжение σ_{eqv} определяется как среднее по толщине стенки мембранное напряжение σ_m в центральной части колена от действия давления и изгибающих моментов.

Д.2.4.2 При невыполнении условий применимости данных уравнений следует использовать уравнения для прямой трубы (см. Д.2.3.2), которые могут быть также использованы для расчета сквозной трещины, расположенной на боковой части колена и расчета поверхностных трещин.

Более точный анализ предполагает расчет напряжений с использованием 3D-МКЭ-расчета с определением J-интеграла.

Д.3 Метод J/T-интеграла

Д.3.1 Вторая группа методов упругопластической механики разрушения, основанная на расчете J/T-интеграла с использованием истинных диаграмм деформирования материала $\sigma(\varepsilon)$ и J_R-кривых, позволяет наиболее точно выполнить расчет стабильности постулируемых трещин с учетом устойчивого докритического подроста трещины.

Д.3.2 Для расчета упругопластического *J/T*-интеграла используют численные методы на основе прямых 3D-МКЭ-расчетов.

Расчет *J*-интеграла для прямых труб с трещинами при различных видах нагружения может быть также выполнен с использованием разработанных весовых функций для различных диаграмм деформирования материала, представленных в справочной литературе, а также с использованием аналитических методов.

Д.3.3 Анализ стабильности трещин выполняют путем сравнения расчетных значений *J*-интеграла или модуля разрыва $T_{appl} = \frac{\partial J_{appl}}{\partial l}\frac{E}{\sigma_{0.2}^2}$ с допускаемыми значениями вязкости разрушения, определяемыми по J_R-кривым материала или $T_{mat} = \left(\frac{dJ_R}{dl}\right)\frac{E}{\sigma_{0.2}^2}$.

Д.3.4 Процедура определения упругопластического *J*-интеграла для трубы с характерными размерами трещины *l* (*a*, *c*) при комбинированном нагружении обобщенной нагрузкой *P* сводится к расчету его упругой J_{el} и пластической составляющей J_{pl} по формуле

$$J = J_{el}(P,l) + J_{pl}(P,l), \qquad (Д.23)$$

где $J_{el} = \frac{K^2\left(1-\nu^2\right)}{E}$;

K — КИН типа I, рассчитываемый по формуле (Г.3);

E — модуль упругости;

ν — коэффициент Пуассона.

Д.3.5 Значение *J*-интеграла определяют из выражения

$$J = J_{el} + J_{pl} = J_{el}\left(\frac{E\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{0.2}}\right)^2\frac{\sigma_{ref}}{E\varepsilon_{ref}}\right), \qquad (Д.24)$$

где $\varepsilon_{ref} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} = \varepsilon_{el+pl}(\sigma_{ref})$ — суммарная референсная деформация, соответствующая референсному напряжению σ_{ref} от механических нагрузок на диаграмме деформирования материала σ(ε) при одноосном растяжении для расчетной температуры (см. рисунок Д.2).

Д.3.6 Истинную диаграмму деформирования материала σ(ε) при одноосном растяжении аппроксимируют степенной зависимостью

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha\frac{\sigma_0}{E}\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n, \qquad (Д.25)$$

где α, ε_0, σ_0, *n* — параметры аппроксимации диаграммы деформирования материала при одноосном растяжении σ(ε); типичное значение показателя деформационного упрочнения *n* для сталей от 2 до 10.

В качестве базисного напряжения σ_0 обычно принимают условный предел текучести $\sigma_{0.2}$, тогда при $\sigma = \sigma_0$ общая деформация $\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E}(1+\alpha)$, где $\frac{\sigma_0}{E} = \varepsilon_{el}$ — упругая деформация, $\alpha\frac{\sigma_0}{E} = \varepsilon_{pl}$ — пластическая деформация, равная 0,002 при $\alpha = 1$ и $\sigma_0 = \sigma_{0.2}$.

Д.3.7 Значения референсного напряжения σ_{ref} рассчитывают по формулам:

- сквозная кольцевая трещина в трубе

$$\sigma_{ref} = \frac{\frac{\sigma_b}{3} + \sqrt{\frac{\sigma_b^2}{9} + \left(z\sigma_m\left(1-\lambda^2\right)\right)^2}}{\left(1-\lambda\right)^2}, \qquad (Д.26)$$

где σ_m и σ_b — соответственно общее мембранное и изгибное напряжение от приложенных механических нагрузок (давление, сила, момент);

$$z = \frac{\pi\left(R_0^2 - R_i^2\right)}{\left(2-\frac{t}{R_0}\right)\cdot R_0 t\cdot\left(2\psi-\theta\right)};$$

$$\psi = \arccos\left(\frac{\sin\theta}{2}\right);$$

$$\lambda = \frac{c}{\pi R};$$

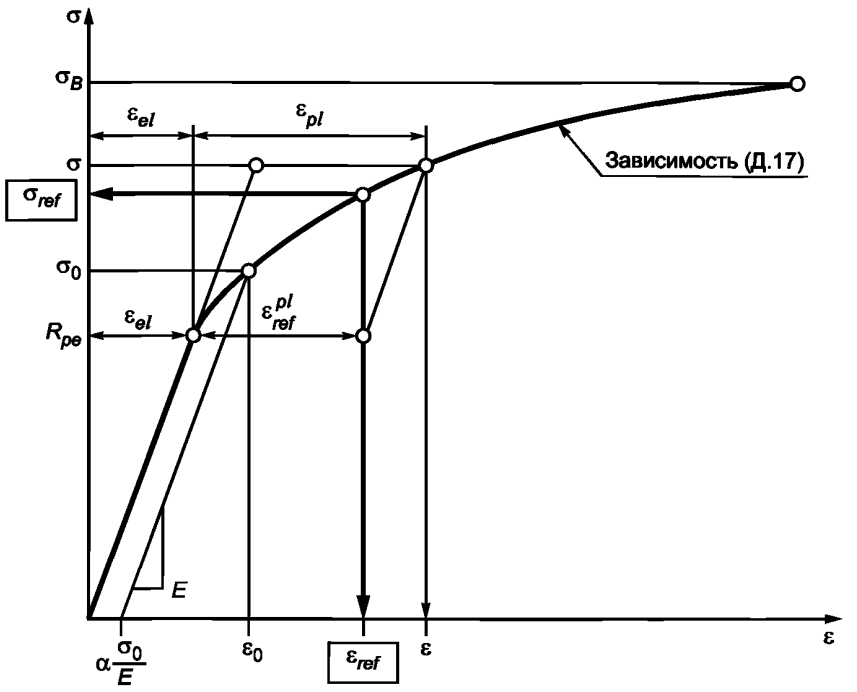


Рисунок Д.2 — Истинная диаграмма деформирования материала σ(ε)

$\theta = \frac{c}{R}$ — полуугол раствора трещины длиной 2*c*, в рад;

c, *t* — соответственно полудлина трещины и толщина стенки;

R_i, *R*, R_0 — внутренний, срединный и наружный радиус трубы.

б) сквозная продольная трещина в трубе от действия мембранного напряжения σ_m

$$\sigma_{ref} = \sigma_m \sqrt{1 + 1{,}05 \frac{c^2}{R_i t}}\ . \qquad (Д.27)$$

Д.3.8 Предельную длину трещины $2c_c$ рассчитывают по критерию пластической нестабильности с использованием величины референсного напряжения σ_{ref} из формул (Д.26) или (Д.27)

$$\sigma_{ref} = \sigma_f, \qquad (Д.28)$$

где $\sigma_f = 0{,}5(\sigma_{0.2} + \sigma_B)$ — напряжение пластической нестабильности материала.

Вместо значений $\sigma_{0.2}$ и σ_B допускается использовать минимальные гарантированные значения $R_{p0.2}$ и R_m.

Д.3.9 Предельную длину трещины $l_c = 2c_c$ под действием приложенной обобщенной нагрузки *P* с использованием *J*/J_R и *J*/*T* подходов рассчитывают по критериям:

- страгивания трещины:

$$J(P, l_c) = J_i = J_c; \qquad (Д.29)$$

- стабильного подроста трещины на 0,2 мм:

$$J(P, l_c) = J_{0.2}\ (\Delta l = 0{,}2\ \text{мм}); \qquad (Д.30)$$

- устойчивого роста трещины:

$$J(P, l_c) = J_R\ (\Delta l); \qquad (Д.31)$$

- перехода к нестабильному росту трещины:

$$\frac{\partial J(P, l_c)}{\partial l} = \frac{dJ_R}{dl} \quad \text{или} \quad T_{appl} = T_{mat}; \qquad (Д.32)$$

- нестабильного роста трещины:

$$\frac{\partial J(P, l_c)}{\partial l} > \frac{dJ_R}{dl} \quad \text{или} \quad T_{appl} = T_{mat}. \qquad (Д.33)$$

Здесь $J(P, l_c) = J_{appl} = J_{appl}(P_{appl}, l)$ — значение J для трещины размером l под действием приложенной нагрузки P, рассчитывают по уравнению (Д.24).

J_i — характеристика материала, определяемая по J_R-кривой в момент начала движения трещины (обычно $J_i = J_c$, где $J_c = \frac{K_c^2}{(1-\nu^2)E}$);

$J_{0.2} = J_R(\Delta l = 0{,}2$ мм) — характеристика сопротивления разрушению на J_R-кривой при начальном стабильном подросте трещины на 0,2 мм.

Величина Δl, для которой выполняются условия формул (Д.31) — (Д.32), соответствует предельному докритическому подросту трещины.

Критерий стабильности постулируемой трещины, для которой рассчитан J_{appl} при заданных условиях нагружения, имеет вид

$$T_{appl} < T_{mat}. \qquad (Д.34)$$

Д.3.10 Приложенное значение модуля разрыва T_{appl} и характеристика сопротивления материала пластическому разрыву T_{mat} определяются наклоном кривых J и J_R-кривых из выражений:

$$T_{appl} = \frac{E}{\sigma_0^2}\frac{\partial J_{appl}}{\partial l}, \qquad (Д.35)$$

$$T_{mat} = \frac{E}{\sigma_0^2}\frac{dJ_R}{dl}, \qquad (Д.36)$$

где σ_0 — базисное напряжение на истинной диаграмме $\sigma(\varepsilon)$ согласно аппроксимации (Д.25) на рисунке Д.2.

В соответствии с уравнениями (Д.32) и (Д.35) после докритического подроста трещины на величину Δl предельный размер трещины c, соответствующий точке касания расчетной кривой $J(P, l)$ с J_R-кривой, определяют в точке пересечении кривых T_{appl} и T_{mat} (см. рисунок Д.3).

Д.3.11 Для анализа стабильности трещины и определения предельных размеров трещин с учетом устойчивого докритического подроста могут применяться как стандартные J_R-кривые, так и модифицированные J_D и J_M-кривые.

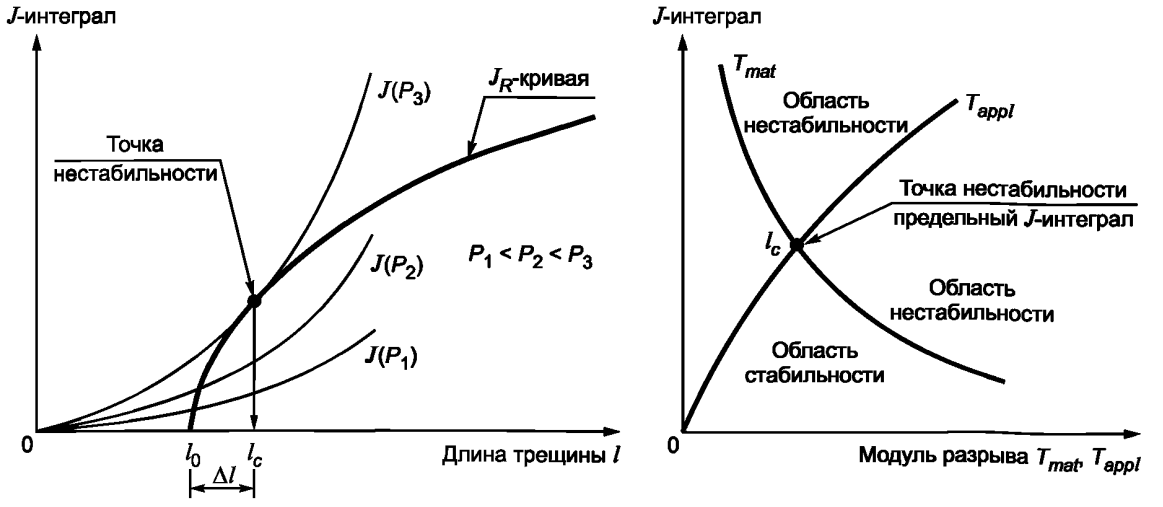


Рисунок Д.3 — Иллюстрация стабильного роста трещины на диаграммах J/J_R и J/T_{appl}

Приложение Е
(рекомендуемое)

Определение размеров выявляемой трещины течи

Расчет размера постулируемой по расходу сквозной трещины длиной $2c_{LD}$ при заданных параметрах теплоносителя, характеристиках материала и нагрузках в режиме НУЭ (100 %-ная мощность) включает в себя три этапа:

- расчет площади раскрытия сквозной трещины A в зависимости от ее длины;
- расчет расхода теплоносителя Q через площадь истечения A;
- определение длины трещины $2c_{LD}$, обнаруживаемой по расходу $Q_{LD} = n_Q \cdot Q_0$, как обратной функции расхода Q и площади истечения A.

Е.1 Расчет площади раскрытия сквозной трещины

Е.1.1 Расчет площади раскрытия трещины выполняют с использованием:

- верифицированных инженерных методов упругопластической механики разрушения, разработанных для тонкостенных труб/цилиндров;
- численных процедур МКЭ для любых геометрий, включая толстостенные трубы малого диаметра.

Для трубопроводов контура теплоносителя реактора рекомендуется использовать методы из первой группы.

Е.1.2 Расчет площади раскрытия трещины выполняют для режима НУЭ с использованием максимальных значений прочностных характеристик основного металла или металла шва. При их отсутствии допускается использовать значения характеристик $R_{p0.2}$ и R_m для основного металла, приведенных в [11], с повышающим коэффициентом 1,2. Учитывают толщину слоя наплавки (в запас).

Е.1.3 Не учитывают исходные самоуравновешенные остаточные напряжения в сварных швах, не прошедших термообработку и до появления сквозной трещины. При появлении сквозной трещины, действовавшие по толщине стенки остаточные напряжения снимаются с берегов трещины, а влияние перераспределенных остаточных напряжений в оставшемся бездефектном сечении сварного шва на искривление и раскрытие берегов сквозной трещины незначительно и перекрывается введенными коэффициентами запаса.

Е.1.4 Площадь раскрытия сквозной трещины A является функцией приложенных напряжений, длины и формы сквозной трещины, геометрии трубы и механических характеристик основного металла.

Е.1.5 Площадь раскрытия сквозной трещины длиной $2c$ в трубах под действием приложенного к плоскости трещины нормального напряжения S_n в режиме НУЭ выполняют по формулам:

$$A = \alpha(\lambda) \cdot \gamma(s) \cdot A_0, \tag{Е.1}$$

$$A_0 = \frac{\pi \delta c}{2} = 7{,}54 \left(\frac{\sigma_{eqv}}{E} \right) c^2, \tag{Е.2}$$

где A_0 — площадь раскрытия сквозной трещины эллиптической формы длиной $2c$ в бесконечной пластине под действием эквивалентного напряжения σ_{eqv}, определяемого как среднее значение приложенных по толщине стенки мембранных напряжений;

δ — величина раскрытия берегов трещины (см. рисунок 1);

E — модуль упругости;

$\alpha(\lambda)$ — параметр трубы, зависящий от ориентации сквозной трещины:

- для осевых (продольных) трещин

$$\alpha(\lambda) = 1 + 0{,}1\lambda + 0{,}16\lambda^2, \text{ если } \lambda \le 8 \tag{Е.3}$$

при $\sigma_{eqv} = S_n = \sigma_m = \dfrac{pR_i}{t}$; (Е.4)

- для кольцевых (поперечных) трещин

$$\alpha(\lambda) = \sqrt{1 + 0{,}1176\lambda^2}, \text{ если } \lambda \le 5 \tag{Е.5}$$

при $\sigma_{eqv} = S_n = \sigma_m + \sigma_b$, (Е.6)

где $\lambda = \left(12\left(1 - \nu^2\right)\right)^{0,25} \dfrac{c}{\sqrt{Rt}}$;

p — рабочее давление в трубе;

R, R_i — соответственно внутренний и средний радиус трубы;

t — толщина стенки,

$\gamma(s)$ — поправка на размер пластической зоны:

$$\gamma(s) = \frac{1 - s^3}{(1 - s^2)^2} \tag{Е.7}$$

при $s = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{\sigma_{eqv}}{\sigma_f}\right)$ (Е.8)

или

$$\gamma(s) = \left(1 + \frac{s^2}{2}\right)^{1,5} - \left(\frac{s^2}{2}\right)^{1,5} \quad \text{(Е.9)}$$

при $s = \frac{\sigma_{eqv}}{\sigma_f}$, (Е.10)

где $\sigma_f = 0,5(R_{p0.2} + R_m)$.

Е.1.6 Расчет площади раскрытия продольных трещин в колене выполняют по формуле (Е.1), где вместо мембранного напряжения $S_n = \sigma_m$ используют эквивалентное напряжение σ_{eqv}, равное среднему значению окружных напряжений на внутренней и наружной поверхности стенки колена. Параметр $\alpha(\lambda)$ рассчитывают по формуле

$$\alpha(\lambda) = \frac{\alpha_{cyl}(\lambda)}{\beta(\lambda)} \quad \text{(Е.11)}$$

$$\alpha_{cyl}(\lambda) = 1 + 0,181\lambda + 0,523\lambda^2 \text{ при } \lambda \le 5;$$

$$\lambda = \frac{c}{\sqrt{Rt}}.$$

$$\beta(\lambda) = \begin{cases} 1,292 - 0,0831\lambda - 0,0535\lambda^2 + 0,0116\lambda^3, \text{ вдоль внутреннего обвода} \\ 0,860 - 0,0143\lambda + 0,0412\lambda^2 - 0,0047\lambda^3, \text{ вдоль наружного обвода.} \end{cases}$$

Е.1.7 По результатам расчета строят зависимость площади раскрытия трещины от ее длины $A = f(2c)$, которую затем используют для определения расхода теплоносителя через площадь истечения.

Е.2 Определение расхода рабочей среды

Е.2.1 Общие требования

Е.2.1.1 Расчет расхода теплоносителя через постулируемую сквозную трещину выполняют для параметров среды и условий нагружения, соответствующих режиму НУЭ, с использованием соотношения

$$Q = q \cdot COA, \quad \text{(Е.12)}$$

где q — интенсивность течи (удельный массовый расход через единицу площади истечения);

COA — площадь истечения принимают равной площади раскрытия трещины A (см. Е.1).

Е.2.1.2 Интенсивность течи через сквозную трещину зависит от термодинамических условий на входе в трещину, типа трещины, раскрытия ее берегов, длины пути истечения вдоль траектории трещины, гидравлического сопротивления потоку, эффектов трения, других морфологических параметров трещины, влияющих на скорость истечения.

Е.2.1.3 Для каждого случая используются свои модели истечения и методы расчета, учитывающие особенности состояния истекающей среды, эффекты трения, геометрические параметры трещины.

Е.2.1.4 Для получения наименьшего расхода течи рекомендуется выполнить расчет с использованием разных методов и выбрать то решение, которое дает наименьшую скорость истечения.

Е.2.2 Однофазное истечение недогретой воды

Е.2.2.1 Массовый расход течи определяется зависимостью

$$Q = C_D(p_0\rho_0)^{0,5} WL, \quad \text{(Е.13)}$$

где Q — массовый расход теплоносителя через трещину;

C_D — коэффициент расхода, учитывающий трение;

p_0 и ρ_0 — соответственно давление и плотность воды на входе в трещину;

W — средняя ширина трещины (см. рисунок Е.1);

$L = 2c$ — длина трещины вдоль срединной поверхности.

Для трубы среднюю ширину трещины определяют по формуле

$$W = \frac{W_{in} + W_{ex}}{2}, \quad \text{(Е.14)}$$

$$W_{in} = \frac{A_{in}}{L}, W_{ex} = \frac{A_{ex}}{L}, \quad \text{(Е.15)}$$

где W_{in}, W_{ex} — ширина трещины на входе в трубу и на выходе из трубы, соответственно;

A_{in}, A_{ex} — площадь трещины на входе в трубу и на выходе из трубы, соответственно.

Значения параметров A_{in} и A_{ex} определяют через площадь раскрытия сквозной трещины A

$$A_{in} = A\frac{R_i^2}{R^2}, \quad A_{ex} = A\frac{R_{ex}^2}{R^2}, \tag{E.16}$$

R_0, R, R_i — наружный, средний и внутренний радиусы трубы соответственно.

Е.2.2.2 Для определения коэффициента расхода C_D предварительно рассчитывают коэффициент трения f, параметр расхождения трещины d и коэффициента потери на трение F.

Коэффициент трения определяют из соотношения

$$f = \left[3{,}64lg\left(\frac{2W}{\mu}\right) - 2{,}636\right]^{-2}, \tag{E.17}$$

где μ — шероховатость поверхности трещины (см. Е.2.4).

Параметр расхождения трещины d рассчитывают по формуле

$$d = \frac{W_{ex} - W_{in}}{2W}. \tag{E.18}$$

Коэффициент потери на трении F рассчитывают по формуле

$$F = f\frac{a}{W}, \tag{E.19}$$

где a — глубина трещины, принимаемая равной толщине стенки t.

Коэффициент расхода C_D определяют из соотношений

$$C_D = \begin{cases} 0{,}4\left(1-d\right), \text{ если } d > 0,\ F < F_1 \\ \dfrac{\left(1-d^2\right)}{\left(1+\left(2F\right)^{0,5}\right)}, \text{ если } d > 0,\ F_1 < F < F_2 \\ \dfrac{\left(1-d^2\right)}{\left[1-\left(\dfrac{p_{ex}}{p_0}\right)^2\right]^{0,5}\left(1+\left(2F\right)^{0,5}-k\right)}, \text{ если } d > 0,\ F > F_2 \\ \min\left(0{,}4;\ 0{,}6\left(1+d\right), \dfrac{\left(1-d^2\right)}{\left(1+\left(2F\right)^{0,5}\right)}\right), \text{ если } d < 0,\ F < F_2 \\ \dfrac{\left(1-d^2\right)}{\left[1-\left(\dfrac{p_{ex}}{p_0}\right)^2\right]^{0,5}\left(1+\left(2F\right)^{0,5}-k\right)}, \text{ если } d > 0,\ F > F_2 \end{cases}, \tag{E.20}$$

где p_0, p_{ex} — соответственно внутреннее давление трубы и внешнее давление;

параметры F_1, F_2 и k определяют из соотношений

$$F_1 = \frac{\left(1{,}5+2{,}5d\right)^2}{2}, \quad F_2 = \frac{\left(\left(1-d\right)\left(\dfrac{p_0}{p_{ex}}\right)-1\right)^2}{2}, \quad k = \left(1-d\right)\left(\left(\frac{p_0}{p_{ex}}\right)-\left[\left(\frac{p_0}{p_{ex}}\right)^2-1\right]^{0,5}\right).$$

Е.2.3 Двухфазный поток истечения

Е.2.3.1 Для определения расхода двухфазной (пароводяной) среды, через узкий протяженный канал используют уравнение термодинамического равновесия гомогенного потока

$$G_c^2 - \frac{1}{\left[\frac{X_c \nu_{gc}}{\gamma_0 p_c} - \left(\nu_{gc} - \nu_{Lc}\right) N_1 \frac{dX_E}{dp}\right]} = 0 \qquad (Е.21)$$

$$p_c + p_e + p_a + p_f + p_k + p_{aa} - p_0 = 0, \qquad (Е.22)$$

где G_c — массовый расход на единицу площади;

p_c — абсолютное давление на выходе трещины, МПа;

p_e — потери давления, вызванные сопротивлением на входе в трещину, МПа;

p_f — потери давления, вызванные трением в канале трещины, МПа;

p_a — потери давления, вызванные ускорением потока, МПа;

p_{aa} — потери давления, вызванные изменением площади трещины на пути потока, МПа;

p_k — потери давления, вызванные наличием выступов (поворотов на 90°), МПа;

p_0 — абсолютное давление на входе в трещину, МПа;

γ_0 — коэффициент изоэнтропического расширения;

ν_{gc}, ν_{Lc} — удельные объемы пара и жидкости на выходе из трещины;

X_c, X_E — характеристики неравновесного и равновесного качества смеси

$$X_c = N_1 X_E \left(1 - e^{-0{,}0523\left(\frac{L_a}{D_h} - 12\right)}\right),$$

где $X_E = \dfrac{S_o - S_{Lc}}{S_{gc} - S_{Lc}}$;

$$N_1 = \begin{cases} 20X_E, \text{ если } X_E < 0{,}05 \\ 1, \text{ если } X_E \geq 0{,}05 \end{cases}, \qquad (Е.23)$$

где L_a — протяженность канала;

$D_h = 4A_{ex}/P_{ex}$ — гидравлический диаметр канала на выходе из трубы, определяющий соотношение между площадью поперечного сечения канала A_{ex} и периметром его смоченной поверхности P_{ex};

S_o — энтропия воды на входе в трещину;

S_{gc} — энтропия насыщенного пара на выходе из трещины;

S_{Lc} — энтропия воды на выходе из трещины.

Е.2.3.2 Потери давления, вызванные сопротивлением кромок на входе в трещину, определяют по формуле

$$p_e = \frac{G_0^2 \nu_{L0}}{2C_D^2}, \qquad (Е.24)$$

$$C_D = \begin{cases} 0{,}95, \text{ если } COD < 0{,}15 \\ 0{,}62, \text{ если } COD \geq 0{,}15 \end{cases},$$

где G_0 — массовый расход через единицу площади на входе в трещину;

ν_{L0} — удельный объем насыщенной жидкости при входном давлении;

COD — раскрытие берегов трещины.

Е.2.3.3 Потери давления, вызванные трением, определяют по формуле

$$p_f = f \frac{L_a}{D_h} \frac{\overline{G}^2}{2} \left[\left(1 - \overline{X}\right)\overline{\nu}_L + \overline{X}\overline{\nu}_g\right], \qquad (Е.25)$$

где $\overline{G}$ — средний массовый расход жидкости на единицу площади;

$\overline{X}$ — осредненные свойства жидкости;

$\overline{\nu}_L$, $\overline{\nu}_g$ — средний объем насыщенного пара и жидкости при среднем давлении внутри трещины;

μ — шероховатость поверхности канала (см. Е.2.3);

f — коэффициент трения, определяемый из соотношения

$$f = \left[C_1 \log\left(\frac{D_h}{\mu}\right) + C_2\right]^{-2}, \qquad (Е.26)$$

$C_1 = 2$, $C_2 = 1{,}74$ при $D_h/\mu > 100$;

$C_1 = 3{,}39$, $C_2 = -0{,}866$ при $D_h/\mu \leq 100$.

Е.2.3.4 Потери давления, вызванные наличием выступов, определяют по формуле

$$p_k = e_n L_a \frac{\bar{G}^2}{2}\left[(1-\bar{X})\bar{\nu}_L + \bar{X}\bar{\nu}_g\right], \quad (E.27)$$

где e_n — коэффициент потерь на единицу длины при заданном типе трещины.

Е.2.3.5 Потери давления, вызванные ускорением потока, определяют по формуле

$$p_a = \bar{G}_T^2\left[(1-X_c)\nu_{Lc} + X_c\nu_{gc} - \nu_{Lc}\right], \quad (E.28)$$

где $\bar{G}_T$ — средний массовый поток двухфазной среды на единицу площади.

Е.2.3.6 Потери давления, обусловленные изменением площади канала, определяют по формуле

$$p_{aa} = \frac{G_c^2\nu_{L0}}{2}\left[\left(\frac{A_{ex}}{A_i}\right)^2 - \left(\frac{A_{ex}}{A_{in}}\right)^2\right] + \frac{G_c^2}{2} + \left[(1-\bar{X})\bar{\nu}_{Lc} + \bar{X}\bar{\nu}_{gc}\right]\left[1-\left(\frac{A_{ex}}{A_i}\right)^2\right], \quad (E.29)$$

где A_i — площадь поперечного сечения трещины, определяемая из соотношения

$$A_i = A_{in} + \frac{12D_h}{L_a}\left(A_{ex} - A_{in}\right). \quad (E.30)$$

Е.2.3.7 Для нахождения удельного массового расхода двухфазной пароводяной среды через постулируемую сквозную трещину решают нелинейные уравнения (Е.21 и Е.22) относительно неизвестных G_c и p_c.

Массовый расход пароводяной среды Q определяют из соотношения

$$Q = G_c \cdot A_{ex}. \quad (E.31)$$

Е.2.4 Морфология трещины

При определении интенсивности истечения используются такие морфологические параметры трещины, как шероховатость поверхности канала μ, число поворотов на 90° в траектории течи n_t и отклонение траектории потока от прямолинейного направления (отношение $\frac{L_a}{t}$).

Е.2.4.1 Шероховатость поверхности канала μ определяют по формуле

$$\mu = \begin{cases} \mu_L, & 0 < \dfrac{COD}{\mu_G} < 0{,}1; \\ \mu_L + \dfrac{\mu_G - \mu_L}{9{,}9}\left[\dfrac{COD}{\mu_G} - 0{,}1\right], & 0{,}1 < \dfrac{COD}{\mu_G} < 10; \\ \mu_G, & \dfrac{COD}{\mu_G} > 10, \end{cases} \quad (E.32)$$

где μ_L — локальная неровность поверхности канала;

μ_G — глобальная шероховатость поверхности канала;

COD — раскрытие трещины (см. рисунок Е.1*а*).

Е.2.4.2 Число поворотов на 90° в траектории течи n_t, совершаемых потоком жидкости при прохождении через трещину, определяют следующим образом:

$$n_t = \begin{cases} n_{tL}, & 0 < \dfrac{COD}{\mu_G} < 0{,}1; \\ n_{tL} - \dfrac{n_{tL}}{11}\left[\dfrac{COD}{\mu_G} - 0{,}1\right], & 0{,}1 < \dfrac{COD}{\mu_G} < 10; \\ 0{,}1n_{tL}, & \dfrac{COD}{\mu_G} > 10, \end{cases} \quad (E.33)$$

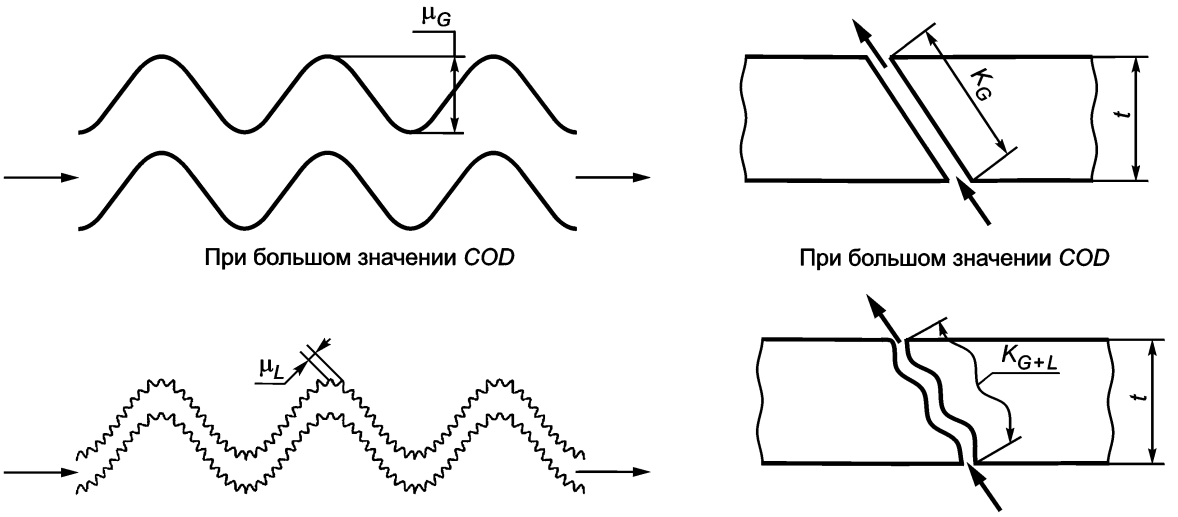
где n_{tL} — локальное количество поворотов.

Е.2.4.3 Отношение протяженности потока к толщине стенки трубы определяют по формуле

$$\frac{L_a}{t}=\begin{cases}K_{G+L}, & 0<\dfrac{COD}{\mu_G}<0{,}1;\\ K_{G+L}-\dfrac{K_{G+L}-K_G}{9{,}9}\left[\dfrac{COD}{\mu_G}-0{,}1\right], & 0{,}1<\dfrac{COD}{\mu_G}<10;\\ K_G, & \dfrac{COD}{\mu_G}>10,\end{cases} \qquad \text{(Е.34)}$$

где L_a— фактическая длина пути потока;

K_G, K_{G+L} — соответственно коэффициент основного отклонения и коэффициент основного отклонения с учетом локальных отклонений траектории развития трещины от прямолинейного положения (см. рисунок Е.1 *б*).



а — глобальная и локальная шероховатость поверхности трещины;
б — отклонение траектории развития трещины от прямолинейного пути

Рисунок Е.1 — Схематичное изображение морфологии трещины

Е.2.4.4 Значения морфологических параметров трещин с различным механизмом разрушения в сталях перлитного и аустенитного классов приведены в таблицах Е.1 и Е.2.

Таблица Е.1 — Расчетные значения морфологических параметров трещины в сталях перлитного класса

Механизм деградации	Среда	μ_L, мкм	μ_G, мкм	n_{tL}, мм$^{-1}$	K_{G+L}	K_G
Усталостная трещина в контакте с водой	Двухфазная	8	33	6	1,06	1,02
Примечание — Для поднаплавочных трещин, не контактирующих с водой, значение n_{tL} принимают равным 2 (мм$^{-1}$)						

Таблица Е.2 — Расчетные значения морфологических параметров трещины в коррозионно-стойких сталях аустенитного класса

Механизм деградации	Среда	μ_L, мкм	μ_G, мкм	n_{tL}, мм$^{-1}$	K_{G+L}	K_G
Усталостная трещина в контакте с водой	Двухфазная	8,9	40	6	1,06	1,01
Коррозионная трещина МКРПН	Двухфазная	4,7	80	14	1,33	1,07

Е.2.5 Истечение острого пара

Е.2.5.1 Удельный массовый расход острого пара при его истечении через круглое отверстие в тонкой стенке определяется из уравнения

$$q_0 = \gamma\sqrt{\frac{2k}{k-1}p_0\rho_0\left(\left(\frac{p_н}{p_0}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_н}{p_0}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right)}, \quad (Е.35)$$

где γ — коэффициент расхода пара, характеризующий количественное отличие расхода реального пара через малый гидравлический канал от расхода идеального газа, т. е. учитывающий влияние сжатия струи пара и скорости пара на входе в малое отверстие;

p_0 — давление пара внутри трубопровода, МПа;

$p_н$ — давление снаружи, куда происходит истечение, МПа;

ρ_0 — плотность острого пара внутри трубы, кг/м^3;

$k = \frac{c_p}{c_v}$ — адиабатическая постоянная пара при заданной температуре;

c_p — изобарная теплоемкость, кДж/(К·кг);

c_v — изохорная теплоемкость, кДж/(К·кг).

Критическое отношение давления $\left(\frac{p_н}{p_0}\right)_{cr} = \beta_{cr}$, при котором истечение острого пара (идеального газа) достигает скорости звука, определяется из соотношения

$$\beta_{cr} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (Е.36)$$

Е.2.5.2 В зависимости от величины $\left(\frac{p_н}{p_0}\right) = \beta$ возможны различные сценарии процесса истечения пара:

- подкритический или дозвуковой процесс истечения при малом перепаде давления $\beta_{кр} < \beta < 1$. В этом случае удельный массовый расход острого пара определяется соотношением (Е.29);

- надкритический или сверхзвуковой процесс истечения при большом перепаде давления $0 < \beta < \beta_{кр}$. В этом случае массовый расход острого пара определяется уравнением

$$q_0 = \gamma\sqrt{\frac{2k}{k-1}p_0\rho_0\left(\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}} - \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}\right)}; \quad (Е.37)$$

- критический процесс истечения пара со скоростью звука при критическом перепаде давления $\beta = \beta_{кр}$. В этом случае массовый расход острого пара определяется уравнением

$$q_0 = \gamma\sqrt{\frac{2k}{k-1}p_0\rho_0\left(\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}\right)}. \quad (Е.38)$$

Е.2.5.3 Коэффициент расхода пара γ определяется из условия:

$$\gamma = \varphi\upsilon, \quad (Е.39)$$

где φ — коэффициент скорости истечения пара, который, как и в случае истечения несжимаемой жидкости, зависит от числа Рейнольдса.

При истечении пара из малого отверстия в тонкой стенке (большие числа Рейнольдса) коэффициент $\varphi = 0{,}98$;

υ — коэффициент сжатия потока пара, значения которого при истечении пара из малого отверстия в тонкой стенке затабулированы в зависимости от величины β.

Для главных паропроводов блоков АС при $\beta < \beta_{кр}$ (T = 281 — 285 °С, p_0 = 6,7—6,9 МПа, $p_н$ = 0,1 МПа и ρ_0 = 34—35 кг/м^3) принимается, что истечение острого пара происходит при критических условиях с использованием зависимости (Е.38), при которых величины k, υ и γ составляют: k = 1,13 — 1,14, $\upsilon \approx 0{,}74$ и $\gamma = 0{,}725$.

Е.2.5.4 Массовый расход острого пара через усталостную трещину определяют по формуле

$$Q = C_d q_0 A, \quad (Е.40)$$

где C_d = 0,4 — суммарный коэффициент сопротивления расходу пара через узкую усталостную трещину в углеродистой стали (принят в запас);

A — площадь раскрытия трещины.

Е.3 Определение длины постулируемой сквозной трещины

Е.3.1 Оценивают результаты определения расхода рабочей среды Q через постулируемую сквозную трещину в соответствии с Е.2.1—Е.2.4.

Е.3.2 Строят график зависимости расхода Q от длины сквозной трещины $2c$.

Постулируемому расходу с обнаруживаемой течью $Q_{LD} = n_Q \cdot Q_0$ на графике $Q = Q(2c)$ соответствует значение искомой трещины длиной $2c_{LD}$.

Е.3.3 Расчетную длину трещины определяют из следущего условия:

$$Q(2c_{LD}) = Q_{LD}. \qquad (Е.41)$$

Е.3.4 Выполняют анализ стабильности постулируемой по расходу Q_{LD} трещины длиной $2c_{LD}$ в соответствии с 7.4.2 и приложением Д.

Е.3.5 Результаты анализа ТПР удовлетворяют критерию стабильности постулируемой сквозной трещины при выполнении условия

$$2c_{LD} \le \frac{2c_c}{n_c}, \text{ где } n \ge 1{,}8. \qquad (Е.42)$$

Приложение Ж
(рекомендуемое)

Метод граничных расчетных кривых

Ж.1 Для проектируемых блоков ГРК, используемая для оценки ТПР применительно ко всем окружным сварным швам по всей длине трубопроводов, позволяет до выполнения прочностного обоснования включить рассмотрение ТПР в процесс проектирования трубопроводов и выявить критические сечения, где не выполняются расчетные критерии ТПР. Внесение изменений в трассировку и размещение опор трубопроводов по результатам упреждающей оценки ТПР еще на стадии проектирования позволяет снизить максимальные расчетные напряжения в контрольных зонах и в результате удовлетворить расчетным критериям ТПР. Для действующих АС анализ ТПР с позиций ГРК также позволяет найти слабое звено в трубопроводе относительно коэффициентов запаса.

Ж.2 ГРК разрабатывают для каждой ветки трубопровода, выполненной из одного сортамента труб (внутренний диаметр, минимальная толщина стенки), имеющей одинаковые свойства основного металла и эксплуатирующейся в режиме НУЭ при одинаковом рабочем давлении и температуре. Чувствительность Q_0 для СКТ также должна быть установлена [Б.2.3 (приложения Б)]. Любое изменение в этих входных данных потребует разработки новой ГРК.

Ж.3 ГРК разрабатывается путем введения следующих запасов:

- коэффициент запаса n_Q не менее 5 на значение Q_0 (например, Q_0 = 3,8 кг/мин);
- коэффициент запаса n_c не менее 1,8 на размер трещины.

Ж.4 Минимум две расчетные точки требуются для построения ГРК в виде прямой линии, для чего необходимо выполнить два расчета. Одну точку выбирают по условию предполагаемого низкого напряжения изгиба $\sigma_{b(1)}$, другую точку — по условию высокого напряжения изгиба $\sigma_{b(2)}$.

Ж.5 При выбранных коэффициентах запаса n_Q и n_c используют следующую процедуру построения ГРК для анализируемого трубопровода:

- для определения координат начальной точки 1 для ГРК с низким напряжением изгиба $\sigma_{b(1)}$ рассчитывают осевую силу N_z от действия рабочего давления p при НН и соответствующее осевое напряжение σ_m, нормальное плоскости сечения трубы по следующим формулам:

$$N_z = p\pi R_i^2, \qquad (Ж.1)$$

$$\sigma_m = \frac{N_z}{F}, \qquad (Ж.2)$$

где $F = 2\pi Rt$ — площадь поперечного сечения трубы;

R_i, R — соответственно внутренний и средний радиус трубы;

t — толщина стенки трубы.

Принимают некоторое произвольное малое значение напряжения изгиба, ниже ожидаемого из расчета напряжений, например $\sigma_{b(1)}$ = 10 МПа, и вычисляют соответствующий изгибающий момент M_b

$$M_{b(1)} = \sigma_{b(1)} W_M, \qquad (Ж.3)$$

где $W_M = \pi R^2 t$ — модуль сопротивления изгибу поперечного сечения трубы;

- используя значения N_z и $M_{b(1)}$ или σ_m и $\sigma_{b(1)}$ в соответствии с рекомендациями приложения Е рассчитывают размер сквозной трещины $2c_{LD(1)}$, течь через которую в n_Q раз больше, чем чувствительность Q_0;
- выполняют анализ стабильности постулируемой окружной трещины в соответствии с рекомендациями приложения Д, сохраняя постоянным значение силы N_x (или напряжения σ_m) и варьируя прикладываемый изгибающий момент M_b (или напряжение σ_b) таким образом, чтобы определить предельный размер трещины $2c_c$, который должен быть в n_c раза больше размера трещины течи $2c_{LD}$.

Из анализа стабильности трещины длиной $2c_{c(1)} = 2c_{LD(1)} \cdot n_c$ вычисляют предельный изгибающий момент $M_{b,\max(1)}$ и соответствующее предельное напряжение изгиба $\sigma_{b,\max(1)}$;

- определяют нормальное напряжение $S_{n(1)}$ и максимальное напряжение $S_{\max(1)}$ (см. В.2.10) и наносят их значения на график ГРК в виде координат точки *1* ($S_{n(1)}$, $S_{\max(1)}$), как показано на рисунке Ж.1;
- аналогичные шаги выполняют для определения координат точки *2*, выбрав более высокое значение напряжения изгиба $\sigma_{b(2)}$, например 100 МПа. Изменение между координатами точек *1* и *2* происходит в результате более высокого предельного изгибающего момента $M_{b,\max(2)}$ и соответствующего предельного напряжение изгиба $\sigma_{b,\max(2)}$;
- прямая линия между точками *1* и *2* есть линейная аппроксимация ГРК (см. рисунок Ж.1). Для получения более точной расчетной кривой между этими точками, эти шаги могут повторяться для ряда промежуточных уровней напряжения изгиба от 10 до 100 МПа.

Ж.6 Значения суммарных осевых напряжений S_n и $S_{\max}$ для каждой точки ГРК рассчитывают по формуле

$$S = \frac{N_z}{F} + \frac{M_b}{W}, \qquad (Ж.4)$$

где при постоянном значении осевой силы N_z значения S_n и S_{max} определяют соответственно при изгибающем моменте M_b и $M_{b,max}$.

Ж.7 Величина S_n необходима для определения расхода утечки через постулируемую сквозную трещину при НН, величина S_{max} — для определения предельной длины сквозной трещины при МРН в режиме НУЭ+МРЗ в соответствии с В.2.4— В.2.7, В.2.10 (приложение В).

Ж.8 Для оценки пригодности анализируемого трубопровода расчетным критериям ТПР следует для каждого расчетного сечения (сварного шва) трубопровода рассчитать значения S_n и S_{max} соответственно для условий нагружения в режимах НУЭ и НУЭ+МРЗ. Нормальное напряжение S_n в режиме НУЭ и максимальное напряжение S_{max} в режиме НУЭ+МРЗ определяют из анализа напряжений для всего трубопровода [В.2.2—В.2.3 (приложение В)]. Далее точки (S_n, S_{max}), рассчитанные по формуле (Ж.4) для каждого сварного соединения, помещают на график ГРК и оценивают результаты.

Ж.9 Если выбранная расчетная точка (S_n, S_{max}) находится под ГРК, то данное сечение (сварное соединение) трубопровода удовлетворяет расчетным критериям ТПР. Такая проверка выполняется для всех сечений, где напряжение S_n превышает 50 МПа. Если хотя бы одна точка, соответствующая какому-либо сечению трубопровода с координатами (S_n, S_{max}) находится выше ГРК, то трубопровод в целом не может быть квалифицирован для применения ТПР.

Ж.10 В качестве примера на рисунке Ж.1 суммарное осевое напряжение в трубопроводе для расчетного сечения А, представленное точкой A с координатами $(S_n, S_{max})_A$, удовлетворяет расчетным критериям ТПР, в то время как точка B с координатами $(S_n, S_{max})_B$, но уже для другого более нагруженного в режиме НУЭ совместно с МРЗ сечения B не удовлетворяет расчетным критериям ТПР.

Ж.11 Анализ расположения точек (S_n, S_{max}) для всех расчетных сечений каждого трубопровода относительно ГРК позволяет однозначно определить наиболее опасные участки и сварные соединения в анализируемом трубопроводе относительно выполнения условий ТПР с наглядной оценкой используемых в расчете коэффициентов запаса.

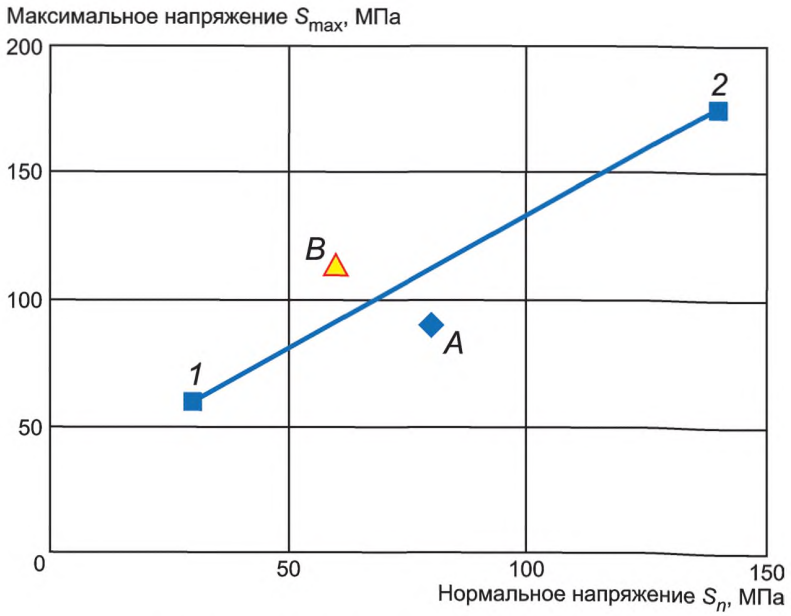


Рисунок Ж.1 — Линейная аппроксимация типичной ГРК

Приложение И
(рекомендуемое)

Обоснование целостности трубопроводов при наличии эксплуатационных дефектов

И.1 Применения подхода концепции «течь перед разрушением»

И.1.1 Применение подхода ТПР для трубопроводов контура теплоносителя действующих блоков АС, подверженных контролируемым механизмам деградации, следует рассматривать как одну из компенсирующих мер по обеспечению конструкционной целостности анализируемых трубопроводов, которая должна подтвердить возможность дальнейшей безопасной эксплуатации блока АС.

И.1.2 При выявлении в процессе эксплуатации неучтенных в проекте специфических нагрузок на трубопроводы (см. 5.2.3) или механизмов деградации (см. 5.2.4) следует провести дополнительное расчетное обоснование сценария ТПР и в итоге показать, что они не оказывают существенного влияния на оценки стабильности постулируемой сквозной трещины и предельного подроста начального скрытого дефекта, а также на выполненную ранее оценку результатов детерминистского обоснования ТПР в части удовлетворения расчетных критериев в соответствии с 7.4.2—7.4.3 при условии выполнения резервных принципов б)—г) 5.1.3 и с учетом предпринятых компенсирующих мер согласно 5.2.5 и перечислению а) 5.2.2.

И.1.3 Если указанная в И.1.2 демонстрация ТПР невозможна, то должны быть предусмотрены корректирующие мероприятия, направленные на снижение влияния обнаруженных механизмов деградации и/или специфических нагрузок до приемлемого уровня.

И.1.4 Если корректирующие мероприятия по И.1.3 нереализуемы по техническим или экономическим причинам, то такие механизмы деградации или специфические нагрузки должны контролироваться системами мониторинга условий эксплуатации, неразрушающего контроля состояния металла и обнаружения течей, а результаты контроля — учитываться в обосновании сценария ТПР при формировании исходных данных по скоростям подрастания дефектов с оценкой расчетной геометрии постулируемых начальных трещин.

И.2 Предотвращение разрывов аустенитных трубопроводов при наличии дефектов

И.2.1 Модифицированная методология ТПР (см. 5.2.5), включая методы механики разрушения, наличие чувствительной СКТ, может использоваться для подтверждения конструкционной целостности трубопроводов, потенциально подверженных непроектным механизмам повреждений, выявляемых при эксплуатации, в частности трещинообразование по механизму МКРПН в сварных соединениях аустенитных трубопроводов ДУ от 200 до 300 мм канальных реакторов.

И.2.2 Для обеспечения конструкционной целостности аустенитных трубопроводов, подверженных МКРПН, и для исключения появления большой течи (ДУ > 150 мм) при отсутствии ограничений для проведения эксплуатационный неразрушающий контроль необходимо определить размеры допускаемых дефектов на заданный срок службы. В этом случае за счет оптимизированного контроля СС возможный подрост коррозионной трещины должен быть ограничен.

И.2.3 Сварные соединения аустенитных трубопроводов ДУ 300 мм канального реактора при наличии в них плоскостных несплошностей могут быть допущены в дальнейшую эксплуатацию на определенный период времени без проведения ремонта, если размеры выявленной поверхностной несплошности с учетом ее подрастания в межконтрольный интервал не превысят допускаемых значений по нормам, представленным в [8] (приложение 5).

И.2.4 Дополнительное расчетное обоснование, демонстрирующее поведение по сценарию ТПР, в сочетании с ограничением размеров дефектов и контролем малой течи позволяет предотвратить разрушения трубопроводов ДУ от 200 до 300 мм полным сечением. Рост трещины в глубину должен быть ограничен предельным значением 0,75 t.

В таком расчете в качестве начального скрытого дефекта постулируют референсный дефект, определяемый порогом его фиксации используемыми методами эксплуатационного НК.

В качестве референсного дефекта принимают поверхностную трещину глубиной $a_0 = 3$ мм и протяженностью вдоль внутренней поверхности сварного шва $2c_0 = 40$ мм (см. рисунок 3).

Скорости подрастания коррозионных трещин по механизму МКРПН определены в И.3.4—И.3.8, И.4.2.

И.2.5 В условиях затрудненного эксплуатационного НК методология ТПР используется для обоснования конструкционной целостности трубопроводов за счет расчетного доказательства невозможности их разрушения полным сечением даже при постулируемом событии, связанном с образованием сквозной трещины.

И.2.6 Применительно к трещине МКРПН необходимо показать, что неконтролируемый коррозионно-статический рост референсного дефекта с выходом на наружную поверхность после прорастания через толщину стенки также происходит по сценарию ТПР с образованием малой течи, а его протяженность на внутренней поверхности сварного шва не превышает предельно допускаемой длины $2c_d$ (см. рисунок 3).

Значение $2c_d$ определяют согласно И.4.4—И.4.5.

Предотвращение разрушения трубопровода полным сечением достигается в этом случае за счет внедрения чувствительной СКТ.

И.2.7 Если при наличии механизма МКРПН расчетом невозможно продемонстрировать поведение по сценарию ТПР и обеспечить эффективный контроль металла, то в этом случае для предотвращения разрыва трубопровода требуется принятие компенсирующих мер, направленных на блокирование механизма роста трещин и предотвращение разрыва трубопровода.

В качестве корректирующих мероприятий рассматриваются:

- усовершенствованный УЗК сварных соединений;
- корректировка ВХР теплоносителя;
- уточнение требований к режимам эксплуатации;
- проведение технологических процедур (высокотемпературная термообработка, обжатие сварных соединений, ремонт с узкой разделкой), направленных на снижение остаточных напряжений;
- замена, ремонт или модернизация частей трубопроводов.

И.3 Оценка коррозионно-статического подрастания трещины

И.3.1 Целью расчета является определение подрастания размеров, охарактеризованного в И.2.4 референсного дефекта при длительной эксплуатации. Дефект в виде коррозионной трещины глубиной $a_0 = 3$ мм, протяженностью $2c_0 = 40$ мм постулируют в околошовной зоне корневой части стыкового СС аустенитного трубопровода ДУ от 200 до 300 мм.

И.3.2 Условия статического нагружения определяются действующими статическими напряжениями, значением коэффициента интенсивности напряжений K_{st} типа I и длительностью воздействия агрессивной среды t.

И.3.3 Для прогнозирования скорости роста коррозионной трещины в направлении толщины стенки аустенитного сварного шва в коррозионно-агрессивной среде рекомендуется использовать экспериментально обоснованные диаграммы КСРТ, полученные для рабочей среды заданных параметров.

И.3.4 В расчетах КСРТ используют два подхода.

Первый K-зависимый подход основан на аппроксимации эмпирических зависимостей, полученных по 95% верхним огибающим диаграмм КСРТ для сенсибилизированных СС аустенитных сталей типа 18-8 в водной среде кипящих реакторов при нормальном ВХР.

Второй K-независимый подход базируется на оценке среднегодовых подростов коррозионных трещин за время эксплуатации большинства сенсибилизированных СС, полученных из обработки массива данных по результатам эксплуатационного НК сварных соединений аустенитных трубопроводов ДУ 300 мм канальных реакторов типа РБМК.

И.3.5 При использовании K-зависимого подхода скорость роста коррозионной трещины в направлении толщины стенки (малой полуоси на рисунке В.1) описывается уравнением:

$$\frac{da}{dt} = C_{st} K_{st}^{m_s}, \qquad (И.1)$$

где $\frac{da}{dt}$ — скорость роста коррозионной трещины, мм/с;

K_{st} — КИН статических напряжений, включающих в себя компоненты эксплуатационных и остаточных напряжений от сварки, МПа$\sqrt{\text{м}}$;

C_{st}, m_s — константы материала, зависящие от условий нагружения, показателей ВХР, температуры, степени сенсибилизации СС.

И.3.6 Скорость роста коррозионной трещины вдоль периметра сварного шва (см. рисунок В.1) определяют зависимостью

$$\left(\frac{dc}{dt}\right) = 10\left(\frac{da}{dt}\right). \qquad (И.2)$$

И.3.7 При отсутствии термообработки распределение остаточных напряжений по толщине стенки аустенитных трубопроводов в зоне СС индивидуально для каждого стыкового СС, поскольку зависит от ряда факторов, включая тепловложение при сварке и жесткость свариваемых элементов.

И.3.8 Для определения скорости подроста коррозионных трещин в направлении толщины стенки СС трубопроводов из стали марки 08Х18Н10Т, не подвергавшимся термообработке или иным технологическим операциям, рекомендуется принимать следующие расчетные значения C_{st} и m_s для прогнозирования КСРТ $\left(\frac{da}{dt}\right)$ в СС стабилизированных сталях типа 18-8 в сенсибилизированном состоянии и контактирующих с кислородсодержащей водной средой при высокой температуре, близкой по составу к показателям качества воды КМПЦ РБМК при нормальном ВХР:

- без учета перераспределения осевых лекальных остаточных напряжений по толщине стенки в зависимости от роста трещины в эксплуатации (см. рисунок И.1*а*):

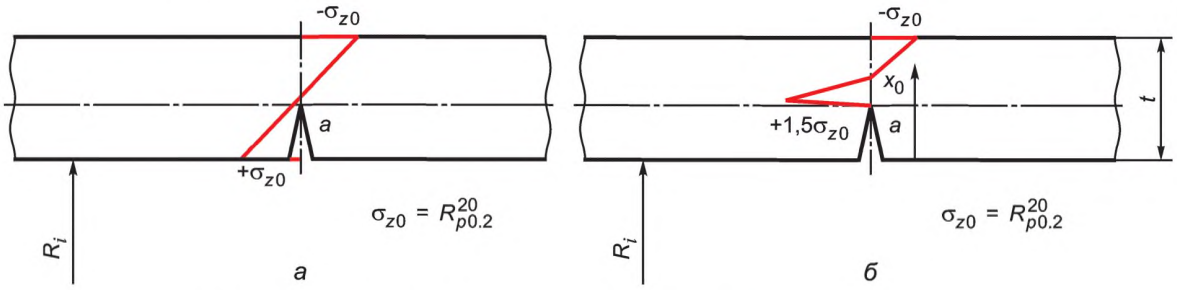
$$C_{st} = 1{,}46 \cdot 10^{-12}, \ m_s = 3{,}0 \quad \text{в мм/с} \qquad (И.3)$$

с верхним плато $3{,}94 \cdot 10^{-8}$ мм/с при $K_{st} \geq 30$ МПа$\sqrt{\text{м}}$ (зависимость MD-01 Rev.3);

- с учетом перераспределения осевых остаточных напряжений по толщине стенки по мере роста трещины в эксплуатации (см. рисунок И.1*б*):

$$C_{st} = 4{,}50 \cdot 10^{-12},\ m_s = 3{,}0 \text{ в мм/с}$$

с верхним плато 10^{-7} мм/с при $K_{st} \geq 50$ МПа$\sqrt{\text{м}}$ (зависимость MD-01 Rev.2.1).



а — исходное бездефектное состояние; *б* — перераспределенное состояние

Рисунок И.1 — Линеаризованное представление распределения локального осевого остаточного напряжения σ_z по толщине стенки в стыковом сварном соединении аустенитного трубопровода ДУ от 200 до 300 мм

И.4 Пример оценки подрастания коррозионной трещины

И.4.1 Оценивается скорость подрастания референсного дефекта 3×40 мм для наиболее нагруженного стыкового шва водоуравнительного трубопровода ДУ 300 мм с минимальной толщиной стенки t = 12 мм в зоне разделки шва, при предельном в режиме НУЭ эксплуатационном напряжении по нормали к сварному стыку σ_{nz} = 105 МПа = = 0,5 $R^{20}_{p0.2}$.

И.4.2 Согласно *K*-независимому эмпирическому подходу среднегодовые значения подростов коррозионных трещин за время эксплуатации большинства СС аустенитных трубопроводов с ДУ 300 мм реакторов РБМК составляют Δa = 1,0 мм/год в направлении толщины стенки до достижения глубины 0,6t и $2\Delta c$ = 20 мм/год в окружном направлении вдоль периметра сварного шва. Данные расчетные скорости подрастания трещины МКРПН могут быть переопределены по результатам эксплуатационного НК (см. И.4.11).

И.4.3 Расчеты скорости подрастания исходного референсного дефекта 3×40 мм с использованием зависимости (см. И.1) показывают следующие результаты:

- скорость подрастания референсного дефекта в глубину *da*/*dt* на участке от 3 до 9 мм, рассчитанная с использованием зависимости MD-01 Rev.3 ($C_{st} = 1{,}46 \cdot 10^{-12}$, m_s = 3,0) при неизменном поле остаточных напряжений (см. рисунок И.1*а*), слабо зависит от длины трещины, поскольку максимальное значение КИН на небольшом участке при глубине трещины $a \approx t/2$ не превышает значения 32 МПа$\sqrt{\text{м}}$ (начальное значение K_{st} = 28 МПа$\sqrt{\text{м}}$), а затем вновь снижается до значения K_{st} = 29 МПа$\sqrt{\text{м}}$, при глубине трещины 0,8 t.

Средняя скорость $\frac{da}{dt} = 4{,}1 \cdot 10^{-8}$ мм/с, что соответствует 1,0 мм/год при длительности одного эксплуатационного года 7000 ч.

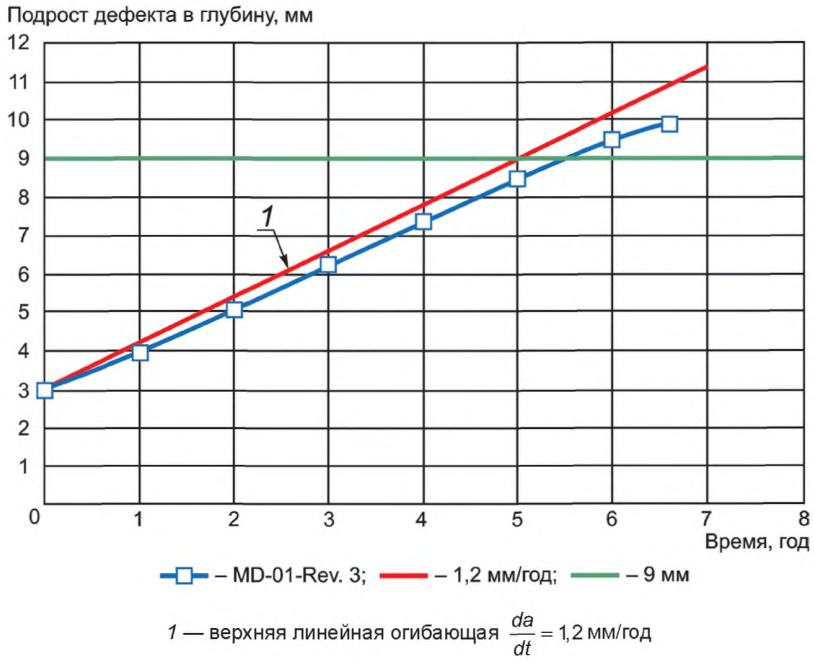
С учетом поправки на выявленный подрост трещин МКРПН в режимах пуска и останова средняя скорость роста трещины $\frac{da}{dt}$ составляет 1,2 мм/год. Результаты расчета показаны на рисунке И.3.

Средний подрост референсного дефекта по периметру СС составляет $\frac{dc}{dt} = 2 \cdot 10 \frac{da}{dt} = 24$ мм/год;

- скорость подрастания референсного дефекта в глубину *da*/*dt* на участке от 3 до 9 мм, рассчитанная с использованием зависимости MD-01 Rev.2.1 ($C_{st} = 4{,}50 \cdot 10^{-12}$, m_s = 3,0) при изменяющемся поле остаточных напряжений (см. рисунок И.1*б*), возрастает с ростом глубины и при ежегодном приросте ее длины на 24 мм. По результатам расчета определена диаграмма КСРТ в СС ДУ 300 мм КМПЦ, включающая в себя два плато скоростей роста трещин.

В диапазоне глубин трещин от 3 до 8 мм ее скорость *da*/*dt* увеличивается от 0,3 мм/год до 2,3 мм/год.

Верхнее плато скорости роста трещины в направлении толщины стенки при $K_{st} \geq 30$ МПа$\sqrt{\text{м}}$ установлено на уровне 10^{-7} мм/с = 2,5 мм/год.



1 — верхняя линейная огибающая $\frac{da}{dt} = 1{,}2$ мм/год

Рисунок И.2 — Среднегодовые подросты референсного дефекта в направлении толщины стенки (нижняя кривая)

Результаты расчета подрастания трещины показаны на рисунке И.3.

Максимальный подрост коррозионной трещины вдоль периметра сварного шва $\frac{dc}{dt} = 2 \cdot 10 \frac{da}{dt}$ ограничен значением 40 мм/год.

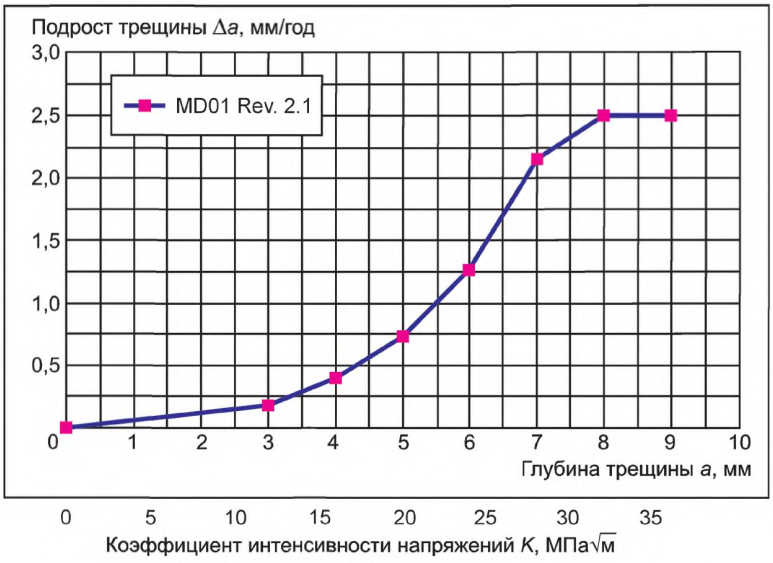


Рисунок И.3 — Среднегодовые подросты референсного дефекта в направлении толщины стенки в зависимости от глубины дефекта

И.4.4 Допускаемый размер поверхностного дефекта определяют путем построения диаграммы конструкционной целостности для режима НУЭ при расчетном напряжении по нормали к плоскости поперечного сварного шва $\sigma_{nz} = 105$ МПа $= 0{,}5\, R^{20}_{p0.2}$.

Граничную область предельно допустимых размеров дефекта в глубину (a_d) и длину ($2c_d$) определяют из условий

$$a_d \le 0{,}75 t_{\min}, \qquad (И.4)$$

$$2c_d \le \frac{2c_c}{n_c}, \qquad (И.5)$$

где t_{min} = 12 мм — минимальная толщина стенки в зоне разделки шва,

$2c_c$ — предельная длина сквозной трещины для режима НУЭ;

n_c = 2,0 — коэффициент запаса на длину сквозной трещины.

И.4.5 Значения a_d и $2c_d$ и соответственно коэффициентов запаса устанавливают из условий обеспечения целостности границ давления и ТПР в режиме нормальной эксплуатации.

Максимальные допустимые размеры дефекта (a_d, $2c_d$) определяют на конец срока оценки, которые не могут быть превышены в эксплуатации.

При t_{min} = 12 мм, допускаемая глубина дефекта a_d составляет 9 мм.

И.4.6 Значение предельной длины сквозной трещины $2c_c$ определяют расчетом в соответствии с рекомендациями Д.2.2.

И.4.7 В результате расчета предельного состояния для трубы с постулируемой окружной трещиной определена предельная длина сквозной $2c_c$ = 422 мм и соответствующая длина предельно допускаемого поверхностного дефекта $2c_d = 2c_c / 2 = 422 / 2 = 211$ мм (см. рисунок 3).

Предельно допустимая глубина поверхностного дефекта в эксплуатации не должна превышать a_d = 9 мм при длине $2c_d$ = 211 мм.

И.4.8 Границы допускаемых размеров дефекта a и $2c$, зависящие от времени подрастания дефекта, определяют из условия

$$[a]_\tau = a_d - \Delta a_\tau, \; [2c]_\tau = 2c_d - 2\Delta c_\tau, \qquad (И.6)$$

где Δa_τ и $2\Delta c_\tau$ — подросты дефекта в глубину и длину за расчетный период времени τ под действием эксплуатационных нагрузок и среды.

Ежегодные подросты Δa_τ и $2\Delta c_\tau$ определены в И.4.2—И.4.3.

И.4.9 Рассчитанные по разным подходам для временного интервала τ = 6 лет величины подростов Δa_τ и $2\Delta c_\tau$ референсного дефекта 3×40 мм и его размеры a_τ и $2c_\tau$ для рассмотренного сварного шва составят:

а) *K*-независимый подход:

1) Δa_τ = 1,0 мм/год, $a_\tau = 3 + 6 \cdot 1{,}0 = 9$ мм $\le a_d$ = 9 мм,

2) $2\Delta c_\tau$ = 20 мм/год, $2c_\tau = 40 + 6 \cdot 20 = 160$ мм $< 2c_d$ = 211 мм,

3) подрастание дефекта за шесть лет в пределах допускаемых границ.

б) K-зависимый подход (рисунок И.2):

1) Δa_τ = 1,2 мм/год, $a_\tau = 3 + 6 \cdot 1{,}2 = 10{,}2$ мм $> a_d$ = 9 мм,

2) $2\Delta c_\tau$ = 24 мм/год, $2c_\tau = 40 + 6 \cdot 24 = 184$ мм $< 2c_d$ = 211 мм,

3) подрастание дефекта за шесть лет превышает допускаемую глубину 9 мм,

4) межконтрольный интервал следует уменьшить до пяти лет.

И.4.10 При обнаружении многоочаговых трещин их следует схематизировать в одну протяженную трещину. Если протяженность такой трещины превысит длину референсного дефекта, для подтверждения условий ТПР может потребоваться дополнительный анализ стабильности комбинированной и комплексной трещины с выходом на наружную поверхность и определением предельной глубины 360° кольцевой трещины вдоль периметра сварного соединения, при которой достигаются условия пластической нестабильности ослабленного сечения с трещиной.

И.4.11 Представленные в И.4.2—И.4.3 значения скорости подрастания коррозионных трещин не учитывают индивидуальную особенность каждого блока РБМК. В зависимости от коррозионной агрессивности воды КМПЦ, характеризуемой в первую очередь электрохимический потенциал, удельной электропроводимости и примененной технологии сварки (разделка шва, тепловложение, тип сварки) следует по блокам дифференцировать значения скоростей подрастания трещин МКРПН для различных групп СС с учетом данных эксплуатационного НК, проведенных ремонтов и технологических операций.

Библиография

[1] НП-001-15 Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций

[2] НП-082-07 Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций

[3] НП-089-15 Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок

[4] НП-010-16 Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила устройства и эксплуатации локализующих систем безопасности атомных станций

[5] НП-031-01 Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций

[6] ПНАЭ Г-7-010 Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля

[7] НП-071-18 Правила оценки соответствия продукции, для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии, а также процессов ее проектирования (включая изыскания), производства, строительства, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации, утилизации и захоронения

[8] НП-084-15 Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций

[9] НП-096-15 Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Требования к управлению ресурсом оборудования и трубопроводов атомных станций. Основные положения

[10] НП-017-18 Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Основные требования к продлению срока эксплуатации блока атомной станции.

[11] ПНАЭ Г-7-002 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок

[12] ПНАЭ Г-7-009 Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения

УДК 621.039:006.354 ОКС 27.120.20

Ключевые слова: трубопроводы, концепция «течь перед разрушением», истечение теплоносителя, система контроля течи, механика разрушения, термогидравлический анализ, детерминистское обоснование

БЗ 1—2019/36

Редактор *Е.А. Моисеева*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *О.В. Лазарева*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 21.12.2018. Подписано в печать 28.12.2018. Формат 60×84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 5,58. Уч.-изд. л. 5,05.
Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» для комплектования Федерального информационного фонда стандартов, 117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru