МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СОВЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И СЕРТИФИКАЦИИ
(МГС)
INTERSTATE COUNCIL FOR STANDARDIZATION, METROLOGY AND CERTIFICATION
(ISC)

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ
СТАНДАРТ

**ГОСТ
34027—
2016**

Система газоснабжения

МАГИСТРАЛЬНАЯ ТРУБОПРОВОДНАЯ ТРАНСПОРТИРОВКА ГАЗА

Механическая безопасность. Назначение срока безопасной эксплуатации линейной части магистрального газопровода

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2017

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

Цели, основные принципы и основной порядок проведения работ по межгосударственной стандартизации установлены в ГОСТ 1.0—2015 «Межгосударственная система стандартизации. Основные положения» и ГОСТ 1.2—2015 «Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Правила разработки, принятия, обновления и отмены»

Сведения о стандарте

1 РАЗРАБОТАН Обществом с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий — Газпром ВНИИГАЗ» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)

2 ВНЕСЕН Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК 523 «Техника и технологии добычи и переработки нефти и газа»

3 ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 8 декабря 2016 г. № 50)

За принятие проголосовали:

Краткое наименование страны по МК (ИСО 3166) 004—97	Код страны по МК (ИСО 3166) 004—97	Сокращенное наименование национального органа по стандартизации
Армения	AM	Минэкономики Республики Армения
Беларусь	BY	Госстандарт Республики Беларусь
Казахстан	KZ	Госстандарт Республики Казахстан
Киргизия	KG	Кыргызстандарт
Россия	RU	Росстандарт
Таджикистан	TJ	Таджикстандарт
Украина	UA	Минэкономразвития Украины

4 Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 марта 2017 г. № 227-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 34027—2016 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 октября 2017 г.

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном информационном указателе «Национальные стандарты», а текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ежемесячном информационном указателе «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, 2017

В Российской Федерации 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 ... 3
4 Методология расчетного обоснования срока службы линейной части магистральных газопроводов на этапе проектирования. Основные положения ... 6
4.1 Цели оценки срока службы на этапе проектирования ... 6
4.2 Общие требования к условиям проведения оценки срока службы (ресурса) ... 7
4.3 Декомпозиция объектов линейной части магистральных газопроводов ... 8
4.4 Оценка срока безопасной эксплуатации линейной части магистральных газопроводов в рамках типового проектирования и на основе расширенного подхода ... 9
4.5 Перечень и содержание этапов алгоритма оценки срока безопасной эксплуатации линейной части магистральных газопроводов ... 13
5 Типовые исходные данные для проведения оценки несущей способности и срока службы расчетного участка линейной части магистрального газопровода на этапе проектирования ... 15
5.1 Общая характеристика проектных решений ... 15
5.2 Технические характеристики труб, соединительных деталей и конструкционных материалов 16
5.3 Данные о технологии строительства линейной части магистральных газопроводов ... 19
5.4 Данные о проектных условиях эксплуатации ... 19
6 Нагрузки и воздействия на газопровод ... 20
6.1 Общая характеристика нагрузок и воздействий. Проектные нагрузки и воздействия на основе детерминистического и вероятностного подходов ... 20
6.2 Частотный и временно́й анализ нагрузок и воздействий ... 21
6.3 Непроектные нагрузки и воздействия ... 21
7 Процессы накопления повреждений, зарождения и развития дефектов ... 22
7.1 Общая характеристика повреждающих факторов ... 22
7.2 Коррозионные и коррозионно-механические процессы ... 22
7.3 Накопление усталостных повреждений ... 23
7.4 Изменение свойств материалов в процессе эксплуатации ... 24
8 Классификация отказов и предельных состояний газопровода ... 24
8.1 Классификация событий, учитываемых при оценке текущего и прогнозируемого технического состояния линейной части магистральных газопроводов ... 24
8.2 Причинно-следственный анализ отказов и повреждений ... 26
8.3 Критерии отказов и предельных состояний ... 27
8.4 Структурирование объектов линейной части магистральных газопроводов с целью выделения расчетных участков и элементов ... 28
9 Расчетная оценка несущей способности и срока службы (ресурса) расчетного участка линейной части магистрального газопровода на этапе проектирования ... 29
9.1 Общая характеристика алгоритма расчетной оценки ... 29
9.2 Напряженно-деформированное состояние ... 29
9.3 Оценка предельных (разрушающих) значений напряжений ... 29
9.4 Оценка предельных (разрушающих) значений показателей дефектности ... 30
9.5 Оценка срока службы расчетного участка на основе детерминистического и вероятностного подходов ... 30
10 Обоснование назначенного срока службы линейной части магистральных газопроводов ... 31
Приложение А (рекомендуемое) Алгоритм оценки срока службы (ресурса) линейной части магистральных газопроводов при проектировании и сводные данные для проведения оценки ... 32
Приложение Б (рекомендуемое) Выделение расчетных участков по признаку однородности условий эксплуатации ... 34
Приложение В (рекомендуемое) Кинетические уравнения роста дефектов ... 35
Приложение Г (рекомендуемое) Расчет срока службы (ресурса) по критериям усталости ... 38
Приложение Д (рекомендуемое) Оценка срока службы (ресурса) расчетного участка с учетом нескольких механизмов накопления повреждений ... 51

Приложение Е (рекомендуемое) Пример определения срока безопасной эксплуатации (назначенного срока службы) участка линейной части магистрального газопровода при проектировании на основе применения детерминистического подхода для прогнозной оценки срока службы расчетных участков 56
Приложение Ж (рекомендуемое) Назначение срока безопасной эксплуатации линейной части магистральных газопроводов по результатам оценки срока безопасной эксплуатации ее участков 62
Приложение И (рекомендуемое) Физико-механические свойства материалов, необходимые для оценки прочности и срока службы (ресурса) объектов линейной части магистрального газопровода 64
Приложение К (рекомендуемое) Проектные нагрузки и воздействия на основе детерминистического и вероятностного подходов к оценке срока службы (ресурса) 65
Приложение Л (рекомендуемое) Методы схематизации переменных нагрузок и воздействий 67
Приложение М (справочное) Метод расчета скорости равномерной коррозии металлов по их химическому составу и электрохимическим измерениям при взаимодействии с коррозионной средой 69
Библиография 71

Введение

Настоящий стандарт разработан с целью повышения безопасности линейной части магистральных газопроводов системы газоснабжения при проектировании посредством обеспечения соблюдения межгосударственных и национальных технических регламентов в части, относящейся к механической безопасности строительных сооружений и технических устройств.

Настоящий стандарт входит в группу межгосударственных стандартов в области магистрального транспорта газа, являющуюся составной частью комплекса межгосударственных стандартов, устанавливающих требования к системе газоснабжения.

Объектом стандартизации является линейная часть магистральных газопроводов, аспектом стандартизации — ее механическая безопасность, обеспечиваемая на этапе проектирования посредством расчетного определения срока службы и обоснованного назначения срока безопасной эксплуатации с использованием исходных данных, реализованных в проектных решениях.

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

Система газоснабжения

МАГИСТРАЛЬНАЯ ТРУБОПРОВОДНАЯ ТРАНСПОРТИРОВКА ГАЗА

Механическая безопасность. Назначение срока безопасной эксплуатации линейной части магистрального газопровода

Gas supply system. Gas main pipeline transportation. Mechanical safety. Assigning of safe operation life for linear part of gas main pipeline

Дата введения — 2017—10—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на объекты линейной части магистральных газопроводов системы газоснабжения (далее — также объекты) в части обеспечения их механической безопасности* и содержит методы и методики, используемые для назначения срока безопасной эксплуатации этих объектов.

Приведенная в настоящем стандарте методология предназначена для использования при проектировании объектов, определяемых областью применения соответствующих стандартов и сводов правил, которые обеспечивают соблюдение или способствуют соблюдению законодательных актов, технических регламентов, норм и правил в области промышленной безопасности**.

Примечание — Положения настоящего стандарта не ограничивают применение альтернативных и (или) дополнительных методов расчетного обоснования и назначения срока безопасной эксплуатации указанных объектов, в том числе применение методов, не связанных с механической безопасностью.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие межгосударственные стандарты:

ГОСТ 9.901.1—89 Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Общие требования к методам испытаний на коррозионное растрескивание

ГОСТ 12.2.063—2015 Арматура трубопроводная. Общие требования безопасности

ГОСТ 21.001—2013 Система проектной документации для строительства. Общие положения

ГОСТ 21.101—97 Система проектной документации для строительства. Основные требования к проектной и рабочей документации***

ГОСТ 21.110—2013 Система проектной документации для строительства. Спецификация оборудования, изделий и материалов

---

* В Российской Федерации общие минимально необходимые требования механической безопасности к зданиям и сооружениям и необходимость расчетного и иного обоснования выполнения этих требований в проектной документации установлены Федеральным законом от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

** В Российской Федерации для организаций — собственников системы газоснабжения Федеральным законом от 31 марта 1999 г. № 69-ФЗ «О газоснабжении в Российской Федерации», кроме обеспечения мер, предусмотренных законодательством в области промышленной безопасности, установлена обязанность обеспечения на стадиях проектирования, строительства и эксплуатации специальных мер по безопасному функционированию объектов этой системы.

*** В Российской Федерации действует ГОСТ Р 21.1101—2013 «Система проектной документации для строительства. Основные требования к проектной и рабочей документации».

Издание официальное

ГОСТ 21.301—2014 Система проектной документации для строительства. Основные требования к оформлению отчетной документации по инженерным изысканиям

ГОСТ 21.501—2011 Система проектной документации для строительства. Правила выполнения рабочей документации архитектурных и конструктивных решений

ГОСТ 21.502—2007 Система проектной документации для строительства. Правила выполнения проектной и рабочей документации металлических конструкций

ГОСТ 23.207—79 Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний машиностроительных материалов на ударно-абразивное изнашивание

ГОСТ 25.101—83 Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов

ГОСТ 25.502—79 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость

ГОСТ 25.504—82 Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости

ГОСТ 25.506—85 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении

ГОСТ 25.507—85 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытаний на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. Общие требования

ГОСТ 27.002—89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения

ГОСТ 27.003—90 Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности

ГОСТ 27.301—95 Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения

ГОСТ 27.310—95 Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения

ГОСТ 1497—84 Металлы. Методы испытаний на растяжение

ГОСТ ISO 3183—2015 Трубы стальные для трубопроводов нефтяной и газовой промышленности. Общие технические условия

ГОСТ 5272—68 Коррозия металлов. Термины

ГОСТ 6996—66 Сварные соединения. Методы определения механических свойств.

ГОСТ 9454—78 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах

ГОСТ 13015—2012 Изделия бетонные и железобетонные для строительства. Общие технические требования. Правила приемки, маркировки, транспортирования и хранения

ГОСТ 15467—79 Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения

ГОСТ 16504—81 Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения

ГОСТ ИСО/МЭК 17025—2009 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий

ГОСТ 19281—2014 Прокат повышенной прочности. Общие технические условия

ГОСТ 23207—78 Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения

ГОСТ 25812—83 Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии*

ГОСТ 25859—83 Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках

ГОСТ 26883—86 Внешние воздействующие факторы. Термины и определения

ГОСТ 27751—2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения

ГОСТ 31448—2012 Трубы стальные с защитными наружными покрытиями для магистральных газонефтепроводов. Технические условия

ГОСТ 33272—2015 Безопасность машин и оборудования. Порядок установления и продления назначенных ресурса, срока службы и срока хранения. Основные положения

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов на территории государства по соответствующему указателю стандартов, составленному по состоянию на 1 января текущего года, и по соответствующим информационным указателям, опубликованным в текущем году. Если ссылочный стандарт заменен (изменен), то при пользовании настоящим стандартом следует руководство-

* В Российской Федерации действует ГОСТ Р 51164—98 «Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии».

ваться заменяющим (измененным) стандартом. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 21.001, ГОСТ 5272, ГОСТ 15467, ГОСТ 23207, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **безопасное состояние опасного производственного объекта**: Состояние объекта, соответствующее требованиям законодательных актов, технических регламентов, нормативной, технической и проектной документации, а также требованиям к безопасности технологических процессов, установленных нормами и правилами в области промышленной безопасности опасных производственных объектов.

3.2 **восстанавливаемый объект**: Объект, восстановление работоспособного состояния которого в определенной ситуации предусмотрено в нормативной, технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

3.3 **жизненный цикл объекта**: Период, охватывающий создание, функционирование и прекращение существования объекта.

Примечания

1 Для объектов, являющихся строительными сооружениями, в том числе линейными, жизненный цикл включает инженерные изыскания, проектирование, строительство, эксплуатацию (включая техническое обслуживание и различные виды ремонтов), реконструкцию, консервацию (расконсервацию) и ликвидацию (демонтаж).

2 Для объектов, являющихся техническими устройствами (машины, оборудование, агрегаты, аппаратура, механизмы) жизненный цикл включает разработку (проектирование) устройства, его производство, хранение, монтаж, наладку, эксплуатацию, модернизацию (при необходимости), ремонт, техническое и сервисное обслуживание, утилизацию.

3.4 **критический отказ**: Отказ объекта или его элемента, тяжесть последствий которого в пределах данного анализа признана недопустимой и требует принятия специальных мер по снижению вероятности данного отказа и (или) возможного ущерба, связанного с его возникновением.

3.5 **линейная часть магистрального газопровода; ЛЧМГ**: Объект магистрального газопровода, состоящий из трубопроводов, переходов через естественные и искусственные препятствия, трубопроводной арматуры, технических устройств электрохимической защиты от коррозии, сооружений связи и иных сооружений и технических устройств, предназначенный для перемещения транспортируемых газообразных углеводородов.

3.6 **механическая безопасность магистрального газопровода**: Состояние объектов магистрального газопровода, при котором обеспечивается требуемая надежность его функционирования и отсутствует недопустимый риск причинения вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу и окружающей среде вследствие разрушения или потери устойчивости этих объектов или их частей.

3.7

нагруженность: Состояние объекта, обусловленное внешними воздействиями и условиями функционирования.

Примечания

1 Характеристиками нагруженности $R_Д$ объекта могут быть: нагрузка, напряжение, напряжение цикла, деформация, перемещение, коэффициент интенсивности напряжений, длительность и число циклов нагружения и т.д.

2 Предельные значения характеристик нагруженности $R_П$ — те значения, превышение которых приводит к частичной или полной потере работоспособности объекта, например: предельная нагрузка, пределы прочности и выносливости, предельное число циклов нагружения, предельные значения характеристик трещиностойкости, критические напряжения, частота и т.д.

3 Отношение $\frac{R_П}{R_Д} = n$ является коэффициентом запаса.

[ГОСТ 27609—88, приложение 1, статья 2]

3.8

назначенный ресурс: Суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

[ГОСТ 27.002—89, статья 4.9]

3.9

назначенный срок службы: Календарная продолжительность эксплуатации, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

[ГОСТ 27.002—89, статья 4.10]

3.10 **назначенный срок хранения**: Календарная продолжительность хранения, при достижении которой хранение объекта должно быть прекращено независимо от его технического состояния.

[ГОСТ 27.002—89, статья 4.11]

Примечание — К терминологическим статьям 3.8 — 3.10. По истечении назначенного срока службы (назначенного ресурса, назначенного срока хранения) объект исключают из эксплуатации и принимают решение, предусмотренное соответствующей нормативной (технической) документацией (реконструкция, направление в ремонт, демонтаж, списание, утилизация, техническая диагностика и установление нового назначенного срока и т.д).

3.11

наработка: Продолжительность или объем работы объекта.

Примечание — Наработка может быть как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах, километраж пробега и т.п.), так и целочисленной величиной (число рабочих циклов, запусков и т.п.).

[ГОСТ 27.002—89, статья 4.1]

3.12

наработка до отказа: Наработка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа.

[ГОСТ 27.002—89, статья 4.2]

3.13 **несущая способность**: Максимальная нагруженность объекта, не приводящая к его переходу в предельное состояние.

3.14 **обслуживаемый объект**: Объект, для которого проведение технического обслуживания предусмотрено нормативной (технической) документацией и (или) конструкторской (проектной) документацией.

3.15 **определяющий параметр**: Техническая и (или) технологическая характеристика, принимаемая при прогнозировании технического состояния объекта.

3.16

отказ: Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

[ГОСТ 27.002—89, статья 3.3]

3.17 **потенциально опасный участок**: Элемент линейной части магистрального газопровода, для которого из-за его конструктивных особенностей, природных условий эксплуатации, близости по отношению к внешним техногенным воздействиям значение ожидаемой (прогнозируемой) частоты возникновения критических отказов больше среднего значения по всей линейной части магистрального газопровода или критический отказ которого может привести к недопустимым последствиям.

3.18

предельное состояние: Состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

[ГОСТ 27.002—89, статья 2.5]

3.19

прогнозирование технического состояния: Определение технического состояния объекта с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени.

Примечание — Целью прогнозирования технического состояния может быть определение с заданной вероятностью интервала времени (ресурса), в течение которого сохранится работоспособное (исправное) состояние объекта или вероятности сохранения работоспособного (исправного) состояния объекта на заданный интервал времени.

[ГОСТ 20911—89, статья 8]

3.20 **разрушение объекта**: Изменение широкого спектра характеристик (или состояний материала) объекта (или его отдельных элементов), возникающее в результате воздействий, определяющих его нагруженность, и приводящее к нарушению работоспособного состояния объекта в целом.

3.21

расчет на прочность: Расчетная проверка выполнения условий прочности объекта.
[ГОСТ 27609—88, приложение 1, статья 6]

3.22

расчетная схема: Схема объекта, используемая при расчете, которая отражает основные особенности конструкции и нагруженности объекта.
[ГОСТ 27609—88, приложение 1, статья 7]

3.23 **ремонтируемый объект**: Объект, ремонт которого возможен и предусмотрен нормативной (технической), ремонтной и (или) конструкторской (проектной) документацией.

3.24

ресурс: Суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.
[ГОСТ 27.002—89, статья 4.5]

3.25 **служебная характеристика**: Показатель, характеризующий техническую способность объекта или его элемента выполнять заданные при проектировании функции.

3.26 **срок безопасной эксплуатации (линейной части магистрального газопровода)**: Устанавливаемая при проектировании календарная продолжительность эксплуатации (суммарная наработка) линейной части магистрального газопровода, соответствующая назначенному сроку службы (назначенному ресурсу), а также продолжительность безопасной эксплуатации, устанавливаемая в заключении экспертизы промышленной безопасности с указанием условий дальнейшей безопасной эксплуатации.

Примечание — Понятие «срок безопасной эксплуатации», как правило, используют в документах надзорных органов по промышленной безопасности в отношении сооружений на опасных производственных объектах при проведении экспертизы промышленной безопасности. Линейная часть магистрального газопровода является строительным сооружением (частью) опасного производственного объекта — магистрального газопровода.

3.27

срок службы: Календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.
[ГОСТ 27.002—89, статья 4.6]

3.28 **технический объект (объект)**: Изделие, техническое устройство, строительное сооружение, функциональная единица, система или подсистема, которые можно рассматривать в отдельности.

3.29

техническое состояние объекта: Состояние, которое характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды, значениями параметров, установленных технической документацией на объект.
[ГОСТ 20911—89, статья 2]

3.30

элемент: Составная часть технического объекта, рассматриваемая при проведении анализа как единое целое, не подлежащее дальнейшему разукрупнению.
[ГОСТ 27.310—95, статья 3.1]

4 Методология расчетного обоснования срока службы линейной части магистральных газопроводов на этапе проектирования. Основные положения

4.1 Цели оценки срока службы на этапе проектирования

4.1.1 Прогнозную (расчетную) оценку срока службы (ресурса) объектов ЛЧМГ на этапе проектирования осуществляют в целях выполнения требований:

- механической безопасности магистральных газопроводов системы газоснабжения в соответствии с техническими регламентами, устанавливающими требования по безопасности строительных сооружений*;
- норм и правил в области промышленной безопасности**.

Примечание — Использование в разделе 4 и в других структурных элементах настоящего стандарта термина «ресурс» в скобках после термина «срок службы» означает что данное положение распространяют на оба эти термина, являющиеся в понятийном смысле эквивалентными, и различающимися только в единицах измерения продолжительности эксплуатации (объема работы) объекта. При заданных единицах измерения используют соответствующий им конкретный термин.

4.1.2 Для обеспечения требований механической безопасности объектов ЛЧМГ, являющихся элементами магистральных газопроводов, при проектировании необходимо:

- получить обоснованную прогнозную оценку срока службы (ресурса) объектов на основе совокупности данных о принятых проектных решениях, в том числе для назначения (проектных) показателей срока службы (ресурса) в пределах оцененного прогнозного срока службы;
- обеспечить согласование прогнозных показателей долговечности объекта с нормативно устанавливаемыми или директивно определяемыми показателями.

4.1.3 Необходимые меры по обеспечению долговечности сооружений с учетом конкретных условий эксплуатации проектируемых объектов, а также расчетные сроки их службы в соответствии с ГОСТ 27751 (пункт 4.3) должна определять проектная организация по согласованию с заказчиком проекта.

Примечания

1 Рекомендуемый расчетный срок службы для применяемых в газовой промышленности трубопроводов, указанный в ГОСТ 27751 (пункт 4.3), составляет не менее 25 лет.

2 В качестве показателей долговечности для объектов ЛЧМГ могут быть приняты показатели долговечности в соответствии с ГОСТ 27.002.

4.1.4 При выполнении требований 4.1.2 должна быть получена прогнозная оценка срока службы (ресурса) объектов ЛЧМГ, основанная на анализе совокупности данных, характеризующих принятые при проектировании конструктивные и технологические решения, свойства материалов, особенности региона строительства магистрального газопровода и другие необходимые данные.

В пределах оцененного (расчетного) срока службы (ресурса) объекта должен быть определен назначенный срок службы (назначенный ресурс), соответствующий сроку безопасной эксплуатации объекта, необходимость определения которого вытекает из требований законодательных актов, технических регламентов, стандартов и норм промышленной безопасности, регламентирующих безопасное состояние опасных производственных объектов***.

---

* В Российской Федерации включение в проектную документацию сведений о расчетном сроке службы сооружений (в составе рабочей документации) соответствует ГОСТ 21.501 (пункт 5.2.2), входящим в перечень документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

** Согласно Федеральным нормам и правилам промышленной безопасности Российской Федерации «Правила безопасности для опасных производственных объектов магистральных трубопроводов» (утверждены приказом Ростехнадзора от 6 ноября 2013 г. № 520) срок эксплуатации линейной части магистральных трубопроводов устанавливают в проектной документации.

*** В Российской Федерации согласно Федеральному закону от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» соответствие построенных опасных производственных объектов требованиям технических регламентов и проектной документации, устанавливается заключением органов государственного строительного надзора в соответствии с законодательством о градостроительной деятельности.

В Российской Федерации в соответствии с Федеральными нормами и правилами [2] срок безопасной эксплуатации сооружений может быть продлен или установлен (при его отсутствии в проектной документации) на основании экспертизы промышленной безопасности.

Примечание — Установленный при проектировании назначенный срок службы (назначенный ресурс) может рассматриваться как полный смысловой аналог срока безопасной эксплуатации сооружений на опасном производственном объекте.

4.1.5 Назначенный срок службы (назначенный ресурс) входящих в состав ЛЧМГ технических устройств, в отношении которых должны выполняться требования технического регламента [1] (в частности, в отношении применяемой на ЛЧМГ трубопроводной арматуры), устанавливают по ГОСТ 33272 при их разработке (проектировании). Установленные значения назначенных показателей таких технических устройств необходимо учитывать при обосновании срока безопасной эксплуатации объектов ЛЧМГ.

Примечание — Общие требования безопасности трубопроводной арматуры (в том числе механической безопасности) установлены в ГОСТ 12.2.063.

4.2 Общие требования к условиям проведения оценки срока службы (ресурса)

4.2.1 Для оценки срока службы (ресурса), указанных в 4.1.2 объектов ЛЧМГ, применяют подход, основанный на принципе «безопасной эксплуатации по техническому состоянию», согласно которому оценку технического состояния и срока службы (ресурса) осуществляют по определяющим параметрам технического состояния, которые обеспечивают надежную и безопасную эксплуатацию объекта согласно нормативной, технической и (или) конструкторской (проектной, рабочей) документации.

В качестве определяющих параметров принимают параметры, изменение которых может привести объект в неработоспособное или предельное состояние.

Примечание — Определяющие параметры могут изменяться каждый в отдельности или в некоторой своей совокупности.

4.2.2 В зависимости от принятых критериев предельного состояния и условий эксплуатации объекта определяющими параметрами его технического состояния могут быть:

- физико-механические характеристики конструкционных материалов (твердость, пределы текучести, прочности, длительной прочности, выносливости, характеристики трещиностойкости и микроструктуры и, если необходимо, другие характеристики);
- значения перемещений, напряжений и деформаций, коэффициентов интенсивности напряжений, размеры дефектов, специальным образом введенные меры повреждений;
- фактические располагаемые коэффициенты запаса прочности (по пределам текучести, прочности, длительной прочности, выносливости, ползучести, трещиностойкости, устойчивости, по числу циклов или по циклическим напряжениям при расчетах на циклическую прочность);
- показатели технологического процесса магистрального транспорта газа (температура, давление, параметры вибрации и, если необходимо, другие показатели).

4.2.3 Прогнозную оценку параметров технического состояния объекта осуществляют по результатам анализа указанной в 4.2.1 документации с учетом опыта проектирования, строительства и эксплуатации аналогичных объектов в соответствии с настоящим стандартом и другой нормативной документацией, которая может быть использована для проведения такой оценки.

Требования к составу проектной и рабочей документации металлических строительных конструкций (в том числе линейных) — по ГОСТ 21.101*, ГОСТ 21.501 и ГОСТ 21.502.

4.2.4 Прогнозную оценку срока службы (ресурса) проводят на основе установленных закономерностей изменения параметров при прогнозировании технического состояния. Указанные закономерности получают при анализе возможных механизмов накопления повреждений, зарождения и развития дефектов, которые могут привести к ухудшению работоспособного состояния проектируемого объекта.

4.2.5 Перечень и состав работ для обоснованной прогнозной оценки срока службы (ресурса) проектируемого объекта определяет проектная организация с учетом типа, сложности и новизны объекта, наличия исходных данных и опыта проектирования, строительства и эксплуатации объектов-аналогов.

4.2.6 Для типовых объектов ЛЧМГ оценку срока службы (ресурса) и срока безопасной эксплуатации необходимо проводить в рамках типового проектирования согласно 4.4.1 — 4.4.5.

---

* В Российской Федерации основные требования к составу проектной документации строительных объектов установлены в ГОСТ Р 21.1101—2013 «Система проектной документации для строительства. Основные требования к проектной и рабочей документации».

Требования к содержанию разделов проектной документации на линейные объекты капитального строительства установлены Постановлением Правительства Российской Федерации [3].

Примечание — Типовое проектирование, как правило, применяют при разработке однотипных проектов зданий, конструкций, сооружений, деталей и других изделий, предназначенных для серийного строительства или производства.

4.2.7 По решению проектной организации применительно к принципиально новым объектам, проектируемым с использованием новых конструктивных и (или) технологических решений, при проектировании в сложных природно-климатических и грунтово-геологических условиях, а также в других случаях по выбору проектной организации, алгоритм оценки срока службы (ресурса) и срока безопасной эксплуатации объектов ЛЧМГ при типовом проектировании может быть дополнен отдельными элементами расширенного подхода в соответствии с 4.4.5.

4.2.8 Реализация расширенного подхода для оценки срока службы (ресурса) и срока безопасной эксплуатации объектов ЛЧМГ может быть применима проектной организацией по отношению к ограниченному числу принципиально новых объектов в рамках специальных комплексных программ исследований, предусматривающих по мере необходимости привлечение для их выполнения в качестве соисполнителей научно-исследовательские и проектно-изыскательские организации.

Требование научно-технического сопровождения при проектировании сооружений повышенного уровня ответственности, к которым в том числе относят магистральные трубопроводы, предусмотрено в соответствии с ГОСТ 27751 (пункт 10.5).

4.3 Декомпозиция объектов линейной части магистральных газопроводов

4.3.1 При проведении оценки срока службы (ресурса) ЛЧМГ должна быть проведена ее декомпозиция (разделение) на элементы (элементарные объекты), срок службы (ресурс) которых может быть оценен в отдельности как единого целого.

Примечание — ЛЧМГ, как правило, рассматривают как элемент магистрального газопровода, входящего в качестве подсистемы в состав системы магистральных газопроводов, в свою очередь являющуюся составной частью (подсистемой) системы газоснабжения.

4.3.2 При выделении в процессе декомпозиции объектов ЛЧМГ целесообразно проводить их объединение (группировку) по признакам компактного и линейного (линейно-протяженного) размещения с целью последующего использования специализированных методик оценки срока службы (ресурса) применительно к каждой из рассмотренных групп объектов. При этом следует руководствоваться перечнем объектов ЛЧМГ, подконтрольных надзорным органам в области промышленной безопасности*.

Примечание — Применяемое здесь и далее по тексту стандарта понятие «элементарный объект» соответствует определению термина «элемент» (см. 3.1.32) в случае, когда элементами ЛЧМГ являются объекты, выделенные в результате ее декомпозиции.

4.3.3 К объектам ЛЧМГ, непосредственно связанным с транспортируемым газом, относят:

а) линейные объекты (основная магистраль, ответвления, лупинги, переходы через естественные и искусственные препятствия), включающие в себя трубы, соединительные детали трубопроводов (тройники, отводы, переходы, гнутые вставки, днища);

б) компактно расположенные объекты, представляющие собой специализированные конструктивные элементы и объекты технологического назначения (линейная запорная арматура, охранные краны компрессорных и газораспределительных станций);

в) компактно расположенные объекты, образующие специализированные технологические узлы и комплектующие (узлы пуска и приема очистных и диагностических устройств, конденсатосборники, узлы редуцирования давления и учета газа).

Примечание — Необходимым и достаточным условием недопущения аварий принято считать сохранение герметичности и конструкционной целостности указанных объектов в течение всего срока их использования по назначению.

4.3.4 К вспомогательным элементам, не связанным непосредственно с транспортируемым газом (не контактирующим с ним), относят элементы инженерного обустройства трассы (анкеры, опоры, при-

* В Российской Федерации национальным надзорным органом в области промышленной безопасности является Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор), а требования промышленной безопасности при проектировании объектов ЛЧМГ установлены в Федеральных нормах и правилах в области промышленной безопасности «Правила безопасности для опасных производственных объектов магистральных трубопроводов» (утверждены приказом Ростехнадзора от 06 ноября 2013 г. № 520).

грузы и функционально специализированные системы защиты от коррозии, системы связи, электропитания и другие устройства по мере необходимости).

Схема декомпозиции ЛЧМГ с учетом положений 4.3.2 — 4.3.4 приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 — Схема декомпозиции объектов ЛЧМГ с выделением элементов для оценки срока службы (ресурса) и назначения срока безопасной эксплуатации

Примечание — Трубы и приваренные к ним соединительные детали трубопроводов могут быть объединены в одну группу, относящуюся к линейно-протяженным объектам.

4.3.5 По результатам декомпозиции формируют перечень элементарных объектов, для которых должны быть получены значения срока безопасной эксплуатации на основе подходов и алгоритмов, изложенных в положениях настоящего стандарта.

4.3.6 Оценку срока службы (ресурса) и назначение срока безопасной эксплуатации вспомогательных элементов, не являющихся предметом регулирования настоящего стандарта, в рамках процедуры, предусмотренной его положениями, не проводят.

4.4 Оценка срока безопасной эксплуатации линейной части магистральных газопроводов в рамках типового проектирования и на основе расширенного подхода

4.4.1 Оценку срока безопасной эксплуатации ЛЧМГ в рамках типового проектирования проводят с учетом следующих основных особенностей ее конструкции:

- линейная часть как элемент (подсистема) входит в состав магистрального газопровода, являющегося в целом ремонтируемым объектом;
- в соответствии с принятой в 4.3 схемой декомпозиции (см. рисунок 1) ЛЧМГ состоит из линейно-протяженных и компактно расположенных объектов;
- линейно-протяженные элементы ЛЧМГ, как правило, могут быть отнесены к категории необслуживаемых, но ремонтируемых и (или) восстанавливаемых объектов;
- компактно расположенные конструктивно-технологические элементы ЛЧМГ (прежде всего те, к которым обеспечен облегченный доступ персонала) относят к категории обслуживаемых, ремонтируемых и (или) восстанавливаемых объектов;

- в зависимости от причины отказа объекта ЛЧМГ восстановление ее работоспособного состояния может быть проведено за счет ремонта или замены отказавшего объекта в соответствии с регламентами, установленными в нормативной и (или) технической документации.

Примечание — Для восстанавливаемой системы отсутствует понятие предельного состояния в традиционном техническом понимании этого термина. При отсутствии финансовых, материально-технических и организационных ограничений на проведение ремонтно-восстановительных работ поддержание газопровода в работоспособном состоянии может осуществляться с практической точки зрения в течение неограниченного периода. Понятие предельного состояния для восстанавливаемой системы может быть сформулировано только при условии введения дополнительных ограничений на возможность восстановления ее работоспособного состояния.

4.4.2 При проведении указанной в 4.4.1 оценки следует учитывать показатели долговечности и показатели безопасности* компактно расположенных объектов, обозначенных в перечислениях б) и в) 4.3.3. Указанные показатели, как правило, приводит организация-изготовитель в технической документации (техническом задании на проектирование, техническом паспорте, технических условиях, руководстве по эксплуатации).

4.4.2.1 Количественные значения назначенного срока службы (назначенного ресурса) применяемой на объектах газовой промышленности трубопроводной арматуры (в том числе линейной запорной арматуры и охранных кранов компрессорных и газораспределительных станций) могут быть установлены в соответствии со стандартами общих технических условий на трубопроводную арматуру (например, в составе требований к показателям безопасности)**.

4.4.2.2 Для узлов пуска и приема очистных и диагностических устройств, узлов редуцирования давления и учета газа, конденсатосборников в технической документации, представляемой заказчику организацией-изготовителем, как правило, приводят количественные значения следующих показателей:

- средний срок службы поставляемого технического устройства;
- рекомендуемый срок службы технического устройства, отсчитываемый от момента ввода его в эксплуатацию, до проведения планового обследования технического состояния.

4.4.2.3 Значение устанавливаемого на этапе проектирования назначенного срока службы (назначенного ресурса) трубопроводной арматуры (см. 4.4.2.1) и перечисленных в 4.4.2.2 показателей для других технических устройств, как правило, не должно превышать значение назначенного срока службы (назначенного ресурса) линейно-протяженных объектов ЛЧМГ.

Установление при проектировании ЛЧМГ увеличенных значений назначенного срока службы (назначенного ресурса) трубопроводной арматуры и других технических устройств по сравнению с назначенными организацией-изготовителем значениями, может быть осуществлено по согласованию между ней, генеральным проектировщиком и заказчиком проекта на основе соответствующего обоснования, подтвержденного расчетами и (или) результатами испытаний.

4.4.2.4 Если организацией-изготовителем назначенные показатели компактно расположенных на ЛЧМГ объектов не установлены и не приведены в технической документации, то определение их назначенного срока службы (назначенного ресурса) должно быть выполнено при проектировании ЛЧМГ на экспертном уровне с учетом опыта эксплуатации объектов-аналогов, либо по результатам специальных исследований. При этом для обеспечения требуемого технического состояния технического устройства в проектной документации должны быть приведены требования к периодичности и порядку проведения работ по оценке его технического состояния в процессе эксплуатации.

---

* В Российской Федерации в соответствии с ГОСТ Р 54123—2010 «Безопасность машин и оборудования. Термины, определения и основные показатели безопасности» назначенный срок службы и назначенный ресурс машин и оборудования, в отношении которых должны выполняться требования технического регламента [1], относят к показателям безопасности, которые нормируют в законодательных или нормативно-правовых актах федеральных органов исполнительной власти и государственного надзора, а также устанавливают заказчики по согласованию с разработчиками.

Согласно ГОСТ Р 54122—2010 «Безопасность машин и оборудования. Требования к обоснованию безопасности» виды опасности для обеспечения механической безопасности на всех стадиях жизненного цикла идентифицируют при проектировании машин и оборудования.

** В Российской Федерации показатели надежности и безопасности применяемой на объектах газовой промышленности трубопроводной арматуры установлены в стандарте [4]. В соответствии с этим стандартом защитное наружное покрытие трубопроводной арматуры наносят в заводских условиях силами организации-изготовителя с учетом конкретных требований опросного листа заказчика (в том числе требований по сроку службы покрытия), соблюдая требования соответствия характеристик наносимого на арматуру покрытия характеристикам наружного защитного покрытия труб.

При таком подходе индивидуальные значения назначенных показателей компактно расположенных объектов не лимитируют значения назначенных показателей ЛЧМГ в целом, но должны быть учтены при формировании регламентов технического обслуживания этих объектов в процессе эксплуатации.

4.4.3 Для линейно-протяженных объектов ЛЧМГ, состоящих из большого числа однотипных элементов (отдельных труб, участков, рассматриваемых как один объект с одинаковыми условиями эксплуатации), расчетную оценку срока службы (ресурса), в пределах которого устанавливают назначенный срок службы (назначенный ресурс), выполняют с учетом следующих особенностей:

а) при эксплуатации в линейно-протяженных объектах с течением времени могут происходить процессы возникновения и накопления повреждений системного характера, обусловленные:

1) сплошной и местной коррозией;

2) коррозионным растрескиванием металла труб под напряжением (КРН);

3) действием переменных во времени нагрузок природно-климатического и технологического (см. 6.1), а также техногенного происхождения (см. 6.3);

4) действием в процессе продолжительной эксплуатации нагрузок (предусмотренных проектом и нештатных), а также физико-химическим воздействием факторов окружающей среды и транспортируемого газа (приводящим также к изменению физико-механических характеристик металла);

Примечание — Терминологические статьи, определяющие разновидности сплошной и местной коррозии, а также коррозионного растрескивания, приведены в ГОСТ 5272.

б) при наличии достаточно однородных условий вдоль трассы ЛЧМГ действие приведенных в перечислении а) 4.4.3 системных факторов на участках значительной протяженности может приводить к появлению на рассматриваемом линейно-протяженном объекте значительного числа поврежденных однотипных элементов, что может сделать проведение полномасштабных восстановительных работ избыточно затратным и, как следствие, невыгодным с точки зрения экономической целесообразности;

в) оценка срока службы (ресурса) может быть выполнена на основе выявления причинно-следственных связей между служебными характеристиками рассматриваемого объекта, повреждающими факторами и процессами возникновения и накопления повреждений, зарождения и развития дефектов.

4.4.4 С учетом изложенных в 4.4.3 особенностей при проведении расчетной оценки срока службы (ресурса) линейно-протяженных объектов ЛЧМГ следует руководствоваться следующими положениями, уточняющими причинно-следственные связи между служебными характеристиками рассматриваемого объекта, повреждающими факторами и процессами возникновения и накопления повреждений, зарождения и развития дефектов:

- служебные характеристики защитного покрытия труб соответствуют требованиям ГОСТ 31448 в пределах всего срока службы покрытия, задаваемого при проектировании ЛЧМГ на основе данных, приведенных изготовителем (поставщиком) труб в сопроводительной документации (либо на основе требований нормативных документов или по результатам специальных исследований по оценке срока службы покрытия);

Примечание — Сохранение соответствия служебных характеристик защитного покрытия труб требованиям ГОСТ 31448 означает, что в пределах установленного изготовителем (поставщиком) труб срока службы защитного покрытия не происходит зарождение и развитие коррозионных повреждений металла труб. При исчерпании срока службы защитного покрытия оно полностью перестает выполнять какие-либо защитные функции.

- накопление коррозионных повреждений и развитие процессов КРН происходит в металле труб и сварных соединений с момента исчерпания срока службы защитного покрытия при наличии внешних условий, обусловленных коррозионной активностью внешней среды;

- скорость распространения коррозии и скорость роста трещин КРН зависит от коррозионной активности окружающего грунта и может быть оценена или спрогнозирована в соответствии с требованиями нормативных документов;

Примечания

1 Прямая оценка скорости коррозии может быть получена с помощью датчиков и индикаторов скорости коррозии, размещенных на участках линейной части будущей трассы магистрального газопровода при проведении инженерных изысканий. Для использования в расчетах принимают наиболее неблагоприятную оценку скорости коррозии, полученную в процессе наблюдений.

2 В стандарте [5] для случая отсутствия прямых данных приведены рекомендации по использованию в расчетах трех средних уровней прогнозных значений скорости коррозии (по глубине проникновения в металл) в зависимости от диапазона изменения удельного электрического сопротивления грунта (0,075 мм/год при удельном сопротивлении более 150 Ом·м; 0,15 мм/год при удельном сопротивлении от 10 до 150 Ом·м; 0,3 мм/год при удельном сопротивлении менее 10 Ом·м).

В стандарте [6] приведены экспериментальные данные по скорости коррозии в металле трубчатых образцов без защитного покрытия, значения которой могут достигать 0,3 мм/год (при наличии минимально необходимого уровня катодной защиты).

3 В международном стандарте [7] установлены требования к испытаниям подвергнутых предварительному растрескиванию образцов при постоянной нагрузке или при постоянном смещении, по результатам которых могут быть получены данные о скорости роста трещин КРН. При отсутствии результатов таких испытаний или других прямых данных об ожидаемой характерной скорости роста КРН ее среднее значение может быть принято равным 0,3 мм/год, что соответствует наиболее неблагоприятному варианту прогнозной скорости роста коррозии.

4 Предельное значение утонения стенки трубы вследствие коррозии может быть определено в соответствии со стандартами или другими нормативными документами, в которых установлены методы анализа и оценки опасности коррозионных дефектов.

В стандартах [8] — [10] методы анализа и оценки опасности коррозионных дефектов изложены применительно к различным видам коррозионных повреждений и трещинам КРН в металлических конструкциях при действии постоянных и переменных во времени нагрузок и воздействий.

- накопление усталостных повреждений, обусловленных действием переменных во времени нагрузок и воздействий (при их наличии), начинает происходить в момент ввода объекта в эксплуатацию с интенсивностью накопления, зависящей от того, в какой среде (атмосферный воздух, пресная или морская вода, почвенные электролиты) происходят воздействия на объект ЛЧМГ.

Примечание — При проведении расчетной оценки срока службы (ресурса) подверженных изменяющимся во времени (в том числе циклическим) воздействиям объектов рекомендуется принимать, что в пределах назначенного срока службы защитного покрытия накопление усталостных повреждений происходит в условиях атмосферного воздуха, а за пределами срока службы защитного покрытия — в среде, свойства которой определены в зависимости от внешних условий по трассе магистрального газопровода.

4.4.5 В соответствии с настоящим стандартом используемый при типовом проектировании подход к оценке срока безопасной эксплуатации ЛЧМГ применяют в рамках поэтапного алгоритма, приведенного в 4.5. Этот же алгоритм используют также и для расширенного подхода (при необходимости его применения согласно 4.2.7), предполагающего учет дополнительных (по отношению к типовому проектированию) требований и исходных данных, перечень и содержание которых определяет проектная организация.

Структурная схема поэтапного алгоритма и рекомендованные для использования при его реализации данные приведены в приложении А, подробное содержание этапов с указанием возможных составляющих расширенного подхода изложено в разделах 5 — 9.

4.4.6 В рамках типового проектирования оценку срока службы (ресурса) проводят после анализа проекта с учетом приведенных в 4.4.1 — 4.4.4 положений и декомпозиции ЛЧМГ (см. 4.3) с выделением элементарных объектов и расчетных участков с однородными условиями эксплуатации в пределах этих элементарных объектов согласно 8.4, для которых могут быть получены расчетные оценки срока безопасной эксплуатации. Пример выделения расчетных участков приведен в приложении Б.

Примечания

1 Элементарные объекты могут быть рассмотрены как элементы выделенной при декомпозиции подсистемы, последовательно соединенные между собой по правилам построения структурных блок-схем для расчета надежности, например по ГОСТ 27.301, ГОСТ 27.310. В международной стандартизации аналогичные правила приведены в стандарте [11]*.

2 Выделенный в качестве элементарного объекта подсистемы участок ЛЧМГ между двумя последовательно расположенными крановыми узлами может быть разделен на локальные участки с однородными конструктивными и природными характеристиками. Такие локальные участки целесообразно принимать в качестве расчетных участков, состоящих из определенного в процессе такого разделения количества труб.

4.4.7 Если в пределах расчетного участка происходят процессы накопления повреждений, вызванные действием нескольких повреждающих факторов, то должны быть проанализированы все механизмы накопления повреждений, составлен перечень вариантов сочетаний повреждающих факторов и получены оценки срока службы этого участка, соответствующие каждому из таких сочетаний.

Если необходимость учета совместного влияния отдельных факторов на накопление повреждений не была подтверждена или обоснована (исходя из особенностей процессов накопления повреждений), то учет влияния этих факторов на оценку срока службы следует выполнять раздельно по каждому фактору.

---

* В Российской Федерации действует ГОСТ Р 51901.14—2007 «Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы», модифицированный по отношению к международному стандарту [11].

Примечания

1 При необходимости учета k повреждающих факторов максимальное число вариантов их сочетаний равно 2^k (включая варианты действия каждого из повреждающих факторов в отдельности и вариант отсутствия их действия вообще).

2 Необходимость совместного учета повреждающих факторов на расчетном участке может возникнуть, например, в случае накопления коррозионных повреждений с одновременным ухудшением физико-механических свойств металла труб при длительной эксплуатации. В этом случае из-за снижения прочности металла уменьшаются и предельные размеры допускаемых коррозионных дефектов, что приводит к сокращению прогнозируемого срока эксплуатации расчетного участка до наступления предельного состояния (при постоянной скорости коррозии).

4.4.8 Расчетную (прогнозную) оценку срока службы (ресурса) расчетных участков выполняют в соответствии с положениями раздела 9.

Рекомендации по проведению анализа процессов накопления повреждений, зарождения и развития дефектов приведены в приложениях В и Г, а рекомендации по учету нескольких механизмов накопления повреждений при проведении оценки срока службы расчетного участка приведены в приложении Д.

4.4.9 Обоснование назначенного срока службы и соответствующего ему срока безопасной эксплуатации ЛЧМГ проводят в соответствии с 4.5 и разделом 10, следуя также рекомендациям, приведенным в приложениях Е и Ж.

4.5 Перечень и содержание этапов алгоритма оценки срока безопасной эксплуатации линейной части магистральных газопроводов

4.5.1 В соответствии с настоящим стандартом приведенный в 4.5.2 поэтапный алгоритм согласно 4.4.5 используют для оценки срока безопасной эксплуатации ЛЧМГ как при типовом проектировании, так и в рамках расширенного подхода.

4.5.2 Алгоритм оценки срока безопасной эксплуатации ЛЧМГ реализован в виде последовательного выполнения семи этапов.

4.5.2.1 На первом этапе выполняют сбор и анализ исходной информации о проектируемом объекте и структурирование информации по группам данных. В перечень рассматриваемых информационных материалов следует включать:

а) задание на проектирование;

б) комплект проектных документов, включающий:

1) расчетно-пояснительные записки;

2) спецификации на трубы и иные комплектующие, выполненные по форме и правилам, установленным в ГОСТ 21.110;

3) чертежи и планы местности;

4) результаты геодезических и инженерно-геологических изысканий, оформляемые по ГОСТ 21.301;

5) другие документы в зависимости от типа и назначения объекта (при необходимости).

Проектно-изыскательские и расчетные материалы должны быть представлены в объеме, достаточном для адекватного описания конструктивной схемы ЛЧМГ, использованных технических решений, климатических и грунтово-геологических характеристик региона прокладки магистрального газопровода.

По результатам выполнения первого этапа должны быть подготовлены данные об особенностях конструктивного исполнения магистрального газопровода и режимах его функционирования, о физико-механических характеристиках материалов, о природно-климатических условиях вдоль трассы, а также сформулированы предложения о первичной схематизации конструкции ЛЧМГ и выделении расчетных участков (объектов) в ее пределах.

4.5.2.2 На втором этапе должен быть выполнен анализ нагрузок и воздействий, действующих в пределах выделенных объектов, с учетом их возможного сочетания и развертывания во времени.

По результатам выполнения второго этапа формируют перечень подлежащих учету нагрузок и воздействий, проводят их классификацию и выделяют в необходимых случаях постоянные и переменные составляющие этих нагрузок и воздействий.

Для переменных составляющих следует провести частотный и временной анализ, позволяющий получить оценку числа циклов нагружения с различными амплитудами и коэффициентами асимметрии цикла за заданный промежуток календарного времени или наработки, что необходимо для оценки уровня прогнозируемых при дальнейшей эксплуатации усталостных повреждений.

Оценки пиковых (экстремальных) значений нагрузок и их распределений в зависимости от времени, необходимые для расчета несущей способности рассматриваемого расчетного участка ЛЧМГ по критериям прочности, трещиностойкости и (или) устойчивости, а также оценки предельно допустимого уровня дефектности могут быть выполнены на основе имеющихся исходных данных по проектируемому магистральному газопроводу с учетом положений настоящего стандарта и других нормативных документов, в которых установлены методы таких оценок.

4.5.2.3 На третьем этапе должны быть выявлены и подвергнуты предварительному анализу основные повреждающие факторы и механизмы деградации служебных характеристик объекта и (или) его элементов. При проведении анализа следует учитывать, что для объектов ЛЧМГ в общем случае характерны следующие группы причин, вызывающих их повреждения и деградацию свойств:

- коррозионные процессы, связанные с выраженной потерей металла, типа сплошной и местной поверхностной коррозии труб, а также с явлениями межкристаллитной и транскристаллитной коррозии;
- коррозионно-механические процессы, прежде всего КРН;
- накопление усталостных повреждений и развитие дефектов в наиболее нагруженных частях магистрального газопровода под действием комплекса повторно-переменных нагрузок и воздействий механической природы;
- изменение свойств металла труб в процессе эксплуатации под действием факторов внешней среды и эксплуатационных нагрузок;
- нарушение проектного положения объекта или его части.

Примечание — Нарушение проектного положения объекта или его части может происходить под действием комплекса эксплуатационных и природно-климатических нагрузок вследствие их неполного учета или неожиданного проявления, а также вследствие частичного или полного разрушения опор, балластирующих и иных устройств, используемых для закрепления газопровода в проектном положении, вызванного обводнением, размывом, промерзанием или растеплением окружающего грунта, в том числе в силу непреодолимых причин природного и техногенного характера.

В качестве основных факторов, способствующих возникновению и развитию коррозионных и коррозионно-механических процессов, следует рассматривать деградацию свойств защитных покрытий и снижение с течением времени защитных возможностей систем электрохимической защиты, сопровождающиеся ухудшением их служебных характеристик.

Результатом выполнения второго и третьего этапа, которые взаимосвязаны и дополняют друг друга, должен стать обоснованный выбор одного или нескольких механизмов накопления повреждений, лимитирующих прочность и показатели долговечности объекта. Основой для принятия решений на этих этапах, как правило, служат экспертные оценки, базирующиеся на совокупности исходных данных, накопленном опыте проектирования, строительства и эксплуатации объектов, аналогичных рассматриваемым расчетным участкам.

4.5.2.4 В рамках четвертого этапа на основе данных предыдущих этапов выполняют классификацию и анализ вероятных отказов, повреждений и ассоциируемых с ними состояний, реализуемых в процессе жизненного цикла объекта, формулируют наборы признаков (критериев отказов и предельных состояний), проводят классификацию отказов объекта по их критичности, выявляют причины возникновения отказов, в том числе ассоциируемых с наступлением предельного состояния объекта.

Если по результатам перечисленной в 4.5.2.4 последовательности действий выявлена необходимость учета внезапных отказов, то должны быть сформулированы рекомендации по проведению дополнительного количественного анализа таких отказов.

Примечание — Анализ причин возникновения и последовательности развития повреждений и отказов может быть выполнен на основе методов построения структурных схем надежности, приведенных в ГОСТ 27.301 и ГОСТ 27.310, а также методов прогнозирования, используемых при анализе безотказности, например в соответствии со стандартом [12]. Выбор методов анализа осуществляют выполняющие его специалисты.

По результатам выполнения четвертого этапа должны быть сформированы:

- перечень и критерии вероятных повреждений и отказов;
- перечень и критерии состояний, ассоциируемых с вероятными повреждениями и отказами.

4.5.2.5 На пятом этапе с учетом выявленных в пределах жизненного цикла объекта возможных механизмов деградации служебных характеристик, зарождения и развития дефектов, а также сформулированных на предыдущем этапе признаков отказов и предельных состояний должны быть выбраны расчетные критерии и методы, используемые при расчетной оценке технического состояния и срока службы (ресурса) анализируемого объекта.

4.5.2.6 На шестом этапе должен быть выполнен структурный анализ объекта с целью выделения отдельных его элементов для проведения расчетного анализа. Структурирование объекта и выделение расчетных участков выполняют в соответствии с приведенными в 4.3 и 8.4 положениями, соблюдая следующий порядок действий:

а) каждому выделенному структурному элементу ставят в соответствие:

1) расчетный объект-аналог (расчетную схему);

2) набор критериальных характеристических параметров, который соответствует выбранным для анализа служебным характеристикам и определяет техническое состояние объекта в течение его жизненного цикла (согласованный с используемой при проектировании нормативной документацией и сформированный на основе анализа, выполненного на предыдущих этапах);

б) устанавливают связь между заданными в проекте технологическими параметрами объекта и сформированным для него набором критериальных характеристических параметров, характеризующих степень соответствия объекта заданным при проектировании расчетным критериям (прочности, устойчивости, трещиностойкости, долговечности и другим критериям при необходимости);

в) осуществляют перенос (отображение) заданных проектом технологических параметров на область, определяемую набором сформированных параметров;

г) проводят анализ степени полноты и достоверности исходной информации, которую используют при оценке значений критериальных характеристических параметров служебных характеристик, определяющих техническое состояние расчетных участков.

4.5.2.7 На заключительном седьмом этапе выполняют прогнозную оценку срока службы (ресурса) расчетного участка (объекта) ЛЧМГ или однотипных групп расчетных участков по всем выделенным типам расчетных состояний.

В процессе проведения расчетов должны быть получены прогнозные оценки происходящей под действием системы нагрузок и воздействий эволюции технического состояния объекта по отношению к его исходному состоянию. При этом необходимо учитывать все выявленные механизмы изменения служебных характеристик и механизмов зарождения и развития дефектов.

Прогнозирование срока службы (ресурса) объекта выполняют по результатам прогнозных оценок эволюции технического состояния, количественно характеризующихся изменением значений критериальных характеристических параметров.

При выполнении расчетов на данном этапе определению подлежат:

- предельные (разрушающие) нагрузки на объекте или соответствующие характеристики напряженно-деформированного состояния (НДС) для фиксированного уровня дефектности;

- критические параметры дефектности, оцениваемые при заданном уровне нагрузок или соответствующих им характеристик НДС.

Примечание — В качестве критериальных характеристических параметров могут быть использованы параметры технического состояния в соответствии с 4.2.2 и при необходимости другие параметры.

Оценку показателей срока службы (ресурса) расчетного участка проводят, применяя выбранную систему кинетических уравнений накопления повреждений и роста дефектов к расчету календарного времени или наработки расчетного участка, соответствующих моменту достижения критических уровней повреждений (дефектности). Критические уровни повреждений определяют на основе принятых критериев.

Значение назначенного срока службы (назначенного ресурса) ЛЧМГ устанавливают на основе результатов прогнозной оценки срока службы (ресурса) всех входящих в ее состав выделенных расчетных участков.

5 Типовые исходные данные для проведения оценки несущей способности и срока службы расчетного участка линейной части магистрального газопровода на этапе проектирования

5.1 Общая характеристика проектных решений

5.1.1 По результатам изучения проектной и инженерно-изыскательской документации должна быть получена информация по следующим группам данных:

а) организационные данные:

1) название магистрального газопровода, в состав которого входят расчетные участки ЛЧМГ;

2) сведения об организации(ях), выполнившей(их) проект ЛЧМГ;

б) конструктивное исполнение и технологические характеристики ЛЧМГ:

1) рабочее давление газа;

2) максимальное пробное давление при гидроиспытаниях (согласно проектным условиям);

3) технологическая схема ЛЧМГ;

4) конструктивное исполнение (подземное, наземное, надземное на опорах, подводное, в канале, в коллекторе);

5) план и профиль ЛЧМГ, включая проектные решения на крутоизогнутых участках и другие нетиповые проектные решения (при наличии);

6) спецификации на трубы, соединительные детали, комплектующие и используемое технологическое оборудование, выполненные по форме и правилам, установленным в ГОСТ 21.110;

7) категории и характеристики локальных участков (крановые узлы, переходы через водные преграды, вантовые переходы, балочные воздушные переходы, межпромысловые коллекторы и т.п.);

в) данные о регионе прокладки магистрального газопровода:

1) региональные географические данные (координаты, климатические характеристики*, рельеф местности, грунтово-геологические условия вдоль трассы, расположение и характеристики обводненных и заболоченных территорий, слабонесущих, пучинистых и мерзлых грунтов);

2) протяженность прохождения трассы по пашне, лесу, лугу, садам, виноградникам, болотам и др.;

3) прохождение трассы по участкам с неблагоприятными условиями строительства, застроенной территории, горным участкам и др.;

4) пересечение трассы водотоками, железными и автомобильными дорогами и др., их число и протяженность;

5) протяженность прохождения трассы по местности без дорог, участков сближения или параллельного следования с железными и автомобильными дорогами, линиями электропередачи и связи и др.;

6) возможные сносы строений и другие показатели (при наличии), учитываемые при выборе направления трассы;

7) расположение ЛЧМГ относительно населенных пунктов и отдельных промышленных объектов;

8) расположение ЛЧМГ относительно других коммуникаций (газопроводов, нефте- и продуктопроводов, линий электропередач, железных и автомобильных дорог).

5.1.2 Данные о грунтово-геологических и гидрогеологических условиях вдоль трассы принимают по результатам инженерно-геологических и инженерно-геотехнических изысканий**, оформленных по ГОСТ 21.301.

5.1.3 В перечень исходных данных, используемых для оценки срока безопасной эксплуатации ЛЧМГ в рамках типового проектирования, как правило, включают следующие грунтово-геологические характеристики:

- тип грунта;
- вид грунта (естественно сформированный или наносный, однородный или неоднородный);
- удельное электрическое сопротивление грунта;
- наличие грунтовой воды на уровне газопровода;
- влажность грунта на уровне газопровода.

5.1.4 Перечень дополнительных данных (из состава результатов инженерных изысканий) определяют исходя из принятой схемы оценки коррозионной агрессивности грунта, а также для использования (при необходимости) в расширенном подходе к оценке срока безопасной эксплуатации ЛЧМГ.

5.2 Технические характеристики труб, соединительных деталей и конструкционных материалов

5.2.1 Для реализации приведенного в 4.5 алгоритма должны быть получены, проанализированы и систематизированы данные о свойствах труб, соединительных деталей и конструкционных материалов в объеме, достаточном для получения обоснованных расчетных оценок.

---

* В Российской Федерации климатические параметры, которые применяют при проектировании зданий и сооружений, определены в своде правил СП 131.13330.2012 «Строительная климатология».

** В Российской Федерации состав и содержание инженерно-геологических и инженерно-геотехнических изысканий для подготовки проектной документации строительных объектов (в том числе линейных) определены в своде правил СП 47.13330.2012 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения».

5.2.2 По результатам сбора, анализа и систематизации данных формируют перечень показателей (физико-механических характеристик), определяющих в рамках принятых расчетных критериев свойства труб, соединительных деталей и конструкционных материалов, и определяют численные значения этих показателей.

Перечень необходимых для проведения расчетов физико-механических характеристик металла труб (в состоянии поставки) приведен в таблице А.1 (приложение А), а источники и способы получения их значений приведены в приложении И.

Примечание — В общем случае в перечень могут быть включены показатели, характеризующие:
- прочность;
- деформативность;
- пластичность;
- трещиностойкость;
- сопротивление переменным нагрузкам при много и малоцикловом нагружении;
- зарождение и рост трещин;
- склонность к изменению отдельных физико-механических характеристик в процессе эксплуатации;
- стойкость к коррозии и коррозионному растрескиванию под напряжением.

При необходимости этот перечень может быть изменен как за счет включения в него дополнительных показателей (например, при расширенном подходе к оценке срока безопасной эксплуатации ЛЧМГ), так и за счет исключения отдельных показателей (например, при отсутствии повреждающих факторов, обусловленных такими показателями).

5.2.3 Формирование указанного в 5.2.2 перечня может быть выполнено на основе данных, приведенных в сертификатах, технических условиях, нормативных документах. Кроме того, могут быть использованы дополнительные данные, предоставленные организацией-изготовителем по запросу проектной организации, полученные по результатам лабораторных испытаний конструкционных материалов и (или) натурных испытаний объектов.

Выбор необходимых видов лабораторных и натурных испытаний — по ГОСТ 16504.

5.2.4 При невозможности получения данных о физико-механических свойствах материалов восполнение недостающей информации может быть проведено проектной организацией или привлеченной ею для этого сторонней экспертной организацией на основании:

- дополнительных исследовательских испытаний, проведенных уполномоченной на это организацией, аккредитованной в соответствии с ГОСТ ИСО/МЭК 17025;
- данных организации-изготовителя, относящихся к изделиям-аналогам;
- совокупности данных, приведенных в нормативной документации, научно-технических публикациях, справочниках и других источниках, относящихся к материалу рассматриваемого изделия или изделия-аналога (при условии обоснования экспертной организацией возможности применения таких данных).

Примечание — Цели проведения исследовательских испытаний, в том числе при проектировании и построении моделей функционирования объектов, определены в ГОСТ 16504.

5.2.5 В некоторых случаях (см. 4.2.7) в зависимости от новизны и сложности проектируемого объекта, располагаемой полноты и достоверности доступной информации проектной организацией может быть принято решение о проведении дополнительных расширенных исследований с целью получения необходимых для анализа данных о свойствах труб, соединительных деталей и конструкционных материалов.

Программу исследовательских работ и перечень исполнителей (в том числе привлекаемых сторонних организаций) определяет проектная организация.

5.2.6 В рамках предусмотренных по 5.2.5 расширенных исследований могут быть дополнительно рассмотрены и проанализированы следующие группы данных, отражающих свойства и характеристики конструкционных материалов и изделий:

- нарушения формы и отклонения фактических размеров изделия от значений, заданных в проектной или конструкторской документации;
- общее или локальное изменение (неоднородность) химического состава, структуры или физико-механических характеристик, приводящее к ухудшению свойств основного металла и (или) металла сварных соединений;
- снижение вязкости металла и повышение ее хрупкости при отрицательных температурах;
- распределение и величина остаточных технологических напряжений в отдельных элементах или зонах изделия;

- фактические данные о типах, размерах и расположении поверхностных и (или) внутренних дефектов в основном металле и металле сварных соединений с учетом требований нормативных документов, объемов, точности и достоверности используемых методов контроля.

На основе перечисленных данных могут быть выявлены и проанализированы следующие дополнительные факторы, которые после экспертного подтверждения их значимости подлежат учету при оценке срока службы расчетного участка:

- ассоциируемые с дефектами формы общие и локальные концентраторы напряжений и деформаций в изделии, вызванные различными технологическими факторами, нарушением геометрических размеров, наличием дефектов технологического происхождения в основном металле и металле сварных соединений;

- зоны с пониженными прочностными и ресурсными характеристиками по отношению к действующей системе нагрузок и воздействий, образование которых вызвано неоднородностью химического состава, нарушениями структуры и изменением физико-механических свойств металла;

- дополнительные нагрузки и воздействия, возникновение которых вызвано технологическими причинами на этапе изготовления (например, остаточные технологические напряжения и деформации).

5.2.7 В процессе реализации приведенного в 4.5 алгоритма учитывают только те из выявленных в соответствии с 5.2.2 — 5.2.6 свойств и характеристик труб, соединительных деталей и конструкционных материалов, а также дополнительных факторов (при их наличии и подтверждении значимости), которые по результатам экспертного анализа и аналитических расчетов признаны влияющими на прочностные показатели и (или) показатели долговечности изделий.

5.2.8 Кроме указанных в 5.2.7 показателей должны быть получены и проанализированы данные о свойствах (служебных характеристиках) планируемых в проектном решении защитных покрытий объектов ЛЧМГ с учетом возможного изменения этих свойств в зависимости от продолжительности и прогнозируемых условий эксплуатации.

К служебным характеристикам по ГОСТ 25812* и ГОСТ 31448, определяющим техническое состояние защитных покрытий и срок их службы, относят:

- целостность покрытия (однородность поверхности без дефектов и пропусков);
- переходное (электрическое) сопротивление покрытия;
- прочность покрытия (при разрыве и при ударе);
- адгезию покрытия с защищаемой поверхностью;
- снижение адгезии от исходного значения после 1000 ч испытаний в воде при установленных стандартных температурах;
- прочность при разрыве отслоенного покрытия при установленных стандартных температурах;
- относительное удлинение при разрыве отслоенного покрытия при установленных стандартных температурах;
- диэлектрическая сплошность покрытия (отсутствие пробоя при установленном стандартном уровне электрического напряжения);
- площадь отслаивания покрытия при катодной поляризации при установленных стандартных температурах;
- сопротивление пенетрации (вдавливанию);
- устойчивость покрытия к термоциклированию при установленных стандартных температурах;
- стойкость покрытия к растрескиванию при температуре (50±3) °С;
- стойкость покрытия к воздействию ультрафиолетовой радиации в потоке 600 кВт·ч/м при температуре (50±3) °С;
- термостабильность при установленных стандартных условиях;
- стойкость покрытия к грибковым поражениям (грибостойкость).

Каждой из перечисленных служебных характеристик могут быть поставлены в соответствие один или несколько критериальных характеристических параметров, которые количественно характеризуют степень соответствия заданным техническими условиями значениям.

Служебные характеристики защитного бетонного покрытия для обетонированных труб (жесткость, прочность, трещиностойкость и др.), установленные в соответствии с нормативными документами, техническими условиями или технической (технологической) документацией организации-изготовителя, подлежат анализу в случае применения таких труб на объектах ЛЧМГ.

---

* В Российской Федерации действует ГОСТ Р 51164—98 «Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии».

Примечание — В соответствии с ГОСТ 13015 (пункт 6.4) перечни контролируемых параметров бетонных и железобетонных изделий для строительных конструкций, устанавливаемые в технической и технологической документации организаций-изготовителей, могут дополняться и уточняться в соответствии с особенностями выпускаемых изделий и условиями их производства.

5.2.9 Выбор значимых и подлежащих учету служебных характеристик (из перечисленных в 5.2.8), которые используют при реализации приведенного в 4.5 алгоритма, определяют специалисты (эксперты) организации, проводящей оценку срока безопасной эксплуатации ЛЧМГ.

5.2.10 Данные об изменении критериальных характеристических параметров и на их основе об изменении служебных характеристик защитного покрытия могут быть представлены в табличной форме или в виде функциональных зависимостей, связывающих значения этих параметров с продолжительностью эксплуатации или наработкой.

Функциональные зависимости целесообразно приводить для средних ожидаемых значений критериальных характеристических параметров и (или) для их минимальных значений, гарантируемых организацией-изготовителем.

5.2.11 При оценке качества защитного покрытия с учетом фактора времени допускается использовать единый интегральный показатель — установленный организацией-изготовителем срок службы защитного покрытия, в пределах которого гарантировано сохранение всех его служебных характеристик, определенных нормативными документами и техническими условиями.

5.3 Данные о технологии строительства линейной части магистральных газопроводов

5.3.1 При оценке срока службы (ресурса) расчетных участков ЛЧМГ в рамках расширенного подхода, в дополнение к общей информации по конструктивному исполнению, технологическим характеристикам ЛЧМГ (см. 5.1) и данным, приведенным в таблице А.1 (приложение А), могут быть использованы сведения о технологиях строительства, которые в соответствии с проектом будут использованы на расчетных участках.

5.3.2 В рамках применения положений настоящего стандарта могут быть рассмотрены предусмотренные проектом технологии строительства основной магистрали, отводов, лупингов и переходов, регламентированные нормами технологического проектирования магистральных трубопроводов и связанными с ними нормативными документами.

При необходимости следует рассмотреть и проанализировать технологию применения предусмотренных проектной и конструкторской документацией новых технических решений, реализация которых может влиять на прогнозные оценки срока службы (ресурса).

5.4 Данные о проектных условиях эксплуатации

5.4.1 Для прогнозной оценки уровня повреждений, которые могут быть накоплены в предусмотренных проектом условиях эксплуатации в конструктивных элементах расчетного участка ЛЧМГ, кроме приведенных в 5.1 сведений по общим характеристикам проектных решений дополнительно необходимо получить данные об ожидаемом уровне нагруженности конструкции в прогнозируемый период.

5.4.2 Перечень рекомендуемых характеристических показателей нагруженности зависит от применяемых при анализе нагруженности расчетных схем, условий эксплуатации магистрального газопровода, его конструктивной схемы и подлежит уточнению в каждом конкретном случае с учетом следующих рекомендаций:

а) при оценке НДС подземных расчетных участков ЛЧМГ необходимы данные:
   1) о распределении температур по длине участка;
   2) о характеристиках грунта, позволяющих оценить его сопротивление продольным и поперечным перемещениям расчетного участка;
   3) о конструктивных особенностях участка;
   4) о конфигурации и рельефе трассы на участке;

б) для проложенных на опорах надземных расчетных участков необходимы прогнозные данные:
   1) о конфигурации продольной оси (с учетом просадки, выпучивания или возможного разрушения одной или нескольких опор);
   2) о ветровых нагрузках в пределах участка;
   3) о температурных режимах в процессе эксплуатации с учетом их изменчивости на коротких и длительных интервалах времени;
   4) о снеговых и гололедных нагрузках в пределах участка;

в) для подводных расчетных участков необходимы данные:

1) о гидродинамических нагрузках;

2) о скорости и направлении течения;

3) о текущем и прогнозируемом рельефе дна;

4) о физико-механических характеристиках грунта донного основания и грунта засыпки.

5.4.3 Частично отраженные в проектной и конструкторской документации сведения, перечисленные в 5.4.2, могут быть при необходимости дополнены информацией, полученной по результатам расширенных исследований на этапе сбора и анализа исходной информации.

5.4.4 Данные об ожидаемых уровнях нагруженности расчетных участков в прогнозируемый период целесообразно представлять в виде соответствующих числовых последовательностей или задавать посредством пространственно-временны́х функций (в том числе случайных).

6 Нагрузки и воздействия на газопровод

6.1 Общая характеристика нагрузок и воздействий. Проектные нагрузки и воздействия на основе детерминистического и вероятностного подходов

6.1.1 Принимая во внимание значительную продолжительность эксплуатации магистральных газопроводов, исходная информация о зависящих от времени и пространственных координат нагрузках и воздействиях должна быть подготовлена с учетом данных о проектных условиях эксплуатации, расположения объектов ЛЧМГ и фактора времени.

6.1.2 При выполнении прогнозной оценки срока службы (ресурса) объектов ЛЧМГ как в рамках детерминистического, так и в рамках вероятностного подхода по 9.5, как правило, выделяют две основные группы нагрузок и воздействий на эти объекты: функциональные и природно-климатические.

6.1.3 Перечень определяемых по ГОСТ 26883 функциональных нагрузок и воздействий и их численные значения в объеме, достаточном для первичного анализа при типовом проектировании, учитывают согласно проектной и нормативной документации* в зависимости от конструктивной схемы магистрального газопровода и реализуемых на практике режимов эксплуатации.

К функциональным нагрузкам и воздействиям относят:

- внутреннее давление;
- вес транспортируемого газа;
- температурные воздействия, обусловленные взаимодействием конструкции магистрального газопровода с транспортируемым газом;
- статические и динамические технологические нагрузки (порождаемые работой технологического оборудования).

6.1.4 Данные о типах и уровнях природно-климатических нагрузок и воздействий, обусловленных взаимодействием магистрального газопровода с окружающей средой, должны быть получены на основе анализа принятых в проекте конструктивных решений с учетом информации о трассовых условиях, включающей основные природно-климатические характеристики региона прокладки.

6.1.5 Описание способов сбора и схематизации, а также методы учета проектных функциональных и природно-климатических нагрузок и воздействий, которые могут быть использованы при оценке срока службы (ресурса) объектов ЛЧМГ в рамках детерминистического и вероятностного подхода по 9.5, приведены в приложении К.

6.1.6 На основе общности порождаемых процессов накопления повреждений выделяют следующие группы нагрузок и воздействий:

- квазистатические (незначительно изменяющиеся во времени);
- переменные и циклические;
- коррозионно-механические.

6.1.7 При проведении расчетов прочности объектов ЛЧМГ на действие квазистатических нагрузок в качестве базовых целесообразно принимать известные в инженерной практике прочностные критерии (например, требование, исключающее превышение допустимых механических напряжений, кото-

---

* В Российской Федерации функциональные расчетные нагрузки и воздействия, учитываемые при проектировании объектов магистральных газопроводов, определены в ГОСТ Р 55989—2014 «Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования на давление свыше 10 МПа», а также в сводах правил СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия» и СП 36.13330.2012 «Магистральные трубопроводы».

рые определяют с учетом проектных коэффициентов запаса относительно предела прочности или текучести материала).

Примечание — Расчет на прочность при действии неучтенных в проектных расчетах квазистатических нагрузках при необходимости проводят на заключительном этапе приведенного в 4.5 алгоритма.

6.1.8 При наличии переменных и циклических нагрузок оценку прочности и работоспособности объектов ЛЧМГ на выделенных расчетных участках следует проводить с учетом процессов накопления усталостных повреждений в материале конструкций, зарождения и развития усталостных трещин.

6.1.9 Учет влияния коррозионно-механических воздействий, которые выделены в отдельную группу из-за специфического механизма накопления повреждений и деградации физико-механических свойств конструкционных материалов, рекомендуется проводить по следующим направлениям:

- оценка эффективности противокоррозионной защиты;
- прогнозирование скорости коррозии на расчетных участках с нарушением нормативного уровня противокоррозионной защиты и на незащищенных участках;
- анализ влияния окружающей среды на изменение физико-механических свойств конструкционных материалов.

6.1.10 Информация о перечисленных в 6.1.6 нагрузках и воздействиях должна содержать данные об их распределении в пространстве, характерных интенсивностях и скоростях изменения во времени. Необходимые данные о продолжительности действия должны быть представлены в объеме и форме, которые обеспечивают возможность их корректного анализа.

Примечание — Структура, содержание, степень наполнения и детализации данных зависят от типа нагрузок и воздействий и характеристик самой конструкции.

6.1.11 Модель схематизации проектных нагрузок и воздействий, позволяющая адекватно выделить их значимые характерные особенности для применения детерминистического и вероятностного подхода к оценке срока службы (ресурса) расчетных участков, следует выбирать в соответствии с выявленным набором классифицирующих признаков, учитывая рекомендации, приведенные в приложениях К и Л.

6.1.12 Взаимное влияние и сочетание нагрузок и воздействий различного происхождения необходимо принимать во внимание посредством выявления их возможных комбинаций (значимых для анализа) с учетом их развертывания во времени и пространстве.

6.2 Частотный и временно́й анализ нагрузок и воздействий

6.2.1 В рамках расширенного подхода при необходимости его применения согласно 4.2.7 должны быть дополнительно проанализированы частотные и временны́е закономерности полученных числовых последовательностей и пространственно-временных функций (в том числе случайных). Анализ проводят в рамках второго этапа реализации приведенного в 4.5 алгоритма для выявления постоянных и переменных составляющих нагрузок и воздействий, а также для оценки их экстремальных (пиковых), т.е. максимальных и минимальных значений.

Для переменных составляющих должен быть проведен частотный и временно́й анализ, позволяющий получить оценку числа циклов нагружения с различными амплитудами и определяемыми по ГОСТ 23207 коэффициентами асимметрии циклов за заданный промежуток календарного времени или наработки. Эти данные используют для оценки уровня накопленных к определенному сроку и прогнозируемых при дальнейшей эксплуатации усталостных повреждений.

6.2.2 Анализ переменных во времени составляющих нагрузок на расчетном участке объекта ЛЧМГ может быть выполнен в соответствии с рекомендациями, приведенными в приложении Л.

6.2.3 Анализ экстремальных (пиковых) значений нагрузок и их распределения в зависимости от времени проводят для расчета несущей способности расчетного участка ЛЧМГ по критериям прочности, трещиностойкости, предельно допустимого уровня дефектности.

Оценка значений экстремальных нагрузок и воздействий, включая результаты статистического анализа распределений экстремальных значений, может быть выполнена на основе анализа данных по группам аналогичных объектов.

6.3 Непроектные нагрузки и воздействия

6.3.1 По решению проектной организации в рамках расширенного подхода при необходимости его применения согласно 4.2.7 кроме определяемых в соответствии с 6.1.3 нормативных расчетных

нагрузок и воздействий могут быть рассмотрены дополнительные нагрузки и воздействия, появление которых на расчетном участке может быть вызвано реализацией непроектных режимов работы.

6.3.2 К непроектным нагрузкам и воздействиям относят:

- редкие (а, следовательно, не учитываемые в регулярных расчетах) сочетания известных нагрузок и воздействий, в том числе вызванных действием непреодолимых причин природного и техногенного* характера;
- непредвиденные аномально высокие уровни нагрузок, учитываемых регулярными расчетами;
- номинальные нагрузки, действующие в пределах частично работоспособного расчетного участка, имеющего повреждения, характерные для данного типа конструкции.

Примечание — К учитываемым регулярным расчетом непроектным нагрузкам, имеющим непредвиденную аномально высокую интенсивность, могут быть отнесены сейсмические нагрузки, превышающие проектный уровень.

6.3.3 Анализ непроектных режимов в рамках расширенного подхода может быть выполнен для обеспечения устойчивости проектного положения и живучести ЛЧМГ по отношению к критическим и катастрофическим отказам.

Примечание — Понятие живучести, характерное для опасных производственных объектов, занимает пограничное место между понятиями надежности и безопасности. Под живучестью, например по ГОСТ 27.002, понимают свойство объекта противостоять развитию критических отказов из-за дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при отказе отдельных компонентов.

7 Процессы накопления повреждений, зарождения и развития дефектов

7.1 Общая характеристика повреждающих факторов

7.1.1 В рамках предусмотренной на третьем этапе реализации приведенного в 4.5 алгоритма при проведении анализа повреждающих факторов и механизмов деградации свойств конструкционных материалов предполагают, что для расчетных участков ЛЧМГ, как правило, характерны следующие четыре основные группы причин, порождающие эти факторы и механизмы:

- коррозионные процессы, связанные с выраженной потерей материала, типа сплошной и местной коррозии труб;
- сложные комбинированные коррозионно-механические явления (прежде всего, КРН);
- накопление усталостных повреждений и развитие дефектов в наиболее нагруженных элементах трубопроводной конструкции под действием комплекса повторно-переменных нагрузок и воздействий механической природы;
- изменение свойств материалов труб и сварных соединений в процессе эксплуатации под действием факторов внешней среды и эксплуатационных нагрузок.

7.1.2 По результатам анализа повреждающих факторов должен быть выбран один или несколько механизмов накопления повреждений, влияющих на прочностные и ресурсные показатели расчетных участков ЛЧМГ.

Выбор указанных механизмов накопления повреждений осуществляют на основании экспертных оценок, которые базируются на совокупности данных натурных наблюдений, результатах полевых исследований и опыте эксплуатации объектов-аналогов.

Рекомендации по выбору схем учета одного или нескольких повреждающих факторов, приводящих к ухудшению служебных характеристик на расчетном участке и исчерпанию его срока службы (ресурса), приведены в приложении Д.

7.2 Коррозионные и коррозионно-механические процессы

7.2.1 Если в соответствии с 7.1 одним из выбранных механизмов накопления повреждений признаны имеющие место на расчетном участке коррозионные и коррозионно-механические процессы, то следует рассмотреть следующие их виды:

---

* Причины, обусловленные влиянием, оказываемым промышленной деятельностью, в частности на ландшафт и биосферу (в отличие от естественных или природно-климатических воздействий).

- сплошная коррозия (равномерная или неравномерная) коррозия, характеризующаяся утонением стенки металлической конструкции на площади, охватывающей практически всю ее поверхность и определяющаяся средней скоростью утонения стенки металлической конструкции за год;

- местная (в виде отдельных пятен, язвенная или кавернообразная) коррозия, отличающаяся от сплошной коррозии компактностью поврежденной области глубиной, сопоставимой с размерами коррозионных повреждений в плане, и определяющаяся средней скоростью локального увеличения по глубине за год;

- точечная (питтинговая) коррозия, представляющая собой совокупность небольших в плане и глубоких (глубина больше линейных размеров в плане) точечных поражений определяющаяся средним значением максимальных скоростей прорастания вглубь наиболее глубоких питтингов и общей площадью поражения за год;

- транскристаллитная или межкристаллитная коррозия, характеризующаяся распространением через кристаллы (зерна) металла или по границам кристаллов соответственно с образованием сетки коротких и глубоких микротрещин, и определяющаяся средней скоростью роста трещин;

- коррозионное растрескивание, представляющее собой квазихрупкое повреждение трубопровода в условиях совместного действия статических растягивающих напряжений и коррозионных сред (например, почвенных электролитов) и определяющееся средней скоростью роста наиболее крупных трещин, а также критическими размерами трещины по квазистатическому критерию разрушения;

- коррозионная усталость, характеризующаяся образованием и ростом усталостных трещин в условиях совместного действия переменных во времени нагрузок и коррозионно-активной среды, и определяющаяся скоростью роста этих трещин при изменении физико-механических характеристик металла.

7.2.2 Для оценки степени воздействия коррозионных процессов следует рассмотреть предусмотренные проектом требования к противокоррозионной защите ЛЧМГ и проанализировать критериальные характеристические параметры, соответствующие следующим установленным по ГОСТ 25812* и ГОСТ 31448 служебным характеристикам электрохимической защиты и защитных покрытий трубопроводов на начальный и конечный периоды эксплуатации:

- силы защитного тока и напряжения на выходе катодных станций и сопротивления анодных заземлений (для установок катодной защиты);
- силы защитного тока и сопротивления протекторов (для протекторных установок);
- силы тока дренажа и сопротивления дренажной цепи (для установок дренажной защиты);
- подлежащие учету в соответствии с 5.2.8 служебные характеристики защитных покрытий.

7.2.3 При рассмотрении указанных в 7.2.2 критериальных характеристических параметров необходимо проанализировать условия возникновения коррозионных повреждений в процессе жизненного цикла ЛЧМГ как в случае обеспечения проектных условий эксплуатации, так и в случаях (прогнозируемых сценариях), учитывающих изменения режимов эксплуатации.

Примечание — В соответствии с 5.2.11 вместо служебных характеристик защитных покрытий для оценки их качества с учетом фактора времени может быть принято решение использовать интегральный показатель (нормативный срок службы защитного покрытия).

7.2.4 В результате рассмотрения и анализа процессов в соответствии с 7.2.1 — 7.2.3 должны быть выявлены основные виды коррозионных повреждений, характерные для всех расчетных участков проектируемой ЛЧМГ.

Значимость прогнозируемых коррозионных дефектов и учет их влияния на срок службы (ресурса) конкретных расчетных участков может быть оценена на основе приведенных в приложении В рекомендаций по применению кинетических уравнений роста дефектов.

7.3 Накопление усталостных повреждений

7.3.1 Если в соответствии с 7.1 одним из выбранных механизмов накопления повреждений признаны действующие (в течение всего или части жизненного цикла) на расчетном участке нагрузки и воздействия, приводящие к возникновению в конструкционных элементах, зависящих от календарного времени (или наработки) механических напряжений, то в качестве одного из механизмов накопления повреждений следует рассматривать усталостные явления в материале конструкции.

---

* В Российской Федерации действует ГОСТ Р 51164—98 «Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии».

7.3.2 Значимость прогнозируемых усталостных повреждений и учет их влияния на срок службы (ресурса) конкретных расчетных участков может быть оценена на основе расчетно-экспериментальных моделей, используемых для получения приведенных в приложении Г кинетических уравнений роста дефектов.

7.4 Изменение свойств материалов в процессе эксплуатации

7.4.1 Если в используемых при проектировании нормативных документах, технических условиях или другой технической документации приведены данные о возможных изменениях свойств конструкционных материалов из-за действующих в условиях длительной эксплуатации нагрузок, воздействий и других факторов, то эти изменяющиеся свойства материалов следует учитывать при прогнозировании технического состояния и оценке срока службы (ресурса) расчетных участков ЛЧМГ.

7.4.2 При отсутствии указанных в 7.4.1 данных прогнозирование технического состояния и оценку срока службы (ресурса) выполняют на основе данных о физико-механических характеристиках конструкционных материалов, имеющихся на момент поставки изделий без учета изменения этих характеристик в процессе эксплуатации.

7.4.3 В случае изменения физико-механических характеристик материалов оценку выполняют на основе тех же алгоритмов, критериев, расчетных моделей и методов, которые применяют в расчетах без учета такого изменения, но в первом случае расчетные оценки получают с использованием изменяющихся со временем значений данных характеристик, во втором — принимают их значения постоянными.

Примечание — Проведение прочностных расчетов с учетом изменения свойств конструкционных материалов в процессе эксплуатации приводит к некоторому усложнению расчетных уравнений за счет появления в них дополнительной переменной — времени. Результат расчетов может быть получен либо прямым решением соответствующих нелинейных уравнений, либо путем последовательного выполнения вычислений с увеличением продолжительности временного интервала вплоть до значения, соответствующего нарушению расчетных критериев. Если необходимо уточнить продолжительность временного интервала, отсчитываемого от начала эксплуатации до перехода в предельное состояние, то могут быть выполнены расчеты с меньшим шагом по времени или проведена интерполяция между двумя последними значениями.

7.4.4 При проектировании объектов ЛЧМГ с использованием новых конструкционных материалов проектной организацией в рамках предусмотренного настоящим стандартом расширенного подхода (при необходимости его применения согласно 4.2.7) может быть принято решение о проведении дополнительных исследований для уточнения данных о возможном изменении свойств конструкционных материалов в процессе эксплуатации.

Для проведения указанных дополнительных исследований в соответствии с 4.2.8 могут быть привлечены научно-исследовательские организации металловедческого профиля, имеющие опыт проведения металлографических и других исследований в области металлургии и материаловедения.

Программу выполняемых в рамках этих исследований работ, порядок их проведения, состав исполнителей, степень и способы использования результатов определяет проектная организация.

8 Классификация отказов и предельных состояний газопровода

8.1 Классификация событий, учитываемых при оценке текущего и прогнозируемого технического состояния линейной части магистральных газопроводов

8.1.1 Учитывая, что магистральные трубопроводы в соответствии с ГОСТ 27751 относят к сооружениям повышенного уровня ответственности, сохранение герметичности и конструкционной целостности объектов ЛЧМГ в течение срока службы следует рассматривать с точки зрения обеспечения их механической безопасности.

Любое событие, связанное с нарушением герметичности и целостности конструкции должно быть классифицировано как отказ.

8.1.2 В соответствии с терминологией, принятой в ГОСТ 27.310 и настоящем стандарте, отказы, которые признаны недопустимыми и требуют принятия специальных мер по снижению их вероятности и (или) возможного ущерба, связанного с их возникновением, относят к критическим отказам.

Примечание — Критический отказ, повлекший за собой гибель или тяжелые травмы людей, согласно ГОСТ 27.310 относят к категории катастрофических.

8.1.3 Признание недопустимости отказа объекта осуществляют по достижении им предельного состояния на основе признака или совокупности признаков, называемых критерием предельного состояния.

Для сложных объектов повышенного уровня ответственности может быть введено несколько типов предельных состояний, для каждого из которых устанавливают свой критерий предельного состояния.

8.1.4 К предельным состояниям объектов ЛЧМГ могут быть отнесены состояния, реализация которых не приводит к необходимости безоговорочного прекращения использования объекта по назначению и снятию его с эксплуатации.

Такие состояния, характеризуемые наличием дефектов и повреждений (терминологически определенных по ГОСТ 27.002), а также некритических отказов и отказов с незначительными последствиями (классифицируемых по ГОСТ 27.310), следует рассматривать как работоспособные состояния с ухудшением служебных характеристик объекта.

Классификация характерных отказов (в том числе критических) и повреждений, приводящих к ухудшению служебных характеристик и влияющих на состояние объектов ЛЧМГ, приведена в таблице 1.

Таблица 1 — Классификация характерных событий (отказов и повреждений), влияющих на состояние объектов ЛЧМГ

Название события (отказа)	Классификация события (отказа)	Состояние объекта, последствия события (отказа)
Разрыв газопровода с разделением на составные части (типа гильотинирования)	Критический отказ	Полная невозможность эксплуатации газопровода; создание чрезвычайной ситуации в зонах, прилегающих к месту разрыва
Протяженное разрушение газопровода с преимущественной ориентацией оси разрыва в продольном направлении	Критический отказ	Полная невозможность эксплуатации газопровода; создание чрезвычайной ситуации в зонах, прилегающих к месту разрыва
Лавинное смятие газопровода при комбинированном нагружении изгибом, продольным усилием и гидростатическим давлением, сопровождающееся нарушением герметичности оболочки (морские глубоководные газопроводы)	Критический отказ	Полная невозможность эксплуатации газопровода; создание чрезвычайной ситуации в прилегающих районах
Протяженное смятие сечения (коллапс) без нарушения герметичности (глубоководные газопроводы)	Существенный отказ	Падение пропускной способности, накопление пластических деформаций, уменьшение запаса пластичности, приводящее к охрупчиванию материала, снижение жесткости сечения при изгибе
Локальное нарушение герметичности (течь)	Существенный отказ	Введение ограничений на режим эксплуатации (вплоть до ее прекращения) на время устранения дефекта; создание опасной ситуации в зонах, прилегающих к месту разрыва
Локальное смятие поперечного сечения (коллапс) без нарушения герметичности	Существенный отказ	Падение пропускной способности, накопление пластических деформаций, уменьшение запаса пластичности, охрупчивание материала, снижение жесткости сечения при изгибе
Циклическое деформирование в упруго-пластической области	Несущественный отказ (повреждение, дефект)	Накопление усталостных повреждений в режиме малоцикловой усталости
Возникновение локальных пластических деформаций в растянутой зоне поперечного сечения при монотонном нагружении	Несущественный отказ (повреждение, дефект)	Уменьшение пластичности, охрупчивание материала, подрастание дефектов
Возникновение местной потери устойчивости	Несущественный отказ (повреждение, дефект)	Появление локальных пластических деформаций, снижение жесткости сечения, уменьшение запаса пластичности

Окончание таблицы 1

Название события (отказа)	Классификация события (отказа)	Состояние объекта, последствия события (отказа)
Возникновение локальных пластических деформаций в сжатой зоне без потери устойчивости	Несущественный отказ (повреждение, дефект)	Уменьшение запаса пластичности, охрупчивание материала
Нарушение расчетного условия прочности без фактического разрушения	Несущественный отказ (повреждение, дефект)	Последствия зависят от требований принятого в расчетах критерия предельного состояния
Циклическое деформирование в упругой области при нарушении ограничения на величину допускаемых циклических напряжений	Несущественный отказ (повреждение, дефект)	Накопление усталостных повреждений в режиме многоцикловой усталости вплоть до подрастания трещиноподобных дефектов

8.1.5 Идентификацию тех состояний, которые рассматривают как работоспособные, характеризуемых наличием повреждений, некритических отказов и отказов с незначительными последствиями, следует проводить в рамках анализа возможного возникновений критических отказов при дальнейшей эксплуатации объекта с ухудшенными служебными характеристиками. Согласно ГОСТ 27.002 такие отказы могут быть классифицированы как существенные и несущественные.

8.1.6 При классификации событий целесообразно различать постепенные и внезапные отказы, которые по ГОСТ 27.002 характеризуются соответственно постепенным и скачкообразным изменением значений одного или нескольких критериальных характеристических параметров объекта.

К внезапным отказам, как правило, относят отказы, возникновение которых связано с действием непроектных нагрузок и воздействий (см. 6.4), в том числе вызванных непреодолимыми причинами природного и техногенного характера.

Примечания

1 В группу постепенных отказов, как правило, входят определяемые по ГОСТ 27.002 деградационные отказы, т.е. отказы, обусловленные естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости, которые протекают при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

2 В приведенном в ГОСТ 27.002 пояснении к понятию внезапного отказа он характеризуется как отказ, наступление которого не может быть предсказано предварительным контролем или диагностированием.

8.1.7 В соответствии с процедурой реализации приведенного в 4.5 алгоритма прогнозная оценка срока службы (ресурса) объектов ЛЧМГ в рамках настоящего стандарта должна быть выполнена по отношению к постепенным отказам.

Примечание — По решению проектной организации в рамках расширенного подхода (при необходимости его применения согласно 4.2.7) может быть выполнен анализ эксплуатационной надежности проектируемого объекта ЛЧМГ по отношению к внезапным отказам, предусматривающий оценку безотказности объекта в целом и (или) отдельных его элементов.

8.2 Причинно-следственный анализ отказов и повреждений

8.2.1 По решению проектной организации в рамках расширенного подхода (при необходимости его применения согласно 4.2.7) на основе требований ГОСТ 27.310 может быть выполнен анализ причин возникновения и последовательности реализации событий и состояний, приводящих к отказам.

При проведении анализа логическая схема возникновения возможной аварии на объекте ЛЧМГ может быть представлена в виде «дерева событий», «дерева отказов» или других структурных схем, образующих с помощью логических функций причинно-следственные цепочки событий, замыкающиеся на конечном событии — отказе.

Примечания

1 Метод построения «дерева событий» предусматривает логическое прослеживание развития событий от исходного до конечного состояния объекта. В результате прослеживания всех вариантов развития событий выявляются те конечные состояния, которые расцениваются как отказы. Метод удобен для выявления зависимых (происходящих по общей причине) событий и при анализе последствий таких внешних воздействий, как взрыв, пожар, землетрясение, при которых возможны одновременные отказы нескольких объектов.

2 Метод построения «дерева отказов» основан на обратном (по отношению к методу построения «дерева событий») анализе развития событий. Анализ начинают с установления вида конечного события — отказа, причины возникновения которого подлежат выявлению, и проводят его методом последовательного раскрытия сочетаний событий, приводящих к тем или иным отказам, совокупность которых и ведет к «вершинному» отказу. Последовательное раскрытие сочетаний событий проводят до уровня элементарных событий, вероятность которых может быть количественно оценена.

3 Метод причинно-следственного анализа предусматривает комбинирование методов построения «дерева событий» и «дерева отказов» (т.е. их совместное построение), заключающееся в том, что при обнаружении в «дереве событий» критических ситуаций для оценки вероятности отказа системы строится «дерево отказов». Это позволяет оценить вероятность развития событий по сценариям, ведущим к отказам, и реализовать главную задачу метода, состоящую в установлении связи последствий отказа с их причинами.

8.2.2 При анализе причин возникновения и последовательности реализации приводящих к отказам событий и состояний должны быть приняты во внимание следующие факторы, определяющие специфику ЛЧМГ как конструктивно сложного объекта:

- значительная протяженность;
- высокая энергоемкость;
- длительные проектные сроки эксплуатации;
- ограниченные возможности диагностики и ремонта;
- удаленность и труднодоступность района строительства;
- сложные условия строительства;
- климатические, грунтовые, гидрогеологические, геокриологические, ландшафтно-топографические, сейсмические условия в регионе прокладки магистрального газопровода;
- антропогенные факторы влияния с привязкой к региону прокладки магистрального газопровода (плотность населения, активность хозяйственной и промышленной деятельности);
- особенности, влияющие на условия эксплуатации других магистральных газопроводов региона прокладки (статистика отказов и повреждений по региону);
- объемы и периодичность диагностических и ремонтно-восстановительных работ, соответствие требованиям нормативных документов.

8.2.3 В качестве источников негативного воздействия (инициирующих событий) и механизмов развития этого воздействия, являющихся причинами отказов на объектах ЛЧМГ (в том числе отказов, приводящих к авариям), целесообразно рассматривать следующие статистически значимые и подтвержденные источники и механизмы:

- механические повреждения (строительной техникой, бурильным оборудованием, якорями судов при подводной прокладке, в результате взрывных работ, актов вандализма и т.п.);
- внешняя подземная и атмосферная коррозия, стресс-коррозия, внутренняя коррозия и эрозия;
- дефекты труб, соединительных деталей, оборудования (включая монтажные сварные соединения) и материалов во время их изготовления, транспортировки и строительно-монтажных работ;
- циклические нагрузки, приводящие к усталостному разрушению;
- природные воздействия, такие как подвижки грунта в результате оседания, размыва, морозного пучения и других процессов (при наличии), эффекты растепления многолетнемерзлого грунта, обводнение траншеи;
- нарушения правил технической эксплуатации.

8.3 Критерии отказов и предельных состояний

8.3.1 Для определения недопустимости тех или иных отказов (см. 8.1.3), определяющих механическую безопасность объектов ЛЧМГ, используют обозначенные в 8.3.1.1 — 8.3.1.3 критерии предельного состояния, отражающие возможные (при строительстве и эксплуатации) механизмы повреждений и деградации служебных характеристик объекта.

8.3.1.1 Критерии предельного состояния по прочности и трещиностойкости:

- критерии прочности в форме ограничений на упруго-пластические напряжения и (или) деформации;
- критерии линейной и упруго-пластической механики разрушения;
- критерии неустойчивого распространения трещин (по хрупкому и вязкому механизмам).

8.3.1.2 Критерии, связанные с потерей устойчивости конструкции:

- критерий стержневой формы устойчивости;
- критерий местной потери устойчивости (в оболочечной форме);

- критерий устойчивости при комбинированном нагружении, включающий в себя совместный учет изгиба, продольных усилий и внешнего давления в их произвольной комбинации;
- критерий устойчивости положения.

8.3.1.3 Критерии, связанные с долговечностью конструкции:
- критерий усталости при многоцикловом нагружении;
- критерий усталости при малоцикловом нагружении;
- критерий роста усталостных трещин при механических нагрузках;
- критерий долговечности при коррозионно-механических нагрузках.

8.3.2 Форму записи расчетного критерия в каждом конкретном случае определяют по типу связанной с ним прочностной (динамической или статической) задачи, виду выбранной расчетной схемы, способу представления нагрузок и воздействий.

8.4 Структурирование объектов линейной части магистральных газопроводов с целью выделения расчетных участков и элементов

8.4.1 Согласно 4.4.6 выделение в пределах ЛЧМГ однородных расчетных участков, проводят в рамках шестого этапа общего алгоритма (см. 4.5) с учетом приведенных в 4.4.1 — 4.4.4 положений и декомпозиции ЛЧМГ в соответствии с 4.3.

Идентификацию по признаку однородности с учетом условий эксплуатации проводят по заданной группе критериальных характеристических параметров, присущих принятым к рассмотрению служебным характеристикам объектов ЛЧМГ.

Примечание — Требование однородности условий означает, что значения всех рассматриваемых критериальных характеристических параметров принимают постоянными в пределах расчетного участка.

8.4.2 Выделение расчетных участков с однородными условиями по заданной группе характеристических параметров может быть проведено в соответствии со следующими последовательно выполняемыми действиями:

- формирование перечня критериальных характеристических параметров, по которым должна быть обеспечена однородность условий на расчетном участке с включением в него данных и критериальных характеристических параметров, определенных на основе рекомендаций раздела 5;
- формирование электронных таблиц или построение графиков, характеризующих изменение каждого из включенных в перечень критериальных характеристических параметров в зависимости от координаты участка вдоль трассы;
- аппроксимация значений критериальных характеристических параметров ступенчатыми функциями при условии, что координаты точек изменения каждого из аппроксимированных таким образом параметров определяют начало и конец участков, в пределах которых их значения постоянны (т.е. определяют границы однородных участков).

Примечание — Распространенным способом обеспечения однородности условий по выбранному параметру является уменьшение протяженности расчетного участка до такой степени, чтобы аппроксимация критериального характеристического параметра постоянным значением обеспечивала приемлемую точность расчетов для этого участка.

8.4.3 Из-за возможного несовпадения между собой координат начала и конца выделенных в процессе разбиения участков, на которых значения разных критериальных характеристических параметров приняты постоянными, координаты границ однородности по каждому из параметров следует отображать на общей оси координат. При этом точки, определяющие границы исходных участков, выделенных по каждому из критериальных характеристических параметров, обезличивают.

8.4.4 В качестве расчетных участков принимают участки между двумя обезличенными граничными точками.

8.4.5 Если среди всех расчетных участков есть несмежные участки с одинаковыми совокупностями критериальных характеристических параметров, то такие участки могут быть объединены в группы.

Примечания

1 Объединение в группы позволяет распространить оценку срока безопасной эксплуатации произвольного расчетного участка из группы на остальные участки, включенные в данную группу.

2 Суммарная длина всех расчетных участков равна протяженности трассы ЛЧМГ.

8.4.6 Пример, иллюстрирующий последовательность и правила выделения расчетных участков, приведен в приложении Б.

9 Расчетная оценка несущей способности и срока службы (ресурса) расчетного участка линейной части магистрального газопровода на этапе проектирования

9.1 Общая характеристика алгоритма расчетной оценки

9.1.1 По итоговым результатам выполнения шести этапов алгоритма оценки срока службы (ресурса) ЛЧМГ, подробно изложенных в разделах 5 — 8, должна быть сформирована информационная и методическая основа для выполнения седьмого (заключительного) этапа (см. 4.5.2.7), включающего:

а) оценку характеристик НДС расчетного участка;

б) оценку предельных (разрушающих) значений напряжений и (или) деформаций, действующих в пределах расчетного участка при фиксированном уровне дефектности;

в) оценку предельных (разрушающих) параметров дефектности при заданном уровне нагрузок или соответствующих им характеристик НДС расчетного участка;

г) оценку срока службы расчетного участка, предусматривающую:

1) определение текущего уровня накопленных повреждений, показателей дефектности, выполняемую на основе выбранной системы кинетических уравнений накопления повреждений;

2) расчетно-экспериментальное определение суммарной наработки или календарного времени от момента ввода расчетного участка в эксплуатацию или с момента проведения текущих оценок до момента перехода этого участка в предельное состояние;

д) обоснование назначенного срока службы (срока безопасной эксплуатации) ЛЧМГ.

9.1.2 Перечисленную в 9.1.1 последовательность действий выполняют на седьмом (заключительном) этапе алгоритма оценки срока службы (ресурса) ЛЧМГ для всех расчетных участков с учетом всех критериальных характеристических параметров, присущих принятым к рассмотрению служебным характеристикам объектов ЛЧМГ.

9.2 Напряженно-деформированное состояние

9.2.1 Оценку характеристик НДС расчетного участка выполняют на основе всей совокупности имеющихся данных о физико-механических свойствах материалов, конструктивных особенностях, нагрузках и воздействиях в пределах этого участка.

В результате оценки должны быть получены и заданы в численной или аналитической форме значения компонент напряжений и деформаций при всех выбранных для анализа сочетаниях нагрузок и воздействий для всего рассматриваемого интервала времени.

9.2.2 Оценку характеристик НДС выполняют на основе расчетных схем, сформированных в соответствии с правилами строительной механики и с учетом предусмотренного расширенным подходом (при необходимости его применения согласно 4.2.7) частотного и временно́го анализа нагрузок и воздействий (см. 6.3).

9.2.3 Характерные значения компонент напряжений и деформаций могут быть получены по результатам натурных наблюдений и измерений, выполненных на других объектах, которые имеют участки, аналогичные расчетным.

Длительность интервалов времени, на которых проводились такие наблюдения и измерения, должны быть не менее интервалов времени, на которых проводят оценку срока службы (ресурса) расчетного участка. В противном случае дополнительно должна быть подтверждена корректность экстраполяции данных за пределы интервала наблюдений (при условии осуществления такой экстраполяции).

9.3 Оценка предельных (разрушающих) значений напряжений

9.3.1 В соответствии с расчетными критериями и методами, выбранными на пятом этапе алгоритма оценки срока службы (ресурса) ЛЧМГ (см. 4.5.2.5), и с учетом результатов проведенного на третьем этапе анализа факторов и механизмов деградации служебных характеристик (см. 4.5.2.3) должна быть получена расчетная оценка предельных (разрушающих) напряжений и (или) деформаций, соответствующих заданному уровню дефектности расчетного участка.

9.3.2 Следуя положенному в основу расчетных критериев принципу расчета по предельным состояниям, оценку предельных значений напряжений и (или) деформаций проводят без учета соответствующих коэффициентов запаса, которые применяют на заключительном этапе оценки срока службы расчетного участка.

9.3.3 Значения предельных напряжений и (или) деформаций должны быть определены для фиксированного состояния конструкции, идентифицируемого набором критериальных характеристических параметров, номенклатура которых является достаточной для определения этих значений на основе выбранных расчетных схем и критериев.

В перечень указанных критериальных характеристических параметров в обязательном порядке должны быть включены физико-механические характеристики конструкционных материалов и характеристики возможной дефектности на расчетном участке.

Физико-механические характеристики конструкционных материалов определяют с учетом их возможного изменения в процессе эксплуатации.

9.4 Оценка предельных (разрушающих) значений показателей дефектности

9.4.1 В соответствии с расчетными критериями и методами, выбранными на пятом этапе алгоритма оценки срока службы (ресурса) ЛЧМГ (см. 4.5.2.5), и с учетом результатов проведенного на третьем этапе анализа факторов и механизмов деградации служебных характеристик (см. 4.5.2.3) должна быть получена расчетная оценка предельных (разрушающих) характеристик дефектности, соответствующих заданной совокупности параметров расчетного участка.

Примечание — Получение расчетных оценок предельных (разрушающих) характеристик дефектности эквивалентно определению в численной или аналитической форме зависимости между характеристиками реализуемого в пределах расчетного участка напряженно-деформированного состояния и значениями показателей дефектности, при которых впервые происходит нарушение соответствующих критериальных уравнений прочности и трещиностойкости.

9.4.2 Перечень параметров, характеризующих дефектность расчетного участка, должен быть согласован с типом расчетного критерия.

9.5 Оценка срока службы расчетного участка на основе детерминистического и вероятностного подходов

9.5.1 Срок службы расчетного участка при детерминистическом подходе оценивают в предположении неизменности (детерминированности) характеристик нагруженности расчетного участка (в том числе предельных).

В соответствии с 4.5.2.7 прогнозирование срока службы выполняют по результатам прогнозных оценок эволюции технического состояния. Количественно эти оценки выражаются изменением значений критериальных характеристических параметров, присущих выбранным для оценки служебным характеристикам расчетного участка.

Пример применения детерминистического подхода для прогнозной оценки срока службы расчетного участка ЛЧМГ при проектировании приведен в приложении Е.

9.5.2 Из-за достаточно высокого уровня сложности и отсутствия унифицированных вероятностных подходов к надежности при проектировании различных строительных сооружений вероятностные методы могут быть применены в рамках расширенного подхода к оценке срока службы расчетного участка ЛЧМГ (при необходимости его применения согласно 4.2.7).

При отсутствии межгосударственных и национальных стандартов и сводов правил, устанавливающих вероятностные методы и правила их применения при проектировании объектов магистральных трубопроводов, рекомендуется учитывать принципы, положенные в основу расчета надежности конструкций, используемые в международной стандартизации. В соответствии с этими принципами уровень надежности конструкций на протяжении срока их службы определяют с помощью вероятностно-статистических методов в зависимости от различных уровней технического состояния, задаваемого в качестве предельного.

Примечание — В международных стандартах [13] и [14] изложены методы, основанные на целевом задании уровня надежности конструкций на протяжении устанавливаемого при проектировании базового периода времени (расчетного срока службы), для которого с помощью известных методов теории вероятностей и математической статистики оценивают изменение базовых (характеристических) параметров с целью оценки (прогнозирования) вероятности отказа, относящейся к этому базовому периоду. Для критических отказов, приводящих к предельному состоянию, устанавливаемый при проектировании базовый период времени соответствует сроку безопасной эксплуатации конструкции. При проведении оценки учитывают неопределенность и изменчивость базовых параметров посредством набора частных (парциальных) коэффициентов надежности, определяющих проектную нагруженность конструкции.

9.5.3 Описание проектных нагрузок и воздействий, влияющих на долговечность конструкций и используемых при оценивании срока службы расчетных участков ЛЧМГ при детерминистическом и вероятностном подходах, приведено в приложении К.

10 Обоснование назначенного срока службы линейной части магистральных газопроводов

10.1 В рамках седьмого (заключительного) этапа алгоритма оценки срока службы (ресурса) ЛЧМГ должна быть получена оценка прогнозируемого срока безопасной эксплуатации (назначенный срок службы, назначенный ресурс) для каждого расчетного участка в соответствии с выбранным вариантом сочетания повреждающих факторов.

10.2 По совокупности оценок, полученных для всех расчетных участков и с учетом их протяженности, необходимо построить функцию распределения прогнозируемого срока безопасной эксплуатации.

Для построения указанной функции на координатной плоскости по оси абсцисс откладывают значение прогнозируемого срока безопасной эксплуатации, а по оси ординат — отношение суммарной протяженности участков, которые имеют различные прогнозные сроки безопасной эксплуатации, к общей протяженности всех оцениваемых участков.

10.3 Назначенный в проекте срок безопасной эксплуатации всей ЛЧМГ в целом должен быть выбран при условии, что суммарная протяженность участков с прогнозируемым сроком безопасной эксплуатации, превышающим выбранный, составит не менее 95 % общей протяженности всех расчетных участков.

Такой подход подобен использованию в качестве показателя долговечности по ГОСТ 27.002 гамма-процентного срока службы (или гамма-процентного ресурса), представляющего собой календарную продолжительность (или суммарную наработку) от начала эксплуатации объекта, в течение которой он не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ (гамма), выраженной в процентах.

Примечание — Гамма-процентный срок, соответствующий вероятности 95 %, и равный, например 30 лет, означает, что с вероятностью 95 % объект проработает 30 лет или же при наработке 30 лет сохранят работоспособность не менее 95 процентов объектов. В случае предлагаемого подхода эти 95 % относятся не к числу объектов (как в классическом походе с использованием статистических данных), а к их суммарной протяженности.

10.4 Если в нормативной документации установлены дополнительные ограничения по максимальным значениям назначенного срока службы (назначенного ресурса), то их следует учитывать при выборе этих значений.

Приложение А
(рекомендуемое)

Алгоритм оценки срока службы (ресурса) линейной части магистральных газопроводов при проектировании и сводные данные для проведения оценки

Структурная схема поэтапного алгоритма оценки срока службы (ресурса) ЛЧМГ, применяемого на стадии ее проектирования, изображена на рисунке А.1, а рекомендуемые сводные данные, используемые при проведении указанной оценки, приведены в таблице А.1.

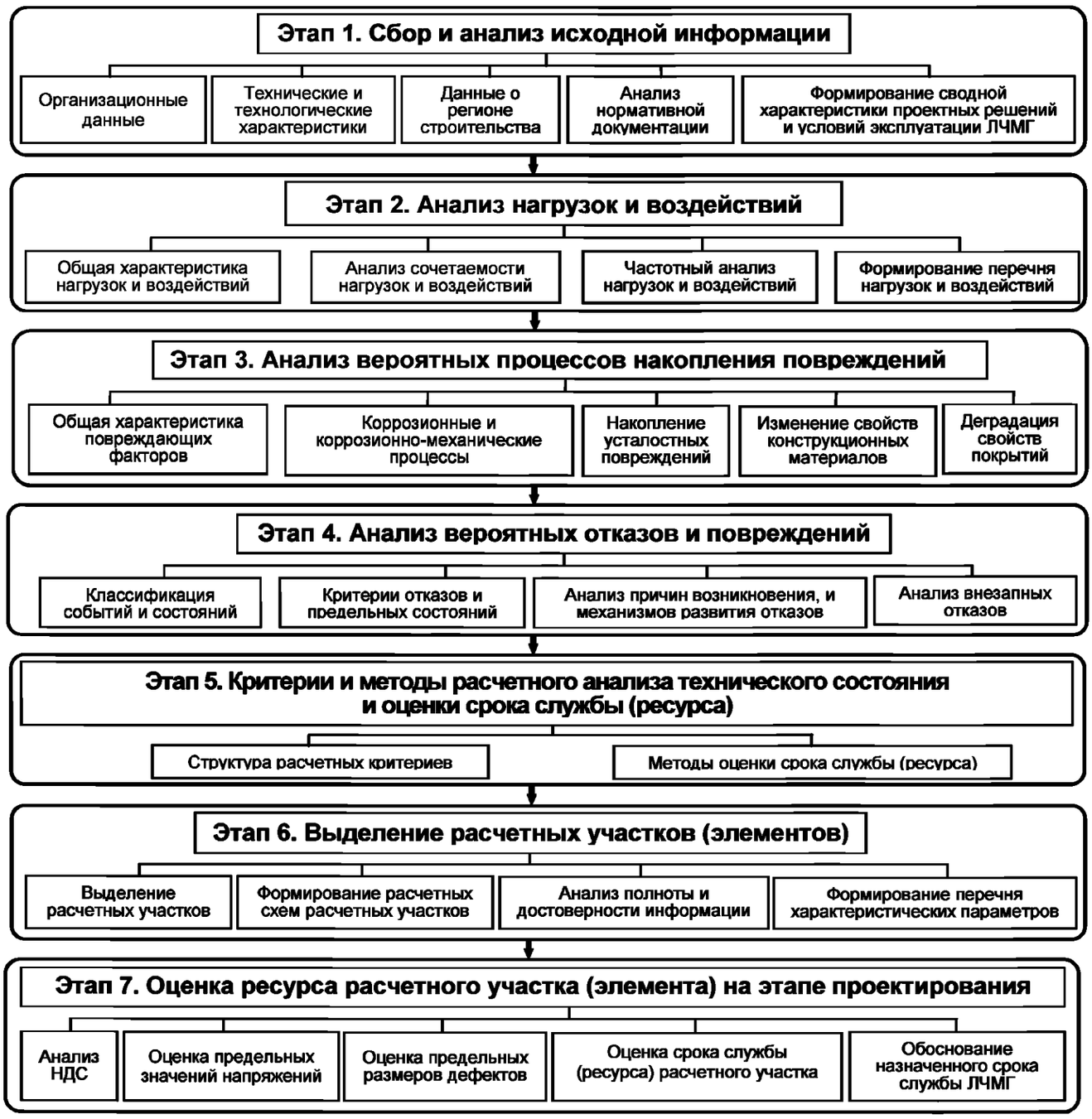

Рисунок А.1 — Схема алгоритма оценки срока службы (ресурса) ЛЧМГ при проектировании

Таблица А.1 — Сводные данные для оценки (срока службы) ресурса ЛЧМГ при проектировании

Характеристика	Значение параметра	Примечание
1 Номер расчетного участка		
2 Тип расчетного участка (линейный, переход через естественное или искусственное препятствие, подводный переход)		
3 Тип прокладки (подземный, наземный, надземный на опорах, подводный)		
4 Координата по трассе начало/конец (по ходу газа)		
5 Протяженность участка, м		
6 Трубы и соединительные детали		
7 Технические условия на трубы и соединительные детали		
8 Поставщик		
9 Марка стали		
10 Физико-механические характеристики трубных сталей в состоянии поставки (следует выбирать в соответствии с необходимым для расчета перечнем)		
10.1 Временное сопротивление, МПа		
10.2 Предел текучести, МПа		
10.3 Относительное равномерное удлинение		
10.4 Относительное удлинение при разрыве (соответствует предельной деформации)		
10.5 Ударная вязкость, Дж		
10.6 Критическое раскрытие в вершине трещины, мм		
10.7 Критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м$^{1/2}$		
10.8 Критическое значение J-интеграла, Дж/см^2		
11 Функциональные зависимости физико-механических характеристик от условий и продолжительности эксплуатации (при наличии)		
12 Диаметр, мм		
13 Толщина стенки, мм		
14 Тип защитного покрытия (нормального типа, усиленного типа)		
15 Назначенный срок службы защитного покрытия, лет		
16 Тип грунта		
17 Удельное электрическое сопротивление грунта в пределах расчетного участка, Ом·м		
18 Ожидаемая скорость коррозии, мм/год		
19 Наличие условий для возникновения и развития КРН, (да/нет)		
19.1 Прогнозируемая продолжительность инкубационной стадии, лет		
19.2 Прогнозируемая скорость развития трещин КРН, мм/год		
20 Наличие переменных нагрузок и воздействий (да/нет)		
20.1 Источник переменных нагрузок		
20.1.1 Изменение внутреннего давления		
20.1.2 Изменение температуры транспортируемого газа		
20.1.3 Колебания трубы в потоке жидкости/воздуха		
20.1.4 Сезонное изменение температуры		
20.1.5 Другие причины		
20.2 Характеристики цикла нагружения		
20.3 Число циклов нагружения, ед./год		
21 Дополнительные данные		

Приложение Б
(рекомендуемое)

Выделение расчетных участков по признаку однородности условий эксплуатации

Б.1 Графическая иллюстрация примера формирования расчетных участков (см. 8.4) при учете двух критериальных характеристических параметров $R_1(x)$ и $R_2(x)$ (далее по тексту приложения — параметров), изменения которых в зависимости от координаты рассматриваемого участка трассы ЛЧМГ приведены на рисунках Б.1 и Б.2 соответственно, приведена на рисунке Б.3.

Б.2 Нерегулярное изменение параметра $R_1(x)$ аппроксимируют ступенчатой функцией, имеющей различные постоянные значения на трех интервалах рассматриваемого участка трассы, а линейно-возрастающее изменение параметра $R_2(x)$ аппроксимируют ступенчатой функцией, имеющей различные постоянные значения на двух интервалах того же участка.

Постоянные значения параметров в пределах каждой части идентифицируют символом R_{ij}, в котором первый индекс обозначает номер параметра, а второй — номер части участка, на котором значение этого параметра принимают постоянным.

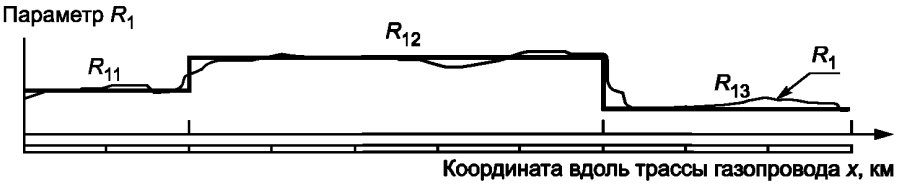

Рисунок Б.1 — Изменение параметра $R_1(x)$ и его аппроксимация ступенчатой функцией

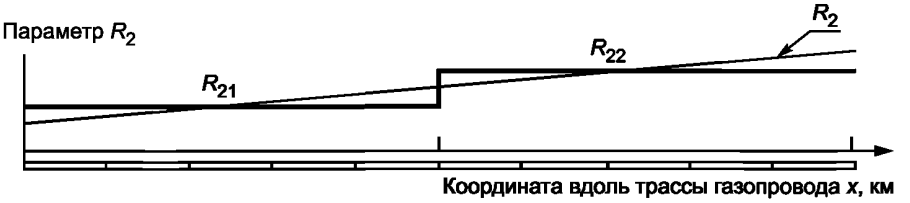

Рисунок Б.2 — Изменение параметра $R_2(x)$ и его аппроксимация ступенчатой функцией

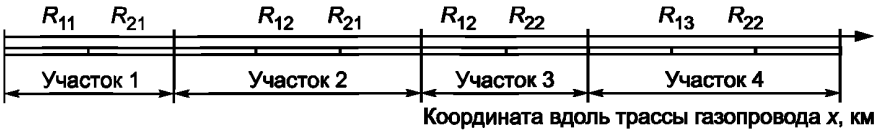

Рисунок Б.3 — Иллюстрация формирования расчетных участков с однородными условиями

Б.3 Границы участков, зафиксированные на общей для всех параметров координатной оси по границам скачкообразного изменения ступенчатых функций, принимают в качестве границ расчетных участков с однородными условиями. В пределах зафиксированных границ значения параметров R_{ij} считают постоянными.

Для наглядности и удобства при проведении расчетов значения параметров R_{ij} в пределах каждого расчетного участка могут быть представлены в табличной форме. В таблице Б.1, соответствующей приведенной на рисунке Б.3 иллюстрации формирования расчетных участков, приведены значения параметров $R_1(x)$ и $R_2(x)$ для рассмотренного в Б.1 и Б.2 случая учета двух параметров.

Таблица Б.1 — Значения параметров в пределах расчетных участков

Расчетный участок	Значения параметров $R_1(x)$ и $R_2(x)$	
1	R_{11}	R_{21}
2	R_{12}	R_{21}
3	R_{12}	R_{22}
4	R_{13}	R_{22}

Приложение В
(рекомендуемое)

Кинетические уравнения роста дефектов

В.1 Уравнения роста коррозионных дефектов

В.1.1 Рост коррозионных дефектов, вызванных сплошной и местной коррозией

В.1.1.1 В общем случае при наличии функциональных зависимостей скорости роста коррозионных дефектов от времени прогнозные оценки достижения этими дефектами своих предельных значений роста могут быть получены путем интегрирования дифференциальных уравнений первого порядка (В.1)

$$\frac{da_{кор}}{dt} = v_a(t), \quad \frac{db_{кор}}{dt} = v_b(t), \tag{В.1}$$

где $a_{кор}$ и $b_{кор}$ — глубина и длина коррозионного дефекта, мм;

t — время, год;

$v_a(t)$ и $v_b(t)$ — скорость коррозии по глубине и длине дефекта, мм/год.

В.1.1.2 В простейшем и наиболее распространенном для практических расчетов подходе к оценке роста размеров коррозионных дефектов используют прогнозные данные о скорости проникновения коррозии v_a вглубь материала конструкции, значения которой принимают постоянными на разных уровнях агрессивности коррозионного воздействия вдоль трассы магистрального газопровода (см. 4.4.4). Скорость проникновения коррозии v_a может быть определена в соответствии с методом, рекомендованным в приложении М.

Примечание — При проведении прогнозной оценки роста размеров коррозионных дефектов минимальное значение скорости их роста по поверхности металла (вдоль элемента конструкции в продольном или поперечном направлении) v_b может быть принято в 20 раз больше, а максимальное в 100 раз больше скорости проникновения коррозии v_a в глубину металла. Уточнение этих значений может быть получено по результатам анализа данных о размерах коррозионных дефектов, зафиксированных при проведении технического диагностирования существующих газопроводов-аналогов, эксплуатируемых в схожих природно-климатических и грунтово-геологических условиях.

В.1.1.3 С учетом принимаемых согласно В.1.1.2 допущений и в соответствии с решением уравнений (В.1) размеры дефектов могут быть вычислены по формулам:

$$a_{кор}(t) = v_a \cdot t, \tag{В.2}$$

$$b_{кор}(t) = v_b \cdot t. \tag{В.3}$$

При известных (или оцененных с помощью расчетов) предельных размерах дефекта $a_{кор}(t)$ и $b_{кор}(t)$, соответствующих выбранному критерию предельного состояния, с помощью формул (В.2) и (В.3) может быть определено значение времени, в течение которого эти предельные размеры будут достигнуты.

В.1.1.4 Пример применения изложенного в В.1.1.2 подхода приведен в приложении Е.

В.1.2 Рост трещин при коррозионном растрескивании при действии механических напряжений.

В.1.2.1 Для получения прогнозных оценок роста трещин КРН, возникающих при совместном действии на элемент конструкции агрессивной окружающей среды и статически приложенных механических или остаточных напряжений, эти трещины, как правило, представляют в виде одиночных трещиноподобных дефектов полуэллиптической формы.

В.1.2.2 Аналитические выражения для оценки роста трещин КРН при статическом и квазистатическом нагружении могут быть получены в виде функциональных зависимостей. Для проведения практических расчетов с помощью таких зависимостей связывают скорости роста da/dt и db/dt (глубины и длины) заменяющих их трещиноподобных дефектов с интенсивностью напряжений K_I для трещин нормального отрыва. Простая форма таких аналитических выражений для скоростей роста трещиноподобного дефекта по аналогии с В.1.1.1 может быть записана в виде следующих дифференциальных уравнений первого порядка

$$\frac{da}{dt} = C_{крн}(K_{I,a} - K_{п,крн})^{m_{крн}}, \tag{В.4}$$

$$\frac{db}{dt} = C_{крн}(K_{I,b} - K_{п,крн})^{m_{крн}}, \tag{В.5}$$

где a и b — соответственно глубина и полудлина трещиноподобного дефекта (при аппроксимации его формы в виде полуэллипса с длинами главных эллиптических осей $2a$ и $2b$), мм;

$K_{I,a}$, $K_{I,b}$ — коэффициенты интенсивности напряжений на концах полуэллипса, определяемые в рамках линейной механики разрушения для модели трещин нормального отрыва;

$C_{крн}$, $m_{крн}$ — полученные экспериментальным путем* коэффициенты (с учетом предположения о равенстве этих констант в выражениях для скоростей роста трещин в глубину и длину);

$K_{п,крн}$ — пороговый коэффициент интенсивности напряжений для трещин КРН, который может быть определен по ГОСТ 9.901.1, а также может быть принят равным пороговому размаху коэффициента интенсивности напряжений ΔK_0, определяемому на основе результатов испытаний изотропных материалов на усталость.

Примечания

1 Согласно ГОСТ 25.506 моделью трещины (нормального) отрыва в механике разрушения считают модель трещины, зарождение и рост которой обусловлено напряжениями, приложенными перпендикулярно поверхности ее раскрытия.

2 Коэффициенты интенсивности напряжений $K_{I,a}$, $K_{I,b}$, $K_{п,крн}$ и ΔK_0 имеют размерность МПа·м$^{1/2}$. Для удобства при расчетах медленно растущих дефектов (например, в долях миллиметра в год) для значений этих коэффициентов часто используют размерность Н/мм$^{3/2}$ (1 МПа·м$^{1/2}$ примерно равен 31,62 Н/мм$^{3/2}$).

3 Для изделий из широкого класса конструкционных сталей, эксплуатируемых в неагрессивных средах до температуры 100 °С, при прогнозных расчетах роста дефектов начальной глубиной не более 1 мм рекомендуется принимать ΔK_0 = 63 Н/мм$^{3/2}$ (2 МПа·м$^{1/2}$).

4 Приведенные в В.2.2.1 уравнения, значения входящих в них параметров (или методы расчета этих параметров) для оценки скорости роста трещин (в том числе трещин КРН) применяются:

- в международном стандарте [7] (экспериментальное определение коэффициентов $m_{крн}$ и $C_{крн}$);
- в международном стандарте [14] (данные о типовых значения коэффициентов m и C для углеродистых сталей);
- в международном стандарте [15] (методика испытаний изотропных материалов на усталость для определения порогового размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK_0);
- в стандарте [9] (методы решения уравнений типа (В.4) и (В.5), методика расчета коэффициентов интенсивности напряжений $K_{I,a}$, $K_{I,b}$ для трещиноподобных дефектов полуэллиптической формы, рекомендации по практическому использованию в расчетах значений коэффициентов m и C и порогового размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK_0 для изделий из широкого класса конструкционных сталей).

В.1.2.3 Чтобы получить значения срока службы конструкции, в течение которого размеры трещины вырастут в интервале от начальных значений a_0 и b_0 до предельных $a_{пр}$ и $b_{пр}$, уравнения к (В.4) и (В.5) должны быть проинтегрированы в пределах этого интервала.

В.1.2.4 В связи с тем, что согласно уравнениям (В.4) и (В.5) трещина КРН не растет при значениях K_I меньших чем $K_{п,крн}$, допустимыми дефектами с коэффициентом запаса $n_{крн}$ можно считать такие дефекты, для которых произведение $n_{крн}\cdot K_I$ меньше чем $K_{п,крн}$.

При необходимости обоснованное расчетно-экспериментальными методами значение коэффициента запаса $n_{крн}$ может быть согласовано между заказчиком и генеральным проектировщиком и указано в проектной документации.

В.1.2.5 Изложенный в В.1.2.1 — В.1.2.4 подход для оценки срока службы расчетных участков ЛЧМГ при наличии трещиноподобных дефектов может быть применен в рамках расширенного подхода к оценке срока службы расчетного участка ЛЧМГ (при необходимости его применения согласно 4.2.7 и в рамках его реализации в соответствии с 4.2.8).

В.2 Рост усталостных трещин

В.2.1 Расчетное прогнозирование роста поверхностных трещин в элементах конструкций объектов ЛЧМГ, подверженных циклическим нагрузкам и воздействиям, проводят с учетом следующих исходных допущений:

- расчеты следует проводить в рамках линейной теории механики разрушения для изотропного материала с трещиной нормального отрыва;
- предполагаемая неизменной в процессе роста форма поверхностной усталостной трещины по аналогии с принятой в В.1.2.2 формой для трещиноподобных дефектов может быть аппроксимирована в виде полуэллипса (в процессе роста может изменяться только отношение *a/b)*.

В.2.2 Простейшая форма кинетических уравнений роста поверхностных усталостных трещин и трещиноподобных дефектов полуэллиптической формы в материале циклически нагружаемой конструкции может быть записана в виде следующих дифференциальных уравнений:

$$\frac{da}{dN} = C_{уст}(\Delta K_{I,a} - \Delta K_0)^{m_{уст}}, \quad (В.6)$$

$$\frac{db}{dN} = C_{уст}(\Delta K_{I,b} - \Delta K_0)^{m_{уст}}, \quad (В.7)$$

---

* При отсутствии экспериментальных данных для углеродистых сталей, используемых для изготовления газопроводных конструкций, рекомендуется принимать типовые значения этих коэффициентов $m_{крн} = m_{уст} = m = 3{,}1$ и $C_{крн} = C_{уст} = C = 1{,}1\cdot 10^{-13}$ (при принятых размерностях интенсивности напряжений в Н/мм$^{3/2}$, а скорости роста трещины в мм/цикл).

где $C_{уст}$, $m_{уст}$ — коэффициенты, определяемые экспериментально при испытаниях на усталость;

$\Delta K_{I,a} = K_{max,a} - K_{min,a}$; $\Delta K_{I,b} = K_{max,b} - K_{min,b}$ — размахи коэффициентов интенсивности напряжений в цикле (блоке) нагружения;

$K_{max,a}$ и $K_{max,b}$ — максимальные в цикле (блоке) нагружения значения коэффициента интенсивности напряжений на концах полуосей *a* и *b* дефекта полуэллиптической формы, определяемые в рамках линейной механики разрушения для трещин нормального отрыва;

ΔK_0 — пороговый размах коэффициента интенсивности напряжений, определяемый в соответствии с В.1.2.2;

N — число циклов нагружения (или число блоков, содержащих циклы с заданной амплитудой).

Для того, чтобы в процессе роста трещиноподобного дефекта учесть критическое значение коэффициента интенсивности напряжений K_{IC}, при котором происходит мгновенное прорастание дефекта до критического, вместо уравнений (В.6) и (В.7) могут быть использованы следующие уравнения

$$\frac{da}{dN} = C_{уст}(\Delta K_{I,a} - \Delta K_0)^{m_{уст}} \left[1 - \left(\frac{K_{max,a}}{K_{IC}}\right)^2\right]^{-1}, \quad (В.8)$$

$$\frac{db}{dN} = C_{уст}(\Delta K_{I,b} - \Delta K_0)^{m_{уст}} \left[1 - \left(\frac{K_{max,b}}{K_{IC}}\right)^2\right]^{-1}, \quad (В.9)$$

где K_{IC} — критический коэффициент интенсивности напряжений (соответствует предельной трещиностойкости материала), значение которого может быть определено в соответствии с И.3 (приложение И).

Расчет усталостной долговечности конструкции с использованием уравнений (В.8) и (В.9) может быть проведен по методике, рекомендуемой в В.2.3.

Примечания

1 Для расчета усталостного ресурса конструкции, измеряемого в числе циклов (или блоков) нагружения до достижения предельных размеров дефектов, может быть использовано численное интегрирование уравнений (В.6) — (В.9) или метод малых приращений размеров, основанный на вычислении размаха коэффициента интенсивности ΔK для каждого приращения и числа циклов (блоков), в течение которых это приращение происходит. При этом расчет проводят в предположении, что отношение приращений размеров $\Delta b/\Delta a$ равно отношению $(\Delta K_b)^{m_{уст}} / (\Delta K_a)^{m_{уст}}$.

2 Приведенные в В.2.2 уравнения, значения входящих в них параметров (или методы расчета этих параметров) для оценки скорости роста усталостных трещин и трещиноподобных дефектов применяются:

- в международном стандарте [15] (методика испытаний изотропных материалов на усталость для определения порогового размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK_0 и коэффициентов $C_{уст}$, $m_{уст}$);
- в стандарте [9] (метод малых приращений для решения уравнений типа (В.6) и (В.7), методика определения коэффициентов интенсивности напряжений, $K_{max,a}$ и $K_{max,b}$ для трещиноподобных дефектов полуэллиптической формы).

В.2.3 Различают два варианта расчета показателей срока службы (ресурса) по критериям роста усталостных и (или) коррозионно-усталостных трещин.

В.2.3.1 При применении первого варианта оценки предполагают наличие в конструкции имеющихся реальных трещиноподобных дефектов (например, технологических или монтажных дефектов, которые не выявлены при контроле из-за их малых размеров). В этом случае полученное значение срока службы (ресурса), как правило, считают достаточно достоверным и практически соответствующим реальной долговечности конструкции.

Примечание — При проведении прогнозных расчетов в качестве начальных размеров подобных дефектов могут быть приняты значения, соответствующие пределам чувствительности средств неразрушающего контроля, используемых для проверки качества материала конструкций.

В.2.3.2 При применении второго варианта расчет показателей срока службы (ресурса) по критериям роста усталостных и (или) коррозионно-усталостных трещин проводят в рамках завершающего этапа последовательной двухэтапной оценки по комплексным критериям усталости.

На первом (начальном) этапе этой оценки по критериям усталостной прочности, приведенным в приложении Г, должна быть определена наработка или календарная продолжительность времени до момента зарождения макроскопического трещиноподобного дефекта, не рассматриваемого в качестве предельного.

Для второго (завершающего) этапа в качестве начальных размеров таких макроскопических дефектов могут быть приняты значения, рекомендуемые в В.2.3.1.

При применении варианта двухэтапной оценки общее прогнозируемое значение срока службы (ресурса) следует определять как сумму значений, определенных на обоих этапах.

Теоретические основы и примеры расчета срока службы (ресурса) по критериям многоцикловой и малоцикловой усталости приведены в приложении Г.

Приложение Г
(рекомендуемое)

Расчет срока службы (ресурса) по критериям усталости

Г.1 В соответствии с 6.1.8 при наличии переменных и циклических нагрузок оценку работоспособности и расчет долговечности объектов ЛЧМГ на выделенных расчетных участках следует проводить с учетом процессов накопления усталостных повреждений в материале конструкций.

Г.2 Основные понятия о характеристиках сопротивления усталости (малоцикловой и многоцикловой), параметры нагрузок, термины, определения и обозначения принимают в соответствии с ГОСТ 23207.

Г.3 Для определения типа накопления усталостных повреждений, которые могут приводить к наступлению предельного состояния конструкций или их конструктивных элементов на расчетных участках ЛЧМГ, следует оценить:

а) максимальные значения циклических напряжений $\sigma_{a,max}$, вызываемых функциональными нагрузками, в том числе:

1) низкочастотным изменением внутреннего давления с учетом собственного веса конструкции, веса перекачиваемого газа и веса присоединенных массивных элементов (арматура, тройники и другие);

2) изменением температуры;

3) вибрациями из-за пульсационного характера работы оборудования;

4) циклически повторяющимися и имеющими, как правило, случайный характер природно-климатическими нагрузками, вызываемыми сейсмическими, ветровыми и гидродинамическими воздействиями;

б) предполагаемое количество циклов нагружения за расчетный срок службы в наиболее опасных по концентрации напряжений элементах конструкций расчетного участка ЛЧМГ.

Примечание — Источники получения данных о циклически изменяющихся нагрузках и воздействиях и рекомендации по способам их учета при проведении оценки срока службы (ресурса) расчетных участков ЛЧМГ приведены в приложениях К и Л.

Г.4 Расчет долговечности по критерию многоцикловой усталости может быть проведен в области больших и области ограниченных значений долговечности.

Г.4.1 Расчет по критерию многоцикловой усталости в области больших значений долговечности проводят только для определения коэффициента запаса по напряжениям. В этом случае максимальные амплитуды напряжения $\sigma_{a,max}$ в цикле или блоке нагружения не превышают предела выносливости σ_{-1} и срок службы конструкций и (или) их элементов практически не ограничен.

Г.4.2 Расчет долговечности по критерию многоцикловой усталости в области ограниченной долговечности при регулярном и нерегулярном (случайном) нагружении проводят с использованием методов, приведенных в ГОСТ 23.207, ГОСТ 25.101, ГОСТ 25.502, ГОСТ 25.504 и ГОСТ 25.507.

В соответствии с данными стандартами могут быть определены основные параметры кривых усталости, а также учтены тип нагружения и факторы, влияющие на усталостную прочность (концентрация напряжений, масштабный эффект, качество обработки элементов конструкции, коррозия), и другие менее значимые факторы (при наличии).

Г.4.2.1 В рамках инженерного подхода расчетное значение долговечности N, измеряемое в числах циклов (или блоков) регулярного нагружения, в соответствии с ГОСТ 25.504 (пункт 4.1) определяют с использованием уравнения кривой усталости. Это уравнение целесообразно записывать в виде степенной зависимости по формуле (Г.1). Наклонная часть кривой для удобства обработки результатов испытаний при построении схематизированных кривых усталости может быть записана в логафмических координатах в виде кусочно-линейной зависимости по формуле (Г.2).

$$N = N_G\left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a}\right)^m \text{ (при } \sigma_a \geq \sigma_{-1},); \; N = \infty \text{ (при } \sigma_a < \sigma_{-1}), \tag{Г.1}$$

$$m = \frac{lg\sigma_a - lg\sigma_{-1}}{lgN_G - lgN} \text{ при } \sigma_a \geq \sigma_{-1}, \tag{Г.2}$$

где N_G — абсцисса точки перелома кривой усталости;

m — показатель степени в уравнении кривой усталости (Г.1) или показатель, определяющий угол наклона кривой усталости в двойных логарифмических координатах (Г.2).

Примечание — Применяемые в формулах (Г.1) — (Г.7) обозначения и размерности параметров кривых усталости соответствуют обозначениям и размерностям, принятым в ГОСТ 25.504.

Типовая схематизированная кривая усталости для применяемых при строительстве газопроводов малоуглеродистых и низколегированных сталей, имеющих предел прочности менее 1200 МПа, изображена на рисунке Г.1 в логарифмических координатах.

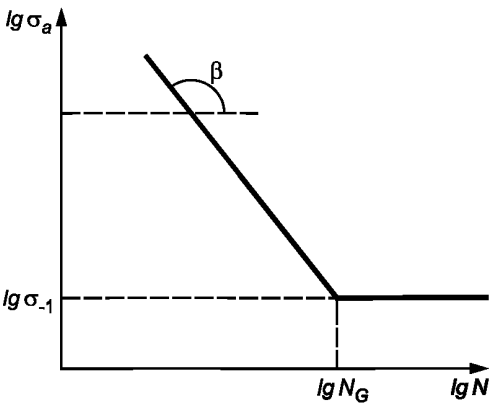

Рисунок Г.1 — Типовая схематизированная кривая усталости для сталей

При отсутствии данных испытаний, с помощью которых строят кривые усталости, для использования в прогнозных расчетах долговечности эти кривые могут быть построены с учетом положений ГОСТ 25.504 по следующим правилам:

- горизонтальный участок схематизированной кривой усталости отсчитывают от точки с абсциссой N_G, значение которой принимают равным $2 \cdot 10^6$ циклов;

- ордината этой точки, соответствующая значению предела выносливости σ_{-1}, при симметричном цикле нагружения (переменным изгибом или растяжением-сжатием) и известном значении предела прочности $\sigma_в$ может быть вычислена по формуле

$$\sigma_{-1} = (0{,}55 - 0{,}0001\sigma_в)\sigma_в; \quad (Г.3)$$

- левый наклонный участок кривой усталости проводят под углом β к горизонтальному участку, вычисляя тангенс этого угла по формуле

$$m = tg\ \beta = 5 + \frac{\sigma_в}{80}. \quad (Г.4)$$

Примечание — Например, для элемента конструкции, изготовленного из трубной стали 17Г1С (предел прочности $\sigma_в$ = 510 МПа, предел текучести $\sigma_т$ = 353 МПа), предел выносливости и угол наклона левой ветви кривой усталости, вычисленные по формулам (Г.3) и (Г.4), принимают значения σ_{-1} = 306,5 МПа и m = *tg* β = 11,4. Расчет по формуле (Г.1) в области ограниченной долговечности ($\sigma_a \geq \sigma_{-1}$) при упругих циклических напряжениях с заданной амплитудой симметричного цикла σ_a = 325 МПа приводит к вычисляемому по формуле (Г.1) значению долговечности $N = N_G(\sigma_{-1}/\sigma_a)^m = 2 \cdot 10^6 (306{,}5/325)^{11{,}4} = 1{,}02 \cdot 10^6$ циклов.

Если в качестве предельного состояния по критерию усталости и в соответствии с распространенной для инженерных расчетов гипотезой линейного суммирования повреждений принять, что накопленное к моменту образования усталостной микротрещины равно единице, то доля усталостного повреждения, приходящаяся на один цикл, составит $1/N = 0{,}98 \cdot 10^{-5}$.

Учет асимметрии циклов и перечисленных в Г.4.2 факторов, влияющих на усталостную прочность, при необходимости может быть предусмотрен в соответствии с методикой, приведенной в ГОСТ 25.504 (раздел 4) или в соответствии с другими расчетными методами построения кривых усталости при ассиметричных циклах нагружения. Например, применительно к сталям при расчете ординат кривых усталости для выбранных значений долговечности со средним напряжением цикла σ_m, предельная амплитуда цикла σ_a может быть вычислена по формуле Хейвуда

$$\sigma_a = \sigma_в(1 - \sigma_m/\sigma_в)[A + \gamma(1 - A)], \quad (Г.5)$$

где параметры γ и *A* вычисляют по формулам (Г.6) и (Г.7):

$$\gamma = \frac{\sigma_m(2 + \sigma_m/\sigma_в)}{3\sigma_в}, \quad (Г.6)$$

$$A = \frac{1 + 0{,}038(\lg N)^4}{1 + 0{,}008(\lg N)^4}. \quad (Г.7)$$

Г.4.2.2 Прогнозный расчет долговечности при нерегулярном нагружении может быть выполнен применительно к конструкциям или их элементам, для которых смена режимов эксплуатации сопровождается изменением амплитуды и частоты нагрузок и воздействий.

В таких случаях нагружение целесообразно задавать в виде блока, состоящего из совокупности определенного количества циклов ν_i, нарабатываемых на уровне i с приведенными к симметричному циклу эквивалентными напряжениями с амплитудами $\sigma_{a,i}$, которые могут быть учтены за время реализации принятого параметра долговечности (например, за год работы).

При случайном характере нагрузок и воздействий в качестве блоков нагружения за определенный период могут быть приняты схематизированные по ГОСТ 25.101 циклограммы нагрузок и воздействий. Методы схематизации переменных нагрузок и воздействий приведены в приложении Л.

В соответствии с гипотезой линейного суммирования повреждений условие возникновения предельного состояния по усталости (т.е. появление усталостной микротрещины) при наработке n_i на каждом уровне нагружения с учетом формулы (Г.1) может быть представлено в виде формулы (Г.8)

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} = \frac{1}{N_G \sigma_{-1}^m} \sum_{i=1}^{k} n_i (\sigma_{a,i})^m = 1. \qquad (Г.8)$$

В инженерных расчетах также применяют формулу (Г.9), позволяющую учитывать суммирование повреждений при нерегулярном нагружении от напряжений, не только превышающих предел выносливости, но и также учитывать повреждающее действие напряжений блока нагружения, уровень которых меньше значения предела выносливости σ_{-1}.

$$\frac{1}{N_G \sigma_{-1}^m} \sum_{i=1}^{r} n_i (\sigma_{a,i})^m = a_p. \qquad (Г.9)$$

В соответствии с формулой (Г.9) общее число учитываемых уровней повреждающих напряжений блока нагружения равно r.

Формулу (Г.9) применяют на основе следующих экспериментально подтвержденных положений:

- при наличии в блоке амплитуд напряжений, превышающих значение предела выносливости σ_{-1}, кроме их повреждающего действия следует также учитывать повреждающее действие напряжений, уровень которых превышает половину значения предела выносливости;

- предельное значение суммы повреждений вместо единицы может быть принято равным величине a_p, зависящей от формы цикла нагружения и вычисляемой по формуле

$$a_p = \frac{\xi \sigma_{a,max} - 0{,}5\sigma_{-1}}{\sigma_{a,max} - 0{,}5\sigma_{-1}}, \text{ где } \xi = \sum_{i=1}^{s} \frac{\sigma_{a,i}}{\sigma_{a,max}} t_i, \qquad (Г.10)$$

где t_i — значение относительной наработки на i-ом уровне амплитуд напряжений, вычисляемое для всех s амплитуд напряжений блока по формуле

$$t_i = \frac{\nu_i}{\sum_{i=1}^{s} \nu_i}. \qquad (Г.11)$$

Расчетное значение долговечности (измеряемой в количестве блоков нагружения $N_{бл}$) с учетом формулы (Г.9) и равенства $n_i = \nu_i N_{бл}$ вычисляют по формуле

$$N_{бл} = \frac{a_p N_G \sigma_{-1}^m}{\sum_{i=1}^{r} \nu_i (\sigma_{a,i})^m}. \qquad (Г.12)$$

Г.5 Расчеты долговечности конструкций или их элементов по обобщенному критерию многоцикловой и малоцикловой усталости с использованием метода условных упругих напряжений проводят при циклическом нагружении с амплитудами напряжений, вызывающими как упругие, так и упруго-пластические деформации.

В состав последовательности действий при проведении указанных расчетов, как правило, включают следующие основные этапы:

- формализация расчетных циклических напряжений;

- учет концентрации напряжений в зонах резкого изменения геометрии элементов конструкции (для газопроводов в тройниках, отводах, переходах с одного диаметра на другой, в сварных соединениях и т.п.);

- учет пластических свойств материала конструкции;

- определение допускаемого числа циклов с целью оценки срока службы (ресурса) конструкции.

Г.5.1 Формализацию расчетных циклических напряжений проводят на основе следующих условий и допущений:

а) для расчета используют амплитуды условных упругих напряжений цикла (с учетом асимметрии);

б) амплитуды условных упругих напряжений принимают равными произведению локальной упругой или упруго-пластической деформации (определенной экспериментально или расчетом) на модуль упругости, учитывая совпадение значений условных и действительных напряжений при деформациях, не превышающих деформаций, соответствующих пределу текучести материала;

в) для определения условных упругих напряжений используют диаграмму статического и циклического упруго-пластического деформирования, а при отсутствии диаграмм циклического деформирования в соответствии с ГОСТ 25.504 (пункт 5.4.3) для расчетов может быть использована условная диаграмма циклического деформирования, получаемая удвоением значений деформаций и напряжений диаграммы статического деформирования.

Примечание — В формулах раздела Г.5 размерности циклических механических напряжений, их амплитуд и физико-механических характеристик материала (предела прочности, предела текучести, предела выносливости и модуля упругости) в соответствии с ГОСТ 25.504 приняты в мегапаскалях (МПа).

Г.5.1.1 Для проектируемого эксплуатационного режима последовательность изменения во времени нагрузок и воздействий формализуют в виде квазистатических кусочно-линейных или циклических зависимостей (разверток) номинальных напряжений от времени, соблюдая следующие условия и последовательный порядок действий:

а) для формализации выбирают те напряжения, значения которых влияют на прогнозную оценку срока службы (ресурса) расчетного участка ЛЧМГ;

б) при фиксировании указанных зависимостей шаг дискретизации по времени выбирают с учетом возможности корректного отслеживания экстремальных (пиковых) значений номинальных напряжений;

в) по компонентам номинальных окружных σ_ψ, продольных σ_z и сдвиговых $\sigma_{\psi z}$ напряжений в выбранных расчетных точках конструкции с наибольшей концентрацией напряжений (т.е. в наиболее опасных точках относительно потери прочности) определяют развертки во времени главных номинальных напряжений σ_i, σ_j и σ_k, причем $\sigma_i < \sigma_j < \sigma_k$;

г) для каждой развертки во времени определяют моменты времени $t_1, t_2, \ldots, t_M$, в которых эти напряжения достигают своих экстремальных значений, принимая во внимание, что в моменты времени t_0 и t_{M+1}, соответствующие началу и концу разверток главных номинальных напряжений, значения этих напряжений равны нулю;

д) для всех указанных моментов времени $t_0, t_1, t_2, \ldots, t_M, t_{M+1}$ значения приведенных номинальных напряжений $\sigma_{ij,n}$; (при $n = 0, 1, 2, \ldots, M+1$), представляющих собой ряд последовательных экстремумов (пиковых значений, ограничивающих размахи в развертке напряжений) с номерами $n = 1, 2, \ldots, M$, вычисляют по формуле

$$\sigma_{ij,n} = \sigma_{i,n} - \sigma_{j,n}\ ; \qquad (Г.13)$$

е) значения приведенных номинальных напряжений $\sigma_{ik,n}$ и $\sigma_{jk,n}$ вычисляют по формулам, аналогичным (Г.13), заменяя соответствующие индексы;

ж) с учетом монотонного изменения (в пределах полуцикла) приведенных номинальных напряжений $\sigma_{ij,n}$ для каждого полуцикла вычисляют их минимальное и максимальное значение по формулам:

$$\sigma_{ij,n}^{\max} = \max_t(\sigma_{i,n} - \sigma_{j,n}), \qquad (Г.14)$$

$$\sigma_{ij,n}^{\min} = \min_t(\sigma_{i,n} - \sigma_{j,n}), \qquad (Г.15)$$

а также размахи каждого из полуциклов этих напряжений по формуле

$$(\sigma_a)_{ij,n} = \frac{1}{2}(\sigma_{ij,n}^{\max} - \sigma_{ij,n}^{\min}) \text{ (при } n = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots,\ M+1); \qquad (Г.16)$$

и) минимальное и максимальное значение приведенных номинальных напряжений $\sigma_{ik,n}$ и $\sigma_{jk,n}$, а также размахи $2(\sigma_a)_{jk,n}$ и $2(\sigma_a)_{ik,n}$ каждого из полуциклов этих напряжений вычисляют по формулам, аналогичным (Г.14) — (Г.16), заменяя соответствующие индексы.

Г.5.1.2 Для проверки на статическую прочность используют максимальное значение из возможных значений размахов, выбираемых из абсолютных (наибольших) максимумов и абсолютных (наименьших) минимумов по всем номерам n полуциклов напряжений $\sigma_{ij,n}$, $\sigma_{ik,n}$ и $\sigma_{jk,n}$.

Условие выбора этого максимального значения (обозначаемого $\sigma_{\text{стат}}$) может быть выражено в формульном виде следующим образом

$$\sigma_{\text{стат}} = \max\{(\max_n\sigma_{ij,n}^{\max} - \min_n\sigma_{ij,n}^{\min});\ (\max_n\sigma_{jk,n}^{\max} - \min_n\sigma_{jk,n}^{\min});\ (\max_n\sigma_{ik,n}^{\max} - \min_n\sigma_{ik,n}^{\min})\}. \qquad (Г.17)$$

Г.5.2 При проведении расчетов долговечности концентрацию напряжений в зонах резкого изменения геометрии элементов конструкции не учитывают в случае, когда локальные упруго-пластические деформации в опасных

точках этих зон определены экспериментально в ходе натурных испытаний при заданных режимах нагружения. В этом случае используют значения этих экспериментально определенных локальных упруго-пластических деформаций, а значения амплитуд приведенных условных упругих напряжений $(\sigma^*_a)_{ij,n}$ получают в соответствии с Г.5.1.

Кроме экспериментального определения локальные упруго-пластические деформации могут быть получены в результате проведения полномасштабного расчетного моделирования НДС конструкции методом конечных элементов.

Примечание — Здесь и далее по тексту параметры, верхний индекс которых обозначен «*», обозначают использование в расчетах:

- условных упругих напряжений (см. Г.5.1);
- приведенных условных упругих напряжений, получаемых с учетом приведенных номинальных напряжений, вычисляемых по формулам (Г.13) — (Г.16);
- приведенных локальных условных упругих напряжений в зонах концентрации, вычисляемых по формуле (Г.23).

Г.5.2.1 Если экспериментальные или расчетные данные об упруго-пластических деформациях отсутствуют, то расчет долговечности проводят с учетом коэффициента концентрации приведенных условных упругих напряжений K^*_σ, тождественно равного коэффициенту концентрации приведенных деформаций K^*_ε, который функционально зависит от приведенного теоретического коэффициента концентрации напряжений α^*_σ.

При локальных напряжениях и деформациях, находящихся в пределах упругости, значение K^*_σ принимают равным значению α^*_σ.

Приведенный теоретический коэффициент концентрации напряжений α^*_σ определяют для выбранных зон опасной концентрации с учетом теоретического коэффициента концентрации α_σ, используемого для вычисления локальных упругих напряжений по известным значениям номинальных упругих окружных σ_ψ, продольных σ_z и сдвиговых $\sigma_{\psi z}$ напряжений, полученных в результате расчета НДС конструкции.

Примечание — Значения теоретического коэффициента концентрации α_σ для различных конструкционных и иных концентраторов могут быть определены по ГОСТ 25.504, другим нормативным документам или техническим справочникам по коэффициентам концентрации.

По результатам вычисления локальных упругих напряжений $\sigma_{\psi,l}$, $\sigma_{z,l}$, $\sigma_{\psi z,l}$ для каждой реализации по времени с пересчетом их в локальные главные упругие напряжения (см.перечисление в) Г.5.1.1) и проведения формализации по формулам (Г.13) — (Г.16) определяют значения амплитуд приведенных локальных условных упругих напряжений $(\sigma^*_{a,l})_{ij,n}$, которые используют для вычисления приведенного теоретического коэффициента концентрации напряжений $(\alpha^*_{\sigma,l})_{ij,n}$ по формуле

$$(\alpha^*_{\sigma,l})_{ij,n} = \frac{(\sigma^*_{a,l})_{ij,n}}{(\sigma^*_a)_{ij,n}}, \qquad (Г.18)$$

где $(\sigma^*_{a,l})_{ij,n}$ — амплитуда приведенного локального условного упругого напряжения $(\sigma^*_{a,l})_{ij}$ для n-го полуцикла;

$(\sigma^*_a)_{ij,n}$ — амплитуда приведенного номинального напряжения $(\sigma^*_a)_{ij}$ для n-го полуцикла.

Значения приведенных теоретических коэффициентов концентрации напряжений $(\alpha^*_{\sigma,l})_{jk,n}$ и $(\alpha^*_{\sigma,l})_{ik,n}$ вычисляют по формулам, аналогичным (Г.18), заменяя соответствующие индексы.

Пример развертки приведенного локального условного упругого напряжения $(\sigma^*_{a,l})_{13}$ для девяти полуциклов (n = 0, 1, 2, ...8) проиллюстрирован на рисунке Г.2, на котором обозначены максимумы и минимумы первых четырех полуциклов (n = 0, 1, 2, 3), а также положительное и отрицательное значение напряжений, соответствующих пределу текучести материала $\sigma_т$.

Для расчета долговечности при наличии концентрации напряжений в элементах конструкций проводят поцикловую обработку разверток $(\sigma^*_a)_{ij,n}$ и $(\sigma^*_{a,l})_{ij,n}$ с учетом уровня локального нагружения в зонах концентрации.

Г.5.2.2 Если уровень локального нагружения в зонах концентрации приводит к образованию в этих зонах упруго-пластических деформаций вследствие превышения локальными напряжениями предела текучести $\sigma_т$ в каком-либо полуцикле (см. рисунок Г.1), то значения напряжений и деформаций необходимо пересчитывать с учетом пластических свойств материала.

При пересчете, учитывающем пластические свойства материала, для нулевого полуцикла используют диаграмму статического деформирования, построенную в соответствии с Г.5.3.1, а для последующих полуциклов — диаграмму циклического деформирования, построенную в соответствии с Г.5.3.2.

Значение коэффициента концентрации приведенных условных упругих напряжений K^*_σ для зон упруго-пластических деформаций следует пересчитывать по формуле

$$K^*_\sigma = K^*_\varepsilon = \frac{(\alpha^*_\sigma)^2}{K_\sigma}, \qquad (Г.19)$$

где K_σ — коэффициент концентрации приведенных упруго-пластических напряжений, которые соответствуют упруго-пластическим деформациям.

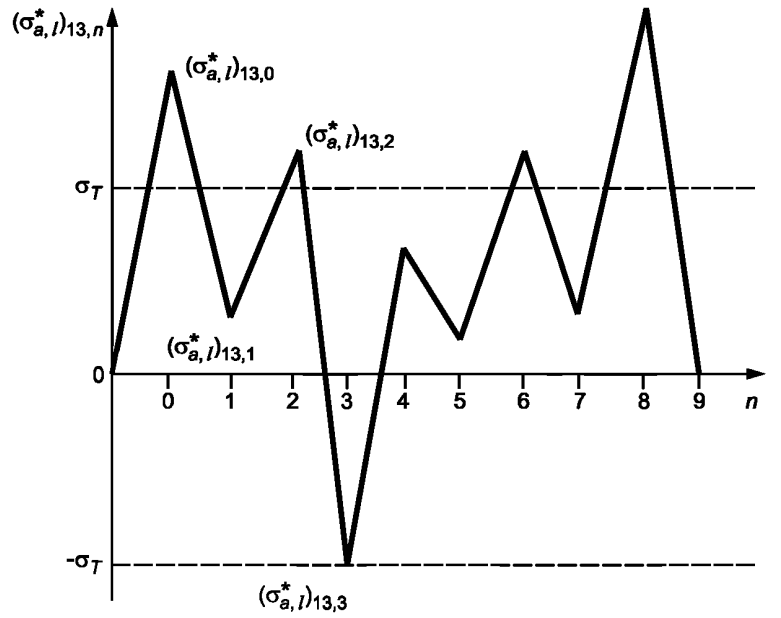

Рисунок Г.2 — Пример развертки значений приведенного локального условного упругого напряжения

Для произвольного вида диаграммы деформирования коэффициент концентрации приведенных упруго-пластических напряжений K_σ определяют из решения нелинейного уравнения, выражаемого функциональной зависимостью в виде формулы

$$K_\sigma \sigma_н = f\left[\frac{\sigma_н (\alpha^*_\sigma)^2}{K_\sigma E}\right], \qquad (Г.20)$$

где выражение $f[\cdot]$ — функция, аппроксимирующая диаграмму статического или циклического деформирования;

$\sigma_н$ — номинальные напряжения (статические или циклические);

E — модуль упругости материала.

При циклическом нагружении в формулах (Г19) и (Г.20) используют применяемые в формуле (Г.18) амплитудные значения приведенного коэффициента концентрации и номинальных напряжений.

Если для расчета значений амплитуды цикла локальных условных упругих напряжений предполагается использовать упруго-пластическую модель материала без упрочнения, то расчет коэффициента концентрации приведенных упруго-пластических напряжений K_σ может быть выполнен по формуле

$$K_\sigma = \frac{\sigma_т}{(\sigma^*_a)_{ij}}, \qquad (Г.21)$$

где $\sigma_т$ — предел текучести с установленным допуском на пластическую деформацию 0,02 %, который может быть определен экспериментально в соответствии с И.3 (приложение И) или расчетом в соответствии с Г.5.3.1;

$(\sigma^*_a)_{ij}$ — амплитуда приведенного условного номинального напряжения.

Если для расчета значений амплитуды цикла локальных условных упругих напряжений предполагается использовать степенной закон упрочнения, то расчет коэффициента концентрации приведенных условных упругих напряжений K^*_σ вместо формулы (Г.19) может быть выполнен по формуле

$$K^*_\sigma = \left[(\alpha^*_\sigma)^2 (\sigma^*_{пр})^{(1-m)}_{ij}\right]^{\frac{1}{m+1}}, \qquad (Г.22)$$

где m — показатель упрочнения, определяемый для диаграммы статического деформирования в соответствии с Г.5.3.1, а для диаграммы циклического деформирования в соответствии с Г.5.3.2;

$(\sigma^*_{пр})_{ij}$ — приведенное условное номинальное напряжение, принимающее значение $\frac{(\sigma^*_a)_{ij,0}}{\sigma_т}$ (при $n = 0$ и использовании диаграммы статического деформирования) и значение $\frac{(\sigma^*_a)_{ij,n}}{S_т}$ (при $n = 1, 2, \ldots, M$ и использовании диаграммы циклического деформирования);

$S_т$ — предел текучести материала конструкции при циклическом нагружении, определяемый в соответствии с Г.5.3.2;

Для напряжений с другим сочетанием индексов i, j и $к$ значения амплитуды приведенного условного номинального напряжения вычисляют, заменяя соответствующие индексы.

Учитывая полученные по формулам (Г.19) или (Г.22) значения коэффициента концентрации приведенных условных упругих напряжений K^*_σ, амплитудные значения приведенных локальных условных упругих напряжений в зонах концентрации могут быть вычислены по формуле

$$(\sigma^*_{a,l})_{ij,n} = K^*_\sigma(\sigma^*_a)_{ij} \text{ (при } n = 1, 2, \ldots, M). \quad (Г.23)$$

Амплитудные значения приведенных локальных условных упругих напряжений $(\sigma^*_{a,l})_{jk,n}$ и $(\sigma^*_{a,l})_{ik,n}$ вычисляют по формулам, аналогичным формуле (Г.23), заменяя соответствующие индексы.

Г.5.2.3 Асимметрию цикла, определяемую по ГОСТ 23207 через коэффициент асимметрии цикла, при проведении расчетов долговечности с учетом положений Г.5.2.1 и Г.5.2.2 учитывают на основе разверток максимальных $(\sigma^*_{max,l})_{ik,n}$ и амплитудных $(\sigma^*_{a,l})_{ik,n}$ значений приведенных локальных условных упругих напряжений.

Максимальные значения $(\sigma^*_{max,l})_{ik,n}$ определяют с использованием диаграммы статического деформирования (для нулевого полуцикла) и диаграммы циклического деформирования (для последующих полуциклов).

Амплитудные значения $(\sigma^*_{a,l})_{ik,n}$ определяют с использованием диаграммы циклического деформирования с учетом принятой последовательности режимов нагружения.

Коэффициент асимметрии цикла r^* вычисляют при различных максимальных $(\sigma^*_{max,l})_{ik,n}$ и амплитудных $(\sigma^*_{a,l})_{ik,n}$ значениях по отношению к значению условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, значения которого могут быть получены согласно И.2 и И.3 (приложение И).

Если и максимальные $(\sigma^*_{max,l})_{ik,n}$, и амплитудные $(\sigma^*_{a,l})_{ik,n}$ значения приведенных локальных условных упругих напряжений меньше значения условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, то значения соответствующего этим напряжениям коэффициента асимметрии цикла r^* вычисляют по формуле

$$r^* = \frac{(\sigma^*_{max,l})_{ik,n} - 2(\sigma^*_{a,l})_{ik,n}}{(\sigma^*_{max,l})_{ik,n}}. \quad (Г.24)$$

Если значение r^*, вычисленное по формуле (Г.24), меньше минус 1, то в расчете принимают его значение, равное минус 1.

Если и максимальные значения $(\sigma^*_{max,l})_{ik,n}$ больше $\sigma_{0,2}$, а амплитудные значения $(\sigma^*_{a,l})_{ik,n}$ меньше значения $\sigma_{0,2}$, то значения r^* вычисляют по формуле (Г.24), заменяя в ней значения $(\sigma^*_{max,l})_{ik,n}$ на значения $\sigma^{max}_{ij,n}$, вычисленные по формуле (Г.14). Допускается также расчет r^* по формуле

$$r^* = \frac{\sigma_{0,2} - 2(\sigma^*_{a,l})_{ik,n}}{\sigma_{0,2}}. \quad (Г.25)$$

Если амплитудные значения $(\sigma^*_{a,l})_{ik,n}$ больше значения $\sigma_{0,2}$, то значение r^* принимают равным минус 1.

Г.5.3 Используемые в Г.5.2.2 для проведения расчетов диаграммы статического и циклического деформирования могут быть построены по данным испытаний, проводимых согласно положениям ГОСТ 1497 и ГОСТ 25.502 соответственно.

Диаграммы циклического деформирования могут быть интерпретированы в форме обобщенной диаграммы циклического деформирования по ГОСТ 25.504 (пункт 5.4.2).

Г.5.3.1 При отсутствии экспериментальных данных диаграмма статического деформирования в координатах «σ-e», соответствующим статическим напряжениям и деформациям, может быть построена с помощью расчета по формулам:

$$\sigma = eE \text{ (при } e \le \sigma_т / E), \quad (Г.26)$$

$$\sigma = \sigma_т(e/e_т)^{m_0} \text{ (при } e > \sigma_т / E), \quad (Г.27)$$

где e — деформация при статическом нагружении;

$\sigma_т$ — предел текучести с установленным допуском на пластическую деформацию 0,02 %;

$e_т$ — деформация, соответствующая пределу текучести ($e_т = \sigma_т / E$);

m_0 — показатель упрочнения при статическом нагружении;

E — модуль упругости материала.

Требуемые для построения диаграммы по формулам (Г.26) и (Г.27) параметры $\sigma_т$ и m_0 могут быть вычислены по формулам (Г.28) и (Г.29) с использованием значений минимально допустимых нормативных значений характеристик трубных сталей (предела прочности $\sigma_в$, условного предела текучести $\sigma_{0,2}$), которые определяют согласно И.2 и И.3 (приложение И), а также в соответствии с другими нормативными и (или) техническими документами, используемыми при заказе труб и соединительных деталей трубопроводов для строительства объектов ЛЧМГ.

$$\sigma_т = \left[\sigma_{0,2}(E \cdot 0,2 \cdot 10^{-2} + \sigma_{0,2})^{-m_0}\right]^{1/(1-m_0)}, \quad (Г.28)$$

$$m_0 = \frac{0,75 \cdot lg\frac{S_k}{\sigma_{0,2}}}{lg\left[ln\frac{100}{100-\psi_f}\left(\frac{\sigma_{0,2}}{E} + 0,2 \cdot 10^{-2}\right)^{-1}\right]}, \quad (Г.29)$$

где ψ_f — относительное сужение площади поперечного сечения образца при разрушении в случае статического нагружения, %;

S_k — вычисляемое по формуле (Г.30) истинное сопротивление разрушению, МПа,

$$S_k = \sigma_в\left(1 + 1,4\frac{\psi_f}{100}\right). \quad (Г.30)$$

Значение пластической деформации e_f, соответствующее значению ψ_f, вычисляют по формуле

$$e_f = ln\left(\frac{100}{100-\psi_f}\right). \quad (Г.31)$$

Примечание — Значения относительного сужения площади поперечного сечения ψ_f могут быть определены на основании результатов испытаний по ГОСТ 1497, на основании данных спецификаций на материалы и изделия, входящих в состав проектной документации по ГОСТ 21.110 (пункт 4.7), а также посредством использования информации, имеющейся в нормативных документах, справочной технической литературе и электронных базах данных по свойствам материалов.

Например, при отсутствии данных испытаний для применяемых в строительстве газопроводов труб и соединительных деталей из низколегируемой и малоуглеродистой стали значение ψ_f, используемое в расчетах по формулам (Г.29) — (Г.31), может быть принято в диапазоне значений от 60 % до 70 % (для сталей типа 09Г2С) и от 35 % до 45 % (для сталей типа 17Г1С).

Г.5.3.2 Диаграмма циклического деформирования при отсутствии экспериментальных данных может быть построена в соответствующих циклическим напряжениям и деформациям координатах «S-ε» расчетным методом по формулам:

$$S = \varepsilon E \text{ (при } \varepsilon \le S_т / E), \quad (Г.32)$$

$$S = S_т\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_т}\right)^{m_k} \text{ (при } \varepsilon > S_т / E), \quad (Г.33)$$

где ε — деформация при циклическом нагружении;

$S_т$ — предел текучести по параметру циклов при циклическом нагружении с установленным допуском на пластическую деформацию 0,04 % (может быть определен экспериментально по ГОСТ 25.504 или принят в соответствии с Г.5.3.3);

$\varepsilon_т$ — деформация, соответствующая циклическому пределу текучести;

m_k — показатель упрочнения при циклическом нагружении.

Г.5.3.3 В соответствии с Г.5.1 (перечисление в) для расчетов может быть использована условная диаграмма циклического деформирования, получаемая удвоением значений деформаций и напряжений диаграммы статического деформирования. В этом случае значение $S_т$ принимают численно равным удвоенному значению $\sigma_т$, а значение $\varepsilon_т$ — удвоенному значению $e_т$.

Входящий в формулу (Г.33) показатель упрочнения m_k вычисляют по формуле

$$m_k = \frac{2m_0}{m_0 + A}, \quad (Г.34)$$

где A — параметр условной диаграммы циклического деформирования, вычисляемый по формуле

$$A = 0,16 \cdot \left(1 + \frac{\sigma_в}{\sigma_в - \sigma_{0,2}}\right). \quad (Г.35)$$

Примечание — При $\sigma_{0,2} / \sigma_в \le 0,8$ допускается принимать $m_k = m_0$.

Графическая иллюстрация построения экспериментальной диаграммы статического деформирования приведена на рисунке Г.3, а графическая иллюстрация построения расчетных диаграмм статического и циклического деформирования в соответствии с Г.5.3.1 и Г.5.3.3 приведена на рисунке Г.4.

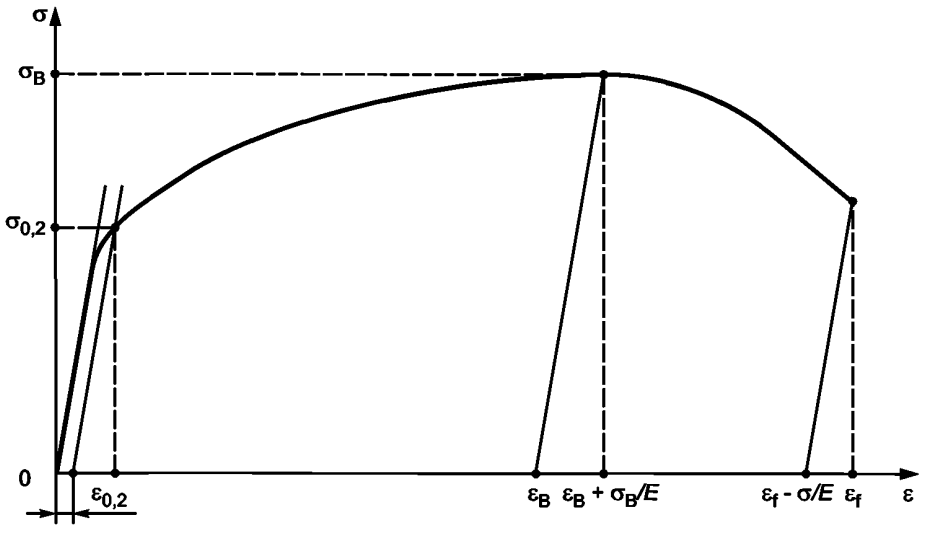

Рисунок Г.3 — Графическая иллюстрация построения экспериментальной диаграммы статического деформирования

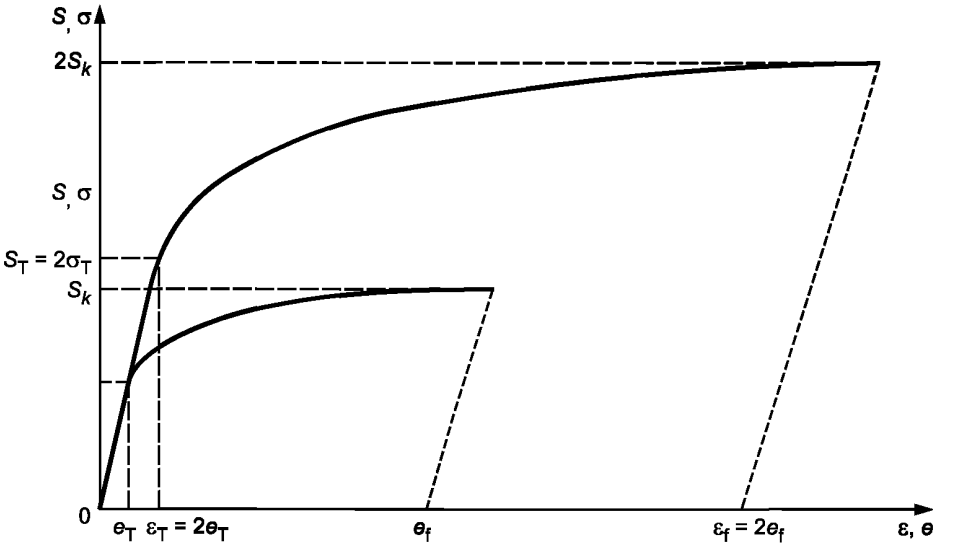

Рисунок Г.4 — Графическая иллюстрация построения расчетных диаграмм статического и циклического деформирования

Пример построения расчетной диаграммы статического и циклического деформирования для стали 09Г2С приведен в Г.5.3.4.

Г.5.3.4 В соответствии с Г.5.3.1 — Г.5.3.3 диаграммы статического и циклического деформирования могут быть построены на основе пересчета по известным для трубных сталей прочностным характеристикам.

При построении диаграммы статического деформирования для стали 09Г2С в качестве исходных данных используют следующие значения ее прочностных характеристик:

- модуль упругости E = 200000 МПа;
- условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ = 345 МПа;
- предел прочности $\sigma_в$ = 505 МПа;
- сужение образца в шейке при разрушении ψ_f = 69,6 %.

Диаграмму статического деформирования строят по формулам (Г.28) — (Г.31), подставляя в них перечисленные данные и получая в результате значения требуемых для построения параметров: $\sigma_т$ = 305 МПа; m_0 = 0,138; S_k = 997 МПа; e_f = 1,19; $e_т$ = 0,00152.

Подставляя эти значения в формулы (Г.26) — (Г.28), получают требуемую диаграмму, результат построения которой приведен на рисунке Г.5.

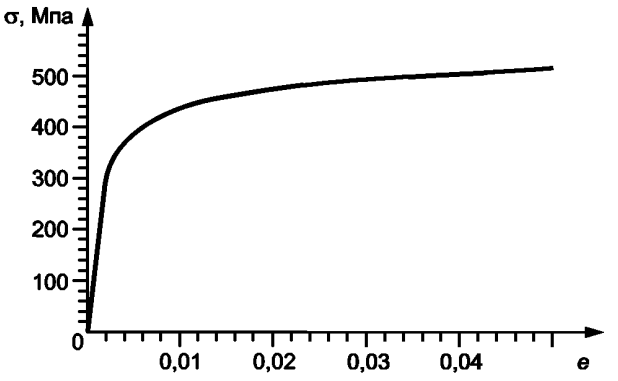

Рисунок Г.5 — Диаграмма статического деформирования для стали 09Г2С

Согласно Г.5.3.3 при построении диаграммы циклического деформирования для стали 09Г2С используют принцип удвоения параметров диаграммы статического деформирования ($S_т = 2\sigma_т$ = 610 МПа; $\varepsilon_т = 2e_т$ = 0,00304) с учетом вычисленных по формулам (Г.34) и (Г.35) параметров m_k = 0,3437 и A = 0,665.

Подставляя эти значения в формулы (Г.32) — (Г.33), получают требуемую диаграмму, результат построения которой приведен на рисунке Г.6.

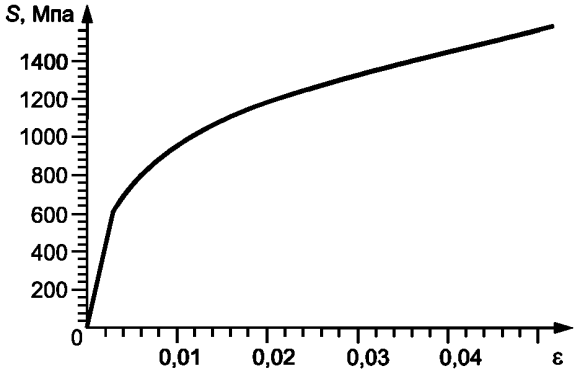

Рисунок Г.6 — Диаграмма циклического деформирования для стали 09Г2С

Г.5.4 Для оценки срока службы (ресурса) конструкций ЛЧМГ на стадии проектирования целесообразно проводить определение допускаемого числа циклов [N] по задаваемым допускаемым амплитудам приведенных условно упругих напряжений [σ^*_a], соответствующих циклическим нагрузкам и воздействиям, предполагаемых проектом. При заданных амплитудах [σ^*_a] эксплуатационное число циклов N не должно превышать допускаемое число циклов [N].

Примечание — Здесь и далее по тексту данного приложения для упрощения записи в обозначениях амплитуд приведенных условных упругих напряжений σ^*_a опущены нижние индексы *i, j, k, l*.

Г.5.4.1 Определение допускаемого числа циклов может быть осуществлено одним из следующих способов:

- по расчетным кривым усталости, построенным на основании данных испытаний по ГОСТ 25.502;
- с помощью кривой усталости, которая может быть построена по приближенным зависимостям в соответствии с ГОСТ 25.504 (пункт 5.6.2) или ГОСТ 25859 (для конструкций, соответствующих области применения стандарта);
- в соответствии с Г.5.4.2 посредством аналитического представления критерия усталостного разрушения, которое связывает допускаемые амплитуды приведенных условных упругих напряжений с допускаемым числом циклов и охватывает область значений упругой и пластической составляющих разрушающих деформаций.

Г.5.4.2 В качестве аналитического представления критерия усталостного разрушения при заданных коэффициентах запаса прочности по долговечности n_N и по напряжениям n_σ могут быть использованы зависимости, выраженные по формулам (Г.36) и (Г.37), применяемые в отраслях энергетики и машиностроения для расчетов в диапазоне числа циклов нагружения от единицы до 10^{12}. С помощью этих зависимостей вычисляют допускаемые числа циклов [N] при заданных допускаемых амплитудах условных упругих напряжений [σ_a^*].

$$[\sigma_a^*] = \frac{1{,}15 \cdot E \cdot lg\frac{100}{100-\psi}}{(4n_N[N])^{m_p}} + \frac{\sigma_в(1+0{,}014\cdot\psi)}{(4n_N[N])^{m_e}+\frac{1+r}{1-r}}, \quad (Г.36)$$

$$[\sigma_a^*] = \frac{1{,}15 \cdot E \cdot lg\frac{100}{100-\psi}}{n_\sigma(4[N])^{m_p}} + \frac{\sigma_в(1+0{,}014\cdot\psi)}{n_\sigma\left[(4[N])^{m_e}+\frac{1+r}{1-r}\right]}, \quad (Г.37)$$

где ψ — значение относительного сужения, определяемое согласно Г.5.4.2.1 в зависимости от значения относительного сужения ψ_f площади поперечного сечения образца при разрушении в случае статического нагружения (см. Г.5.3.1);

m_p — показатель степени, учитываемый в выражении для компоненты амплитуд приведенных условных упругих напряжений, соответствующей пластической деформации (первое слагаемое в правых частях формул);

m_e — показатель степени, учитываемый в выражении для компоненты амплитуд приведенных условных упругих напряжений, соответствующих упругой деформации (второе слагаемое в правых частях формул);

r — коэффициент асимметрии цикла.

Остальные, используемые в формулах (Г.36) и (Г.37), обозначения приведены в предыдущих положениях настоящего приложения.

Примечание — Для конструкций ЛЧМГ значение коэффициента запаса прочности по напряжениям n_σ рекомендуется принимать равным 2, а значение коэффициента запаса прочности по долговечности n_N равным 10.

При значениях ψ_f меньших 30 % значение относительного сужения ψ, используемое для расчетов по формулам (Г.36) и (Г.37), принимают равным значению ψ_f. Если ψ_f больше 30 %, то значение ψ корректируют по формуле

$$\psi = 15 + 0{,}5 \cdot \psi_f. \quad (Г.38)$$

Примечание — Такая коррекция значения относительного сужения, выполняемая при отсутствии экспериментальной проверки его значения, дает нижнюю оценку по долговечности и несколько повышает консерватизм используемой расчетной модели.

Значение коэффициента асимметрии цикла r вычисляют по формуле (Г.25), если амплитудные значения σ_a^* меньше значения $\sigma_{0,2}$ и максимальные значения σ_{max}^* меньше или равны $\sigma_{0,2}$.

При σ_a^* большем или равном $\sigma_{0,2}$ расчетное значение r принимают равным минус 1.

Для элементов конструкций ЛЧМГ, изготовленных из малоуглеродистых и низколегированных сталей и нагружаемых циклически изменяющимися внутренним давлением, осевыми нагрузками и изгибающими моментами, расчеты по формулам (Г.36) и (Г.37) допускается проводить при значении r, равном нулю.

При значениях предела прочности $\sigma_в$ от 300 до 699 МПа значение показателя степени m_p принимают равным 0,5. При значениях $\sigma_в$ от 700 до 1200 МПа его значение вычисляют по формуле

$$m_p = 0{,}5 + 0{,}0002 \cdot (\sigma_в - 700). \quad (Г.39)$$

Значение показателя степени m_e вычисляют по формуле

$$m_e = -0{,}132 \cdot lg[2{,}5(1 + 0{,}014 \cdot \psi)]. \quad (Г.40)$$

Решение каждого из уравнений (Г.36) и (Г.37) проводят:

а) численными методами (например, методом последовательных приближений), принимая в качестве расчетного значения допускаемого числа циклов [N] наименьшее их значение из двух полученных решений;

б) графическим методом, с помощью построения по этим формулам расчетных кривых допускаемых напряжений [σ_a^*] в зависимости от допускаемого числа циклов [N].

Примечание — Построение расчетных кривых допускаемых напряжений производят последовательно, задавая в выбранном диапазоне значения допускаемых чисел циклов [N], которые при подстановке в формулы (Г.36) и (Г.37) дают соответствующие значения допускаемых напряжений [σ_a^*].

Пример расчетных кривых допускаемых чисел циклов для конструкций ЛЧМГ, изготовленных из стали 17Г1С с характеристиками E = 200000 МПа, $\sigma_в$ = 510 МПа, ψ_f = 40 %, значениями коэффициентов асимметрии r = 0 и рекомендуемыми в Г.5.4.2 значениями коэффициентов запаса n_N и n_σ приведен на рисунке Г.7. Для наглядности и удобства использования кривые построены в двойных логарифмических координатах: кривая 1 соответствует уравнению (Г.36), а кривая 2 соответствует уравнению (Г.37).

До точки пересечения кривых 1 и 2 при определении допускаемого числа циклов по значению допускаемого напряжения используют кривую 1, а после точки пересечения — кривую 2, что соответствует положению о принятии наименьшего значения из двух полученных решений (см. перечисление а) Г.5.4.2).

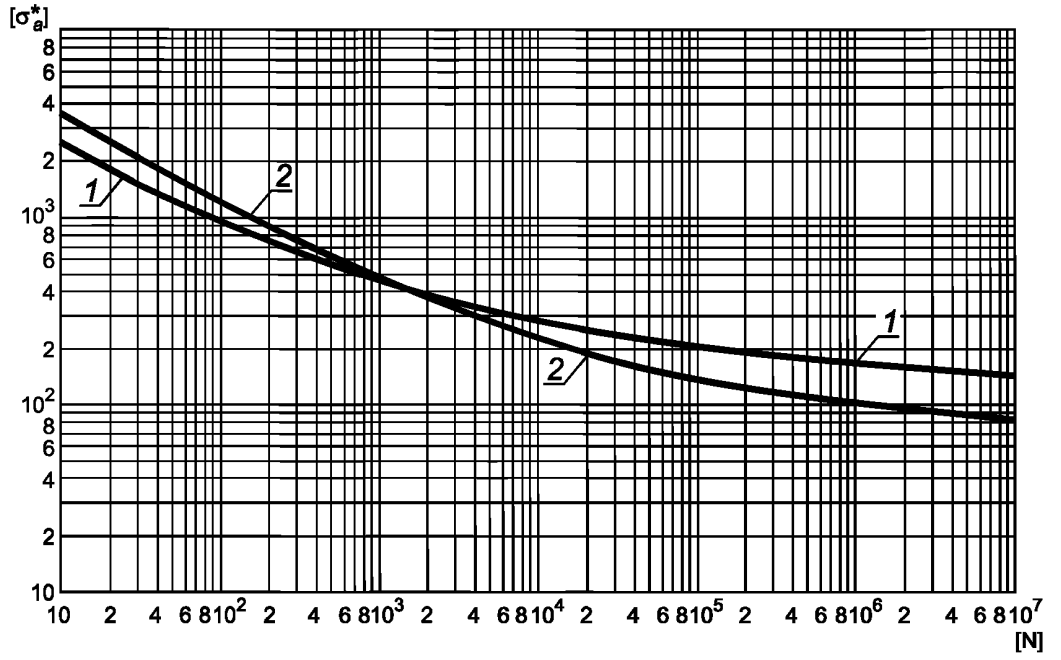

Рисунок Г.7 — Расчетные кривые допускаемых чисел циклов для конструкций из стали 17Г1С при значениях коэффициентов запаса n_N = 10 и n_σ = 2

В таблице Г.1 в качестве примера приведены определенные по изображенным на рисунке Г.7 кривым значения четырех допускаемых напряжений, соответствующие допускаемым числам циклов, имеющих значения 10^3, 10^4, 10^5 и 10^6, а также точные значения этих напряжений, вычисленные по формулам (Г.36) и (Г.37) методом последовательных приближений.

Таблица Г.1 — Результаты определения допускаемых напряжений, соответствующих допускаемым числам циклов

Допускаемое число циклов	Приближенные значения допускаемых напряжений, определенные графически по кривым, изображенным на рисунке Г.7, МПа	Точные значения допускаемых напряжений, вычисленных по формулам (Г.36) и (Г.37), МПа
10^3	460	451
10^4	220	225
10^5	130	138
10^6	100	102

Г.5.4.3 Если в течение некоторого отрезка времени $T_{бл}$ нагрузка на конструкцию ЛЧМГ может быть представлена в виде типовой последовательности циклического нагружения, представляющей собой блок, в который входит M типов циклов с одинаковой в пределах каждого типа амплитудой, то в соответствии с правилом линейного

суммирования повреждений мера усталостных повреждений φ, накопленных за время действия блока $T_{бл}$, может быть вычислена по формуле

$$\varphi = \sum_{i=1}^{M} \frac{N_i}{[N]_i}, \qquad (Г.41)$$

где N_i — число входящих в блок циклов i-го типа с допускаемым значением амплитуды $[\sigma^*_a]_i$;

$[N]_i$ — допускаемое число циклов, соответствующее значению $[\sigma^*_a]_i$.

Для условно взятого блока нагружения, состоящего, например, из 10 циклов каждого из четырех типов с допускаемыми амплитудами напряжений, приведенными в таблице Г.1, вычисление по формуле (Г.41) приводит к следующему результату

$$\varphi = \sum_{i=1}^{4} \frac{N_i}{[N]_i} = \frac{10}{1000} + \frac{10}{10000} + \frac{10}{100000} + \frac{10}{1000000} = 0{,}011111. \qquad (Г.42)$$

Примечание — Как правило, в соответствии с критерием усталостного повреждения принято считать, что при φ = 1 в подверженной циклическому нагружению конструкции или ее элементе возникают усталостные микротрещины, которые могут быть обнаружены визуально или с помощью средств неразрушающего контроля.

Ресурс конструкции, измеряемый в числах циклов (или блоков, состоящих из циклов с разной амплитудой), считают исчерпанным по критерию усталостного повреждения при достижении меры φ значения, равного единице. Если предполагаемая за время эксплуатации календарная продолжительность циклов (или блока циклов) нагружения известна (или задана) и измеряется в годах, то значение прогнозируемого срока службы конструкции $T_{пс}$ по критерию усталостного повреждения обратно пропорционально значению меры повреждения φ.

Примечание — Для приведенного примера $T_{пс} = 1/\varphi = 1/0{,}011111 = 90$ лет, при условии, что продолжительность действия соответствующих напряжений (см. таблицу Г.1) в пределах принятого для этого примера блока нагружения, состоящего из 40 циклов, равна одному календарному году.

Если продолжительность действия этого блока нагружения увеличить до двух или более лет, то значение $T_{пс}$ возрастет прямо пропорционально этим срокам. Если в течение одного календарного года реализовано два или более таких блоков нагружения, то значение $T_{пс}$ уменьшится прямо пропорционально количеству блоков.

Приложение Д
(рекомендуемое)

Оценка срока службы (ресурса) расчетного участка с учетом нескольких механизмов накопления повреждений

Д.1 В соответствии с 7.1.2 варианты учета одного или нескольких механизмов накопления повреждений для оценки срока службы (ресурса) расчетного участка ЛЧМГ выбирают по результатам анализа повреждающих факторов, влияющих на прочностные и ресурсные показатели конструкций на этом участке.

Д.2 В приведенной на рисунке Д.1 схеме формирования вариантов учета механизмов накопления повреждений в соответствии с каждой из указанных в 7.1.1 четырех основных групп причин повреждений, подлежащих учету на расчетных участках, рассматривают следующие факторы: коррозия, КРН, усталость и изменение свойств (материала конструкций).

Примечание — Для удобства схематизации приняты краткие названия факторов.

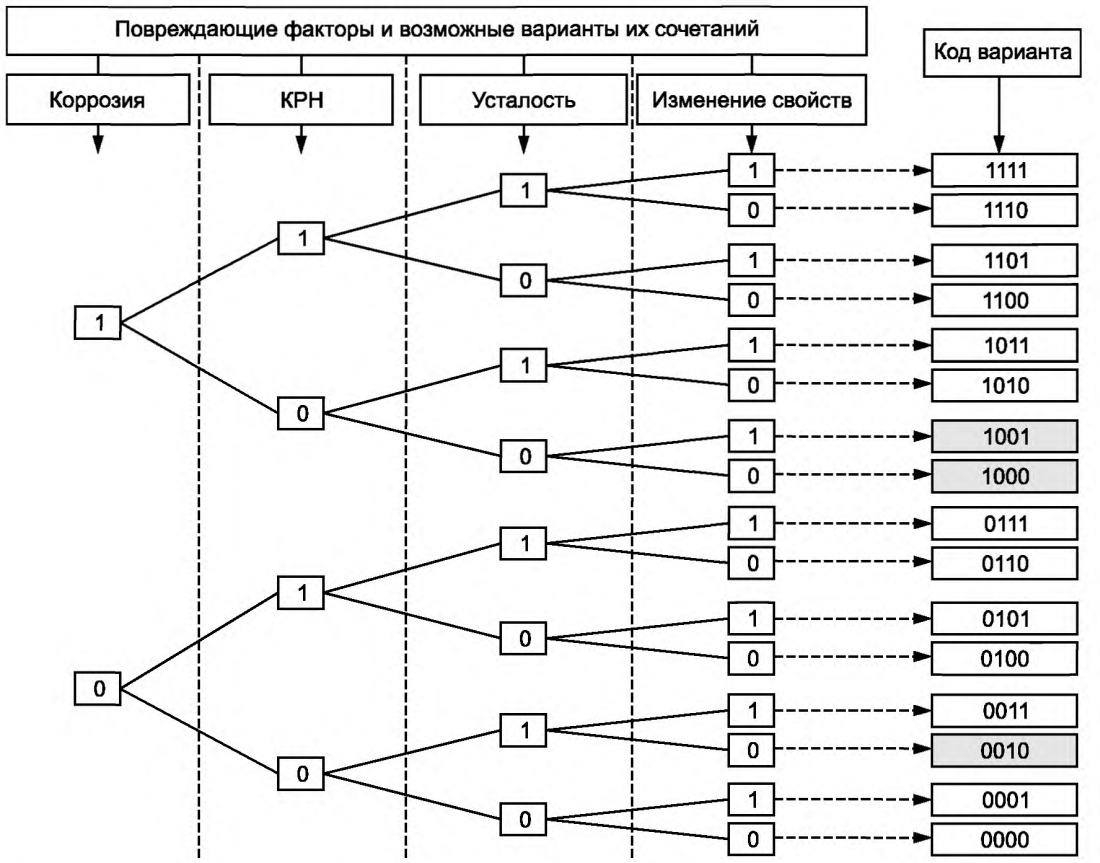

Рисунок Д.1 — Схема формирования вариантов учета механизмов накопления повреждений для оценки срока службы (ресурса) расчетного участка ЛЧМГ

Д.3 При составлении приведенной на рисунке Д.1 схемы и подобных ей схем, учитывающих другое количество различных повреждающих факторов соблюдают следующие условия:

- общее число возможных сочетаний механизмов накопления повреждений, соответствующих количеству идентификационных кодов вариантов, должно быть равно $2^{к}$, где значение показателя степени соответствует количеству рассматриваемых для учета (или неучета) факторов;
- идентификационные коды вариантов для наглядности и упрощения использования в электронных базах данных удобно представлять в виде $к$ — разрядной комбинации нулей (обозначают неучет факторов) и единиц (обозначают учет факторов);

- формирование кода варианта для удобства восприятия рекомендуется проводить, начиная со старшего разряда слева направо по древовидной структуре, схематически изображающей варианты.

Примечание — Для изображенной на рисунке Д.1 схемы, составленной для четырех указанных в Д.2 факторов, количество идентификационных кодов вариантов равно 16 (так как $2^4 = 16$).

Выделенные на схеме серым цветом три идентификационных кода вариантов соответствуют:

- код 1000 — варианту учета единственного повреждающего фактора «коррозия»;
- код 0010 — варианту учета единственного повреждающего фактора «усталость»;
- код 1001 — варианту совместного учета двух повреждающих факторов: «коррозия» и «изменение свойств».

Описание и графическая интерпретация этих вариантов учета повреждающих факторов при проведении оценки срока службы (ресурса) расчетных участков ЛЧМГ приведены в Д.4.

Д.4 Для варианта, имеющего код 1000 (см. примечание к Д.3), прогнозируемый срок службы $T_{пс}$ вычисляют по формуле (Д.1) как сумму следующих слагаемых:

- назначенного срока службы $T_{зп}$ защитного покрытия;
- прогнозной продолжительности $T_{кор}$ роста размеров коррозионного дефекта после истечения срока службы защитного покрытия

$$T_{пс} = T_{зп} + T_{кор}. \quad (Д.1)$$

Для данного варианта расчета предполагают:

- в пределах срока службы изоляционного покрытия накопление коррозионных повреждений не происходит;
- процесс накопления коррозионных повреждений может начаться с момента истечения срока службы защитного покрытия, подразумевающей полную потерю покрытием своих защитных свойств.

Графическая интерпретация для данного варианта представлена на рисунке Д.2, а пример прогнозной оценки срока службы расчетных участков и рассматриваемого участка ЛЧМГ в целом с учетом коррозии, как единственного повреждающего фактора, приведен в приложении Е.

Примечание — Назначенный срок службы защитного покрытия для варианта с кодом 1000 (см. рисунок Д.2) и вариантов с кодами 1001 и 0010 (проиллюстрированы на рисунках Д.3 и Д.4 соответственно) принят одинаковым. Предельные значения параметров, относительно которых проводят оценку срока службы (ресурса) с учетом того или иного повреждающего фактора, обозначены на всех этих рисунках штриховой линией.

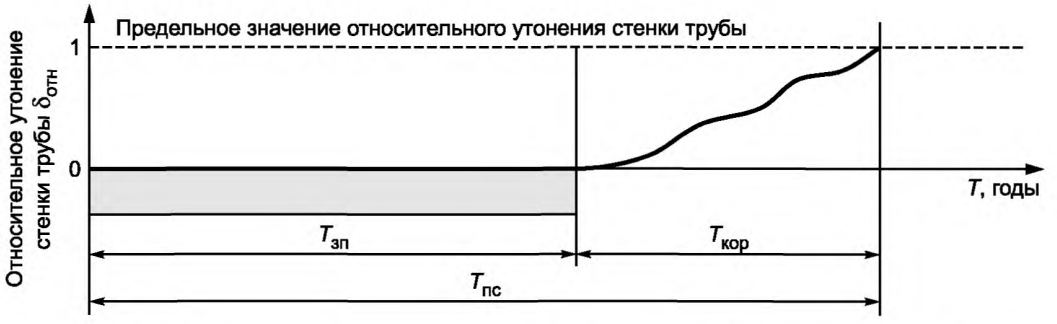

Рисунок Д.2 — Графическая интерпретация оценки срока службы расчетного участка ЛЧМГ с учетом повреждающего фактора «коррозия» (код варианта 1000)

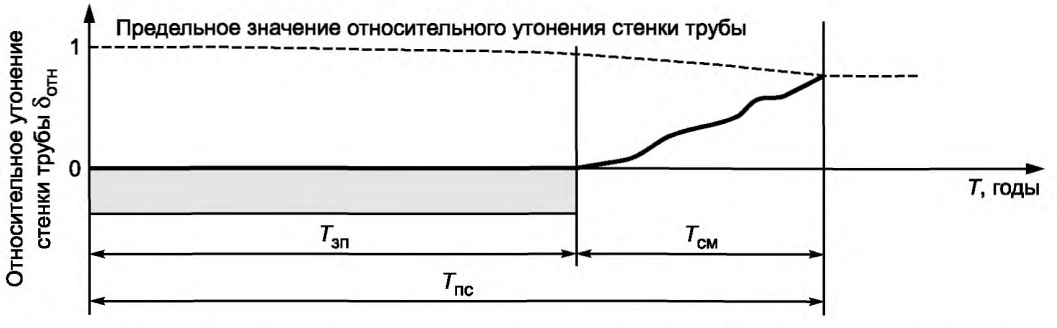

Рисунок Д.3 — Графическая интерпретация оценки срока службы расчетного участка ЛЧМГ с учетом повреждающих факторов «коррозия» и «изменение свойств» (код варианта 1001)

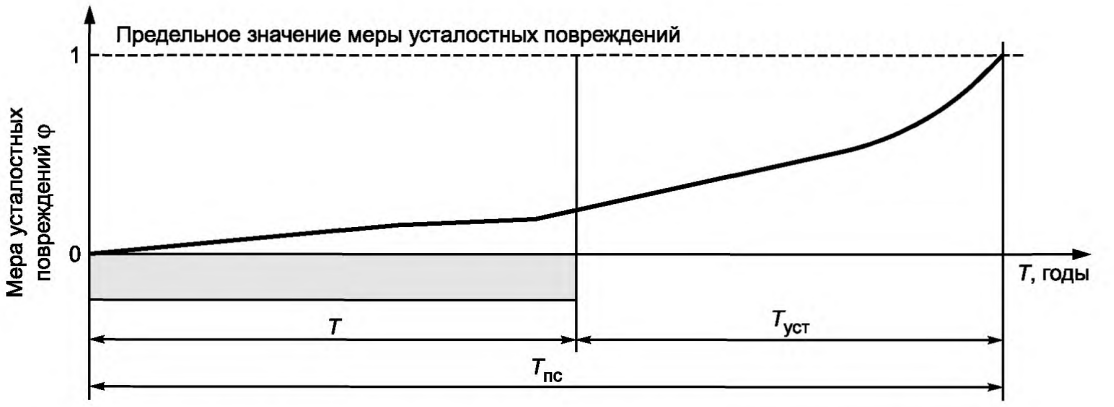

Рисунок Д.4 — Графическая интерпретация оценки срока службы расчетного участка ЛЧМГ с учетом повреждающего фактора «усталость» (код варианта 0010)

Д.5 Для варианта, имеющего код 1001 (см. примечание к Д.3 и графическую иллюстрацию на рисунке Д.3), прогнозируемый срок службы $T_{пс}$ вычисляют по формуле (Д.2) как сумму следующих слагаемых:

- назначенного срока службы $T_{зп}$ защитного покрытия;
- прогнозной продолжительности $T_{см}$, учитывающей ухудшение нормативных свойств материала после истечения срока службы защитного покрытия.

$$T_{пс} = T_{зп}^{см} + T_{кор}^{см}. \quad (Д.2)$$

Примечание — Разный угол наклона штриховой линии на рисунке Д.3 в пределах $T_{зп}$ и $T_{см}$ означает, что скорость деградации нормативных свойств материала (при наличии) до истечения срока службы защитного покрытия может быть меньше, чем при исчерпании срока службы защитного покрытия.

Д.6 Для варианта, имеющего код 0010 (см. примечание к Д.3 и графическую иллюстрацию на рисунке Д.4), прогнозируемый срок службы $T_{пс}$ вычисляют по формуле (Д.3) как сумму следующих слагаемых:

- срока службы защитного покрытия $T_{зп}^{уст}$ (с учетом накапливающихся с момента ввода конструкции в эксплуатацию усталостных повреждений независимо от наличия покрытия);
- прогнозной продолжительности $T_{уст}$, учитывающей собственно усталостные повреждения материала после истечения срока службы защитного покрытия.

$$T_{пс} = T_{зп}^{уст} + T_{уст}. \quad (Д.3)$$

Примечания

1 Сплошными кривыми линиями на рисунках Д.2 — Д.4 обозначены возможные тренды изменения значений параметров (от начальных до предельных), относительно которых проводят оценку срока службы (ресурса).

2 Более высокая скорость накопления усталостных повреждений, обозначенная на рисунке Д.4 сплошной линией в пределах $T_{уст}$ (чем в пределах $T_{зп}^{уст}$), означает, что отсутствие защитного покрытия может интенсифицировать процесс накопления усталостных повреждений вследствие повышения чувствительности материала конструкции при контакте с грунтовыми электролитами.

Д.7 В таблице Д.1 в виде формульных комбинаций обозначены схемы оценки срока службы (ресурса) расчетного участка, соответствующие всем приведенным на рисунке Д.1 вариантам сочетания повреждающих факторов. Для каждой схемы даны пояснения по правилам учета временны́х характеристик срока службы (ресурса) при проведении оценки.

Таблица Д.1 — Обозначение схем оценки срока службы (ресурса) расчетного участка для различных вариантов сочетания повреждающих факторов

Код варианта	Характеристики срока службы (ресурса) для повреждающих факторов	Обозначение схемы оценки срока службы (ресурса) расчетного участка	Пояснения к обозначениям схем оценки
1111	$T_{зп}^{уст,\ см}$, $T_{кор}^{уст,\ см}$, $T_{крн}^{уст,\ см}$	$T_{пс} = T_{зп}^{уст,\ см} + \min(T_{кор}^{уст,\ см}, T_{крн}^{уст,\ см})$	После исчерпания срока службы защитного покрытия, происходящего на фоне ухудшения свойств материала и накопления усталостных повреждений, повреждающими факторами являются коррозия и КРН, также действующие на фоне ухудшения свойств материала и накопления усталостных повреждений. Учитывают повреждающий фактор с наименьшим значением характеристики срока службы (ресурса)
1110	$T_{зп}^{уст}$, $T_{кор}^{уст}$, $T_{крн}^{уст}$	$T_{пс} = T_{зп}^{уст} + \min(T_{кор}^{уст}, T_{крн}^{уст})$	После исчерпания срока службы защитного покрытия, происходящего на фоне накопления усталостных повреждений, повреждающими факторами являются коррозия и КРН, также действующие на фоне накопления усталостных повреждений. Учитывают повреждающий фактор с наименьшим значением характеристики срока службы (ресурса)
1101	$T_{зп}^{см}$, $T_{кор}^{см}$, $T_{крн}^{см}$	$T_{пс} = T_{зп}^{см} + \min(T_{кор}^{см}, T_{крн}^{см})$	После исчерпания срока службы защитного покрытия, происходящего на фоне ухудшения свойств материала, повреждающими факторами являются коррозия и КРН, также действующие на фоне ухудшения свойств материала. Учитывают повреждающий фактор с наименьшим значением характеристики срока службы (ресурса)
1100	$T_{зп}$, $T_{кор}$, $T_{крн}$	$T_{пс} = T_{зп} + \min(T_{кор}, T_{крн})$	После исчерпания срока службы защитного покрытия повреждающими факторами являются коррозия и КРН. Учитывают повреждающий фактор с наименьшим значением характеристики срока службы (ресурса)
1011	$T_{зп}^{уст,\ см}$, $T_{кор}^{уст,\ см}$	$T_{пс} = T_{зп}^{уст,\ см} + T_{кор}^{уст,\ см}$	Ухудшение свойств материала и накопление усталостных повреждений происходит до исчерпания срока службы защитного покрытия и после него при наличии коррозии
1010	$T_{зп}^{уст}$, $T_{кор}^{уст}$	$T_{пс} = T_{зп}^{уст} + T_{кор}^{уст}$	Накопление усталостных повреждений происходит до исчерпания срока службы защитного покрытия и после него при наличии коррозии
1001	$T_{зп}^{см}$, $T_{кор}^{см}$	$T_{пс} = T_{зп}^{см} + T_{кор}^{см}$	Ухудшение свойств материала происходит до исчерпания срока службы защитного покрытия и после него при наличии коррозии

Окончание таблицы Д.1

Код варианта	Характеристики срока службы (ресурса) для повреждающих факторов	Обозначение схемы оценки срока службы (ресурса) расчетного участка	Пояснения к обозначениям схем оценки
1000	$T_{зп}$, $T_{кор}$	$T_{пс} = T_{зп} + T_{кор}$	После исчерпания срока службы защитного покрытия единственным повреждающим фактором является коррозия
0111	$T_{зп}^{уст, см}$, $T_{кор}^{уст, см}$	$T_{пс} = T_{зп}^{уст, см} + T_{кор}^{уст, см}$	Ухудшение свойств материала и накопление усталостных повреждений происходит до исчерпания срока службы защитного покрытия и после него при наличии КРН
0110	$T_{зп}^{уст}$, $T_{крн}^{уст}$	$T_{пс} = T_{зп}^{уст} + T_{крн}^{уст}$	Накопление усталостных повреждений происходит до исчерпания срока службы защитного покрытия и после него при наличии КРН
0101	$T_{зп}^{см}$, $T_{крн}^{см}$	$T_{пс} = T_{зп}^{см} + T_{крн}^{см}$	Ухудшение свойств материала происходит до исчерпания срока службы защитного покрытия и после него при наличии КРН
0100	$T_{зп}$, $T_{крн}$	$T_{пс} = T_{зп} + T_{крн}$	После исчерпания срока службы защитного покрытия единственным повреждающим факторм является КРН
0011	$T_{зп}^{уст, см}$, $T_{см}^{уст}$	$T_{пс} = T_{зп}^{уст, см} + T_{см}^{уст}$	Ухудшение свойств материала и накопление усталостных повреждений происходит до и после исчерпания срока службы защитного покрытия
0010	$T_{зп}^{уст}$, $T_{уст}$	$T_{пс} = T_{зп}^{уст} + T_{уст}$	Накопление усталостных повреждений происходит до и после исчерпания срока службы защитного покрытия
0001	$T_{зп}^{см}$, $T_{см}$	$T_{пс} = T_{зп}^{см} + T_{см}$	Ухудшение свойств материала происходит до и после исчерпания срока службы защитного покрытия
0000	Повреждающие факторы отсутствуют		

Примечание — Верхний индекс в обозначениях характеристик срока службы (ресурса) обозначает учет данной характеристикой непрерывно действующих в процессе эксплуатации повреждающих факторов, таких как «изменение свойств» и «усталость», независимо от защитного покрытия и воздействия основного повреждающего фактора, обозначаемого нижним индексом.

Приложение Е
(рекомендуемое)

Пример определения срока безопасной эксплуатации (назначенного срока службы) участка линейной части магистрального газопровода при проектировании на основе применения детерминистического подхода для прогнозной оценки срока службы расчетных участков

Е.1 В соответствии с приложением Б расчетные участки с однородными условиями эксплуатации для оценки их срока службы могут быть выделены на основании анализа данных строительных чертежей. Пример фрагмента такого чертежа, в левой части которого приведены служебные характеристики участка ЛЧМГ, а в правой значения их критериальных характеристических параметров, приведен на рисунке Е.1.

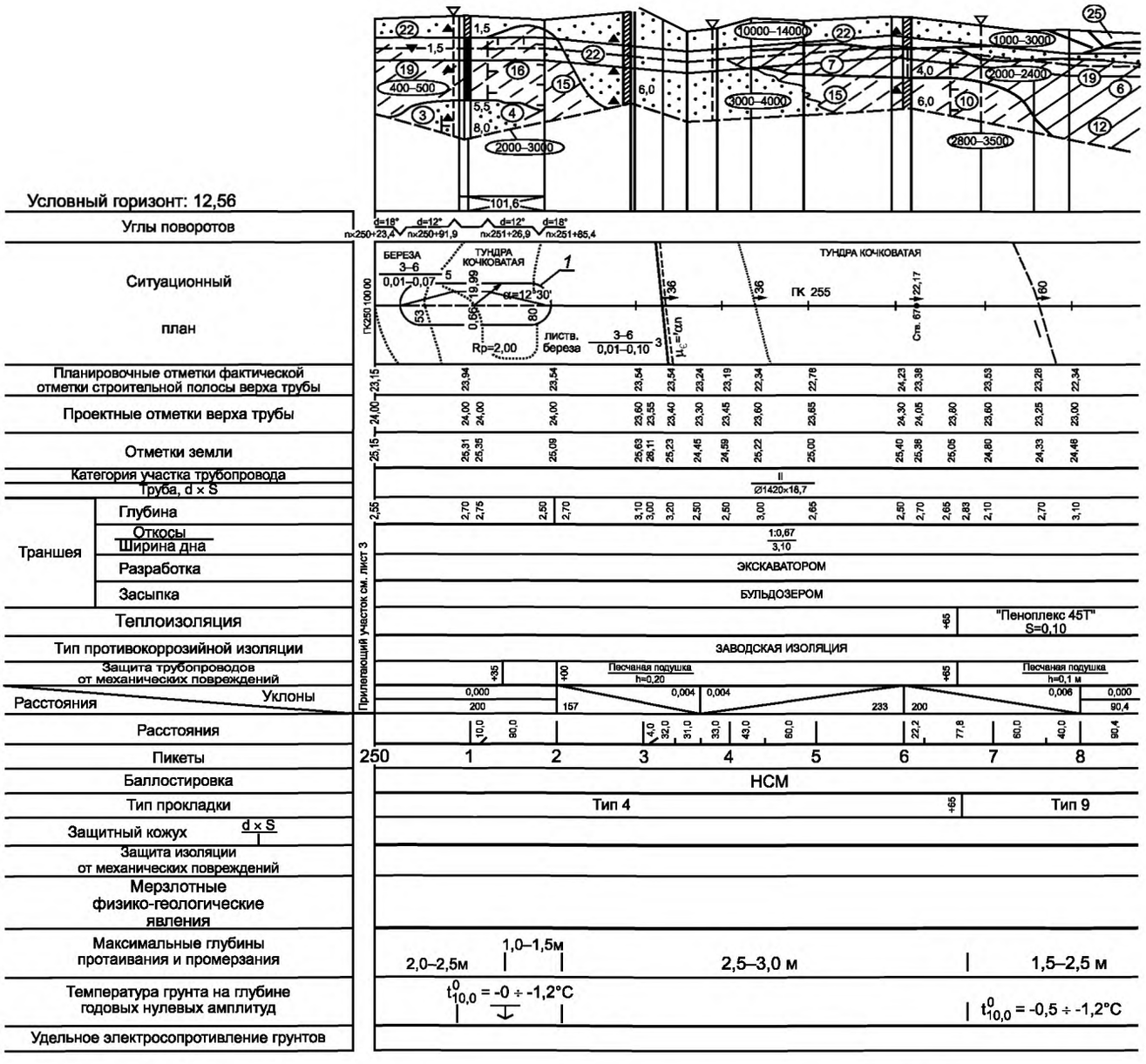

Рисунок Е.1 — Пример фрагмента строительного чертежа для участка ЛЧМГ

Е.2 Пример формирования сводных данных о критериальных характеристических параметрах для пятикилометрового участка ЛЧМГ (проектное давление — 5,4 МПа) с выделением на нем расчетных участков приведен в таблице Е.1, а также для наглядности на рисунках Е.2 — Е.5. Изменение значений критериальных характеристических параметров на данном участке показано на рисунках Е.2 — Е.4 в виде ступенчатых прямых, а границы скачкообразного изменения ступенчатых функций приняты в качестве границ расчетных участков с однородными условиями и показаны на рисунке Е.5.

В качестве значимых критериальных характеристических параметров для проведения оценки срока службы принимают критериальные характеристические параметры следующих служебных характеристик:

- типоразмер труб (диаметр, толщина стенки, марка стали);
- тип защитного покрытия (нормальный, усиленный);
- удельное электрическое сопротивление грунта ρ, Ом·м.

Для каждого сформированного расчетного участка с однородными условиями эксплуатации, номера которых приводят в первой графе таблицы Е.1, в графы со второй по восьмую этой же таблицы сводят данные о значениях критериальных характеристических параметров учитываемых служебных характеристик. В девятой графе таблицы Е.1 приводят измеряемые в календарном времени прогнозируемые в соответствии с Е.5 значения продолжительности фазы роста дефектов от момента их зарождения до достижения на расчетных участках предельного состояния, определяемого допустимыми размерами дефектов.

Таблица Е.1 — Значения критериальных характеристических параметров на расчетных участках

Расчетный участок	Координаты начала — конца участка, км	Длина участка, км	Типоразмер труб			Тип защитного покрытия	Удельное электрическое сопротивление грунта, ρ, Ом·м	Продолжительность фазы роста дефектов (в годах)
			диаметр, мм	толщина стенки, мм	марка стали			
1	0 — 0,896	0,896	717	8	19Г	нормальный	45	10
2	0,896 — 0,904	0,008	717	10	19Г	нормальный	45	17
3	0,904 — 0,992	0,088	717	10	19Г	усиленный	39	17
4	0,992 — 1,008	0,016	717	10	19Г	нормальный	45	17
5	1,008 — 2,824	1,816	717	8	19Г	нормальный	45	10
6	2,824 — 2,84	0,016	717	8	19Г	нормальный	26	10
7	2,84 — 2,896	0,056	717	10	19Г	усиленный	26	17
8	2,896 — 2,928	0,032	717	8	19Г	усиленный	26	10
9	2,928 — 3,12	0,192	717	8	19Г	усиленный	57	10
10	3,12 — 3,416	0,296	508	9,5	«Ц»	усиленный	57	20
11	3,416 — 3,6	0,184	508	9,5	«Ц»	усиленный	87	60
12	3,6 — 3,904	0,304	508	9,5	«Ц»	усиленный	112	60
13	3,904 — 4,816	0,912	508	9,5	«Ц»	усиленный	57	60
14	4,816	0,184	508	9,5	«Ц»	усиленный	26	20

Примечание — Применяемые на расчетных участках трубы изготовлены из стали марки 19Г отечественного производства и стали марки «Ц» импортного производства.

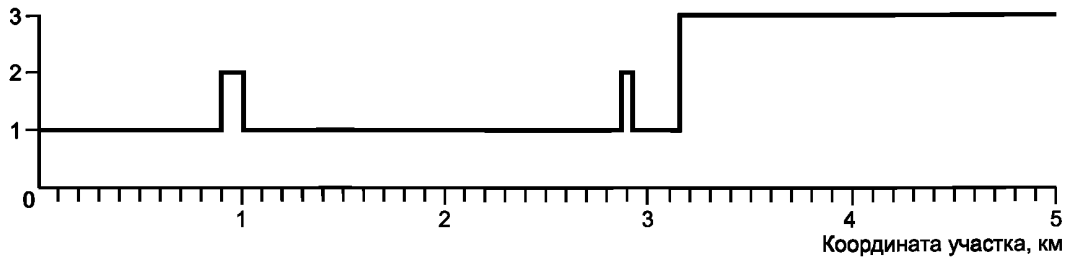

Рисунок Е.2 — Изменение типоразмера труб на участке ЛЧМГ

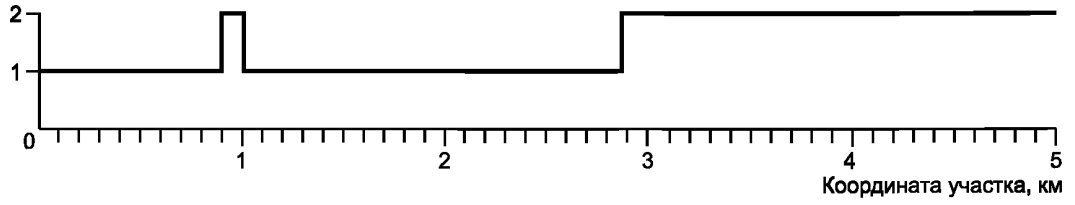

Рисунок Е.3 — Изменение типа защитного покрытия на участке ЛЧМГ

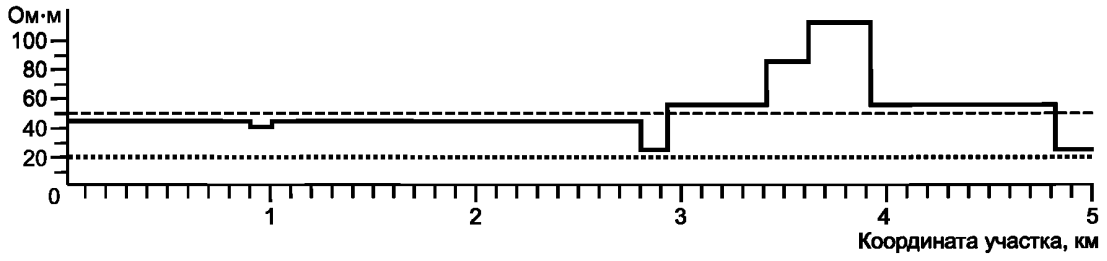

Рисунок Е.4 — Изменение значений удельного электрического сопротивления грунта на участке ЛЧМГ

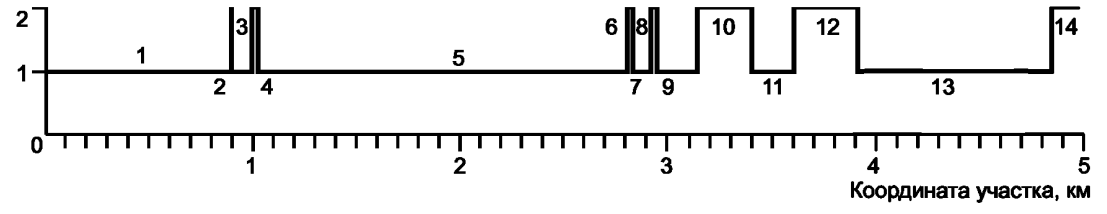

Рисунок Е.5 — Графическая иллюстрация формирования расчетных участков

Примечание — По оси ординат численные значения размерности критериального характеристического параметра приведены только на рисунке Е.4 для графика изменения удельного электрического сопротивления грунта. Штриховой и пунктирной линиями на этом графике разграничены его значения для высокой (до 20 Ом·м), средней (от 20 до 50 Ом·м) и низкой (свыше 50 Ом·м) коррозионной агрессивности грунта.

Для графиков изменения типоразмеров труб и типов защитного покрытия (см. рисунки Е.2 и Е.3) по оси ординат отложены номера вариантов изменения параметров, имеющих постоянное значение в пределах каждого варианта. Особенности каждого из вариантов учтены в Е.3 и Е.4 при выполнении прогнозной оценки срока службы расчетных участков. Приведенными на оси ординат цифрами на рисунке Е.5, иллюстрирующем сформированные расчетные участки, для наглядности идентифицированы границы разделения этих участков, номера которых обозначены вдоль оси абсцисс числами от единицы до четырнадцати.

Е.3 Оценку прочности выделенных в соответствии с Е.2 расчетных участков проводят с учетом следующих условий:

а) единственным силовым фактором, определяющим НДС расчетных участков, считают внутреннее давление, значение которого равно проектному рабочему давлению;

б) в качестве основного повреждающего фактора, приводящего к возникновению отказов и предельных состояний, принимают зарождение и рост коррозионных дефектов после исчерпания нормативного срока службы защитного покрытия (код варианта расчета 1000 в соответствии с приложением Д);

в) в качестве критерия предельного состояния принимают достижение размеров дефектов своих предельных значений с коэффициентом запаса n = 1,5 по отношению к разрушающему давлению;

г) расчет предельных размеров коррозионных дефектов может быть выполнен по формуле (Е.1) или на основе нормативных документов, предназначенных для использования при оценке работоспособности корродированных конструкций на стадии эксплуатации;

д) значение скорости роста коррозионных дефектов в глубину v_a (т.е. скорость проникновения коррозии вглубь структуры металла, определяемая коррозионной агрессивностью грунта), которая зависит от величины его удельного электрического сопротивления, принимают постоянным;

е) значение скорости роста коррозионных дефектов в длину v_b (т.е. скорость распространения коррозионных повреждений по поверхности металла трубы в продольном направлении), которое может превышать скорость роста в глубину в 20 — 100 раз, принимают постоянным;

ж) рассматривают два прогнозируемых значения скорости коррозии v_a в зависимости от диапазона изменения удельного электрического сопротивления грунта, значения которого приведены в таблице Е.1:

1) 0,1 мм/год при удельном сопротивлении свыше 50 Ом·м (низкая коррозионная агрессивность грунта);

2) 0,3 мм/год при удельном сопротивлении от 20 до 50 Ом·м (средняя коррозионная агрессивность грунта);

и) прогнозный расчет предельных размеров дефектов, соответствующих достижению предельного состояния на расчетных участках, выполняют для всех трех приведенных в таблице Е.1 типоразмеров труб при реализации двух вариантов соотношения скоростей $v_b = 50v_a$ и $v_b = 100v_a$ (второй вариант рассматривают в качестве наиболее неблагоприятного сценария).

Примечание — При наличии участков с удельным сопротивлением грунта до 20 Ом·м (высокая коррозионная агрессивность) значение скорости коррозии v_a может быть принято равным 0,5 мм/год.

Е.4 Результаты расчетов роста дефектов до достижения ими предельных размеров проиллюстрированы на рисунке Е.6 для труб из стали 19Г (предел прочности равен 470 МПа) с толщиной стенки 8 мм при средней коррозионной агрессивности грунта (т.е. при скорости проникновения коррозии вглубь металла 0,3 мм/год). Если дефект имеет размеры (в координатах *a* и *b)*, которые располагают образ этого дефекта ниже кривой предельных размеров дефектов (сплошная утолщенная линия на рисунке Е.6), то его определяют как допустимый, если выше ее, то его считают недопустимым.

Примечание — В расчетах принято положение о недопустимости дефектов глубиной более 80 % толщины стенки трубы. Это ограничение соответствует горизонтальному участку на кривой предельных размеров дефектов.

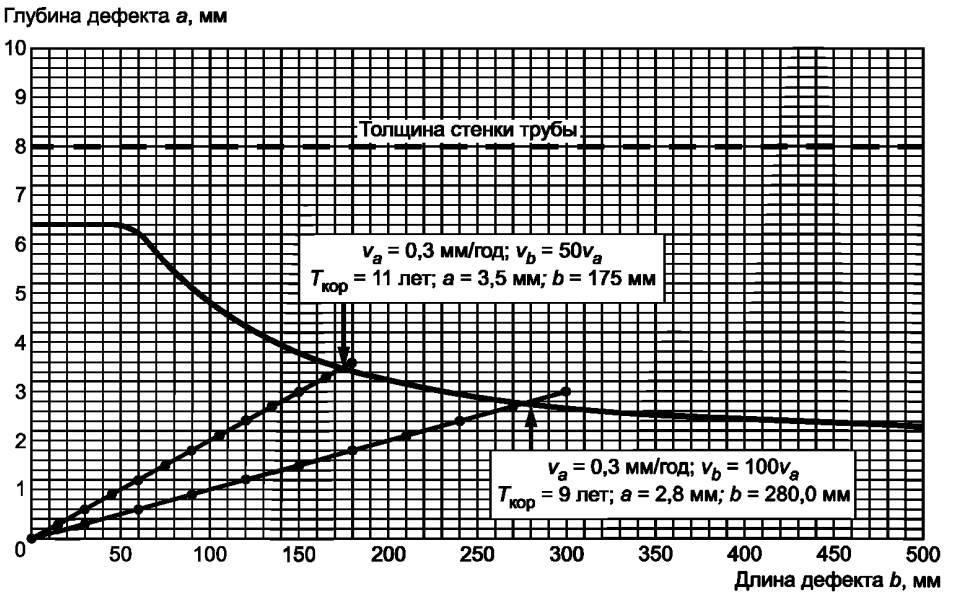

Рисунок Е.6 — Графическая интерпретация результатов расчета роста дефектов до достижения ими предельных размеров

Е.5 Анализ приведенной на рисунке Е.6 числовой и графической информации показывает, что для первого варианта соотношения скоростей роста размеров дефектов $v_b = 50v_a$ предельное состояние может наступить через 11 лет после исчерпания срока службы защитного покрытия, а для более неблагоприятного сценария (при $v_b = 100v_a$) это состояние может наступить через 9 лет. В первом случае предельные размеры дефекта, при достижении которых может произойти разрушение трубы при рабочем давлении 5,4 МПа, принимают значения a = 3,5 мм и b = 175 мм, а во втором — a = 2,8 мм и b = 280 мм. Эти значения (показаны на рисунке Е.6 стрелками) определяют по координатам точки пересечения предельной кривой с траекториями роста размеров дефекта. Траектории роста размеров дефекта изображены в виде исходящих из начала координат прямых линий с круглыми маркерами. Эти линии обозначены на рисунке Е.6 цифрами 1 и 2 в соответствии с вариантами соотношения скоростей роста дефектов. Координаты маркеров соответствуют размерам дефектов в конце каждого года их роста. Число маркеров, расположенных ниже предельной кривой (без учета маркера, расположенного в начале координат), соответствует продолжительности (в календарных годах) фазы роста до наступления предельного состояния.

Примечание — Расчет предельных размеров дефектов для построения предельных кривых, приведенных на рисунке Е.6, может быть выполнен с учетом положений Е.3 по формуле

$$a = \frac{(A-1)Qt}{A-Q}, \qquad (Е.1)$$

в которой параметры A и Q вычисляют по формулам:

$$A = \frac{np(D-t)}{2t\sigma_в}, \qquad (Е.2)$$

$$Q = \left(1 + 0{,}31\frac{b^2}{Dt}\right)^{1/2}, \qquad (Е.3)$$

где D — номинальный внешний диаметр трубы, мм;

t — толщина стенки трубы, мм;

$\sigma_в$ — предел прочности трубной стали, МПа;

n — коэффициент запаса, определяющий уровень допустимых размеров дефекта по отношению к разрушающему давлению (см. Е.3).

Построение предельной кривой выполняют, последовательно задавая возрастающие от нуля приращения длины дефекта b для вычисления параметра Q по формуле (Е.3) с последующей подстановкой параметра A, вычисляемого по формуле (Е.2), и параметра Q в формулу (Е.1) для вычисления соответствующей глубины дефекта a. Построение предельной кривой продолжают до ее пересечения с траекторией роста дефектов. Для наглядности графической интерпретации построение предельной кривой может быть продолжено еще на несколько шагов приращения размеров дефекта (см. рисунок Е.6).

Е.6 Расчет продолжительности фазы роста при скоростях коррозии, принимаемых в соответствии с перечислением ж) Е.3, и анализ результатов для других типоразмеров труб проводят аналогично (в соответствии с Е.3 — Е.5). Результаты этих расчетов для неблагоприятного сценария (при соотношении скоростей роста $v_b = 100v_a$) приведены в таблице Е.2, а для всех четырнадцати расчетных участков — в девятой графе сводной таблицы Е.1.

Таблица Е.2 — Результаты расчета предельных размеров дефектов и продолжительности и фазы их роста

Типоразмер труб			Предельные размеры дефекта		Продолжительность фазы роста дефектов до достижения своих предельных размеров, годы	
диаметр, мм	толщина стенки, мм	марка стали	a, мм	b, мм	при скорости роста v_a = 0,3 мм/год	при скорости роста v_a = 0,1 мм/год
717	8	19Г	2,8	280	9	27
717	10	19Г	4,7	480	15	45
508	9,5	«Ц»	5,7	570	19	57

Е.7 Определение прогнозируемого срока службы расчетного участка графически проиллюстрировано на рисунке Е.7.

В соответствии с приведенной графической иллюстрацией прогнозируемый срок службы $T_{пс}$ (в календарных годах) для каждого из расчетных участков (сплошная ломаная линия) вычисляют по формуле (Д.1) как сумму назначенного срока службы $T_{зп}$ защитного покрытия (приравненного в данном примере к 25 годам) и прогнозной продолжительности $T_{кор}$ фазы роста размеров коррозионного дефекта (пунктирная ломаная линия).

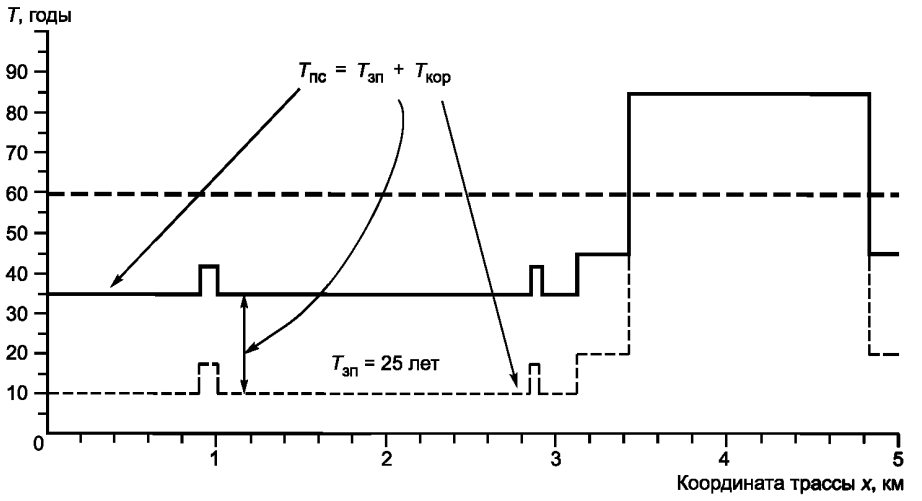

Рисунок Е.7 — Графическая иллюстрация определения прогнозируемого срока службы расчетного участка

Примечание — На отдельных расчетных участках (например, на участках с более толстостенными трубами и низкими показателями коррозионной агрессивности грунта), целесообразно директивно ограничивать слишком высокие значения прогнозируемого срока службы. Например, в качестве ограничительного значения для таких участков может быть принято увеличенное в полтора раза осредненное значение срока службы на других участках.

В рассмотренном примере максимальная продолжительность прогнозируемого срока службы равна 85 лет, что соответствует части ломаной линии, относящейся к расчетным участкам 11, 12 и 13, расположенной на рисунке Е.7 выше горизонтальной штриховой линии, которая директивно ограничивает прогнозируемый срок службы значением, равным 60 лет. Осредненное значение срока службы, вычисленное для других расчетных участков (1 — 10, 14), примерно равно 40 лет.

Е.8 Назначенный срок службы (соответствующий сроку безопасной эксплуатации) всего рассматриваемого участка ЛЧМГ в целом может быть оценен на основе полученных оценок прогнозируемых сроков службы всех расчетных участков с помощью данных таблицы Е.1, а также графически посредством построения кумулятивной функции распределения прогнозируемых сроков службы всех расчетных участков, изображенной на рисунке Е.8.

Для установления в качестве назначенного срока службы рассматриваемого участка ЛЧМГ в целом в соответствии с 10.2 и 10.3 следует выбрать такое значение срока службы, при котором доля общей протяженности расчетных участков с прогнозируемым сроком службы, превышающим назначаемый, будет составлять не менее 95 %.

Согласно приведенной на рисунке Е.8 графической иллюстрации в рассматриваемом примере назначенный срок службы рассматриваемого участка принимают равным 35 годам (это значение обозначено на оси времени круглым маркером).

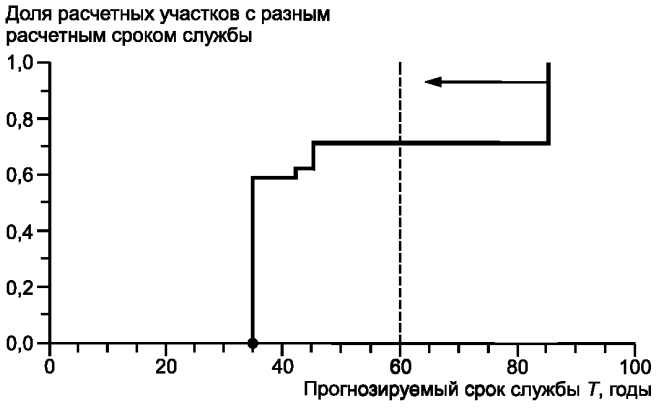

Рисунок Е.8 — Графическая иллюстрация построения кумулятивной функции распределения сроков службы расчетных участков и установления назначенного срока службы для всего участка ЛЧМГ

Примечание — Стрелкой на рисунке Е.8 обозначено направление директивного ограничения (при необходимости) прогнозируемого срока службы расчетных участков, а вертикальной штриховой линией показано значение этого ограничения, равное для приведенного примера 60 годам.

Приложение Ж
(рекомендуемое)

Назначение срока безопасной эксплуатации линейной части магистральных газопроводов по результатам оценки срока безопасной эксплуатации ее участков

Ж.1 Обоснование назначенного срока службы и соответствующего ему срока безопасной эксплуатации ЛЧМГ проводят в соответствии с 4.5 и разделом 10. При этом необходимо учитывать сводку данных о прогнозных сроках безопасной эксплуатации, полученных для каждого из рассматриваемых в пределах ЛЧМГ участков согласно рекомендациям, приведенным в приложении Е.

Ж.2 Участки ЛЧМГ с одинаковыми значениями прогнозируемого срока безопасной эксплуатации объединяют в группы и вычисляют абсолютные значения протяженности объединенных участков, а также относительные доли каждой группы в общей протяженности ЛЧМГ.

Методический пример такого анализа сводных данных для шести (полученных после объединения в группы) участков ЛЧМГ общей протяженностью 100 км приведен в таблице Ж.1.

Таблица Ж.1 — Пример анализа сводных данных о прогнозных значениях сроков безопасной эксплуатации участков ЛЧМГ

Прогнозный срок безопасной эксплуатации группового участка, лет	Суммарная протяженность группы участков с одинаковым сроком безопасной эксплуатации, км	Относительная доля группы участков с одинаковым сроком безопасной эксплуатации в общей протяженности ЛЧМГ
25	2	0,02
30	3	0,03
35	10	0,1
40	25	0,25
45	40	0,4
50	20	0,2

Ж.3 На основании данных таблицы Ж.1 срок безопасной эксплуатации ЛЧМГ может быть установлен аналогично рекомендациям, приведенным в Е.7 и Е.8 (приложение Е) при установлении назначенного срока службы эксплуатации конкретного участка ЛЧМГ на основе оцененных сроков службы расчетных участков.

Ж.4 Срок безопасной эксплуатации ЛЧМГ может быть оценен на основе полученных оценок прогнозируемых сроков безопасной эксплуатации групповых участков посредством анализа данных, приведенных в таблице Ж.1.

Для наглядности оценка может быть проиллюстрирована посредством построения графика кумулятивной функции распределения относительной доли групповых участков в общей протяженности ЛЧМГ.

Для установления в качестве срока безопасной эксплуатации ЛЧМГ в соответствии с 10.2 и 10.3 следует выбрать такое его значение, при котором доля общей протяженности групповых участков с прогнозируемым сроком безопасной эксплуатации, не превышающим назначаемый, будет составлять не более 5 % (или 0,05 в относительных долях) от общей протяженности ЛЧМГ.

Если полученное значение срока безопасной эксплуатации ЛЧМГ будет признано недостаточным, то в рамках проекта должны быть приняты дополнительные меры технического и (или) организационного характера, обеспечивающие повышение характеристик долговечности отдельных участков ЛЧМГ, после чего следует последовательно выполнить повторный анализ этих характеристик на данных участках согласно рекомендациям, приведенным в приложениях Е и Ж.

Ж.5 Согласно приведенной на рисунке Ж.1 графической иллюстрации срок безопасной эксплуатации ЛЧМГ для рассматриваемого примера принимают равным 30 годам. Это значение соответствует точке пересечения графика кумулятивной функции распределения (сплошная ломаная линия) с горизонтальной прямой (штриховая линия), отсекающей на вертикальной оси значение 0,05.

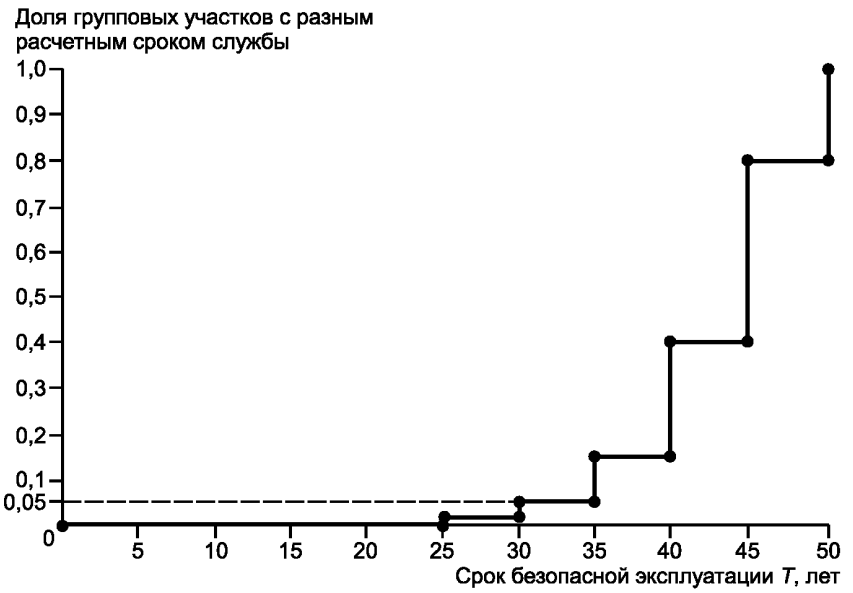

Рисунок Ж.1 — Графическая иллюстрация построения кумулятивной функции распределения сроков безопасной эксплуатации групповых участков и установления назначенного (проектного) срока безопасной эксплуатации ЛЧМГ

Приложение И
(рекомендуемое)

Физико-механические свойства материалов, необходимые для оценки прочности и срока службы (ресурса) объектов линейной части магистрального газопровода

И.1 Необходимые для оценки срока службы (ресурса) данные о физико-механических характеристиках материалов, приведенные в таблице А.1 (приложение А), могут быть определены согласно положениям И.2 — И.3.

И.2 В соответствии с ГОСТ ISO 3183 в технических условиях на поставку стальных труб, применяемых для трубопроводов в нефтяной и газовой промышленности, указывают численные значения физико-механических свойств сталей, полученных при испытаниях стандартных образцов на растяжение:

- предел прочности;
- предел текучести (условный);
- удлинение (относительное).

И.3 Предел прочности, предел текучести (условный и физический) и относительное удлинение (равномерное и после разрыва) могут быть определены при проведении испытаний на растяжение для металлов и сварных соединений по ГОСТ 1497 и ГОСТ 6996 соответственно.

И.4 В качестве характеристик меры сопротивления металла разрушению согласно ГОСТ ISO 3183 принимают:

- работу удара при испытании образцов с V-образным надрезом на ударный изгиб;
- процентное содержание вязкой составляющей в изломе образца при испытании образца падающим грузом;
- раскрытие в вершине трещины.

Примечания

1 Ударная вязкость (работа удара, отнесенная к начальной площади поперечного сечения образца) может быть определена по ГОСТ 9454 или ГОСТ 6996 при испытании на разрушение при различных температурах образцов с V-образным концентратором.

В международной стандартизации ударная вязкость при испытаниях образцов такого типа определяется в соответствии со стандартом [16].

2 Такие характеристики трещиностойкости, как раскрытие в вершине трещины, а также не регламентируемые ГОСТ ISO 3183 значения критического коэффициента интенсивности напряжений и критического значения *J*-интеграла, могут быть определены по ГОСТ 25.506.

В международной стандартизации характеристики трещиностойкости определяются в соответствии со стандартом [17].

3 Для оценки влияния температуры эксплуатации характеристики трещиностойкости рекомендуется определять при испытаниях в интервале характерных температур от минус 60 °С до 20 °С (с шагом, равным 20 °С). Конкретные значения температур согласно ГОСТ ISO 3183 могут быть выбраны при заказе труб.

Приложение К
(рекомендуемое)

Проектные нагрузки и воздействия на основе детерминистического и вероятностного подходов к оценке срока службы (ресурса)

К.1 Согласно 6.1.2 при выполнении на стадии проектирования прогнозной оценки срока службы (ресурса) объектов ЛЧМГ как в рамках детерминистического, так и в рамках вероятностного подхода по 9.5, выделяют действующие на эти объекты функциональные (см. 6.1.3) и природно-климатические (см. 6.1.4) нагрузки и воздействия, которые могут влиять на долговечность конструкции в процессе эксплуатации.

К.2 Источниками информации о функциональных и природно-климатических нагрузках и воздействиях могут служить данные, полученные на эксплуатируемых в сходных природно-климатических условиях объектах-аналогах при одинаковых параметрах транспорта газа.

К.2.1 Информация о функциональных нагрузках (внутреннем давлении, в том числе о его низкочастотном изменении, и температуре перекачиваемого газа) может быть получена на основе данных рабочих журналов. Записи в рабочих журналах, как правило, проводят диспетчерские службы в соответствии с периодичностью, определенной правилами эксплуатации (вручную или с помощью специального оборудования).

Для проведения прогнозной оценки срока службы (ресурса) объектов ЛЧМГ необходимо иметь переведенные в электронную форму (оцифрованные на основе данных рабочих журналов) развертки во времени:

- изменения давления (например, в линии нагнетания и линии всасывания газоперекачивающих установок);
- изменения температуры (например, по данным датчиков температуры, установленных на трассе).

Примечание — Пульсации давления газа и скорости газового потока на магистральных газопроводах могут быть вызваны следующими причинами:

- пульсационным характером работы нагнетателей газоперекачивающих установок;
- взаимодействием стационарного газового потока с местными неоднородностями в конструкционных элементах (тройниковых соединениях, отводах, гнутых вставках, переходах с одного диаметра на другой, соединениях трубопровода с арматурой, заглушенных отводах и т.п.);
- возможной турбулентностью газового потока;
- возможными автоколебаниями (помпажом) в системе нагнетания;
- переходными колебательными процессами, связанными с изменением режимов работы газоперекачивающих агрегатов (режимов пуска-останова, переходных режимов).

К.2.1.1 Для использования в расчетах полученные реализации процессов силового и температурного нагружения схематизируют с помощью методов схематизации случайных процессов нагружения по ГОСТ 25.101. Пример применения одного из методов схематизации с учетом требований ГОСТ 25.101 для обработки записей рабочего журнала о значениях внутреннего давления приведен в приложении Л.

К.2.1.2 Действие функциональных нагрузок может вызывать кинематическое нагружение конструкционных элементов ЛЧМГ, обусловленное перемещением опор на надземных участках, смещением окружающих массивов грунта, подвижкой основной части конструкции. Такие возможные изменения проектного положения строительных объектов, которые могут стать причиной возникновения предельных состояний (первой или второй группы по ГОСТ 27751), при необходимости следует учитывать при проведении на стадии проектирования прогнозной оценки срока службы (ресурса) объектов ЛЧМГ.

Исходные данные о кинематических нагрузках и воздействиях могут быть получены по результатам инструментальных геодезических измерений (конфигурации продольной оси, нивелировки положения опор), проведенных при проектировании действующих газопроводов-аналогов (перечисление 4) в перечислении б) 4.5.2.1) или при оценке их технического состояния, например в рамках проведения экспертизы промышленной безопасности объектов ЛЧМГ.

К.2.2 К основным природно-климатическим нагрузкам и воздействиям, которые могут быть при необходимости учтены при прогнозной оценке срока службы (ресурса) объектов ЛЧМГ, как правило, относят:

- ветровые, снеговые и гололедные нагрузки (для надземных участков ЛЧМГ);
- гидродинамические нагрузки (для зон речных переходов сухопутных магистральных газопроводов и зон действий морских течений для морских магистральных газопроводов);
- грунтово-геологические воздействия трубопроводных конструкций с окружающим грунтом.

К.2.2.1 Ветровые нагрузки, вызывающие колебания надземного участка ЛЧМГ как по направлению, так и перпендикулярно направлению ветрового потока, могут быть учтены посредством моделирования скорости ветрового потока, имеющего случайную природу и представляющего собой в общем случае нестационарный случайный процесс с сезонной и суточной изменчивостью. Аналогичным образом с учетом установленных периодов изменчивости могут быть представлены и гидродинамические нагрузки.

К.2.2.2 Ветровую нагрузку в заданном направлении (например, перпендикулярном продольной оси надземного участка ЛЧМГ), а также аналогичные по результату воздействия гидродинамические нагрузки (например, от набегающего водного потока в зоне речных переходов или подводного течения в зоне прокладки морской части газопровода) можно выразить с помощью функциональной зависимости скорости потоков ветра (воды) от времени. Эту функциональную зависимость целесообразно представлять в виде суммы кусочно-стационарной функции, соответствующей осредненному постоянному воздействию в течение разных достаточно длительных отрезков расчетного периода времени (например, для осредненных сезонно повторяющихся воздействий) и некоторой случайной функции, характеризующей нерегулярные (пульсационные) кратковременные порывы ветра, воздействия волн, придонных течений и других воздействий, которые целесообразно учитывать при расчетах. При отсутствии таких кратковременных воздействий значение этой пульсационной составляющей функции принимают равным нулю.

Примечание — При расчете на действие ветровой нагрузки в ее постоянной составляющей при необходимости могут быть учтены постоянные значения сезонно повторяющихся снеговых и гололедных нагрузок.

К.2.2.3 Данные для учета ветровых и гидродинамических нагрузок (схемы распределения скоростей и направлений ветровых потоков и водных течений) могут быть получены по результатам инженерных изысканий*, которые выполняют для объектов капитального строительства с целью подготовки проектной документации.

К.2.2.4 Расчеты на действие ветровых нагрузок могут быть выполнены с учетом природно-климатических условий региона строительства и положений национальных нормативных документов**, регламентирующих подобные расчеты.

Примечание — В международной стандартизации методика расчета на действие ветровых нагрузок реализована в положениях стандарта [18]***.

К.2.3 Учет взаимодействия с грунтом на участках ЛЧМГ при проведении прогнозной оценки срока службы (ресурса) расчетных участков ЛЧМГ может быть осуществлен в рамках расширенного подхода при необходимости его применения согласно 4.2.7.

Основное внимание при оценке взаимодействия трубопроводных конструкций с грунтом целесообразно уделять анализу следующих особых расчетных ситуаций:

- развитие процессов морозного пучения обводненных грунтов, продуцирующих при промерзании интенсивные силовые и кинематические воздействия на трубопровод;
- снижение несущей способности грунта при оттаивании, приводящее к неконтролируемой неоднородной просадке трубопроводных конструкций;
- изменение параметров взаимодействия трубопровода с грунтом вследствие изменения сопротивления грунта продольным и поперечным перемещениям трубопровода;
- отслаивание грунта засыпки, образование внутренних пустот, приводящее к снижению сопротивления грунта поперечным перемещениям, продуцирующим возможность знакопеременных перемещений подземного трубопровода с амплитудами, приводящими к накоплению значимых уровней усталостных повреждений.

Необходимые данные для учета взаимодействия трубопроводных конструкций с грунтом получают на основе результатов инженерно-геологических и инженерно-геотехнических изысканий, входящих в состав общих инженерных изысканий*, проводимых для включения их результатов в состав проектной документации.

---

* В Российской Федерации состав и содержание инженерных изысканий для подготовки проектной документации строительных объектов (в том числе линейных) определены в своде правил СП 47.13330.2012 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения».

** В Российской Федерации расчетные ветровые воздействия, учитываемые при проектировании строительных сооружений, регламентированы сводом правил СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия», а климатические параметры (преобладающие направления, максимальные и средние скорости ветра), используемые в расчетах, определены в своде правил СП 131.13330.2012 «Строительная климатология».

*** В Республике Беларусь действует технический кодекс установившейся практики ТКП EN 1991-1-4—2009 «Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1—4. Общие воздействия. Ветровые воздействия», который идентичен по степени соответствия стандарту [18] и дополнен национальным приложением, содержащим требования, необходимые при учете ветровых воздействий для каждого региона страны.

Приложение Л
(рекомендуемое)

Методы схематизации переменных нагрузок и воздействий

Л.1 В соответствии с 6.2.1 анализ частотных и временны́х закономерностей полученных числовых последовательностей значений нагрузок и воздействий, имеющих нерегулярный, а в общем случае случайный характер, проводят в рамках расширенного подхода оценки срока службы (ресурса) расчетных участков ЛЧМГ при необходимости применения такого подхода согласно 4.2.7.

При проведении расчетов указанные числовые последовательности значений нагрузок и воздействий, как правило, заменяют схематизированными процессами с заданными распределениями амплитуд колебаний этих значений и равными повреждающими способностями по отношению к исходным процессам. Схематизация процессов нагружения может быть проведена в соответствии с методами, установленными ГОСТ 25.101.

Л.2 В соответствии с ГОСТ 25.101 при проведении схематизации процессов нагружения применяют:

а) однопараметрические методы схематизации, включающие:

1) метод экстремумов;

2) метод максимумов;

3) метод минимумов;

4) метод размахов (с учетом одного параметра — величины размаха);

б) двухпараметрические методы схематизации, включающие:

1) метод размахов (с учетом двух параметров — величины размаха и его положения относительно нагрузки, равной нулю);

2) метод выделения полных циклов и его разновидность — метод «дождя».

Примечание — Методы выделения полных циклов приводят к более точным результатам, так как учитывают как основные, так и наложенные циклы нагружения.

Л.3 Пример схематизации по методу полных циклов, проведенной на основе обработки записанных в рабочем журнале диспетчерской службой компрессорной станции изменений среднесуточных значений входного и выходного давления газа (см. рисунок Л.1), приведен на рисунках Л.2 и Л.3.

Изображенные на рисунках Л.2 и Л.3 гистограммы иллюстрируют распределения циклов с определенными размахами изменения давления, выделенными по методу полных циклов размахов в соответствии с ГОСТ 25.101. Эти схематизированные данные могут быть использованы в прогнозных расчетах показателей долговечности расчетных участков ЛЧМГ.

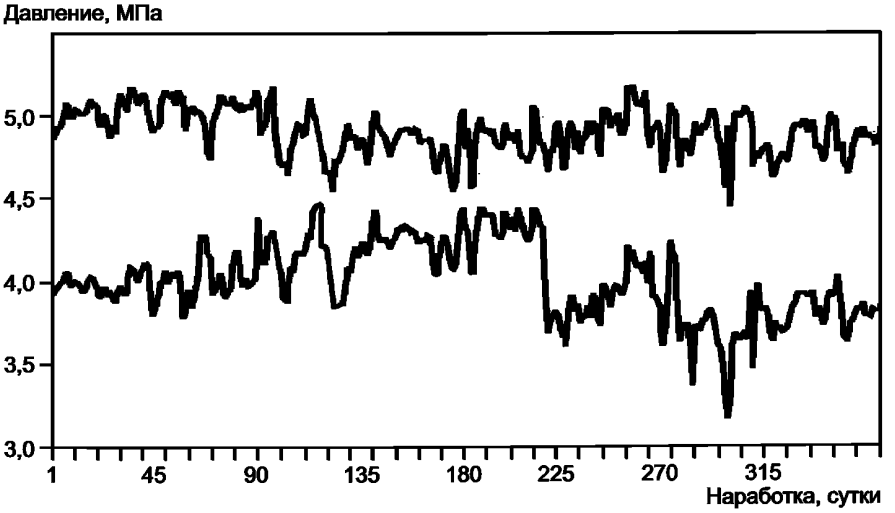

Рисунок Л.1 — Циклограммы изменения входного (нижний график) и выходного (верхний график) давления на компрессорной станции

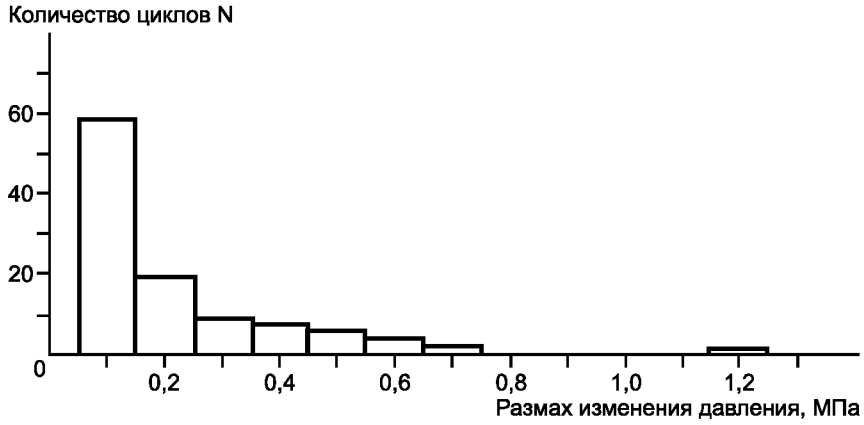

Рисунок Л.2 — Распределение циклов входного давления на компрессорной станции

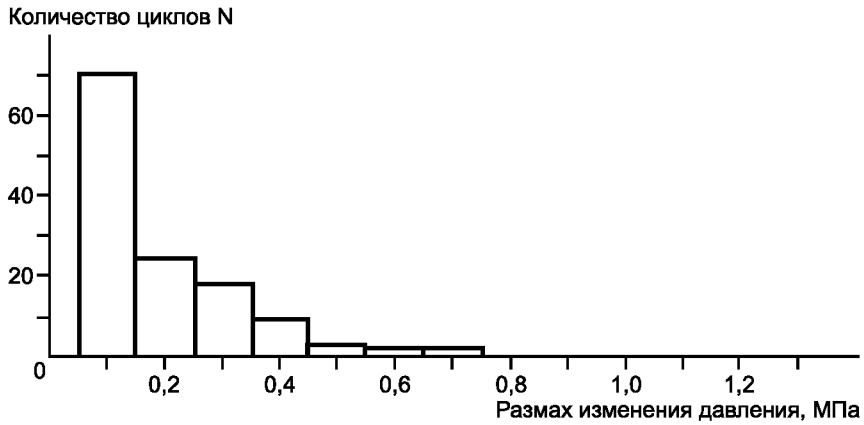

Рисунок Л.3 — Распределение циклов выходного давления на компрессорной станции

Приложение М
(справочное)

Метод расчета скорости равномерной коррозии металлов по их химическому составу и электрохимическим измерениям при взаимодействии с коррозионной средой

М.1 Для приближенной оценки скорости равномерной коррозии металлов (скорости проникновения коррозионного повреждения в металл) может быть применен расчетно-экспериментальный метод, основанный на использовании закона Фарадея. Метод может быть применен для любых металлов и сплавов, в том числе для трубных сталей, используемых при изготовлении объектов ЛЧМГ.

При проведении расчетов скорости коррозии по этому методу необходимы следующие исходные данные:

- соответствующее потенциалу коррозии $E_{кор}$ значение плотности коррозионного тока $i_{кор}$, определяемого как частное от деления коррозионного тока $I_{кор}$ в образце на площадь образца, подвергающуюся электрохимическому воздействию ($E_{кор}$ и $I_{кор}$ определяют экспериментально);
- эквивалентный вес $W_{экв}$ металла, состоящего из основных химических элементов, массовая доля каждого из которых составляет более одного процента;
- значение плотности металла, ρ.

Примечания

1 Изложенный в данном приложении расчетно-экспериментальный метод определения скорости равномерной коррозии в металлах и сплавах рекомендуется для практического применения в стандарте [19].

2 Терминологически определяемый в соответствии с ГОСТ 5272 потенциал коррозии $E_{кор}$, как правило, принимает стационарное значение, при котором одинаковы скорости анодной и катодной реакции (одинаковы плотности анодного и катодного токов). Для применяемого метода потенциал коррозии измеряют в милливольтах, плотность коррозионного (анодного) тока — в микроамперах на квадратный сантиметр, а плотность металла — в граммах на сантиметр кубический.

М.2 Для вычисления эквивалентного веса одного грамма металла $W_{экв} = 1 / Q_{экв}$ необходимы данные о процентном содержании входящих в металл металлических элементов, значениях их атомной массы и валентности, соответствующей наиболее устойчивой степени окисления этих элементов.

М.3 При наличии перечисленных в М.1 данных и вычисленного согласно М.2 эквивалентного веса $W_{экв}$, скорость равномерной коррозии металлов $v_{кор}$ вычисляют на основании закона Фарадея по формуле

$$v_{кор} = C_{кор} \frac{i_{кор}}{\rho} W_{экв}, \qquad (М.1)$$

где $C_{кор} = 3{,}27 \cdot 10^{-3}$ — константа, соответствующая перечисленным в М.1 единицам измерения, значение которой позволяет получить в результате расчета размерность скорости коррозии $v_{кор}$, мм/год.

М.4 Электронный эквивалент $Q_{экв}$ одного грамма окислившегося металла, состоящего из $M_э$ металлических элементов, вычисляют по формуле

$$Q_{экв} = \sum_{i=1}^{M_э} \frac{m_i k_i}{w_i}, \qquad (М.2)$$

где m_i — массовая доля i-го элемента;

k_i — валентность элемента, соответствующая наиболее устойчивой степени окисления;

w_i — атомный вес i-го элемента.

М.5 Методический пример расчета скорости коррозии для низколегированной стали 17Г1С.

М.5.1 Массовые доли основных составных химических элементов (марганца и железа) для листового проката из стали 17Г1С определяют по ГОСТ 19281, согласно которому эта сталь может включать в свой химический состав 98,4 % железа (Fe) и 1,6 % марганца (Mn) без учета других элементов с массовой долей меньше одного процента. Плотность стали составляет 7,85 г/см^3.

Валентность железа и марганца, соответствующую наиболее устойчивой степени окисления, принимают равной +2, атомный вес железа — 55,847, марганца — 54,938.

М.5.2 Проводя расчет значения электронного эквивалента $Q_{экв}$ по формуле (М.2), получают

$$Q_{экв} = \sum_{i=1}^{2} \frac{m_i k_i}{w_i} = \frac{2 \cdot 98{,}4}{55{,}847} + \frac{2 \cdot 1{,}6}{54{,}938} = 3{,}582. \qquad (М.3)$$

Примечание — Для наглядности расчет выполнен в предположении, что в процессе электрохимической реакции растворилось 100 г металла.

М.5.3 С учетом полученного в М.5.2 этого результата в соответствии с М.2 может быть вычислен эквивалентный вес, т.е. $W_{экв} = 100/Q_{экв} = 100/3,582 = 27,917$.

М.5.4 Проводя расчет по формуле (М.1) с учетом М.5.1 — М.5.3, получают следующее значение скорости коррозии

$$v_{кор} = C_{кор}\frac{i_{кор}}{\rho}W_{экв} = \frac{3,27 \cdot 10^{-3} \cdot 20,4 \cdot 27,917}{7,85} = 0,24 \text{ мм/год.} \quad (М.4)$$

Примечание — В расчете использовано значение плотности коррозионного тока $i_{кор} = I_{кор}/S = 27/1,33 = 20,4$ μA/см^2 для изготовленного из хромоникелевой стали круглого образца площадью $S = 1,33$ см^2 при коррозионном токе $I_{кор} = 27$ μA, соответствующем потенциалу коррозии $E_{кор} = 300$ мВ. Эти параметры использованы только для демонстрации последовательности расчета в приведенном методическом примере. Реальные значения $I_{кор}$, $E_{кор}$ и $i_{кор}$ для образцов из стали 17Г1С, определяемые экспериментально, могут несколько отличаться от использованных для данного примера значений.

Библиография

[1] Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 010—2011 — О безопасности машин и оборудования

[2] Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности» (утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору Российской Федерации от 14 ноября 2013 г. № 538)

[3] Постановление Правительства Российской Федерации от 16 февраля 2008 г. № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию»

[4] ГОСТ Р 56001—2014 — Арматура трубопроводная для объектов газовой промышленности. Общие технические условия

[5] ANSI/ASME B31.8S:2014 * — Система управления целостностью газопроводов (Managing System Integrity of Gas Pipelines)

[6] ANSI/NACE RP 0502:2010 * — Методология прямой оценки внешней коррозии трубопроводов (Pipeline External Corrosion Direct Assessment Methodology)

[7] ИСО 7539—6:2011 * (ISO 7539—6:2011) — Коррозия металлов и сплавов. Испытание на коррозию под напряжением. Часть 6. Приготовление и использование образцов, подвергнутых предварительному растрескиванию, для испытаний при постоянной нагрузке или постоянном смещении (Corrosion of metals and alloys. Stress corrosion testing. Part 6: Preparation and use of precracked specimens for tests under constant load or constant displacement)

[8] API 579—1/ASME FFS—1:2007 * — Оценка соответствия эксплуатационным требованиям (Fitness-for-Service)

[9] BS 7910:2013 * — Руководство по оцениванию допустимости дефектов металлических конструкций (Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures)

[10] ANSI/ASME B 31G:2009 * — Руководство по определению остаточной прочности корродированных трубопроводов (Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines)

[11] МЭК 61078:2006 * (IEC 61078:2006) — Методы анализа общей надежности. Метод блок-схемы и булев метод (Analysis techniques for de-pendability. Reliability block diagram and boolean methods)

[12] ГОСТ Р 27.301—2011 — Надежность в технике. Управление надежностью. Техника анализа безотказности. Основные положения

[13] ИСО 2394:2015 * (ISO 2394:2015) — Основные принципы надежности конструкций (General principles on reliability for structures)

[14] ИСО 16708:2006 * (ISO 16708:2006) — Нефтяная и газовая промышленность. Системы трубопроводного транспорта. Методы расчета надежности по предельному состоянию (Petroleum and natural gas industries. Pipeline transportation systems. Reliability based limit state methods)

[15] ИСО 12108:2012 * (ISO 12108:2012) — Материалы металлические. Испытание на усталость. Метод роста усталостных трещин (Metallic materials. Fatigue testing/Fatigue crack growth method)

[16] ИСО 148—1:2009 * (ISO 148—1:2009) — Материалы металлические. Испытание на удар по Шарпи на маятниковом копре. Часть 1. Метод испытания (Metallic materials. Charpy pendulum impact test. Part 1: Test method)

[17] ИСО 12135:2002 * (ISO 12135:2002) — Материалы металлические. Унифицированный метод испытания на определение вязкости разрушения под действием квазистатической нагрузки (Metallic materials — Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness)

[18] ЕН 1991—1—4:2005 * EN 1991—1—4:2005 — Европейские нормы 1: Воздействия на конструкции. Часть 1-4. Общие воздействия. Ветровые воздействия (Eurocode 1: Actions on structures. Part 1 — 4: General actions — Wind actions)

[19] ASTM G102—89 (2010) * — Стандартная методика расчета скоростей коррозии и связанных с ней данных по результатам электрохимических измерений (Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements)

* Оригиналы стандартов находятся в Федеральном информационном фонде технических регламентов и стандартов Российской Федерации (ФГУП «Стандартинформ»).

УДК 621.643:69.059.4

МКС 23.040.01,
75.180,
91.140.40

Ключевые слова: система газоснабжения, магистральная трубопроводная транспортировка газа, механическая безопасность, срок безопасной эксплуатации, линейная часть магистрального газопровода

Редактор *Н.А. Аргунова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *И.А. Королева*
Компьютерная верстка *А.А. Ворониной*

Сдано в набор 07.04.2017. Подписано в печать 03.05.2017. Формат 60×84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 8,84. Уч.-изд. л. 8,00. Тираж 31 экз. Зак. 691.
Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Издано и отпечатано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4.

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

gost.e-ecolog.ru