ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 70418— 2022

ТРУБНЫЕ И КАБЕЛЬНЫЕ ПРОХОДКИ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Расчет на прочность на стадии проектирования

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2023

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Акционерным обществом «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежаля» (АО «НИКИЭТ»)

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

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2022 г. № 1647-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

5 Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии не несет ответственности за патентную чистоту настоящего стандарта. Патентообладатель может заявить о своих правах и направить в Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии аргументированное предложение о внесении в настоящий стандарт поправки для указания информации о наличии в стандарте объектов патентного права и патентообладателе

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

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2023

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, определения, сокращения и обозначения 2
4 Общие положения 4
5 Номинальные допускаемые напряжения 6
6 Порядок определения напряжений и деформаций 7
6.1 Приведенные напряжения 7
6.2 Линеаризация напряжений 7
6.3 История изменения приведенных напряжений 9
6.4 Формирование расчетных циклов изменения напряжений 12
7 Классификация напряжений 13
8 Расчет на статическую прочность 15
9 Расчет на устойчивость 16
9.1 Основные положения расчета на устойчивость 16
9.2 Расчет типовых компонентов проходок 16
9.3 Расчет численными методами 21
10 Расчет на циклическую прочность 21
11 Расчет на прогрессирующее изменение формы и размеров 27
12 Расчет на внешние динамические воздействия 28
12.1 Расчет на сейсмические воздействия 28
12.2 Расчет на внешние динамические воздействия техногенного происхождения 30
13 Расчет на вибропрочность трубных проходок 31
Библиография 32

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ТРУБНЫЕ И КАБЕЛЬНЫЕ ПРОХОДКИ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Расчет на прочность на стадии проектирования

Tube and cable penetrant of nuclear plants. Strength verification analysis at the design stage

Дата введения — 2023—02—01

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт устанавливает требования к расчету на прочность на стадии проектирования трубных и кабельных проходок атомных станций, работающих при температурах, не вызывающих ползучесть, и подпадающих под действие федеральных норм и правил в области использования атомной энергии [1].

1.2 Настоящий стандарт может быть применен при проведении расчетов на прочность негерметичных проходок атомных станций.

1.3 Настоящий стандарт не регламентирует методы, применяемые для определения расчетных нагрузок, внутренних усилий, перемещений, напряжений и деформаций проходок.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ Р 59115.1 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Термины и определения

ГОСТ Р 59115.2 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Модуль упругости, температурный коэффициент линейного расширения, коэффициент Пуассона, модуль сдвига

ГОСТ Р 59115.3 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Кратковременные механические свойства конструкционных материалов

ГОСТ Р 59115.5 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчетные характеристики циклической и длительной циклической прочности конструкционных материалов

ГОСТ Р 59115.8 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчет по выбору основных размеров

ГОСТ Р 59115.9—2021 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Поверочный расчет на прочность

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

Издание официальное

датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины, определения, сокращения и обозначения

3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ Р 59115.1, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1

проходка (герметичная): Элемент герметичного ограждения, обеспечивающий пересечение строительных конструкций, ограждающих зону локализации аварии (с сохранением герметичности герметичного ограждения), трубопроводами, воздуховодами, электрическими кабелями, каналами ионизационных камер и т.д.

[[1], приложение № 2]

3.1.2 **кабельная проходка (герметичная):** Проходка, обеспечивающая пересечение электрическими кабелями строительных конструкций.

3.1.3 **трубная проходка (герметичная):** Проходка, обеспечивающая пересечение трубопроводами строительных конструкций.

3.1.4 **поверочный расчет (на прочность):** Расчет на прочность, проводимый при разработке (доработке) проекта и (или) изготовлении и эксплуатации объекта с целью проверки выполнения условий его прочности для выбранных размеров и материалов с учетом заданных режимов эксплуатации, ресурса, срока службы и конструктивных особенностей объекта.

3.1.5 **средняя температура по сечению:** Температура стенки проходки в рассматриваемом режиме ее нагружения, равная максимальному среднеарифметическому значению температур на ее наружной и внутренней поверхностях в одном сечении.

3.1.6 **упругопластический расчет:** Расчет по определению напряженно-деформированного состояния проходки в предположении упругопластического поведения материала, из которого она изготовлена.

3.1.7 **акселерограмма:** Зависимость ускорения колебаний от времени.

3.1.8 **максимальное расчетное землетрясение:** Землетрясение максимальной интенсивности на площадке атомной станции с повторяемостью один раз в 10 000 лет.

3.1.9 **проектное землетрясение:** Землетрясение максимальной интенсивности на площадке атомной станции с повторяемостью один раз в 1000 лет.

3.1.10 **вибропрочность:** Способность проходок сохранять прочность во время и после воздействия вибрации.

3.2 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

АС — атомная станция;
ГО — герметичное ограждение;
ЛП — линия приведения;
МКЭ — метод конечных элементов;
МРЗ — максимальное расчетное землетрясение;
НДС — напряженно-деформированное состояние;
ННУЭ — нарушение нормальных условий эксплуатации;
НУЭ — нормальные условия эксплуатации;
ПЗ — проектное землетрясение;
СП — сечение приведения;
УИ — условия испытаний;
УПА — условия проектной аварии.

3.3 Обозначения

В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

a — накопленное усталостное повреждение;
c — суммарная прибавка к толщине стенки, мм;

D_m — средний диаметр цилиндрической части компонента, мм;

D_a — наружный диаметр цилиндрической части компонента, мм;

E^T — модуль упругости при температуре T, МПа;

H_m — высота выпуклой части днища до срединной поверхности, мм;

K_{ef} — эффективный коэффициент концентрации условных упругих напряжений;

K_σ — теоретический коэффициент концентрации напряжений (далее — коэффициент концентрации);

L — расчетная длина оболочки, мм;

L_{kr} — критическая длина, мм;

$[N]$ — допускаемое число циклов нагружения компонента в эксплуатации;

$n_{0,2}$ — коэффициент запаса прочности по пределу текучести;

n_m — коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению;

n_N — коэффициент запаса прочности по числу циклов при расчетах на циклическую прочность;

n_σ — коэффициент запаса прочности по условному местному приведенному напряжению при расчетах на циклическую прочность;

p_a — наружное давление, МПа;

p_{kr} — критическое давление, МПа;

$[p_a]$ — допускаемое наружное давление, МПа;

R_m^T — минимальное значение временного сопротивления при температуре T, МПа;

$R_{p0,2}^T$ — минимальное значение условного предела текучести при температуре T, МПа;

R_{-1}^T — предел выносливости при симметричном цикле осевого растяжения-сжатия при температуре T, МПа;

R_{pe}^T — предел пропорциональности при температуре T, МПа;

s — номинальная толщина стенки компонента, мм;

T — температура, K (°C);

$\langle T \rangle$ — средняя температура по сечению, K (°C);

t — время, ч;

Z^T — относительное сужение поперечного сечения образца после разрыва при температуре T, %;

α — коэффициент линейного температурного расширения, K^{-1};

ε — деформация;

σ — напряжение, МПа;

σ_b — общие изгибные напряжения, МПа;

σ_c — напряжение сжатия, МПа;

σ_m — общие мембранные напряжения, МПа;

σ_{bL} — местные изгибные напряжения, МПа;

σ_{mL} — местные мембранные напряжения, МПа;

σ_T — общие температурные напряжения, МПа;

σ_{TL} — местные температурные напряжения, МПа;

σ_{kr} — критическое напряжение сжатия, МПа;

$(\sigma)_1$ — группа приведенных напряжений в проходках, МПа;

$(\sigma)_2$ — группа приведенных напряжений в проходках, МПа;

$(\sigma)_{3w}$ — группа приведенных напряжений в болтах и шпильках, МПа;

$(\sigma)_{4w}$ — группа приведенных напряжений в болтах и шпильках, МПа;

(σ), $(\sigma)_{ij}$, $(\sigma)_{ik}$, $(\sigma)_{jk}$ — приведенные напряжения без учета концентрации, МПа;

$(\sigma)_{max}$ — максимальное приведенное напряжение, МПа;

$(\sigma)_R$ — размах приведенных напряжений в проходках, МПа;

(σ_{aF}) — амплитуда условных упругих приведенных напряжений с учетом концентрации напряжений, МПа;

$(\sigma_{aF})_w$ — амплитуда местного условного упругого приведенного напряжения в болте (шпильке), рассчитанная с учетом концентрации напряжений в резьбе, МПа;

σ_i, σ_j, σ_k — напряжение на главных площадках i, j, k, МПа;

$(\sigma_F)_{ij}$, $(\sigma_F)_{jk}$, $(\sigma_F)_{ik}$, (σ_F) — местные условные упругие приведенные напряжения, рассчитанные с учетом концентрации напряжений, МПа;

$(\sigma_F)_{max}$ — максимальное условное упругое приведенное напряжение расчетного цикла, МПа;

$(\sigma_F^*)_{max}$ — максимальное условное упругое приведенное напряжение, МПа;

$(\sigma_L)_{ij}$, $(\sigma_L)_{jk}$, $(\sigma_L)_{ik}$, (σ_L) — местные приведенные напряжения, рассчитанные с учетом теоретического коэффициента концентрации напряжений, МПа;

$(\sigma_s)_1$ — группа приведенных общих мембранных напряжений с учетом сейсмических воздействий, МПа;

$(\sigma_s)_2$ — группа приведенных мембранных и общих изгибных напряжений с учетом сейсмических воздействий, МПа;

$(\sigma_s)_{mw}$ — группа приведенных напряжений растяжения в болтах и шпильках, вызываемых механическими нагрузками и сейсмическими воздействиями, МПа;

$(\sigma_s)_{4w}$ — группа приведенных напряжений в болтах и шпильках, вызываемых механическими нагрузками, температурными и сейсмическими воздействиями, МПа;

$(\sigma_s)_s$ — напряжения смятия с учетом сейсмических воздействий, МПа;

$[\sigma]$ — номинальное допускаемое напряжение, МПа;

$[\sigma]_w$ — номинальное допускаемое напряжение для болтов и шпилек, МПа;

$[\sigma]_c$ — номинальное допускаемое напряжение корпусов страховочных и защитных оболочек, МПа;

$[\sigma_c]$ — допускаемое напряжение сжатия, МПа;

τ — касательные напряжения среза в компонентах, МПа;

τ_p — напряжения среза резьбы, МПа;

$(\tau_s)_s$ — касательные напряжения среза с учетом сейсмических воздействий, МПа;

φ_s — коэффициент снижения циклической прочности сварного соединения.

4 Общие положения

4.1 На рисунке 4.1 представлена принципиальная схема проходки. Расчет на прочность корпуса проходки (позиция *1* на рисунке 4.1) и защитной трубы проходки (позиция *2* на рисунке 4.1) проводят в соответствии с положениями настоящего стандарта.

4.2 Расчет на прочность трубы, транспортирующей среду (позиция *3* на рисунке 4.1), проводят согласно ГОСТ Р 59115.9.

4.3 Расчеты на прочность облицовки, закладных деталей и других компонентов, относящихся к ГО (позиции *4*, *5* на рисунке 4.1), проводят согласно документам, устанавливающим требования к расчетам на прочность строительных конструкций.

4.4 Расчетные оценки прочности, выполняемые при расчете проходок на стадии проектирования, проводят по следующим предельным состояниям:

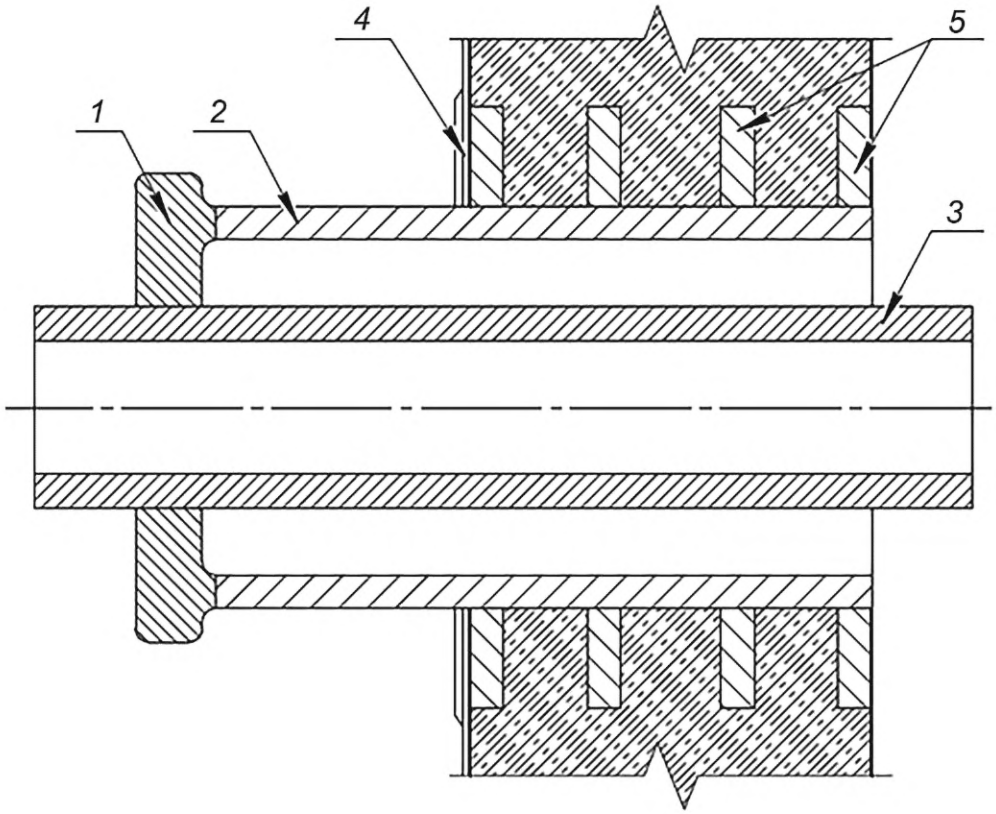
- кратковременное разрушение;
- возникновение пластической деформации по всей площади какого-либо из возможных сечений или только по части площади сечения, но по всей толщине стенки;
- возникновение трещин при циклическом нагружении;
- потеря устойчивости;
- достижение предельных изменений формы и (или) размеров, и (или) значения накопленной пластической деформации.

4.5 Расчет на прочность проходок состоит из поверочного расчета и расчета по выбору основных размеров проходки по ГОСТ Р 59115.8. Поверочный расчет проходок состоит из следующих расчетов:

- расчет на статическую прочность;
- расчет на устойчивость;
- расчет на циклическую прочность;
- расчет на прогрессирующее изменение формы и размеров;
- расчет на внешние динамические воздействия;
- расчет на вибропрочность.

4.6 При проведении расчета на прочность на стадии проектирования следует использовать номинальные значения размеров и толщин стенок компонентов проходки, кроме расчета на устойчивость, который проводят по минимальным размерам, определяемым с учетом допусков и возможных утонений за срок службы проходки.

4.7 При расчете учитывают все нагрузки (включая вызванные температурными и радиационными воздействиями, при их наличии) и рассматривают все режимы эксплуатации и испытаний, регламентированные проектом АС.



1 — корпус проходки[1)]; *2* — защитная труба проходки; *3* — труба, транспортирующая среду; *4* — облицовка ГО; *5* — закладные детали ГО (анкера, шпангоуты и т.д.)

Рисунок 4.1 — Принципиальная схема проходки (герметичная часть АС — слева)

4.8 Расчет на статическую прочность проводят для определения напряжений при всех значениях нагрузок и температур во всех расчетных режимах и сопоставления полученных значений с допускаемыми, определенными по предельным состояниям, кратковременное разрушение и пластическая деформация по всему сечению проходки.

4.9 Расчет на устойчивость заключается в определении допускаемых нагрузок или допускаемой длительности эксплуатации, превышение которых вызывает возможность потери устойчивости (включая вызванные внешними динамическими, температурными и радиационными воздействиями, при их наличии).

4.10 Расчет на циклическую прочность выполняется на основе анализа общих и местных напряжений с целью исключения появления трещин при нагружении проходки циклически изменяющимися нагрузками и температурными воздействиями. При оценке циклической прочности за пределами упругости используют условное упругое напряжение. Это напряжение должно быть равно произведению упругопластической деформации в рассматриваемой точке на модуль упругости.

Допускаемые амплитуды напряжений определяют исходя из характеристик циклической прочности с введением запасов прочности по числу циклов и по напряжениям.

В результате расчета на циклическую прочность определяют допускаемое число повторений эксплуатационных режимов для заданных повторных эксплуатационных тепловых и механических нагрузок или допускаемые тепловые и механические нагрузки для заданного числа повторений эксплуатационных режимов и срока службы проходки.

4.11 Расчет на прогрессирующее изменение формы и размеров проводят на основе анализа НДС с целью исключения недопустимых изменений формы и размеров ее компонентов.

[1)] Корпус проходки показан условно, он может содержать различные элементы, такие как: компенсаторы, сильфоны, сферические и конические переходы, фланцы и т.д.

Предельные допускаемые изменения формы и размеров компонентов проходок в результате процесса накопления необратимых пластических деформаций устанавливаются проектной (конструкторской) организацией в каждом частном случае с учетом назначения и условий работы проходки.

4.12 Расчет на внешние динамические воздействия включает расчет на сейсмические воздействия, а также расчеты на воздействие воздушной ударной волны и на падение летального аппарата на строительные конструкции АС.

4.13 Целью расчета на вибропрочность является уменьшение вибрационного воздействия на проходки путем отстройки их частот собственных колебаний от возмущающих частот источников вибрации, а также оценка допустимости вибрационных нагрузок.

4.14 Приведенные напряжения, сопоставляемые с допускаемыми значениями, определяют по теории наибольших касательных напряжений Треска или, в оговоренных в настоящем стандарте случаях, энергетической теории Мизеса. Расчет напряжений без учета концентрации проводят в предположении линейно-упругого поведения материала, за исключением особо оговоренных в настоящем стандарте случаев.

4.15 Оценки прочности выполняются путем сопоставления полученных в результате поверочного расчета величин (напряжения, числа циклов, время нагружения, нагрузки, деформации или перемещения) с соответствующими допускаемыми значениями, зависящими от режима работы и категории действующих напряжений.

4.16 Снижение характеристик прочности под воздействием эксплуатационных факторов должно учитываться в расчете в соответствии с 4.20 или быть обосновано в проектной (конструкторской) документации.

4.17 Изменение характеристик пластичности и сопротивления усталостному разрушению вследствие влияния эксплуатационных условий, в том числе облучения, учитывают при проведении соответствующих расчетов с использованием этих характеристик.

4.18 Все расчеты проводят с учетом всех расчетных нагрузок и воздействий, в том числе:

- внутреннего давления, нагрузок от присоединенных трубопроводов;
- нагрузок от затяга болтов и шпилек;
- весовых нагрузок (собственного веса проходки и ее содержимого, веса присоединенных изделий, теплоизоляции);
- температурных воздействий;
- внешних динамических нагрузок, включая нагрузки от сейсмических и динамических воздействий техногенного происхождения (с учетом смещения строительных конструкций, в которых закреплена проходка);

а также всех расчетных режимов нагружения проходок. В один расчетный режим может быть включена группа режимов, если внешние нагрузки и температуры этих режимов не отличаются более чем на 5 % от принятых расчетных значений (значение температуры — в °С).

4.19 Основными расчетными режимами для проходок являются:

- режим затяга шпилек и болтов;
- режим пуска;
- стационарный режим;
- переходный режим;
- режим останова;
- условия испытаний;
- нарушение нормальных условий эксплуатации;
- условия проектной аварии.

Категории расчетных режимов НУЭ, ННУЭ и УПА для проходок должны быть определены на основе анализа их условий работы при нормальной эксплуатации, при нарушениии нормальной эксплуатации и при проектной аварии АС.

4.20 При поверочном расчете следует использовать значения физических и механических характеристик конструкционных материалов согласно требованиям ГОСТ Р 59115.2 и ГОСТ Р 59115.3.

4.21 При проведении расчета все напряжения в компонентах проходок разделяют на категории. Напряжения, относящиеся к различным категориям, объединяют в группы категорий напряжений, которые сопоставляют с допускаемыми напряжениями.

5 Номинальные допускаемые напряжения

5.1 Номинальные допускаемые напряжения для проходок следует определять по механическим характеристикам конструкционных материалов при температуре $\langle T \rangle$.

5.2 Номинальные допускаемые напряжения определяются по значениям кратковременных механических характеристик конструкционных материалов.

5.3 Номинальное допускаемое напряжение для компонентов проходок, за исключением болтов, шпилек, а также частей защитных труб проходок, находящихся вне ГО, определяют по формуле

$$[\sigma] = \min\left(\frac{R_{p0,2}^{\langle T\rangle}}{n_{0,2}}; \frac{R_m^{\langle T\rangle}}{n_m}\right), \tag{5.1}$$

где $n_{0,2}$ = 1,5, n_m = 2,6.

5.4 Номинальное допускаемое напряжение для болтов и шпилек определяют по формуле

$$[\sigma]_w = \frac{R_{p0,2}^{\langle T\rangle}}{n_{0,2}}, \tag{5.2}$$

где $n_{0,2}$ = 2.

5.5 Номинальное допускаемое напряжение для частей защитных труб проходок, находящихся за пределами оболочки ГО или между защитными оболочками для ГО, выполненных в виде двойных защитных оболочек, определяют по формуле

$$[\sigma]_c = \min\left(\frac{R_{p0,2}^{\langle T\rangle}}{n_{0,2}}; \frac{R_m^{\langle T\rangle}}{n_m}\right), \tag{5.3}$$

где $n_{0,2}$ = 1,07, n_m = 1,85.

6 Порядок определения напряжений и деформаций

6.1 Приведенные напряжения

6.1.1 Приведенное напряжение по теории максимальных касательных напряжений Треска определяют по формуле

$$(\sigma) = \sigma_1 - \sigma_3, \tag{6.1}$$

где σ_1 — алгебраически наибольшее главное напряжение, МПа;

σ_3 — алгебраически наименьшее главное напряжение, МПа.

6.1.2 Приведенное напряжение по энергетической теории Мизеса определяют по формуле

$$(\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\left(\sigma_x - \sigma_y\right)^2 + \left(\sigma_y - \sigma_z\right)^2 + \left(\sigma_z - \sigma_x\right)^2 + 6\left(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2\right)}, \tag{6.2}$$

где σ_x, σ_y, σ_z, σ_{xy}, σ_{yz}, σ_{zx} — компоненты тензора напряжений {σ}, МПа,

или по формуле

$$(\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\left(\sigma_1 - \sigma_2\right)^2 + \left(\sigma_2 - \sigma_3\right)^2 + \left(\sigma_3 - \sigma_1\right)^2}, \tag{6.3}$$

где σ_1, σ_2, σ_3 — главные напряжения, МПа.

6.2 Линеаризация напряжений

6.2.1 Общие положения линеаризации напряжений

6.2.1.1 Линеаризацию распределения напряжений проводят для выделения составляющих категорий напряжений из напряженного состояния общего вида. Линеаризация может выполняться как по всему сечению компонента проходки, так и по толщине стенки (т.е. вдоль линии). Например, для выделения общих изгибных напряжений в трубе выполняют линеаризацию по всему сечению, а для определения местных мембранных и местных изгибных напряжений следует выполнять линеаризацию по толщине стенки. Сечение, по которому проводят линеаризацию, называется СП. Линия, по которой проводят линеаризацию, называется ЛП.

СП следует проводить через зону компонента проходки, где ожидается первое появление пластических деформаций. Сечение следует проводить перпендикулярно срединной поверхности проходок.

ЛП следует проводить через стенку компонента проходки, перпендикулярно ее внутренней, внешней или срединной поверхности. Примеры выбора ЛП приведены на рисунке 6.1.

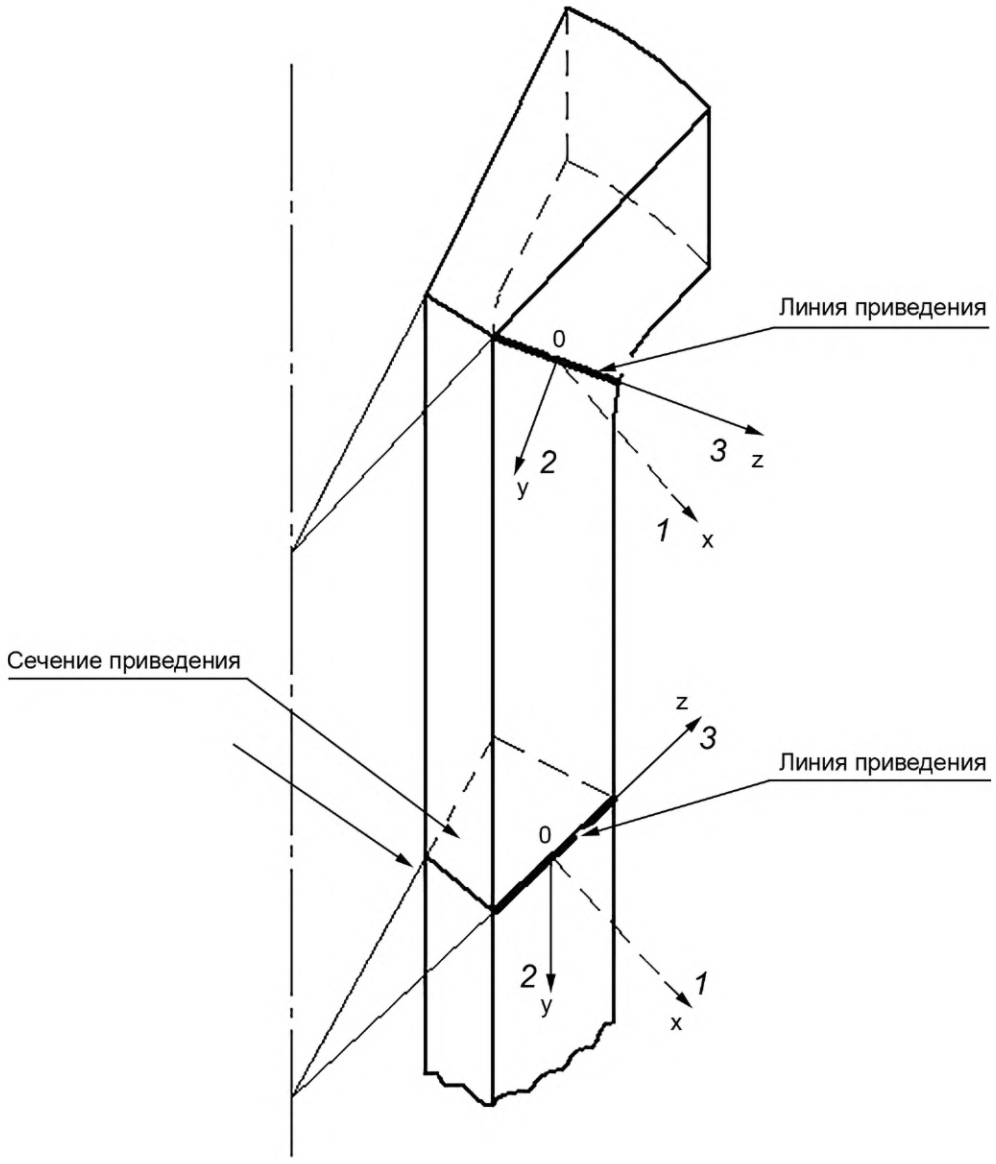


Рисунок 6.1 — Пример выбора СП и ЛП

6.2.1.2 При использовании балочных или оболочечных расчетных схем с линейным распределением напряжений по сечению линеаризацию не проводят.

6.2.1.3 Напряженное состояние в каждой точке СП и ЛП характеризуется тензором напряжений $\{\sigma\}$. Целью процедуры линеаризации является нахождение линейного распределения напряжений по СП или ЛП, статически эквивалентного распределению, полученному при расчете НДС в проходке, т. е. имеющего такой же главный вектор силы и главный момент.

По компонентам линеаризованных напряжений в соответствии с требованиями подраздела 6.1 определяют приведенные напряжения категорий σ_m, σ_{mL} (мембранные) и σ_b, σ_{bL} (изгибные). Для определения приведенных напряжений категорий $\sigma_m \oplus \sigma_b$ (суммарные мембранные и изгибные) компоненты линеаризованных средних и изгибных напряжений алгебраически суммируют.

6.2.2 Линеаризация напряжений по сечению приведения

В случае если СП — плоское, то напряженное состояние в каждой точке сечения можно представить как сумму средних, изгибных и нелинейных составляющих напряжений $\sigma_{m\ \alpha\beta} + \sigma_{b\ \alpha\beta} + \sigma_{nl\ \alpha\beta}$. При этом величины b и a, характеризующие среднюю (мембранную) и изгибную составляющие напряжений, постоянны для всех точек СП:

$$\sigma_{(m+b)\ \alpha\beta} = ax + b, \tag{6.4}$$

где b и a — коэффициенты, определяющие среднюю (мембранную) и изгибную составляющие;

x — расстояние от центральной оси, относительно которой происходит общий изгиб СП, мм.

Средние (мембранные) составляющие напряжений постоянны для всех точек СП и равны:

$$\sigma_{m\,\alpha\beta} = b = \frac{1}{A}\int_A \sigma_{\alpha\beta} dA, \tag{6.5}$$

где A — площадь СП, мм^2.

Изгибные составляющие напряжений линейно изменяются по сечению и равны:

$$\sigma_{b\,\alpha\beta} = ax = \frac{x}{I}\int_A \sigma_{\alpha\beta} x\, dA, \tag{6.6}$$

где $I = \int_A x^2 dA$ — момент инерции СП относительно центральной оси, мм^2.

Нелинейные составляющие напряжений определяют как

$$\sigma_{nl\,\alpha\beta} = \sigma_{\alpha\beta} - \sigma_{(m+b)\alpha\beta}. \tag{6.7}$$

6.2.3 Линеаризация напряжений по линии приведения

Напряженное состояние в каждой точке, лежащей на ЛП, также представляют (см. рисунок 6.2) как сумму средних, изгибных и нелинейных составляющих напряжений $\sigma_{m\,\alpha\beta} + \sigma_{b\,\alpha\beta} + \sigma_{nl\,\alpha\beta}$. При этом коэффициенты, определяющие мембранную и изгибную составляющие напряжений, постоянны для всех точек ЛП:

$$\sigma_{(m+b)\,\alpha\beta} = ax + b, \tag{6.8}$$

где b и a — коэффициенты, характеризующие мембранную и изгибную составляющие;

x — расстояние от срединной поверхности до рассматриваемой точки, лежащей на ЛП, мм.

Средние (мембранные) составляющие напряжений постоянны для всех точек ЛП и равны:

$$\sigma_{m\,\alpha\beta} = b = \frac{1}{s}\int_{-s/2}^{+s/2} \sigma_{\alpha\beta} dx, \tag{6.9}$$

где s — длина ЛП, мм.

Изгибные составляющие напряжений линейно изменяются по ЛП и равны:

$$\sigma_{b\ \alpha\beta} = ax = \frac{12x}{s^3}\int_{-s/2}^{+s/2} \sigma_{\alpha\beta} x\, dx, \tag{6.10}$$

где x — расстояние от точки, лежащей на ЛП, до срединной поверхности, мм.

На концах ЛП изгибные напряжения принимают значения:

$$\sigma_{b\ \alpha\beta} = \pm\frac{6}{s^2}\int_{-s/2}^{+s/2} \sigma_{\alpha\beta}\ x\, dx. \tag{6.11}$$

Нелинейные составляющие напряжений определяют как

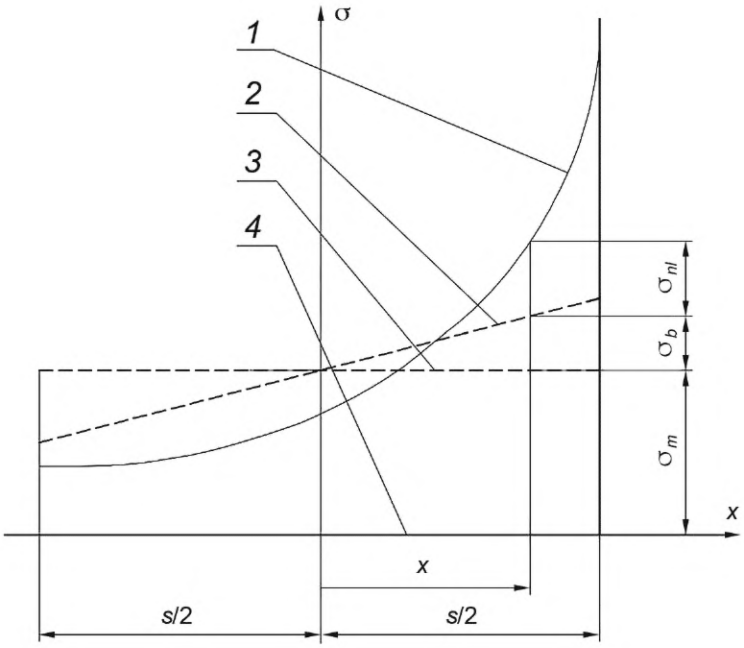
$$\sigma_{nl\,\alpha\beta} = \sigma_{\alpha\beta} - \sigma_{(m+b)\,\alpha\beta}. \tag{6.12}$$

6.3 История изменения приведенных напряжений

6.3.1 Для компонентов проходки на основе анализа условий эксплуатации, регламентированных проектом АС, устанавливают типовую физически возможную последовательность во времени режимов нагружения, включая условия испытаний и нарушения нормальных условий эксплуатации.

Для принятой последовательности режимов нагружения упругим расчетом определяют НДС в рассматриваемой зоне проходки в расчетные моменты времени t_1, t_2, …, t_l, …, t_m. Расчетные моменты времени следует выбирать таким образом, чтобы нагрузки и воздействия (включая температурные) на проходку достигали своих экстремальных значений. Расчетом должны быть определены экстремальные значения компонент тензора напряжений в рассматриваемой зоне в расчетные моменты времени.

6.3.2 Расчет истории изменения приведенных напряжений с использованием энергетической теории Мизеса проводят в порядке, изложенном в 6.3.2.1—6.3.2.5.



1 — компонент тензора напряжений; *2* — изгибная составляющая компонента тензора напряжений; *3* — мембранная составляющая компонента тензора напряжений; *4* — линия приведения

Рисунок 6.2 — Разделение суммарных напряжений на среднюю, изгибную и нелинейную составляющие для ЛП

6.3.2.1 Приведенные напряжения (σ), (σ_L) определяют по суммам приращений приведенных напряжений, определяемых, в свою очередь, по приращениям компонент напряжений.

Приращения компонент тензора напряжений без учета концентрации от момента времени t_l до момента t_n определяют по формулам:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{x(l,n)} &= \sigma_{x(l)} - \sigma_{x(n)},\ \Delta\sigma_{y(l,n)} = \sigma_{y(l)} - \sigma_{y(n)};\\ \Delta\sigma_{z(l,n)} &= \sigma_{z(l)} - \sigma_{z(n)},\ \Delta\sigma_{xy(l,n)} = \sigma_{xy(l)} - \sigma_{xy(n)};\\ \Delta\sigma_{yz(l,n)} &= \sigma_{yz(l)} - \sigma_{yz(n)},\ \Delta\sigma_{zx(l,n)} = \sigma_{zx(l)} - \sigma_{zx(n)}.\end{aligned} \tag{6.13}$$

Приращения компонент тензора местных напряжений от момента времени t_l до момента t_n определяют по формулам:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{Lx(l,n)} &= \sigma_{Lx(l)} - \sigma_{Lx(n)},\ \Delta\sigma_{Ly(l,n)} = \sigma_{Ly(l)} - \sigma_{Ly(n)};\\ \Delta\sigma_{Lz(l,n)} &= \sigma_{Lz(l)} - \sigma_{Lz(n)},\ \Delta\sigma_{Lxy(l,n)} = \sigma_{Lxy(l)} - \sigma_{Lxy(n)};\\ \Delta\sigma_{Lyz(l,n)} &= \sigma_{Lyz(l)} - \sigma_{Lyz(n)},\ \Delta\sigma_{Lzx(l,n)} = \sigma_{Lzx(l)} - \sigma_{Lzx(n)}.\end{aligned} \tag{6.14}$$

6.3.2.2 Приращение приведенных напряжений без учета концентрации напряжений от момента времени t_l до момента t_n определяют по формуле

$$\Delta(\sigma)_{l,n} = \frac{1}{\sqrt{2}}\Big[\left(\Delta\sigma_{x(l,n)} - \Delta\sigma_{y(l,n)}\right)^2 + \left(\Delta\sigma_{y(l,n)} - \Delta\sigma_{z(l,n)}\right)^2 + \left(\Delta\sigma_{z(l,n)} - \Delta\sigma_{x(l,n)}\right)^2 + 6\left(\Delta\sigma^2_{xy(l,n)} + \Delta\sigma^2_{yz(l,n)} + \Delta\sigma^2_{zy(l,n)}\right)\Big]^{1/2}. \tag{6.15}$$

Приращение приведенных напряжений с учетом концентрации напряжений от момента времени t_l до момента t_n определяют по формуле

$$\Delta(\sigma_L)_{l,n} = \frac{1}{\sqrt{2}}\Big[\left(\Delta\sigma_{Lx(l,n)} - \Delta\sigma_{Ly(l,n)}\right)^2 + \left(\Delta\sigma_{Ly(l,n)} - \Delta\sigma_{Lz(l,n)}\right)^2 + \left(\Delta\sigma_{Lz(l,n)} - \Delta\sigma_{Lx(l,n)}\right)^2 + 6\left(\Delta\sigma^2_{Lxy(l,n)} + \Delta\sigma^2_{Lyz(l,n)} + \Delta\sigma^2_{Lzy(l,n)}\right)\Big]^{1/2}. \tag{6.16}$$

6.3.2.3 Историю изменения приведенных напряжений без учета концентрации (σ) формируют в следующем порядке:

1) Для начального момента времени t_0 $(\sigma)_0$ равно нулю или постоянному значению, например напряжениям от веса или монтажного натяга.

2) Для первого расчетного момента времени t_1 (при $l = 1$)

$$(\sigma)_l = (\sigma)_0 + \lambda_1 \cdot \Delta(\sigma)_{1,0}, \tag{6.17}$$

где $\lambda_1 = 1$.

3) Для последующих расчетных моментов t_l ($l = 2, \ldots, m - 1$) параметр λ сохраняет знак $\lambda_l = \lambda_{l-1}$, если выполняется условие

$$\begin{cases} \Delta(\sigma)_{l,h} \geq \Delta(\sigma)_{l-1,h} \\ \Delta(\sigma)_{l,h} \geq \Delta(\sigma)_{l,l-1} \end{cases}, \tag{6.18}$$

в противном случае параметр λ меняет знак $\lambda_l = -\lambda_{l-1}$ и индекс h принимается равным $h = l - 1$. Значение приведенного напряжения следует вычислять по формуле

$$(\sigma)_l = (\sigma)_h + \lambda_l \cdot \Delta(\sigma)_{l,h}. \tag{6.19}$$

Пример формирования истории приведенного напряжения (σ) показан на рисунке 6.3.

6.3.2.4 Историю изменения местных приведенных напряжений с учетом концентрации (σ_L) формируют в следующем порядке:

1) Для начального момента времени $t_0(\sigma_L)_0$ равно нулю или постоянному значению, например напряжениям от веса или монтажного натяга. Индекс h момента времени реверса приведенного напряжения принимается равным нулю, т. е. $(\sigma_L)_h = (\sigma_L)_0$.

2) Для первого расчетного момента времени t_1 (при $l = 1$)

$$(\sigma_L)_1 = (\sigma_L)_0 + \lambda_1 \cdot \Delta(\sigma_L)_{1,0}, \tag{6.20}$$

где $\lambda_1 = \begin{cases} 1, \text{ если } \Delta\sigma_{Lx(1,0)} + \Delta\sigma_{Ly(1,0)} + \Delta\sigma_{Lz(1,0)} \geq 0 \\ -1, \text{ если } \Delta\sigma_{Lx(1,0)} + \Delta\sigma_{Ly(1,0)} + \Delta\sigma_{Lz(1,0)} < 0 \end{cases}$.

3) Для последующих расчетных моментов t_l ($l = 2, \ldots, m - 1$) параметр λ сохраняет знак $\lambda_l = \lambda_{l-1}$, если выполняется условие

$$\begin{cases} \Delta(\sigma_L)_{l,h} \geq \Delta(\sigma_L)_{l-1,h} \\ \Delta(\sigma_L)_{l,h} \geq \Delta(\sigma_L)_{l,l-1} \end{cases}, \tag{6.21}$$

в противном случае параметр λ меняет знак $\lambda_l = -\lambda_{l-1}$ и индекс h принимается равным $h = l - 1$. Значение приведенного напряжения следует вычислять по формуле

$$(\sigma_L)_l = (\sigma_L)_h + \lambda_l \cdot \Delta(\sigma_L)_{l,h}. \tag{6.22}$$

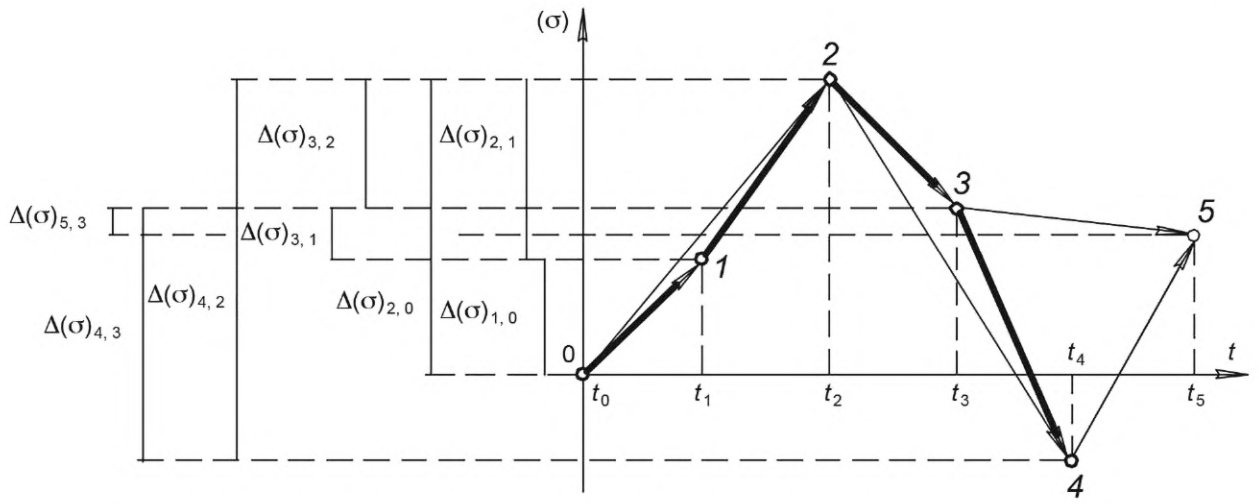


Рисунок 6.3 — Пример формирования истории приведенного напряжения (σ) с использованием теории Мизеса

6.3.2.5 Размах напряжений $(\sigma)_R$ определяют по истории изменения приведенных напряжений (σ) для принятой последовательности режимов нагружения НУЭ по формуле

$$(\sigma)_R = (\sigma)_{max} - (\sigma)_{min}, \quad (6.23)$$

где $(\sigma)_{max}$, $(\sigma)_{min}$ — алгебраически максимальные и минимальные приведенные напряжения, соответственно, для оцениваемой истории напряжений.

6.4 Формирование расчетных циклов изменения напряжений

6.4.1 Формирование расчетных циклов напряжений следует проводить в соответствии с принципом наибольших размахов: каждый из последовательно выделяемых из истории изменения напряжений циклов должен иметь наибольший возможный размах (амплитуду).

6.4.2 Размах приведенного напряжения $\Delta(\sigma_F)$ в расчетном цикле определяют по формуле

$$\Delta(\sigma_F) = (\sigma_F)_{max} - (\sigma_F)_{min}, \quad (6.24)$$

где $(\sigma_F)_{max}$, $(\sigma_F)_{min}$ — алгебраически максимальное и минимальное значения приведенного напряжения, соответственно, для выделенного расчетного цикла.

Амплитуду приведенного напряжения (σ_{aF}) в расчетном цикле определяют как половину размаха.

6.4.3 Допускается определять амплитуды циклов местного условного упругого напряжения (σ_{aF}) на основе истории изменения приведенных напряжений без учета концентрации (σ), определенной по теории Мизеса согласно 6.3.2.3. При этом физически возможная последовательность нагружения не требуется. Данный подход подойдет при условии

$$\Delta(\sigma)_k \le 2R^T_{p0,2},\ k = 1, 2, ..., n, \quad (6.25)$$

где $\Delta(\sigma)_k$ — размах k-го замкнутого цикла приведенного напряжения (σ), сформированного согласно положениям 6.4.1;

T — максимальная температура цикла, °С.

6.4.4 Размахи приведенных напряжений с учетом концентрации $\Delta(\sigma_L)$ определяют в предположении упругого поведения материала по формуле

$$\Delta(\sigma_L)_k = K_{(\sigma)}\Delta(\sigma)_k,\ k = 1, 2, ..., n, \quad (6.26)$$

где $K_{(\sigma)}$ — коэффициент концентрации приведенных напряжений.

$K_{(\sigma)}$ принимают равным наибольшему из значений коэффициента концентрации для мембранных и для изгибных номинальных напряжений. При отсутствии концентрации напряжений $K_{(\sigma)} = 1$.

6.4.5 Местное условное упругое напряжение (σ_F) в резьбе болтов и шпилек определяют в соответствии с ГОСТ Р 59115.9—2021 (пункт 6.5.2). Напряжение (σ_L) определяют с учетом коэффициента концентрации K_σ, вычисляемого для метрической резьбы по формуле

$$K_\sigma = K_s\left(1 + 1{,}57\sqrt{\frac{s_z}{R}}\right), \quad (6.27)$$

где K_s — коэффициент, зависящий от типа гайки;

s_z — шаг резьбы, мм;

R — радиус закругления в основании витка, мм.

Для стандартной гайки сжатия коэффициент K_s равен 1,0, а для гайки растяжения-сжатия при длине растянутой зоны, равной диаметру резьбовой части, $K_s = 0{,}75$.

Коэффициент K_s для промежуточных длин растянутой зоны гайки растяжения-сжатия устанавливают линейной интерполяцией.

При увеличении высоты гайки сжатия от 0,8 диаметра резьбовой части до 1,25 и выше K_s уменьшают от 1,0 до 0,9.

При расчете резьбовой части шпильки или болта, вворачиваемой во фланец, учитывают влияние на K_s различия механических свойств материала шпильки или болта и фланца. При этом при длине ввернутой части шпильки, равной ее диаметру и более, коэффициент $K_s = 0{,}75$.

В случае различия значений предела прочности материалов шпильки или болта R^T_{mw} и фланца R^T_{mf} коэффициент концентрации определяют по формуле

$$K_\sigma = K_s K_w \left(1 + 1{,}57\sqrt{\frac{s_z}{R}}\right), \qquad (6.28)$$

где значение коэффициента K_w определяют по таблице 6.1.

Таблица 6.1 — Значения коэффициента K_w

R^T_{mf}/R^T_{mw}	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
K_w	0,7	0,8	0,87	0,95	0,97	1,0

6.4.6 Расчетные амплитуды местного условного упругого напряжения (σ_{aF}) определяют по формуле

$$(\sigma_{aF})_k = \begin{cases} 0{,}5 \cdot \Delta(\sigma_L)_k, \text{ если } \Delta(\sigma_L)_k \le 2R^T_{p0,2} \\ \dfrac{[\Delta(\sigma_L)_k]^2}{4R^T_{p0,2}}, \text{ если } \Delta(\sigma_L)_k > 2R^T_{p0,2} \end{cases}, \; k = 1, 2, ..., n, \qquad (6.29)$$

где T — максимальная температура цикла, °С.

7 Классификация напряжений

7.1 При проведении расчета на прочность напряжения в компонентах проходки подразделяют на категории. Используют следующие основные категории напряжений, определяемые из упругого расчета:

- σ_m — общие мембранные напряжения;
- σ_{mL} — местные мембранные напряжения;
- σ_b — общие изгибные напряжения;
- σ_{bL} — местные изгибные напряжения;
- σ_T — общие температурные напряжения;
- σ_{TL} — местные температурные напряжения.

7.1.1 σ_m — общие мембранные напряжения, вызываемые действием механических нагрузок, нормальные к рассматриваемому сечению, распределенные по всему сечению и равные среднему значению напряжений в данном сечении. Общие мембранные напряжения должны определяться вне зон концентрации напряжений.

7.1.2 σ_{mL} — местные мембранные напряжения, вызываемые действием механических нагрузок. Мембранные напряжения относят к категории местных, если размеры зоны, в пределах которой напряжения превосходят 1,1[σ], не превышают $0{,}7\sqrt{D(s-c)}$ и эта зона расположена не ближе чем на $1{,}7\sqrt{D(s-c)}$ к другой области, где напряжения превышают [σ].

7.1.3 σ_b — общие изгибные напряжения, вызываемые действием давления и механических нагрузок, меняющиеся от максимального положительного значения до минимального отрицательного значения по всему сечению и приводящие к изгибу корпуса сосуда или трубопровода в целом.

7.1.4 σ_{bL} — местные изгибные напряжения, вызываемые действием краевых сил и моментов от механических нагрузок.

7.1.5 σ_T — общие температурные напряжения, возникающие от неравномерного распределения температур по объему компонента или из-за различия коэффициентов линейного расширения материалов, приводящие в предельном случае к недопустимым остаточным изменениям формы и размеров проходки.

7.1.6 σ_{TL} — местные температурные напряжения, возникающие от неравномерного распределения температур по объему компонента или из-за различия коэффициентов линейного расширения материалов, которые не могут вызывать недопустимых остаточных изменений формы и размеров проходки.

7.1.7 σ_{mw} — средние напряжения растяжения по сечению болта или шпильки, вызываемые механическими нагрузками (с учетом или без учета затяга).

7.1.8 τ_{sw} — напряжения кручения в болтах и шпильках.

7.1.9 σ_L — местные напряжения с учетом концентрации напряжений.

7.2 Из категорий напряжений формируют расчетные группы категорий напряжений, которые используют для оценки прочности:

$(\sigma)_1$ — группа приведенных напряжений от механических нагрузок, определяемая по составляющим общих мембранных напряжений;

$(\sigma)_2$ — группа приведенных напряжений от механических нагрузок, определяемая по суммам составляющих общих или местных мембранных и общих изгибных напряжений;

$(\sigma)_{3w}$ — группа приведенных напряжений, определяемая как сумма средних по сечению болта или шпильки напряжений растяжения, вызываемых механическими нагрузками, включая усилие затяга, и температурными воздействиями;

$(\sigma)_{4w}$ — группа приведенных напряжений в болтах и шпильках от механических нагрузок, включая усилие затяга, и температурных воздействий, определяемая по составляющим напряжений растяжения, изгиба и кручения;

$(\sigma_s)_1$ — группа приведенных напряжений от механических нагрузок и сейсмических воздействий, определяемая по составляющим общих мембранных напряжений;

$(\sigma_s)_2$ — группа приведенных напряжений от механических нагрузок и сейсмических воздействий, определяемая по составляющим мембранных и общих изгибных напряжений;

$(\sigma_s)_{mw}$ — группа приведенных напряжений, определяемая по суммам средних по сечению болта или шпильки напряжений растяжения, вызываемых механическими нагрузками и сейсмическими воздействиями;

$(\sigma_s)_{4w}$ — группа приведенных напряжений от механических нагрузок, температурных и сейсмических воздействий, определяемая по составляющим напряжений растяжения, изгиба и кручения в болтах или шпильках;

$(\sigma)_R$ — максимальный размах приведенных напряжений, определяемых по суммам составляющих общих или местных мембранных, общих и местных изгибных, общих температурных напряжений и напряжений компенсации в проходках;

(σ_{aF}) — амплитуда приведенных напряжений, определяемых по суммам составляющих общих или местных мембранных, общих и местных изгибных, общих и местных температурных напряжений и напряжений компенсации с учетом концентрации напряжений.

При определении расчетных групп категорий напряжений приведенные напряжения определяют по теории максимальных касательных напряжений согласно 6.1.1. При определении амплитуд (σ_{aF}) также допускается определять приведенные напряжения по энергетической теории Мизеса согласно 6.1.2.

7.3 Классификацию групп категорий напряжений проводят согласно таблице 7.1.

Знак $\oplus$ в таблице 7.1 обозначает, что суммирование напряжений при формировании приведенных групп категорий напряжений выполняется с использованием выбранной теории прочности (Треска или Мизеса).

Таблица 7.1 — Определение групп категорий напряжений по категориям напряжений в компонентах проходки

Тип компонента	Категории напряжений	Группа категории напряжений
Корпус проходки, крышки, днища	σ_m	$(\sigma)_1$
	$[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}] \oplus \sigma_b$	$(\sigma)_2$
	$[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}] \oplus \sigma_b \oplus \sigma_{bL} \oplus \sigma_T \oplus \sigma_{km} \oplus \sigma_{kb} \oplus \tau_{ks}$	$(\sigma)_R$
	$[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}] \oplus \sigma_b \oplus \sigma_{bL} \oplus \sigma_T \oplus \sigma_{TL} \oplus \sigma_{km} \oplus \sigma_{kb} \oplus \tau_{ks}$ с учетом концентрации напряжений	(σ_{aF})
Компенсаторы (торовые, сильфонные и др.)	σ_m	$(\sigma)_1$
	$[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}] \oplus \sigma_b \oplus \sigma_{bL} \oplus \sigma_T \oplus \sigma_{TL}$ с учетом концентрации напряжений	(σ_{aF})
Болты и шпильки	σ_{mw}	$(\sigma)_1$
	$\sigma_{mw} \oplus \sigma_T$	$(\sigma)_{3w}$
	$\sigma_{mw} \oplus \sigma_T \oplus \sigma_{bw} \oplus \tau_{sw}$	$(\sigma)_{4w}$
	$\sigma_{mw} \oplus \sigma_T \oplus \sigma_{TL} \oplus \sigma_{bw} \oplus \tau_{sw}$ с учетом концентрации напряжений	$(\sigma_{aF})_w$

7.4 Обработку распределения напряжений по сечению и по толщине стенки с целью выделения средних (мембранных) и изгибных составляющих распределения проводят согласно 6.2.

8 Расчет на статическую прочность

8.1 При расчете компонент проходки на статическую прочность необходимо проверить выполнение условий прочности согласно 8.2—8.7 во всех расчетных режимах и условиях эксплуатации, предусмотренных проектом АС (см. 4.19), при действии всех расчетных нагрузок (см. 4.18), кроме динамических (в том числе сейсмических и вибрационных).

При определении групп категорий напряжений $(\sigma)_1$, $(\sigma)_2$ следует рассматривать только механические расчетные нагрузки (кроме динамических). При определении размахов приведенных напряжений $(\sigma)_R$ следует рассматривать механические нагрузки (кроме динамических) и температурные воздействия.

При расчете болтов, шпилек проверяют условия прочности при действии механических нагрузок (кроме динамических), а также при совместном действии механических нагрузок (кроме динамических) и температурных воздействий.

8.2 Напряжения расчетных групп категорий напряжений, определенные при расчете на статическую прочность проходки, не должны превышать допускаемых значений, приведенных в таблицах 8.1—8.3. Значение коэффициента формы K, используемого в таблице 8.1, принимается равным 1,5 для пластин и 1,3 для компонентов прочей геометрической формы.

Значения номинальных допускаемых напряжений $[\sigma]$, $[\sigma]_w$, $[\sigma]_c$ определяют согласно требованиям раздела 5.

8.3 Максимальное $(\sigma)_{max}$ и минимальное $(\sigma)_{min}$ значения приведенных напряжений, по которым определен размах $(\sigma)_R$, не должны по абсолютному значению превосходить R_m^T.

8.4 При расчете на статическую прочность болтов и шпилек усилие затяга следует относить к механическим нагрузкам.

Таблица 8.1 — Допускаемые напряжения для компонентов проходок, за исключением болтов и шпилек

Режим	$(\sigma)_1$	$(\sigma)_2$*	$(\sigma)_R$
НУЭ	$[\sigma]$	$K\,[\sigma]$	$\min\left\{\left(2{,}5-\frac{R_{p0,2}^T}{R_m^T}\right)R_{p0,2}^T,\quad 2R_{p0,2}^T\right\}$
ННУЭ	1,2 $[\sigma]$	1,2 $K\,[\sigma]$	—
УПА	1,2 $[\sigma]$	1,2 $K\,[\sigma]$	—
УИ	1,35 $[\sigma]$	1,7 $[\sigma]$	—
* Кроме компенсирующих устройств.			

Таблица 8.2 — Допускаемые напряжения для болтов и шпилек

Режим	$(\sigma)_1$	$(\sigma)_{3w}$	$(\sigma)_{4w}$
НУЭ	$[\sigma]_w$	1,3 $[\sigma]_w$	1,7 $[\sigma]_w$
ННУЭ	1,2 $[\sigma]_w$	1,6 $[\sigma]_w$	2,0 $[\sigma]_w$
УПА	1,2 $[\sigma]_w$	1,6 $[\sigma]_w$	2,0 $[\sigma]_w$
УИ	$0{,}7R_{p0,2}^T$	—	—

Таблица 8.3 — Допускаемые напряжения для частей защитных оболочек

Режим	$(\sigma)_1$	$(\sigma)_2$
Разгерметизация трубы, транспортирующей среду	$[\sigma]_c$	1,3 $[\sigma]_c$

8.5 Средние напряжения смятия не должны превышать $1{,}5R_{p0,2}^T$. В случае если расстояние от края зоны приложения нагрузки до свободной кромки превышает размеры зоны, на которой действует нагрузка, допускаемые напряжения смятия могут быть увеличены на 25 %.

8.6 Средние касательные напряжения среза в компонентах проходки, предназначенных для восприятия перерезывающих усилий (шпонки, кольца, бобышки), не должны превышать допускаемых значений, приведенных в таблице 8.4.

Таблица 8.4 — Допускаемые напряжения среза в компонентах проходок, за исключением болтов и шпилек

Режим	τ	
	от механических нагрузок	от механических нагрузок и температурных воздействий
НУЭ	0,5 [σ]	0,65 [σ]
ННУЭ	0,6 [σ]	0,77 [σ]
УПА	0,6 [σ]	0,77 [σ]
УИ	0,68 [σ]	—

8.7 Напряжения среза в резьбах не должны превышать значений, приведенных в таблице 8.5.

Таблица 8.5 — Допускаемые напряжения среза в резьбах

Режим	τ_p	
	от механических нагрузок	от механических нагрузок и температурных воздействий
НУЭ	$0,25R^T_{p0,2}$	$0,32R^T_{p0,2}$
ННУЭ	$0,3R^T_{p0,2}$	$0,38R^T_{p0,2}$
УПА	$0,3R^T_{p0,2}$	$0,38R^T_{p0,2}$
УИ	$0,35R^T_{p0,2}$	—

8.8 Выполнение условий 8.3 и таблицы 8.1 по размахам напряжений $(\sigma)_R$ не является обязательным для компонентов проходки для случаев, если возможное при эксплуатации искажение формы конструкции, связанное с невыполнением данных условий, не может повлиять на нормальную эксплуатацию рассчитываемого узла (отсутствуют нарушение плотности различных соединений, недопустимое искажение проходных сечений, недопустимые деформации сопряженных деталей).

Необходимость удовлетворения требования по размахам напряжений $(\sigma)_R$ должна устанавливать конструкторская (проектная) организация.

9 Расчет на устойчивость

9.1 Основные положения расчета на устойчивость

Расчет на устойчивость проводят для проходок, работающих под наружным избыточным давлением, за исключением компонентов проходок, работающих под внутренним избыточным давлением.

9.2 Расчет типовых компонентов проходок

9.2.1 Цилиндрическая оболочка под действием наружного давления

Расчет проводят для гладких цилиндрических оболочек, находящихся под действием всестороннего или бокового наружного давления. При боковом давлении отсутствует осевая нагрузка на торцах оболочки.

Гладкими считаются цилиндрические оболочки, на расчетной длине которых отсутствуют укрепленные отверстия с диаметром, превышающим наибольший допускаемый диаметр неукрепленного одиночного отверстия (определяется согласно ГОСТ Р 59115.8), кольцевые и спиральные ребра жесткости или другие укрепления. Продольные либо спиральные ребра жесткости с углом до 30° к образующей не рассматриваются как укрепление от действия наружного давления.

Рассматривается гладкая цилиндрическая оболочка на расчетной длине L. Для цилиндрической оболочки, закрытой фланцевыми соединениями или плоскими днищами, за расчетную длину принимают длину оболочки между фланцами или между плоскими днищами.

В случае если цилиндрическая оболочка с торцов закрыта приварными выпуклыми днищами, за расчетную длину принимают длину цилиндрической оболочки, увеличенную на длину отбортованного цилиндрического участка и на $H_m/3$ каждого днища.

Расчетные формулы применимы при выполнении условий:

$$0,002 \le \frac{s-c}{D_m} \le 0,1,\ \frac{D_m}{L} \le 3,\ a \le 2\ \%, \tag{9.1}$$

где $a = 200\dfrac{D_{a\,\max} - D_{a\,\min}}{D_{a\,\max} + D_{a\,\min}}$ — овальность, $D_{a\,\max}$, $D_{a\,\min}$ — наибольший и наименьший наружные диаметры, мм. Диаметры следует выбирать в одном поперечном сечении цилиндрической оболочки. Суммарную прибавку к толщине стенки оболочки определяют по ГОСТ Р 59115.8.

Критическую длину определяют по формуле

$$L_{kr} = 1,2\,D_m\sqrt{\frac{D_m}{s-c}}. \tag{9.2}$$

Критическое напряжение определяют по формулам:

- при $L \ge L_{kr}$

$$\sigma_{kr} = 1,1\,E^T\left(\frac{s-c}{D_m}\right)^2; \tag{9.3}$$

- при $\dfrac{D_m}{3} < L < L_{kr}$

$$\sigma_{kr} = 1,3\,E^T\,\frac{D_m}{L}\left(\frac{s-c}{D_m}\right)^{1,5}. \tag{9.4}$$

Критическое давление определяют по формуле

$$p_{kr} = 2\sigma_{kr}\left(\frac{s-c}{D_m}\right). \tag{9.5}$$

Допускаемое наружное давление определяют как

$$[p_a] = 0,5\xi p_{kr}, \tag{9.6}$$

где $\xi = \min\left\{0,7;\dfrac{\lambda}{1+\lambda}\right\}$ — поправочный коэффициент;

$$\lambda = \frac{R^T_{p0,2}}{\sigma_{kr}}.$$

Устойчивость цилиндрической оболочки обеспечена, если выполнено условие $p_a \le [p_a]$.

9.2.2 Цилиндрическая оболочка под действием осевой силы

Формулы применимы для расчета гладких цилиндрических оболочек без продольных ребер жесткости.

Спиральные ребра жесткости под углом более 60° к образующей не рассматривают как укрепление от действия осевой силы.

Формулы применимы при выполнении условия

$$0,002 \le \frac{s-c}{D_m} \le 0,2. \tag{9.7}$$

Расчетное осевое напряжение сжатия определяют по формуле

$$\sigma_c = \frac{F}{\pi D_m (s-c)}. \tag{9.8}$$

Для определения значения допускаемого напряжения следует определять два значения критического напряжения:

- напряжение первого рода — из условия общей потери устойчивости цилиндрического компонента как длинного стержня;
- напряжение второго рода — из условия местной потери устойчивости цилиндрической тонкостенной оболочки.

Критическое напряжение первого рода определяют по формуле

$$\sigma_{kr1} = 1{,}2E^T\left(\frac{D_m}{\eta L}\right)^2, \tag{9.9}$$

где η = 1,0, если оба конца цилиндрической оболочки шарнирно оперты;

η = 0,5, если оба конца оболочки жестко заделаны;

η = 0,7, если один конец оболочки шарнирно оперт, а другой жестко заделан;

η = 2,0, если один конец оболочки свободен, а другой жестко заделан.

Критическое напряжение второго рода определяют по формуле

$$\sigma_{kr2} = 1{,}2E^T\frac{s-c}{D_m}. \tag{9.10}$$

Допускаемое осевое напряжение сжатия определяют по формуле

$$[\sigma_c] = \min\{[\sigma_c]_1; [\sigma_c]_2\}, \tag{9.11}$$

где $[\sigma_c]_1 = 0{,}5\xi_1\sigma_{kr1}$;

$[\sigma_c]_2 = 0{,}5\xi_2\sigma_{kr2}$,

поправочные коэффициенты:

$$\xi_1 = \min\left\{0{,}7;\frac{\lambda_1}{1+\lambda_1}\right\},\ \lambda_1 = \frac{R^T_{p0,2}}{\sigma_{kr1}};$$

$$\xi_2 = \min\left\{0{,}25;\frac{\lambda_2}{1+\lambda_2}\right\},\ \lambda_2 = \frac{R^T_{p0,2}}{\sigma_{kr2}}.$$

Устойчивость цилиндрической оболочки обеспечена, если выполнено условие $\sigma_c \le [\sigma_c]$.

9.2.3 Выпуклое днище под действием наружного давления

Расчетные формулы предназначены для расчета выпуклых днищ полусферической и эллиптической формы, находящихся под действием давления, равномерно распределенного по наружной поверхности.

Допускается применение формул для выпуклых днищ сферической формы. В сферических (тарельчатых) днищах поверхность имеет форму сегмента сферы.

Расчетные формулы применимы при выполнении условий

$$0{,}002 \le \frac{s-c}{D_m} \le 0{,}1,\ \frac{H_m}{D_m} \ge 0{,}2. \tag{9.12}$$

Критическое напряжение определяют по формуле

$$\sigma_{kr} = 1{,}2E^T\left(\frac{2H_m}{D_m}\right)\left(\frac{s-c}{D_m}\right). \tag{9.13}$$

Критическое давление определяют по формуле

$$p_{kr} = 4\sigma_{kr}\left(\frac{2H_m}{D_m}\right)\left(\frac{s-c}{D_m}\right). \tag{9.14}$$

Допускаемое наружное давление определяют по формуле

$$[p_a] = 0{,}5\xi p_{kr}, \tag{9.15}$$

где $\xi = \min\left\{0{,}15;\frac{\lambda}{1+\lambda}\right\}$ — поправочный коэффициент;

$$\lambda = \frac{R^T_{p0,2}}{\sigma_{kr}}.$$

Устойчивость выпуклого днища обеспечена, если выполнено условие $p_a \le [p_a]$.

9.2.4 Конический переход под действием наружного давления

Расчетные формулы применимы для расчета на наружное давление гладких конических переходов с углом конусности α, удовлетворяющих условиям:

$$0{,}002 \le \frac{s-c}{D_{0m}} \le 0{,}1,\ \ 0{,}002 \le \frac{s-c}{D_m} \le 0{,}1,\ \ 10° \le \alpha \le 60°, \tag{9.16}$$

где D_{0m} и D_m — средние диаметры меньшего и большего оснований конического перехода, соответственно.

При $\alpha < 10°$ конический переход допускается рассматривать как цилиндрическую оболочку, длина которой равна высоте конуса, а средний диаметр равен диаметру большего основания. Толщину стенки цилиндрической оболочки принимают равной толщине стенки конического перехода.

Критическое напряжение определяют по формуле

$$\sigma_{kr} = 0{,}5 C_x E^T \sin\alpha \sqrt{\cos\alpha} \left(\frac{s-c}{D_m}\right)^{3/2}, \tag{9.17}$$

где $C_x = \sum_{k=1}^{5} a_k (1-x)^{k-3}$;

$x = \frac{D_{0m}}{D_m}$, $0 < x < 0{,}8$;

$a_1 = 1{,}098$; $a_2 = -0{,}823$; $a_3 = 16{,}250$; $a_4 = 6{,}936$; $a_5 = -6{,}603$.

На границах расчетного интервала $C_0 = 17$ и $C_{0,8} = 38$.

Допускается определять C_x в зависимости от значения x по графику на рисунке 9.1.

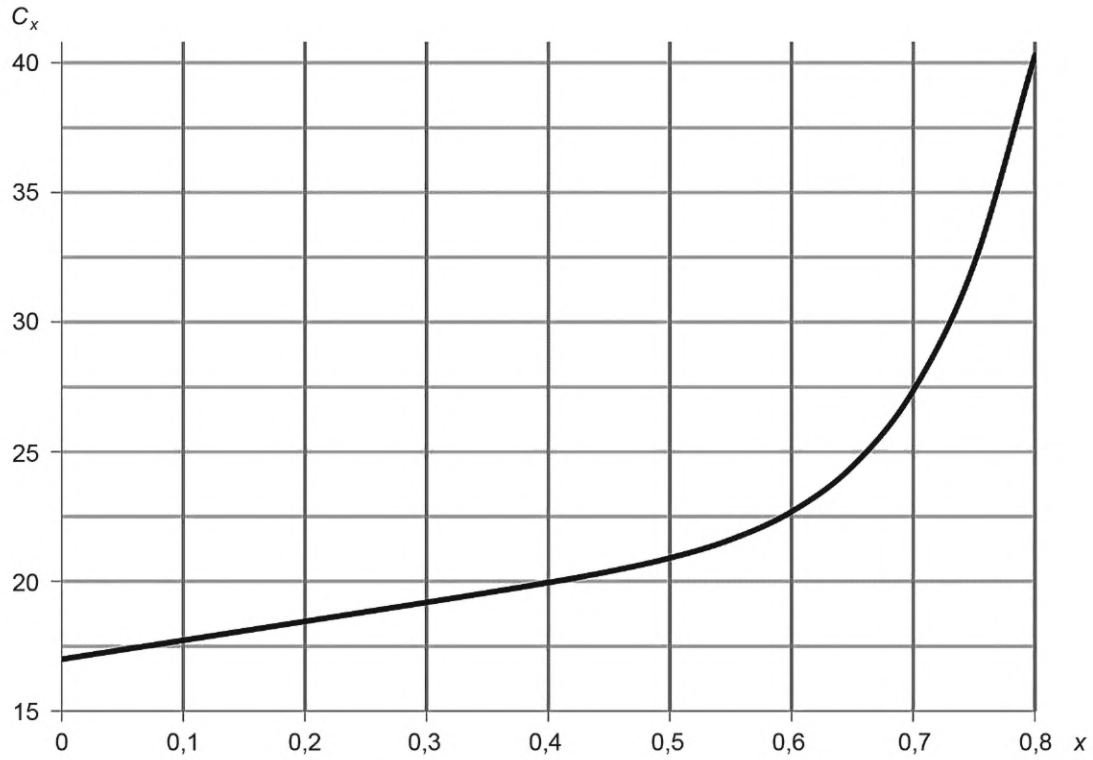


Рисунок 9.1 — График для определения C_x

Критическое давление определяют по формуле

$$p_{kr} = 2\sigma_{kr} \left(\frac{s-c}{D_m}\right) \cos\alpha. \tag{9.18}$$

Допускаемое наружное давление определяют по формуле

$$[p_a] = 0{,}5\xi p_{kr}, \tag{9.19}$$

где $\xi = \min\left\{0{,}7; \dfrac{\lambda}{1+\lambda}\right\}$ — поправочный коэффициент;

$$\lambda = \frac{R^T_{p0,2}}{\sigma_{kr}}.$$

Устойчивость конического перехода обеспечена, если выполнено условие $p_a \le [p_a]$.

9.2.5 Конический переход под действием осевой силы

Расчетные формулы применимы для расчета гладких конических переходов, находящихся под действием осевой силы, удовлетворяющих условиям (9.16).

При $\alpha < 10°$ конический переход допускается рассматривать как цилиндрическую оболочку, длина которой равна высоте конуса, а средний диаметр равен диаметру большего основания. Толщину стенки цилиндрической оболочки принимают равной толщине стенки конического перехода.

Расчетное осевое напряжение сжатия определяют по формуле

$$\sigma_c = \frac{F}{\pi D_{0m}(s-c)\cos\alpha}. \tag{9.20}$$

Критическое напряжение определяют по формуле

$$\sigma_{kr} = 1{,}2E^T\left(\frac{s-c}{D_{0m}}\right)\cos\alpha. \tag{9.21}$$

Допускаемое напряжение сжатия определяют по формуле

$$[\sigma_c] = 0{,}5\xi\sigma_{kr}, \tag{9.22}$$

где $\xi = \min\left\{0{,}25; \dfrac{\lambda}{1+\lambda}\right\}$ — поправочный коэффициент;

$$\lambda = \frac{R^T_{p0,2}}{\sigma_{kr}}.$$

Устойчивость конического перехода обеспечена, если выполнено условие $\sigma_c \le [\sigma_c]$.

9.2.6 Конический переход при совместном действии наружного давления и осевой силы

Устойчивость конического перехода обеспечена, если выполнено условие

$$\frac{\sigma_c}{[\sigma_c]} + \frac{p_a}{[p_a]} \le 1{,}0, \tag{9.23}$$

где допускаемое наружное давление и допускаемое напряжение сжатия определяют по 9.2.4 и 9.2.5, соответственно.

9.2.7 Цилиндрическая оболочка при совместном действии наружного давления и осевой силы

Расчет проводят для гладких цилиндрических оболочек без кольцевых, спиральных или продольных ребер жесткости или других видов укрепления (гофры и др.), находящихся под действием осевой сжимающей силы и всестороннего или бокового наружного давления. При боковом давлении отсутствует осевая нагрузка на торцах оболочки.

Цилиндрическую оболочку рассматривают на расчетной длине согласно требованиям 9.2.1, при выполнении условий формулы (9.1).

Устойчивость цилиндрической оболочки обеспечена, если выполнено условие

$$\frac{\sigma_c}{[\sigma_c]} + \frac{p_a}{[p_a]} \le 1{,}0, \tag{9.24}$$

где допускаемое наружное давление и допускаемое напряжение сжатия определяются по 9.2.1 и 9.2.2, соответственно.

9.3 Расчет численными методами

9.3.1 При проведении расчета компонентов проходки на устойчивость допускается определять критические значения нагрузки численными методами (например, МКЭ) в соответствии со следующими положениями:

- толщины стенок компонента проходки при расчете следует принимать равными (s – с);
- НДС в компоненте проходки должно быть определено при действии всех расчетных нагрузок;
- решением линейной задачи устойчивости (buckling) численным методом должно быть определено критическое значение нагрузки F_{kr}, вызывающее потерю устойчивости.

9.3.2 Устойчивость компонента проходки обеспечена, если выполнено условие

$$F \le \frac{F_{kr}}{n_{kr}}, \tag{9.25}$$

где F — расчетная нагрузка, Н;

F_{kr} — критическая нагрузка, Н;

$n_{kr} = \frac{2}{\xi}$ — коэффициент запаса устойчивости;

ξ — поправочный коэффициент, определяемый на основе соответствия рассчитываемой конструкции типовым случаям, рассмотренным в 9.2.1—9.2.6 согласно пояснениям к формулам (9.6), (9.11). Для определения n_{kr} принимается наименьшее значение ξ.

10 Расчет на циклическую прочность

10.1 Расчет на циклическую прочность компонентов проходки заключается в определении допускаемых чисел циклов нагружения по заданным амплитудам напряжений или допускаемых амплитуд напряжений для заданных чисел циклов и проверке условия циклической прочности.

10.2 Определение допускаемого числа циклов по заданным амплитудам напряжений или допускаемых амплитуд напряжений для заданного числа циклов проводится:

- по расчетным кривым усталости, характеризующим в пределах их применения зависимость между допускаемыми амплитудами условных упругих напряжений и допускаемыми числами циклов;
- по уравнениям, связывающим допускаемые амплитуды условных упругих напряжений и допускаемые числа циклов, при уточненном расчете.

10.3 Амплитуда эксплуатационного напряжения не должна превышать допускаемую амплитуду напряжения $[\sigma_{aF}]$, получаемую для заданного числа циклов N. В случае если задана амплитуда напряжения, то эксплуатационное число циклов N не должно превышать допускаемое число циклов $[N_0]$.

В случае если процесс нагружения состоит из ряда циклов, характеризуемых амплитудами напряжений $(\sigma_{aF})_i$ и соответствующими числами циклов N_i, то должно выполняться условие прочности по накопленному усталостному повреждению согласно 10.14.

10.4 Расчетные кривые усталости приведены в ГОСТ Р 59115.5.

10.5 Определение допускаемой амплитуды условного упругого напряжения по расчетным кривым усталости, приведенным в ГОСТ Р 59115.5, для заданной температуры ниже максимальной температуры применения соответствующей расчетной кривой, допускается выполнять путем умножения значения $[\sigma_{aF}]$ по расчетным кривым на отношение значения модуля упругости материала при заданной температуре к значению при максимальной температуре применения соответствующей расчетной кривой.

10.6 Допускаемую амплитуду условного упругого напряжения или допускаемое число циклов при $[N_0] \le 10^{12}$ для проходок рекомендуется определять с учетом максимального влияния асимметрии цикла по формулам:

$$\left.\begin{aligned}
[\sigma_{aF}] &= \frac{E^T e_c^T}{\left(4 n_N [N_0]\right)^m} + \frac{R_c^T - R_{p0,2}^{T_{\min}}}{\left(4 n_N [N_0]\right)^{m_e} - 1} \\
[\sigma_{aF}] &= \frac{E^T e_c^T}{n_\sigma \left(4[N_0]\right)^m} + \frac{R_c^T - R_{p0,2}^{T_{\min}}}{n_\sigma \left(\left(4[N_0]\right)^{m_e} - 1\right)}
\end{aligned}\right\}, \tag{10.1}$$

где n_σ, n_N — коэффициенты запаса прочности по напряжениям и числу циклов;

m, m_e — параметры, определяемые по таблице 10.1;

T_{min} — минимальная температура цикла, °С;

R_c^T — характеристика прочности, МПа, принимаемая равной

$$R_c^T = R_m^T(1 + 1{,}4 \cdot 10^{-2} Z^T); \quad (10.2)$$

e_c^T — характеристика пластичности, зависящая от значения Z_c^T, определяемая по формулам:

$$e_c^T = 1{,}15 \lg \frac{100}{100 - Z_c^T} - \frac{(\sigma_F^*)_{max} - R_{p0,2}^T}{2E^T} \text{ при } (\sigma_F^*)_{max} > R_{p0,2}^T; \quad (10.3)$$

$$e_c^T = 1{,}15 \lg \frac{100}{100 - Z_c^T} \text{ при } (\sigma_F^*)_{max} < R_{p0,2}^T. \quad (10.4)$$

Из двух значений $[N_0]$ или $[\sigma_{aF}]$, определенных по формулам (10.1), выбирают наименьшее.

При использовании в расчете минимальных значений механических характеристик или значений, приведенных в ГОСТ Р 59115.3, при $Z^T \le 50$ % следует принимать $Z_c^T = Z^T$. При $Z^T > 50$ % следует принимать $Z_c^T = 50$ %.

В случае если характеристика пластичности e_c^T определяется по значению Z^T, полученному при испытании на статическое растяжение, то используют формулы:

$$e_c^T = 0{,}005 Z^T - \frac{(\sigma_F^*)_{max} - R_{p0,2}^T}{2E^T} \text{ при } (\sigma_F^*)_{max} > R_{p0,2}^T; \quad (10.5)$$

$$e_c^T = 0{,}005 Z^T \text{ при } (\sigma_F^*)_{max} \le R_{p0,2}^T. \quad (10.6)$$

Характеристики E^T, Z^T, R_m^T принимают равными их наименьшим значениям в интервале рабочих температур с учетом эксплуатационных факторов. Коэффициент запаса прочности по напряжениям $n_\sigma = 2$, по числу циклов $n_N = 10$.

10.7 Остаточное напряжение учитывают в том случае, если оно является растягивающим и в рассматриваемой зоне компонента проходки амплитуда местного условного упругого напряжения от механических и тепловых нагрузок ни при одном из типов циклов нагружения не превышает предела текучести при температуре 293 К (20 °С). Допускается принимать остаточное напряжение равным пределу текучести при температуре 293 К (20 °С).

Таблица 10.1 — Значения показателей степени m и m_e и предела выносливости R_{-1}^T

Обозначение	$R_m^T \le 700$ МПа	700 МПа $< R_m^T \le 1200$ МПа
R_{-1}^T (при симметричном цикле)	$0{,}4R_m^T$	$(0{,}54 - 2 \cdot 10^{-4} R_m^T)\, R_m^T$
m	0,5	$0{,}36 + 2 \cdot 10^{-4} R_m^T$
m_e	$0{,}132 \lg\left[\frac{R_m^T}{R_{-1}^T}\left(1 + 1{,}4 \cdot 10^{-2} Z^T\right)\right]$	

10.8 Допускаемую амплитуду напряжений для сварного соединения $[\sigma_{aF}]_s$, за исключением сварного соединения с неполным проплавлением, определяют по формуле

$$[\sigma_{aF}]_s = \varphi_s [\sigma_{aF}], \quad (10.7)$$

где $[\sigma_{aF}]$ — амплитуда допускаемых условных упругих напряжений, определяемая по расчетной кривой усталости или соответствующей формуле для основного материала при заданном числе циклов;

φ_s — эмпирически определяемый коэффициент, зависящий от вида сварки свариваемых материалов и термообработки после сварки $\varphi_s \le 1$.

При отсутствии экспериментальных данных о значении φ_s могут быть использованы данные таблицы 10.2.

Таблица 10.2 — Значения коэффициента снижения циклической прочности для сварного соединения

Основной материал (сталь)	φ_s для сварного соединения	
	после отпуска	без отпуска
Углеродистая, кремнемарганцовистая, легированная, $R_m^T \le 380$ МПа	0,75	0,75
Легированная, 380 МПа < $R_m^T \le 520$ МПа	0,70	0,65
Легированная, 520 МПа < $R_m^T \le 700$ МПа	0,60	0,50
Аустенитная	0,70	0,60

10.9 Для резьбовых участков шпилек, болтов из сталей перлитного класса используют расчетные кривые усталости, полученные с учетом коэффициентов запаса $n_\sigma = 1{,}5$ и $n_N = 5$.

10.10 Уточненный расчет резьбовых участков шпилек, болтов проводят по формуле (10.1). При этом коэффициенты запаса принимают равными $n_\sigma = 1{,}5$ и $n_N = 3$. При использовании коэффициентов концентрации K_{ef} коэффициенты запаса принимают равными $n_\sigma = 1{,}5$ и $n_N = 5$.

10.11 В тех случаях, когда низкочастотное циклическое нагружение, связанные с пуском, остановкой, изменением мощности, срабатыванием аварийной защиты или другими режимами, сопровождаются наложением высокочастотного нагружения: вибрации, пульсации температур при перемешивании потоков теплоносителя с различной температурой, расчет на циклическую прочность проводят с учетом высокочастотного нагружения.

10.12 Исходные данные о высокочастотном нагружении компонента проходки получают при анализе результатов измерений на постпректной стадии или их расчетом.

10.13 В расчете допускаемого числа циклов при высокочастотном нагружении используют только кривые усталости, полученные по формуле (10.1).

10.14 Условие прочности при наличии различных циклических нагрузок проверяют по формуле

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{N_i}{[N_0]_i} = a_N \le [a_N], \tag{10.8}$$

где N_i — число циклов i-го типа за время эксплуатации;

k — общее число типов циклов;

$[N_0]_i$ — допускаемое число циклов i-го типа с амплитудой $(\sigma_{aF})_i$;

a_N — накопленное усталостное повреждение, предельное значение которого $[a_N] = 1$.

В общем случае:

$$a_N = a_1 + a_2 + a_3 \le [a_N], \tag{10.9}$$

где a_1 — повреждение от эксплуатационных циклов нагружения, включая испытания, на которые не наложены циклы высокочастотного нагружения;

a_2 — повреждение от циклов высокочастотного нагружения при постоянных эксплуатационных напряжениях (стационарные режимы);

a_3 — сумма повреждений от высокочастотных напряжений в течение циклов переменных напряжений при переходных эксплуатационных режимах a_3^* и при прохождении резонансных частот в тех же циклах a_3^{**}.

Повреждение a_2 допускается принимать равным нулю, если для высокочастотного нагружения с амплитудой $\langle\sigma_a\rangle$ и числом циклов N выполняются условия:

$$10^7 \le N \le 10^{12};\ \frac{\langle\sigma_a\rangle}{[\sigma_{aF}]} \le 0{,}5, \tag{10.10}$$

где $[\sigma_{aF}]$ — допускаемая амплитуда при числе циклов N, МПа.

Накопленные повреждения a_1 и a_2 определяют по формуле (10.8). Значения амплитуд и частот при определении повреждений a_2 и a_3 принимают в соответствии с 13.1.

10.15 Сочетание основного циклического нагружения с амплитудой (σ_{aF}) и частотой f_0 и наложенного с амплитудой $\langle\sigma_a\rangle$ и частотой f вызывает снижение допускаемого числа циклов основного низкочастотного нагружения от $[N_0]$ до $[N]$, определяемого по формуле

$$[N] = [N_0] / æ, \quad (10.11)$$

где æ — коэффициент снижения долговечности при наложении высокочастотных циклов, используемых при определении повреждения a_3^*.

Для основного цикла нагружения i-го типа повреждение a_3^* определяют по формуле

$$(a_3^*)_i = æ N_i / [N_0]_i. \quad (10.12)$$

Коэффициент æ независимо от степени концентрации напряжений, остаточных напряжений, асимметрии цикла, значения номинальных напряжений и температуры определяют по номограммам, приведенным на рисунках 10.1 и 10.2, или определяют по формуле

$$æ = \left(\frac{f}{f_0}\right)^{\eta \frac{\langle \sigma_a \rangle}{(\sigma_a)}}, \quad (10.13)$$

где $f_0 = 1/(t_1 + t_2)$ — частота основного цикла переменных напряжений, определяемая без учета периода времени, в течение которого происходит наложение дополнительных напряжений на постоянные (рисунок 10.3);

(σ_a) — амплитуда приведенных напряжений основного цикла без учета концентрации напряжений;

η — коэффициент, зависящий от материала, принимаемый по таблице 10.3.

При отсутствии экспериментальных данных для предварительных оценок значение η принимают равным 2.

Таблица 10.3 — Значения коэффициента η

Углеродистая сталь $R_m^T \le 500$ МПа	Сталь аустенитного класса $R_m^T \le 550$ МПа	Сталь перлитного класса	
		500 МПа < $R_m^T \le 800$ МПа	$R_m^T > 800$ МПа
1,3	1,54	1,8	1,9

10.16 Метод расчета при двухчастотном циклическом нагружении применим при выполнении всех следующих условий:

- отношение амплитуды напряжений $\langle \sigma_a \rangle$ к амплитуде напряжений (σ_a) находится в интервале

$$0 < \langle \sigma_a \rangle / (\sigma_a) \le 0{,}5; \quad (10.14)$$

- абсолютное значение максимального и минимального напряжений при двухчастотном нагружении не превышает значения $(0{,}2 \cdot 10^{-2} E^T + R_{p0,2}^T)$ при расчетной температуре;
- отношение f/f_0 не превышает $5 \cdot 10^6$;
- число циклов с амплитудой $\langle \sigma_a \rangle$ в пределах времени $(t_1 + t_2)$ превышает 10 (рисунок 10.3).

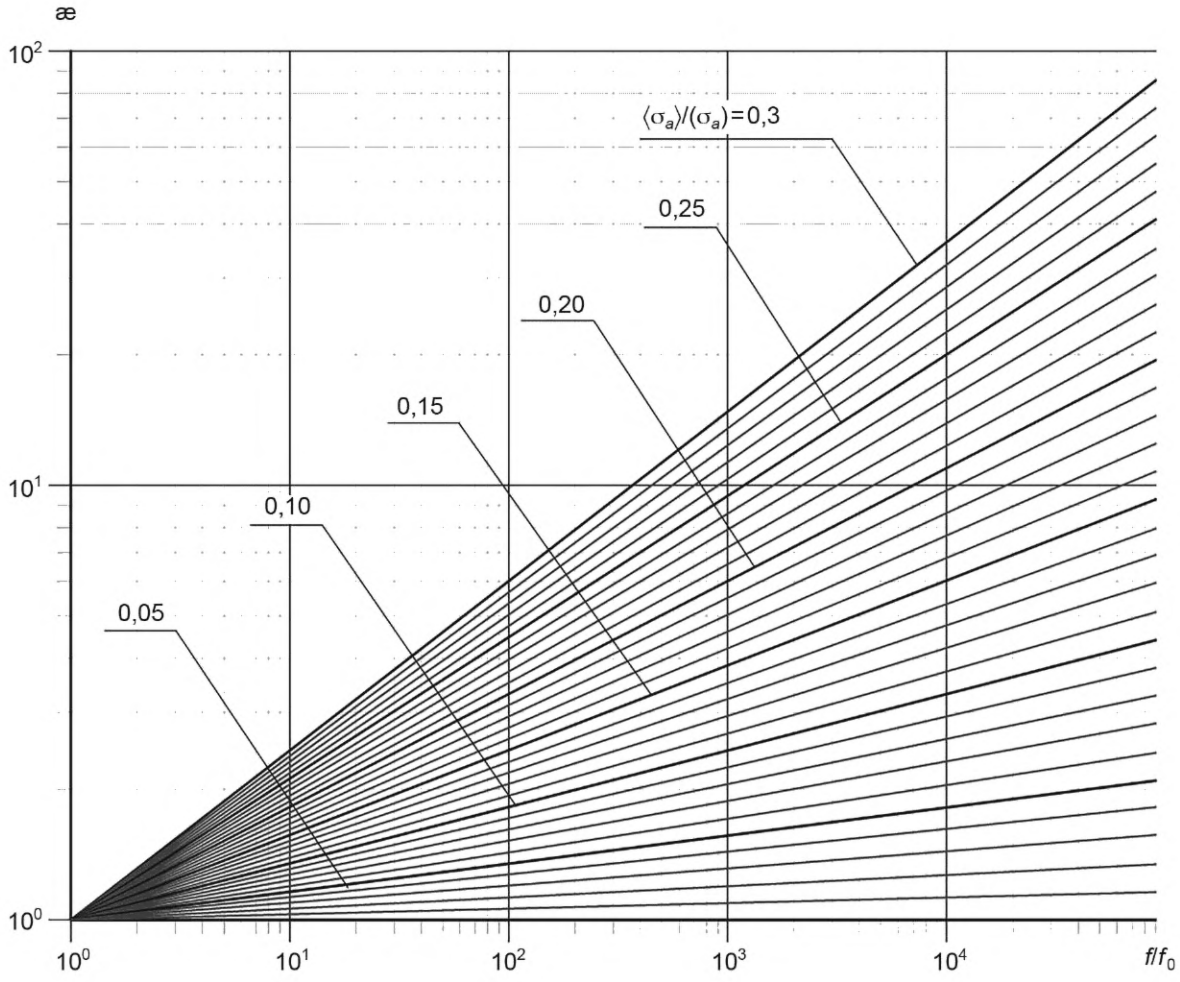


Рисунок 10.1 — Значения æ для сталей перлитного класса и их сварных соединений с $R_m^T \leq 500$ МПа

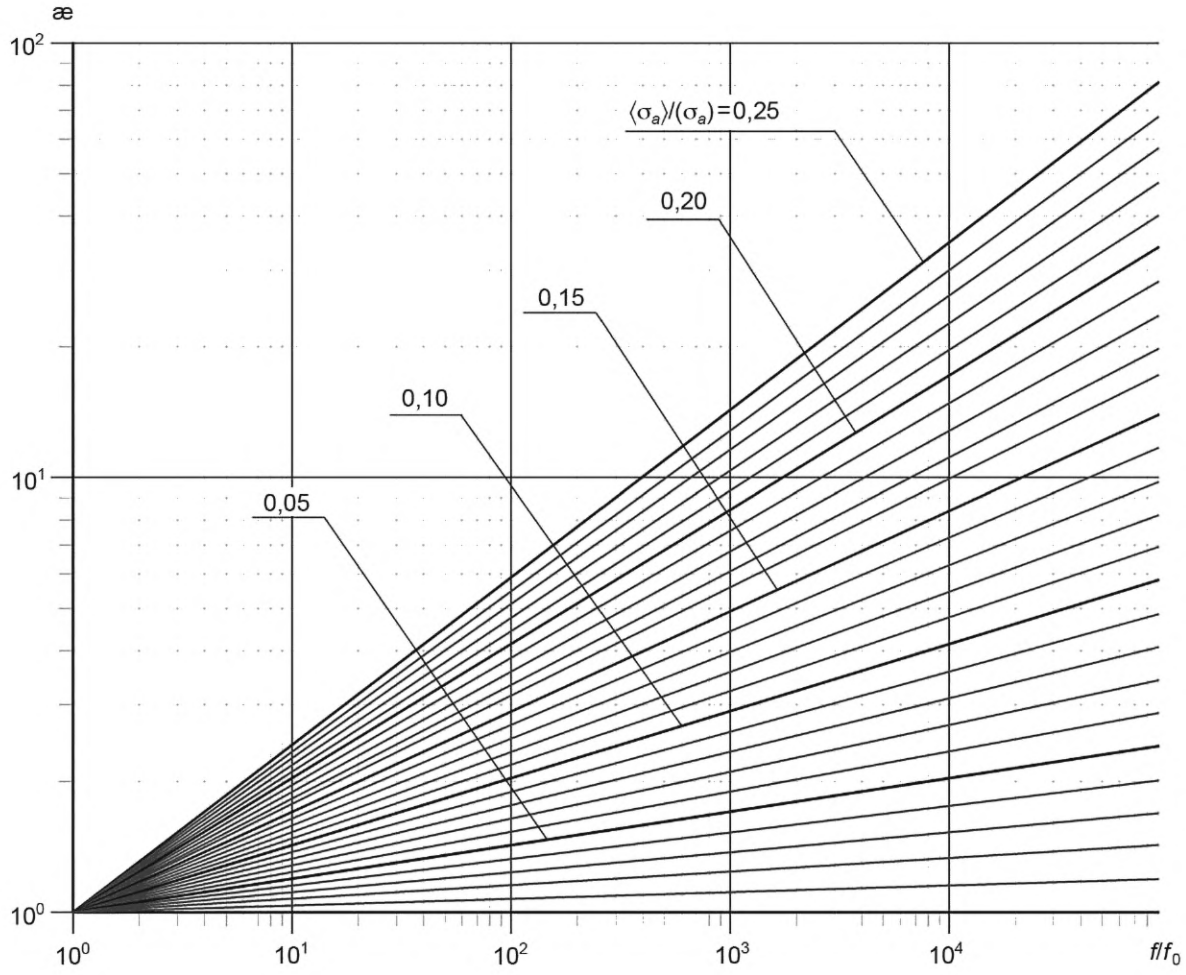


Рисунок 10.2 — Значения æ для сталей аустенитного класса и их сварных соединений с $R_m^T \leq 550$ МПа

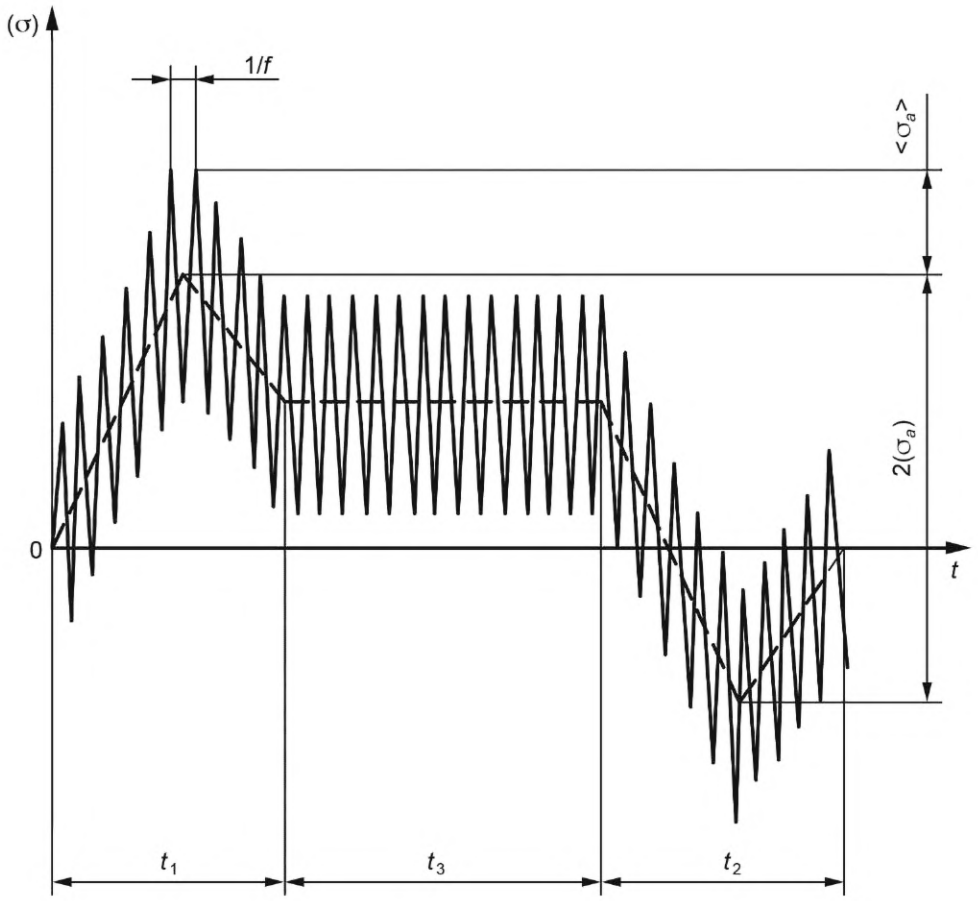


Рисунок 10.3 — Форма цикла при двухчастотном нагружении

11 Расчет на прогрессирующее изменение формы и размеров

11.1 Расчет на прогрессирующее изменение формы и размеров проводят для всех компонентов проходки, за исключением болтов и шпилек, для которых остаточные изменения формы и размеров в работе недопустимы или ограничены заданными пределами по условиям нормальной эксплуатации.

11.2 Расчет на прогрессирующее изменение формы и размеров допускается не проводить, если максимальное значение размаха приведенных напряжений $(\sigma)_R$ в компоненте проходки не превышает допускаемого значения

$$(\sigma)_R \le \min\left\{\left(2{,}5 - \frac{R^T_{p0,2}}{R^T_m}\right)R^T_{p0,2},\ 2R^T_{p0,2}\right\}. \qquad (11.1)$$

В случае невыполнения данного условия допускается проведение уточненной оценки приспособляемости.

11.3 Уточненную оценку приспособляемости проводят для НУЭ и ННУЭ для всех расчетных нагрузок согласно 4.18, кроме внешних динамических и вибрационных. Должно быть выполнено любое из условий приспособляемости согласно 11.3.1 и 11.3.2.

11.3.1 Для осесимметричных компонентов проходки с циклически изменяющейся температурой стенки, нагруженных давлением, приспособляемость обеспечена, если выполнены следующие условия:

- в случае линейного распределения температуры по толщине стенки компонента

$$y \le \frac{1}{x} \text{ при } 0 < x \le 0{,}5,$$
$$y \le 4(1 - x) \text{ при } 0{,}5 < x < 1{,}0; \qquad (11.2)$$

- в случае параболического распределения температуры по толщине стенки компонента

$$\begin{gathered} y \le 5{,}2(1 - x) \text{ при } 0{,}615 < x < 1{,}0, \\ y \le 4{,}65 \text{ при } 0{,}5 < x < 1{,}0, \\ y \le 3{,}55 \text{ в случае } x = 0{,}4, \\ y \le 2{,}7 \text{ в случае } x = 0{,}5, \end{gathered} \qquad (11.3)$$

где $x = \dfrac{\sigma_m}{R^T_{p0,2}}$ — отношение общих мембранных напряжений к пределу текучести при температуре T;

$y = \dfrac{\Delta\sigma_{TL}}{R^T_{p0,2}}$ — отношение размаха местных температурных напряжений без учета концентрации к пределу текучести при температуре T.

Промежуточные значения y следует определять линейной интерполяцией.

11.3.2 Уточненную оценку приспособляемости упругопластическим расчетом следует проводить по накопленным в компоненте проходки деформациям и перемещениям.

Допускаемые значения накопленной деформации растяжения для сталей аустенитного класса не должны превышать:

- 1 % — для средней деформации по сечению компонента проходки (по толщине стенки);
- 2 % — для максимального значения на поверхности компонента проходки деформации, линеаризованной по сечению (по толщине стенки);
- 5 % — в любой точке компонента проходки.

Для сварных соединений сталей аустенитного класса допускаемая деформация составляет 0,5 от допускаемой деформации основного металла.

Найденные расчетом значения перемещений, накопленных в компоненте проходки в течение ее срока службы с учетом всех повторений эксплуатационных режимов, не должны превышать пределов, установленных в проекте АС.

12 Расчет на внешние динамические воздействия

12.1 Расчет на сейсмические воздействия

12.1.1 Расчет на прочность при сейсмических воздействиях (сейсмопрочность) компонентов проходок должен проводиться в соответствии с положениями федеральных норм и правил в области использования атомной энергии [2].

12.1.2 Сейсмические нагрузки рассматривают для всех уровней землетрясений, предусмотренных федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии, устанавливающими требования к обеспечению сейсмостойкости атомных станций [2]. Исходными данными для расчета являются наборы акселерограмм и спектров ответа[1)] (или обобщенных спектров ответа[1)]) на отметках расположения проходок, определенных для трех взаимно перпендикулярных направлений — вертикального и двух горизонтальных, а также механические эксплуатационные нагрузки.

12.1.3 Расчет проводят для АС с сейсмичностью площадки 5 баллов и выше. Необходимость расчетов проходок для АС с сейсмичностью площадки 4 балла определяется проектной (конструкторской) организацией.

12.1.4 Сейсмические нагрузки на проходки должны быть заданы с учетом одновременного сейсмического воздействия по трем пространственным направлениям. Угловые составляющие сейсмического воздействия допускается не учитывать.

12.1.5 Допускаемые перемещения (прогиб, сдвиг, смещение), допускаемые скорости и ускорения от сейсмических воздействий (в случае ограничений, установленных проектом АС) следует определять с учетом условий эксплуатации для данного компонента проходки (выбор зазоров, недопустимые соударения, недопустимые перекосы, разуплотнение герметичных стыков).

12.1.6 Динамическую реакцию компонента проходки следует анализировать с учетом связей с другими компонентами, с которыми он взаимодействует, и влияния этих связей на колебания компонента проходки.

[1)] Определение к данному термину установлено в федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии [2].

12.1.7 При определении динамической реакции компонента проходки следует учитывать следующие факторы: масса конструкции, в том числе теплоизоляции, масса жидкости в трубах, НДС (в том числе от внутреннего и наружного давления), влияющее на жесткость конструкции.

12.1.8 Значение относительного вязкого демпфирования при отсутствии специального обоснования для металлических компонентов проходки следует принимать равным 2,0 %.

12.1.9 Оценку сейсмопрочности проходок следует проводить по допускаемым напряжениям, по допускаемым перемещениям, по критериям циклической прочности, устойчивости.

12.1.10 Напряжения в компонентах проходки не должны превосходить допускаемых значений, приведенных в таблицах 12.1—12.4. Номинальные допускаемые напряжения $[\sigma]$ и $[\sigma]_w$ должны быть определены согласно 5.3 и 5.4, соответственно, по кратковременным механическим характеристикам материалов, в соответствии с температурой эксплуатации соответствующего компонента проходки и с учетом эксплуатационных факторов.

Значение коэффициента формы K, используемого в таблице 12.1, принимают равным 1,5 для пластин и 1,3 для компонентов прочей геометрической формы.

В случае если принятые для расчета акселерограммы или спектры ответа для ПЗ и МРЗ различаются только амплитудами не менее чем в два раза, допускается не рассматривать сочетание нагрузок НУЭ + ПЗ.

Таблица 12.1 — Сочетания нагрузок и допускаемые напряжения для компонентов проходок, за исключением болтов, шпилек

Категория сейсмостойкости	Сочетание нагрузок	$(\sigma_s)_1$	$(\sigma_s)_2$
I	НУЭ + МРЗ	1,4 $[\sigma]$	1,4 K $[\sigma]$
	ННУЭ + МРЗ		
	УПА + МРЗ		
	НУЭ + ПЗ	1,2 $[\sigma]$	1,2 K $[\sigma]$
	ННУЭ + ПЗ		
II	НУЭ + ПЗ	1,5 $[\sigma]$	1,5 K $[\sigma]$
	ННУЭ + ПЗ		

Таблица 12.2 — Значения допускаемых напряжений для болтов и шпилек

Категория сейсмостойкости	Сочетание нагрузок	$(\sigma_s)_{mw}$	$(\sigma_s)_{4w}$
I	НУЭ + МРЗ	1,4 $[\sigma]_w$	2,2 $[\sigma]_w$
	ННУЭ + МРЗ		
	УПА + МРЗ		
	НУЭ + ПЗ	1,2 $[\sigma]_w$	2,0 $[\sigma]_w$
	ННУЭ + ПЗ		
II	НУЭ + ПЗ	1,5 $[\sigma]_w$	2,3 $[\sigma]_w$
	ННУЭ + ПЗ		
	ННУЭ + ПЗ		

Таблица 12.3 — Значения допускаемых напряжений смятия

Категория сейсмостойкости	Сочетание нагрузок	Допускаемое напряжение
I	НУЭ + МРЗ	2,7 $[\sigma]$
	ННУЭ + МРЗ	
	УПА + (МРЗ)	
	НУЭ + ПЗ	2,5 $[\sigma]$
	ННУЭ + ПЗ	

Окончание таблицы 12.3

Категория сейсмостойкости	Сочетание нагрузок	Допускаемое напряжение
II	НУЭ + ПЗ	3,0 [σ]
	ННУЭ + ПЗ	

Таблица 12.4 — Значения допускаемых напряжений среза

Категория сейсмостойкости	Сочетание нагрузок	Допускаемое напряжение	
		для болтов и шпилек (срез резьбы)	для компонентов, кроме среза резьбы шпилек и болтов
I	НУЭ + МРЗ	$0,7\ [\sigma]_w$	0,7 [σ]
	ННУЭ+ МРЗ		
	УПА (МРЗ)		
	НУЭ + ПЗ	$0,6\ [\sigma]_w$	0,6 [σ]
	ННУЭ + ПЗ		
II	НУЭ + ПЗ	$0,8\ [\sigma]_w$	0,8 [σ]
	ННУЭ + ПЗ		

Таблица 12.5 — Сочетания нагрузок и допускаемые напряжения для защитных оболочек (труб)

Категория сейсмостойкости	Сочетание нагрузок	$(\sigma_s)_1$	$(\sigma_s)_2$
I	НУЭ + МРЗ	$1,4\ [\sigma]_c$	$1,8\ [\sigma]_c$
	ННУЭ + МРЗ		
	УПА + МРЗ		
	НУЭ + ПЗ	$1,2\ [\sigma]_c$	$1,6\ [\sigma]_c$
	ННУЭ + ПЗ		
II	НУЭ + ПЗ	$1,5\ [\sigma]_c$	$1,95\ [\sigma]_c$
	ННУЭ + ПЗ		

12.1.11 При расчете болтов и шпилек на прочность при сейсмических воздействиях усилие затяга следует относить к механическим нагрузкам.

12.2 Расчет на внешние динамические воздействия техногенного происхождения

12.2.1 Расчет проходок на внешние динамические воздействия техногенного происхождения (воздушная ударная волна, падение летательного аппарата) проводят при совместном действии эксплуатационных и динамических нагрузок. Рассматривают динамические нагрузки на проходку, возникающие при действии ударной волны или при падении летательного аппарата на строительные конструкции. Общие положения и методы расчета принимают в соответствии с положениями 12. При выборе расчетных сочетаний и допускаемых напряжений динамические нагрузки рассматривают как соответствующие МРЗ.

12.2.2 В случае если спектры ответа при действии ударной волны или при падении летательного аппарата во всем диапазоне частот ниже спектров ответа при МРЗ, расчет на соответствующие воздействия допускается не проводить.

12.2.3 Расчет на циклическую прочность при внешнем динамическом воздействии техногенного происхождения допускается не проводить.

13 Расчет на вибропрочность трубных проходок

13.1 Расчетом на вибропрочность компонентов трубных проходок должна быть подтверждена циклическая прочность с учетом вибронапряжений в соответствии с разделом 10.

13.2 Расчет на вибропрочность компонентов трубных проходок не проводят для трубных проходок, не подвергающихся вибрационному нагружению.

13.3 Допускается не проводить расчеты на вибропрочность компонентов трубных проходок, если для присоединенных трубопроводов проведена отстройка от резонанса или выполнен любой из двух критериев:

- величины среднеквадратичных значений виброскоростей $\vartheta_{скз}$ не превышают $\vartheta_{скз} \le [\vartheta_{скз}]$, где $[\vartheta_{скз}] = 7{,}5$ мм/с;
- величины максимальных значений виброскоростей ϑ^*_{max} не превышают $\vartheta_{max} \le [\vartheta_{max}]$, где $[\vartheta_{max}] = 15$ мм/с.

Критерий по ϑ^*_{max} требует консервативного измерения скоростей в различных точках трубопроводной системы, проходящей через проходку, для определения точек с максимальной виброскоростью. Когда местоположение этих точек установлено, в них выполняют окончательные измерения максимальных скоростей.

Библиография

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

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

УДК 621.039:531:006.352 ОКС 27.120.20

Ключевые слова: прочность, проходки трубные, проходки кабельные, атомные станции, поверочный расчет на прочность, допускаемые напряжения

Редактор *Л.В. Коретникова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *Е.Д. Дульнева*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 29.12.2022. Подписано в печать 18.01.2023. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 4,18. Уч.-изд. л. 3,72.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

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

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

gost.e-ecolog.ru