ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ГОСТ Р 59115.9— 2021**

# ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ АТОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

## Поверочный расчет на прочность

**Издание официальное**

**Москва**
**Российский институт стандартизации**
**2022**

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 17 декабря 2021 г. № 1810-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 «РСТ», 2022

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
3.1 Термины и определения . . . . . 2
3.2 Сокращения и обозначения . . . . . 2
4 Общие положения . . . . . 5
5 Номинальные допускаемые напряжения . . . . . 7
6 Порядок определения напряжений и деформаций . . . . . 8
6.1 Приведенные напряжения . . . . . 8
6.2 Линеаризация напряжений . . . . . 8
6.3 Линеаризация деформаций . . . . . 11
6.4 История изменения приведенных напряжений . . . . . 11
6.5 Определение местных условных упругих приведенных напряжений . . . . . 14
6.6 Формирование расчетных циклов изменения напряжений . . . . . 19
7 Классификация напряжений . . . . . 19
8 Расчет на статическую прочность . . . . . 25
9 Расчет на устойчивость . . . . . 26
9.1 Основные положения расчета на устойчивость . . . . . 26
9.2 Расчет типовых компонентов без учета ползучести . . . . . 26
9.3 Расчет численными методами . . . . . 31
9.4 Расчет типовых компонентов в условиях ползучести . . . . . 31
10 Расчет на циклическую прочность . . . . . 33
11 Расчет на длительную циклическую прочность . . . . . 43
12 Расчет на сопротивление разрушению . . . . . 43
12.1 Общие положения . . . . . 43
12.2 Условия прочности . . . . . 45
12.3 Допускаемые значения коэффициентов интенсивности напряжений . . . . . 46
12.4 Определение коэффициента интенсивности напряжений $K_I$ . . . . . 48
12.5 Определение минимальной допускаемой температуры конструкции при гидравлических (пневматических) испытаниях . . . . . 51
13 Расчет на прогрессирующее изменение формы и размеров . . . . . 52
14 Расчет на длительную статическую прочность . . . . . 53
15 Расчет на внешние динамические воздействия . . . . . 55
15.1 Расчет на сейсмические воздействия . . . . . 55
15.2 Расчет на внешние динамические воздействия техногенного происхождения . . . . . 58
16 Расчет на вибропрочность . . . . . 58
Приложение А (рекомендуемое) Упрощенная методика расчета амплитуд циклов на основе истории изменения приведенных напряжений без учета концентрации . . . . . 61
Приложение Б (рекомендуемое) Формирование расчетных циклов напряжений . . . . . 62
Приложение В (рекомендуемое) Определение допускаемого числа циклов с учетом влияния водной среды . . . . . 67
Приложение Г (рекомендуемое) Расчет на длительную циклическую прочность . . . . . 70
Приложение Д (рекомендуемое) Расчет на сейсмические воздействия . . . . . 78
Приложение Е (рекомендуемое) Расчетно-экспериментальные методы оценки вибропрочности типовых элементов конструкций . . . . . 98
Библиография . . . . . 107

## Введение

Настоящий стандарт взаимосвязан с другими стандартами, входящими в комплекс стандартов, регламентирующих обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

# ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ АТОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

## Поверочный расчет на прочность

Rules for strength assessment of equipment and pipelines of nuclear power installations. Strength verification analysis

**Дата введения — 2022—03—01**

## 1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт устанавливает требования к поверочному расчету на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок, на которые распространяется действие федеральных норм и правил в области использования атомной энергии [1].

1.2 Настоящий стандарт распространяется на следующие виды расчетов:

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

1.3 Настоящий стандарт предназначен для применения при обосновании прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.

## 2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 16819 Приборы виброизмерительные. Термины и определения

ГОСТ Р 8.669 Государственная система обеспечения единства измерений. Виброметры с пьезоэлектрическими, индукционными и вихретоковыми вибропреобразователями. Методика поверки

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 59115.4—2021 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Длительные механические свойства конструкционных материалов

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

**Издание официальное**

ГОСТ Р 59115.6—2021 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Методы определения характеристик трещиностойкости конструкционных материалов

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

ГОСТ Р 59115.10—2021 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Уточненный поверочный расчет на стадии проектирования

ГОСТ Р 59115.11 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Поверочный расчет на постпроектных стадиях

ГОСТ Р 59115.13 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Поверочный расчет для стадии вывода из эксплуатации атомных энергетических установок

ГОСТ Р 59115.14—2021 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпуса водо-водяного энергетического реактора

ГОСТ Р 59115.15 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчет на прочность типовых узлов трубопроводов

ГОСТ Р 59115.16 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчет на прочность разъемных соединений

ГОСТ Р 59115.17 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчет на прочность перфорированных плит

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

## 3 Термины, определения, сокращения и обозначения

### 3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по [2], ГОСТ Р 59115.1, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 **средняя температура по сечению $\langle T \rangle$:** Температура стенки компонента оборудования или трубопровода, равная максимальному среднеарифметическому значению температур на его наружной и внутренней поверхностях в одном сечении в рассматриваемом режиме нагружения.

Примечания

1 Для частей корпусов реакторов температуру сечения следует определять с учетом внутреннего тепловыделения как среднеинтегральное значение распределения температур по толщине стенки корпуса.

2 Для шпилек и болтов температуру сечения следует определять как среднеинтегральное значение распределения температур по сечению.

3.1.2 **упругопластический расчет:** Расчет по определению напряженно-деформированного состояния компонента в предположении упругопластического поведения материала.

### 3.2 Сокращения и обозначения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения и обозначения:

АЭУ — атомная энергетическая установка;

ЛП — линия приведения;

МКЭ — метод конечных элементов;

МРЗ — максимальное расчетное землетрясение;

НДС — напряженно-деформированное состояние;

ННУЭ — нарушение нормальных условий эксплуатации;
НУЭ — нормальные условия эксплуатации;
СП — сечение приведения;
УИ — условия испытаний;
ПЗ — проектное землетрясение;
УПА — условия проектной аварии;
$a$ — накопленное усталостное повреждение;
$A^T$ — относительное удлинение образца после разрыва температуре $T$, %;
$A_з$ — заданное остаточное удлинение, %;
$c$ — 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;
$J_c$ — критическое значение $J$-интеграла, Н/мм;
$K_I$ — коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м$^{1/2}$;
$K_{Ic}$ — критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа · м$^{1/2}$;
$K_{Jc}$ — статическая трещиностойкость, соответствующая величине $J_c$, МПа · м$^{1/2}$;
$K_{ef}$ — эффективный коэффициент концентрации условных упругих напряжений;
$K_\sigma$ — теоретический коэффициент концентрации напряжений;
$L$ — расчетная длина оболочки, мм;
$L_{kr}$ — критическая длина оболочки, мм;
$n_{0,2}$ — 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;
$n_\sigma$ — коэффициент запаса прочности по условному местному приведенному напряжению при расчетах на циклическую прочность;
$N$ — число циклов нагружения компонента в эксплуатации;
$[N]$ — допускаемое число циклов нагружения компонента в эксплуатации;
$p_a$ — 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;
$R_{mt}^T$ — минимальное значение предела длительной прочности за время $t$ при температуре $T$, МПа;
$R_{pe}^T$ — предел пропорциональности при температуре $T$, МПа;
$s$ — номинальная толщина стенки компонента, мм;
$t$ — время, ч;
$T$ — температура, °С;
$\langle T \rangle$ — средняя температура по сечению, °С;
$T_t$ — температура, при достижении которой необходимо учитывать характеристики длительной прочности, пластичности и ползучести, °С;
$Z^T$ — относительное сужение поперечного сечения образца после разрыва при температуре $T$, %;
$\alpha$ — коэффициент линейного температурного расширения, К$^{-1}$;
$\varepsilon$ — деформация;
$\varphi_s$ — коэффициент снижения циклической прочности сварного соединения;

$\sigma$ — напряжение, МПа;

$\sigma_b$ — общие изгибные напряжения, МПа;

$\sigma_{bL}$ — местные изгибные напряжения, МПа;

$\sigma_m$ — общие мембранные напряжения, МПа;

$\sigma_{mL}$ — местные мембранные напряжения, МПа;

$\sigma_T$ — общие температурные напряжения, МПа;

$\sigma_{TL}$ — местные температурные напряжения, МПа;

$\sigma_к$ — напряжение самокомпенсации, МПа;

$\sigma_{кm}$ — напряжение компенсации растяжения или сжатия, МПа;

$\sigma_{кb}$ — напряжение компенсации изгиба, МПа;

$\sigma_{кs}$ — напряжение компенсации кручения, МПа;

$\sigma_{bw}$ — напряжение изгиба в шпильке (болте), МПа;

$\sigma_{mw}$ — среднее напряжение растяжения по сечению болта или шпильки, вызываемое механическими нагрузками, МПа;

$\sigma_i$, $\sigma_j$, $\sigma_k$ — напряжение на главных площадках $i$, $j$, $k$, МПа;

$\sigma_a$ — амплитуда напряжений без учета концентрации, МПа;

$\sigma_c$ — напряжение сжатия, МПа;

$\sigma_{kr}$ — критическое напряжение сжатия, МПа;

$(\sigma)_1$ — группа приведенных напряжений в оборудовании и трубопроводах, МПа;

$(\sigma)_2$ — группа приведенных напряжений в оборудовании и трубопроводах, МПа;

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

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

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

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

$(\sigma)_R$ — размах приведенных напряжений в компонентах оборудования и трубопроводов, МПа;

$(\sigma_L)$ — приведенные напряжения без учета концентрации, МПа;

$(\sigma_a)$ — амплитуда приведенных напряжений без учета концентрации, МПа;

$(\sigma_{aL})$ — амплитуда приведенных напряжений с учетом концентрации, МПа;

$(\sigma_{tr})$ — местные приведенные напряжения, рассчитанные с учетом упругопластического поведения материала, МПа;

$(\sigma_{aF})$ — 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;

$(\sigma_F)_{ij}$, $(\sigma_F)_{jk}$, $(\sigma_F)$ — 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;

$(\sigma_L)_{ij}$, $(\sigma_L)_{jk}$, $(\sigma_L)_{ik}$, $(\sigma_L)$ — 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;

$[\sigma]_t$ — номинальное допускаемое напряжение для расчета на длительную статическую прочность, МПа;

$[\sigma]_{wt}$ — номинальное допускаемое напряжение для расчета на длительную статическую прочность болтов и шпилек, МПа;

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

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

$[\sigma_c]_s$ — допускаемое напряжение сжатия при сейсмическом воздействии, МПа;

$\tau$ — касательные напряжения среза в компонентах, МПа;

$\tau_s$ — напряжения кручения, равномерные по сечению, МПа;

$\tau_{sw}$ — напряжение кручения в шпильке (болте), МПа;

$\tau_p$ — напряжения среза резьбы, МПа;

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

## 4 Общие положения

4.1 Расчетные оценки прочности, выполняемые при поверочном расчете, проводятся по предельным состояниям, предусмотренным федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии, устанавливающими требования к обоснованию прочности.

4.2 Поверочный расчет на стадии конструирования (проектирования) проводят в соответствии с требованиями настоящего стандарта. Поверочный расчет на стадии эксплуатации проводят в соответствии с требованиями ГОСТ Р 59115.11, а на стадии вывода из эксплуатации — ГОСТ Р 59115.13.

4.3 Поверочный расчет проводят после расчета по выбору основных размеров в соответствии с ГОСТ Р 59115.8 рассчитываемых компонентов. При проведении поверочного расчета на стадии проектирования (конструирования) следует использовать номинальные значения размеров и толщин стенок рассчитываемых компонентов, кроме расчета на устойчивость, который следует проводить по минимальным размерам, определяемым с учетом допусков и возможных утонений за проектный срок эксплуатации.

4.4 При поверочном расчете рассматривают все режимы эксплуатации и испытаний давлением (гидравлических, пневматических или пневмогидравлических), регламентированные проектом АЭУ, и учитывают все нагрузки (включая вызванные температурными и радиационными воздействиями, при их наличии), соответствующие рассматриваемым режимам.

4.5 Расчет на статическую прочность проводят для определения напряжений при всех значениях нагрузок и температур в регламентированных проектом режимах работы АЭУ и сопоставления полученных значений с допускаемыми, определенными по предельным состояниям кратковременное разрушение и пластическая деформация по всему сечению компонента.

4.6 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).

4.7 Расчет на циклическую прочность и длительную циклическую прочность выполняется на основе анализа общих и местных напряжений с целью исключения появления трещин при нагружении компонента 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.

Расчет на циклическую прочность проводят для компонентов, работающих при температурах, не превышающих $T_t$. Расчет на длительную циклическую прочность проводят для компонентов, работающих при температурах, превышающих $T_t$.

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

В результате расчета на циклическую и длительную 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 проектного срока службы.

4.8 Расчет на сопротивление разрушению проводят для компонентов с постулированными трещиноподобными дефектами на основе сопоставления значения расчетной характеристики разрушения с допускаемым значением в целях оценки возможности нестабильного роста трещины.

4.9 Расчет на длительную статическую прочность проводят на основе сопоставления действующих напряжений во всех режимах с допускаемыми с целью исключения разрушения оборудования или трубопроводов при длительном статическом нагружении.

Допускаемые напряжения определяют исходя из характеристик сопротивления длительному статическому разрушению, зависящих от температуры и длительности нагружения, с введением запасов прочности по напряжениям.

В результате расчета определяют допускаемые нагрузки для заданных режимов и проектного срока службы или допускаемый срок службы для заданных режимов эксплуатации.

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

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

В результате расчета определяют допускаемые нагрузки для заданных режимов и проектного срока службы или допускаемый срок службы для заданных режимов эксплуатации.

4.11 Расчет на внешние динамические воздействия включает расчет на сейсмические воздействия, а также расчеты на воздействие воздушной ударной волны и на падение летательного аппарата на строительные конструкции АЭУ.

4.12 Целью расчета на вибропрочность является уменьшение вибрационного воздействия на рассматриваемый компонент путем отстройки частот собственных колебаний компонента от возмущающих частот источников вибрации, а также оценка допустимости вибрационных нагрузок.

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

4.14 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.

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

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

4.17 Поверочный расчет проводят с учетом всех расчетных нагрузок и воздействий, в том числе:

- внутреннее и наружное давление;
- нагрузки от затяга болтов и шпилек;
- весовые нагрузки (собственный вес оборудования или трубопровода и их содержимого, вес присоединенных изделий, теплоизоляции и т. п.);
- реакции и перемещения опор и трубопроводов;
- температурные воздействия;
- внешние динамические нагрузки, включая сейсмические воздействия и динамические воздействия техногенного происхождения;
- вибрационные нагрузки, а также всех расчетных режимов эксплуатации и испытаний давлением.

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).

4.18 Основными расчетными режимами эксплуатации и испытаний являются:

- режим затяга болтов и шпилек;
- режим пуска;

- стационарный режим;
- режим срабатывания аварийной защиты;
- переходный режим;
- режим останова;
- условия испытаний;
- нарушение нормальных условий эксплуатации;
- условия проектной аварии.

Категории расчетных режимов НУЭ, ННУЭ и УПА для рассчитываемого компонента должны быть определены на основе анализа условий его работы при нормальной эксплуатации, при нарушении нормальной эксплуатации и при проектной аварии АЭУ.

4.19 При проведении поверочного расчета наплавленных поверхностей или плакированных стенок напряжения в стенке и наплавке рассматривают с учетом температурных напряжений, вызванных разницей коэффициентов линейного расширения основного металла и наплавки.

4.20 При поверочном расчете следует использовать значения физических и механических характеристик конструкционных материалов согласно требованиям ГОСТ Р 59115.2 — ГОСТ Р 59115.4.

4.21 Настоящим стандартом не регламентируются методы, применяемые для определения расчетных нагрузок, внутренних усилий, перемещений, напряжений и деформаций рассчитываемых компонентов. Выбранный метод должен учитывать все расчетные нагрузки для всех расчетных случаев и давать возможность определить все необходимые расчетные группы категорий напряжений.

Расчет параметров НДС и расчетных групп категорий напряжений в некоторых типовых узлах трубопроводов рекомендуется проводить по ГОСТ Р 59115.15; расчет усилий предварительной затяжки разъемных соединений и определение категорий напряжений в болтах и шпильках рекомендуется проводить в соответствии с ГОСТ Р 59115.16; расчет перфорированных плит рекомендуется проводить в соответствии с ГОСТ Р 59115.17.

4.22 При проведении поверочного расчета все напряжения в конструкции 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 компонентов оборудования и трубопроводов АЭУ следует определять по механическим характеристикам конструкционных материалов при температуре $\langle T \rangle$.

5.2 Номинальные допускаемые напряжения вычисляют по значениям кратковременных и длительных механических характеристик конструкционных материалов, определяемым согласно 4.20. Повышение пределов прочности и текучести под действием облучения не учитывают.

Расчетные значения механических характеристик конструкционных материалов компонентов, находящихся в контакте с натрием реакторной чистоты, определяют согласно ГОСТ Р 59115.4.

5.3 Номинальные допускаемые напряжения определяют в зависимости от значения температуры $T_t$, являющейся характеристикой конструкционного материала и определяемой по ГОСТ Р 59115.4.

5.4 Номинальное допускаемое напряжение для компонентов оборудования и трубопроводов, за исключением болтов и шпилек, вычисляют 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 $n_{0,2} = 1,5$; $n_m = 2,6$.

Дополнительно для компонентов, за исключением болтов и шпилек, с температурой $\langle T \rangle$, превышающей $T_t$, устанавливают номинальное допускаемое напряжение для расчета на длительную статическую прочность

$$[\sigma]_t = \frac{R_{mt}^{\langle T \rangle}}{n_{mt}}, \tag{5.2}$$

где $n_{mt} = 1,5$.

5.5 Номинальное допускаемое напряжение для болтов и шпилек вычисляют по формуле

$$[\sigma]_w = \frac{R_{p0,2}^{\langle T \rangle}}{n_{0,2}}, \tag{5.3}$$

где $n_{0,2} = 2$.

Дополнительно для болтов и шпилек, температура которых превышает $T_t$, устанавливают номинальное допускаемое напряжение для расчета на длительную статическую прочность

$$[\sigma]_{wt} = \frac{R_{mt}^{\langle T \rangle}}{n_{mt}}, \tag{5.4}$$

где $n_{mt} = 3$.

5.6 Для корпусов страховочных и защитных оболочек номинальное допускаемое напряжение вычисляют по формуле

$$[\sigma]_c = \min\left(\frac{R_{p0,2}^{\langle T \rangle}}{n_{0,2}}; \frac{R_m^{\langle T \rangle}}{n_m}\right), \tag{5.5}$$

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 вычисляют по формуле

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

где $\sigma_1$ — алгебраически наибольшее главное напряжение;

$\sigma_3$ — алгебраически наименьшее главное напряжение.

6.1.2 Приведенное напряжение по энергетической теории Мизеса вычисляют по формуле

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

или

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

где $\sigma_x$, $\sigma_y$, $\sigma_z$, $\sigma_{xy}$, $\sigma_{yz}$, $\sigma_{zx}$ — компоненты тензора напряжений $\{\sigma\}$;

$\sigma_1$, $\sigma_2$, $\sigma_3$ — главные напряжения.

### 6.2 Линеаризация напряжений

#### 6.2.1 Общие положения линеаризации напряжений

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

СП следует проводить через зону компонента, где ожидается первое появление пластических деформаций. Если компонент представляет собой цилиндрическую оболочку, то сечение следует проводить перпендикулярно к срединной поверхности оболочки. В противном случае СП рекомендуется выбирать перпендикулярно к одной из внешних поверхностей.

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

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

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

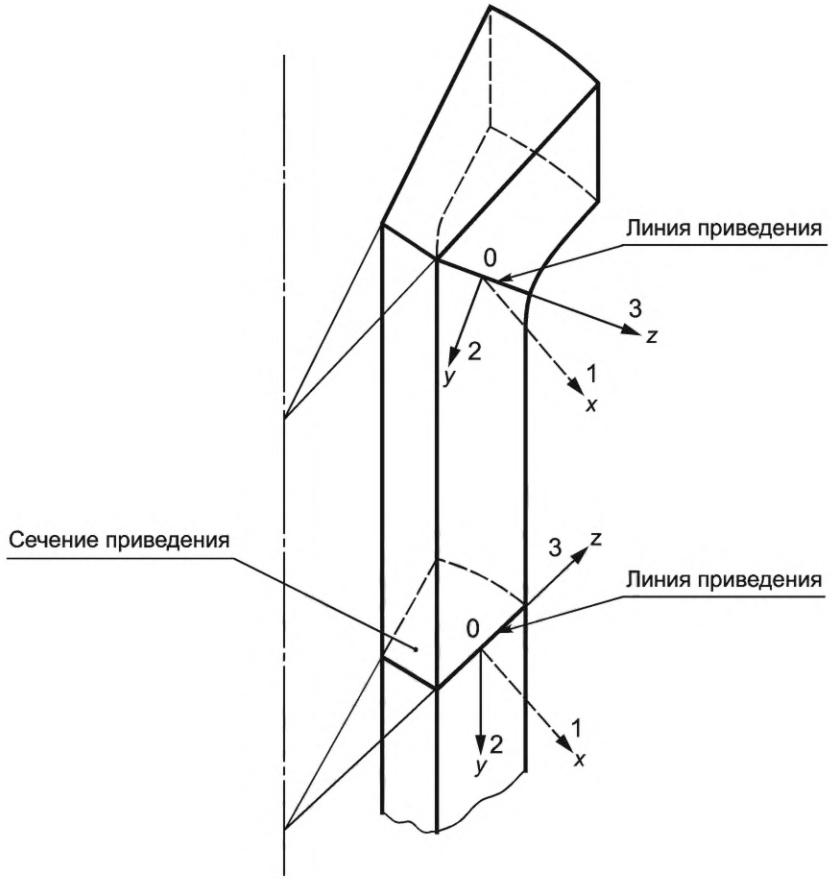



Рисунок 6.1 — Пример выбора СП и ЛП

**6.2.2 Линеаризация напряжений по сечению приведения**

Если СП — плоское, то напряженное состояние в каждой точке сечения можно представить как сумму средних, изгибных и нелинейных составляющих напряжений $\sigma_{m\,\alpha\beta} + \sigma_{b\,\alpha\beta} + \sigma_{ni\,\alpha\beta}$. 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 соответственно;

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

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.

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.

Нелинейные составляющие напряжений следует вычислять по формуле

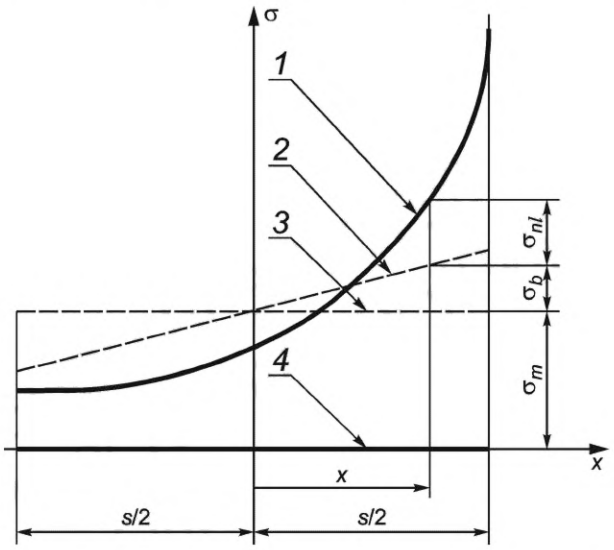
$$\sigma_{nl\,\alpha\beta} = \sigma_{\alpha\beta} - \sigma_{(m+b)\,\alpha\beta}. \tag{6.7}$$

**6.2.3 Линеаризация напряжений по линии приведения**

Напряженное состояние в каждой точке, лежащей на ЛП, также представляется (см. рисунок 6.2) как сумма 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 $x$ — расстояние от срединной поверхности до рассматриваемой точки, лежащей на ЛП.




*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

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.

Изгибные составляющие напряжений линейно изменяются по ЛП и равны

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

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 следует вычислять по формуле

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

### 6.3 Линеаризация деформаций

Деформированное состояние в каждой точке, лежащей на ЛП, может быть представлено как сумма средних, изгибных и нелинейных составляющих деформаций $\varepsilon_{m\,\alpha\beta} + \varepsilon_{b\,\alpha\beta} + \varepsilon_{nl\,\alpha\beta}$. При этом величины, характеризующие мембранную и изгибную составляющие деформаций постоянны для всех точек ЛП

$$\varepsilon_{(m+b)\,\alpha\beta} = ax + b, \tag{6.13}$$

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

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

$$\varepsilon_{m\,\alpha\beta} = b = \frac{1}{s}\int_{-s/2}^{+s/2} \varepsilon_{\alpha\beta} dx, \tag{6.14}$$

где $s$ — длина ЛП.

Изгибные составляющие деформаций линейно изменяются по ЛП и равны

$$\varepsilon_{b\,\alpha\beta} = ax = \frac{12x}{s^3}\int_{-s/2}^{+s/2} \varepsilon_{\alpha\beta} x\, dx. \tag{6.15}$$

На концах ЛП изгибные деформации принимают значения

$$\varepsilon_{b\,\alpha\beta} = \pm\frac{6}{s^2}\varepsilon\int_{-s/2}^{+s/2} \varepsilon_{\alpha\beta}\ x\, dx. \tag{6.16}$$

### 6.4 История изменения приведенных напряжений

6.4.1 Для рассматриваемого компонента конструкции на основе анализа условий эксплуатации, регламентированных проектом, устанавливается типовая физически возможная последовательность во времени режимов нагружения, включая условия испытаний и нарушения нормальных условий эксплуатации.

Для принятой последовательности режимов нагружения упругим расчетом следует определять НДС в рассматриваемой зоне компонента 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 компонент, достигали своих экстремальных значений. Расчетом должны быть определены экстремальные значения компонент тензора напряжений в рассматриваемой зоне в расчетные моменты времени.

6.4.2 Расчет истории приведенных напряжений с использованием теории максимальных касательных напряжений Треска следует проводить в порядке, изложенном в 6.4.2.1—6.4.2.4.

6.4.2.1 По шести компонентам тензора напряжений вычисляют значения главных напряжений $\sigma_1$, $\sigma_2$ и $\sigma_3$ и соответствующие им направления главных площадок. Приведенные напряжения $(\sigma)$, $(\sigma_L)$ следует определять для моментов времени, в которые любое из главных напряжений принимает экстремальное значение.

Для фиксации главных площадок выбирают момент времени, когда действует наибольшее за всю историю главное напряжение $\sigma_1$. Если таких моментов несколько, выбирают тот из них, когда минимально напряжение $\sigma_3$. Главные площадки в выбранный момент времени обозначают индексами: $i$ — для главного напряжения $\sigma_1$, $j$ — для $\sigma_2$ и $k$ — для $\sigma_3$. Напряжения $\sigma_{i,l}$, $\sigma_{j,l}$, $\sigma_{k,l}$, условно отнесенные к зафиксированным площадкам $i$, $j$, $k$, рассчитываются для всех остальных моментов времени $t_l$, $l$ = 1, 2, ..., $m$ – 1, в следующем порядке:

а) $\sigma_{i,l}$ равно тому из значений $\sigma_1$, $\sigma_2$, $\sigma_3$ в момент времени $t_l$, площадка действия которого наклонена к площадке $i$ под наименьшим углом;

б) $\sigma_{j,l}$ равно тому из значений $\sigma_1$, $\sigma_2$, $\sigma_3$ в момент времени $t_l$, [за исключением значения, выбранного для площадки $i$ по перечислению а)], площадка действия которого наклонена к площадке $j$ под наименьшим углом;

в) $\sigma_{k,l}$ равно оставшемуся значению главного напряжения в момент времени $t_l$.

Для начального $t_0$ и конечного $t_m$ моментов времени $\sigma_i = \sigma_j = \sigma_k = 0$ или равняются постоянным значениям, например, напряжениям от веса или монтажного натяга.

6.4.2.2 Историю изменения приведенных напряжений $(\sigma)_{ij,l}$, $(\sigma)_{jk,l}$, $(\sigma)_{ik,l}$ для момента времени $t_l$ без учета концентрации напряжений вычисляют по формулам:

$$(\sigma)_{ij,l} = \sigma_{i,l} - \sigma_{j,l};$$
$$(\sigma)_{jk,l} = \sigma_{j,l} - \sigma_{k,l}; \quad (6.17)$$
$$(\sigma)_{ik,l} = \sigma_{i,l} - \sigma_{k,l},$$

где $l = 1, 2, ..., m - 1$;

$\sigma_{i,l}$, $\sigma_{j,l}$, $\sigma_{k,l}$ — напряжения, условно отнесенные к площадкам $i$, $j$, $k$ для момента времени $t_l$, рассчитанные без учета концентрации напряжений.

6.4.2.3 Историю изменения местных приведенных напряжений $(\sigma_L)_{ij,l}$, $(\sigma_L)_{jk,l}$, $(\sigma_L)_{ik,l}$ для момента времени $t_l$ с учетом концентрации напряжений вычисляют по формулам:

$$(\sigma_L)_{ij,l} = \sigma_{Li,l} - \sigma_{Lj,l};$$
$$(\sigma_L)_{jk,l} = \sigma_{Lj,l} - \sigma_{Lk,l}; \quad (6.18)$$
$$(\sigma_L)_{ik,l} = \sigma_{Li,l} - \sigma_{Lk,l};$$

где $l = 1, 2, ..., m - 1$;

$\sigma_{Li,l}$, $\sigma_{Lj,l}$, $\sigma_{Lk,l}$ — напряжения, условно отнесенные к площадкам $i$, $j$, $k$ для момента времени $t_l$, рассчитанные по компонентам тензора местных напряжений.

6.4.2.4 Размах напряжений $(\sigma)_R$ следует вычислять по истории изменения приведенных напряжений ($\sigma$) для принятой последовательности режимов нагружения НУЭ по формуле

$$(\sigma)_R = \max\begin{Bmatrix}(\sigma)_{ij,\max} - (\sigma)_{ij,\min} \\ (\sigma)_{jk,\max} - (\sigma)_{jk,\min} \\ (\sigma)_{ik,\max} - (\sigma)_{ik,\min}\end{Bmatrix}, \quad (6.19)$$

где $(\sigma)_{ij,\max}$, $(\sigma)_{jk,\max}$, $(\sigma)_{ik,\max}$ и $(\sigma)_{ij,\min}$, $(\sigma)_{jk,\min}$, $(\sigma)_{ik,\min}$ — максимальные и минимальные значения соответствующих приведенных напряжений для всей истории изменения приведенных напряжений.

6.4.3 Расчет истории изменения приведенных напряжений с использованием энергетической теории Мизеса следует проводить в порядке, изложенном в 6.4.3.1—6.4.3.5.

6.4.3.1 Приведенные напряжения ($\sigma$), ($\sigma_L$) определяют по суммам приращений приведенных напряжений, вычисляемых, в свою очередь, по приращениям компонент напряжений.

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

$$\Delta\sigma_{x(l,n)} = \sigma_{x(l)} - \sigma_{x(n)}, \quad \Delta\sigma_{y(l,n)} = \sigma_{y(l)} - \sigma_{y(n)};$$
$$\Delta\sigma_{z(l,n)} = \sigma_{z(l)} - \sigma_{z(n)}, \quad \Delta\sigma_{xy(l,n)} = \sigma_{xy(l)} - \sigma_{xy(n)};$$
$$\Delta\sigma_{yz(l,n)} = \sigma_{yz(l)} - \sigma_{yz(n)}, \quad \Delta\sigma_{zx(l,n)} = \sigma_{zx(l)} - \sigma_{zx(n)}. \quad (6.20)$$

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

$$\Delta\sigma_{Lx(l,n)} = \sigma_{Lx(l)} - \sigma_{Lx(n)}, \quad \Delta\sigma_{Ly(l,n)} = \sigma_{Ly(l)} - \sigma_{Ly(n)};$$
$$\Delta\sigma_{Lz(l,n)} = \sigma_{Lz(l)} - \sigma_{Lz(n)}, \quad \Delta\sigma_{Lxy(l,n)} = \sigma_{Lxy(l)} - \sigma_{Lxy(n)};$$
$$\Delta\sigma_{Lyz(l,n)} = \sigma_{Lyx(l)} - \sigma_{Lyz(n)}, \quad \Delta\sigma_{Lzx(l,n)} = \sigma_{Lzx(l)} - \sigma_{Lzx(n)}. \quad (6.21)$$

6.4.3.2 Приращение приведенных напряжений без учета концентрации напряжений от момента времени $t_l$ до момента $t_n$ следует вычислять по формуле

$$\Delta(\sigma)_{l,n} = \frac{1}{\sqrt{2}}\Big[\left(\Delta\sigma_{x(l,n)} - \Delta\sigma_{y(l,n)}\right)^2 + \left(\Delta\sigma_{y(l,n)} - \Delta\sigma_{z(l,n)}\right)^2 + \\ + \left(\Delta\sigma_{z(l,n)} - \Delta\sigma_{x(l,n)}\right)^2 + 6\left(\Delta\sigma_{xy(l,n)}{}^2 + \Delta\sigma_{yz(l,n)}{}^2 + \Delta\sigma_{zy(l,n)}{}^2\right)\Big]^{1/2}. \quad (6.22)$$

Приращение приведенных напряжений с учетом концентрации напряжений от момента времени $t_l$ до момента $t_n$ следует вычислять по формуле

$$\Delta(\sigma_L)_{l,n} = \frac{1}{\sqrt{2}}\Big[\left(\Delta\sigma_{Lx(l,n)} - \Delta\sigma_{Ly(l,n)}\right)^2 + \left(\Delta\sigma_{Ly(l,n)} - \Delta\sigma_{Lz(l,n)}\right)^2 + \\ + \left(\Delta\sigma_{Lz(l,n)} - \Delta\sigma_{Lx(l,n)}\right)^2 + 6\left(\Delta\sigma_{Lxy(l,n)}{}^2 + \Delta\sigma_{Lyz(l,n)}{}^2 + \Delta\sigma_{Lzy(l,n)}{}^2\right)\Big]^{1/2}. \quad (6.23)$$

6.4.3.3 История изменения приведенных напряжений без учета концентрации ($\sigma$) формируется в следующем порядке:

- для начального момента времени $t_0$ $(\sigma)_0$ равно нулю или постоянному значению, например, напряжениям от веса или монтажного натяга. Индекс $h$ момента времени реверса приведенного напряжения принимается равным нулю, т. е. $(\sigma)_h = (\sigma)_0$;
- для первого расчетного момента времени $t_1$ (при $l = 1$)

$$(\sigma)_l = (\sigma)_0 + \lambda_1 \cdot \Delta(\sigma)_{1,0}, \quad (6.24)$$

где $\lambda_1 = 1$;

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

$$\begin{cases}\Delta(\sigma)_{l,h} \geq \Delta(\sigma)_{l-1,h} \\ \Delta(\sigma)_{l,h} \geq \Delta(\sigma)_{l,l-1}\end{cases}, \quad (6.25)$$

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

$$(\sigma)_l = (\sigma)_h + \lambda_l \cdot \Delta(\sigma)_{l,h}. \quad (6.26)$$

Пример формирования истории приведенного напряжения ($\sigma$) показан на рисунке 6.3.

6.4.3.4 История изменения местных приведенных напряжений с учетом концентрации ($\sigma_L$) формируется в следующем порядке:

- 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. $(\sigma_L)_h=(\sigma_L)_0$;
- для первого расчетного момента времени $t_1$ (при $l = 1$)

$$(\sigma_L)_1 = (\sigma_L)_0 + \lambda_1 \cdot \Delta(\sigma_L)_{1,0}, \quad (6.27)$$

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

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

$$\begin{cases}\Delta(\sigma_L)_{l,h} \geq \Delta(\sigma_L)_{l-1,h} \\ \Delta(\sigma_L)_{l,h} \geq \Delta(\sigma_L)_{l,l-1}\end{cases}, \quad (6.28)$$

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

$$(\sigma_L)_l = (\sigma_L)_h + \lambda_l \cdot \Delta(\sigma_L)_{l,h}. \quad (6.29)$$

6.4.3.5 Размах напряжений $(\sigma)_R$ следует вычислять по истории изменения приведенных напряжений ($\sigma$) для принятой последовательности режимов нагружения НУЭ по формуле

$$(\sigma)_R = (\sigma)_{max} - (\sigma)_{min}, \quad (6.30)$$

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

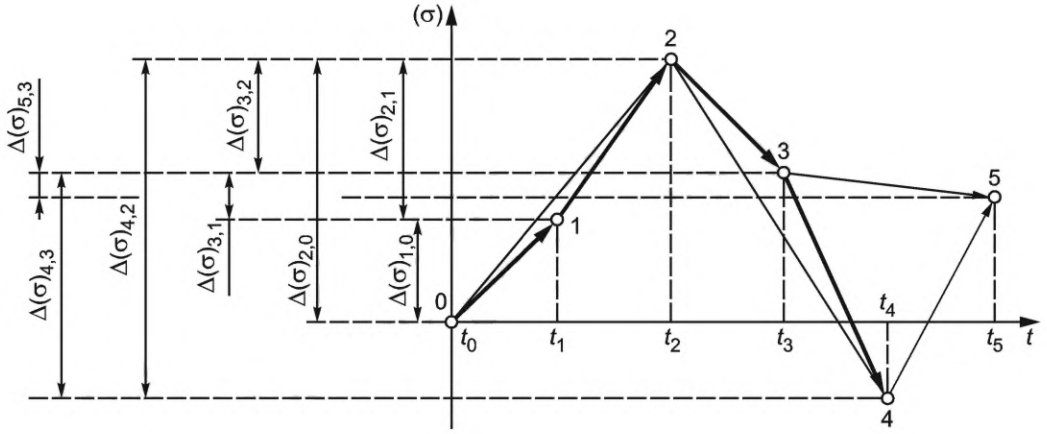



Рисунок 6.3 — Пример формирования истории приведенного напряжения (σ) с использованием теории Мизеса

### 6.5 Определение местных условных упругих приведенных напряжений

6.5.1 История изменения местных условных упругих приведенных напряжений ($\sigma_F$) формируется одним из следующих методов:

- на основе истории изменения местных приведенных напряжений ($\sigma_L$) с учетом поправки на местные пластические деформации материала при помощи упрощенного упругопластического расчета согласно 6.5.2;
- на основе истории изменения местных приведенных напряжений ($\sigma_L$) с использованием эффективного коэффициента концентрации $K_{ef}$ согласно 6.5.4;
- при помощи полного упругопластического расчета согласно 6.5.3.

Правила определения местных условных упругих напряжений в резьбах приведены в 6.5.5.

Историю изменения местных приведенных напряжений ($\sigma_L$) следует рассчитывать согласно положениям 6.4.

**6.5.2 Упрощенный упругопластический расчет**

6.5.2.1 Поправку на упругопластическое деформирование следует проводить с использованием степенной аппроксимации диаграммы растяжения материала следующего вида

$$\sigma = \begin{cases} \varepsilon \cdot E^T, \text{ если } \varepsilon \le \varepsilon_e \\ R^T_{pe}\left(\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_e}\right)^{\nu}, \text{ если } \varepsilon > \varepsilon_e \end{cases}, \tag{6.31}$$

где $R^T_{pe} = \left[\dfrac{R^T_{p0,2}}{\left(2\cdot 10^{-3}\cdot E^T + R^T_{p0,2}\right)^{\nu}}\right]^{\frac{1}{1-\nu}}$ — предел пропорциональности, МПа;

$\nu = \dfrac{0{,}73\cdot \lg\left[\left(1+1{,}4\cdot 10^{-2}\cdot Z^T\right)\dfrac{R^T_m}{R^T_{p0,2}}\right]}{\lg\left(\dfrac{2{,}3\cdot \lg\dfrac{100}{100-Z^T}}{2\cdot 10^{-3}+R^T_{p0,2}/E^T}\right)}$ — показатель упрочнения;

$\varepsilon_e = \dfrac{R^T_{pe}}{E^T}$ — деформация, соответствующая пределу пропорциональности.

Если в рассматриваемой зоне расположен сварной шов, то значения $R^T_{pe}$ и $\nu$ принимают наименьшими из значений для металла шва и основного металла.

При переменной в течение полуцикла температуре значения $R^T_{pe}$ и $\nu$ вычисляют для максимального и минимального значений температуры в полуцикле по соответствующим значениям $R^T_{p0,2}$, $R^T_m$, $Z^T$, $E^T$. Расчетное значение $R^T_{pe}$ принимают равным полусумме соответствующих значений при максимальной и минимальной температурах полуцикла. Расчетное значение $\nu$ принимают равным своему минимальному значению в интервале температур полуцикла. Допускается использовать в расчете значения $R^T_{pe}$ и $\nu$, соответствующие максимальной температуре полуцикла. Допускается принимать $\nu = 0$ при условии использования в качестве расчетного значения $R^T_{pe}$ полусуммы значений предела текучести $R^T_{p0,2}$ при максимальной и минимальной температурах полуцикла, либо значения $R^T_{p0,2}$ при максимальной температуре полуцикла.

При температуре выше температуры $T_t$ значение $R^T_{pe}$ определяют по изохронной кривой деформирования за время нагружения компонента в течение рассматриваемого полуцикла.

Длительность полуцикла равна времени изменения напряжений от минимального (максимального) до максимального (минимального) значения. При расчете напряжений в процессе пуска, выхода на стационарный режим после какого-либо переходного режима и работы на стационарном режиме до следующего переходного режима при температурах выше температуры $T_t$ необходимо учитывать среднее время работы на стационарном режиме между соответствующими переходными режимами.

При температуре, превышающей температуру $T_t$, показатель упрочнения следует вычислять по формуле

$$\nu = \frac{\lg\left(\dfrac{\sigma^T}{R^T_{p0,2t}}\right)}{\lg\left(\dfrac{e^T}{e^T_{0,2t}}\right)}, \qquad (6.32)$$

где $R^T_{p0,2t}$, $\sigma^T$ — предел текучести и напряжение, соответствующее упругопластической деформации $e^T$, принимаемые по изохронной кривой деформирования для длительности $t$ и температуры $T$ полуцикла;

$e^T_{0,2t}$ — деформация, соответствующая пределу текучести $R^T_{p0,2t}$;

$e^T$ — деформация, соответствующая $\sigma^T$ (не менее 2 %).

6.5.2.2 Графики изменения напряжений $(\sigma_F)$ и $(\sigma_{tr})$ строят путем последовательной обработки значений $(\sigma_L)$ для расчетных моментов времени $t_1$, $t_2$, …, $t_l$, …, $t_m$. При этом используют вспомогательные параметры $\xi$, $\lambda$ и $\gamma$, а также индексы моментов времени $l$, $b$ и $h$. В начале расчета принимают: $b = h = 0$, $l = 1$, $\xi = \lambda = \gamma = 1$, $(\sigma_L)_0 = (\sigma_F)_0 = (\sigma_{tr})_0 = 0$. Значения $(\sigma_F)_l$ и $(\sigma_{tr})_l$ ($l = 1, 2, ..., m$); рассчитывают в зависимости от значения безразмерной величины $(\sigma_L)_l/R^T_{pe}$ в следующем порядке:

а) в случае если $(\sigma_L)_l/R^T_{pe} < -1$, при $\lambda = 1$ и $\gamma = 1$ и ни разу не была использована формула (6.33), то следует принимать $\lambda = \gamma = -1$;

б) значения параметров $\xi$, $\lambda$ и $\gamma$, а также индексов моментов времени $b$ и $h$ для дальнейших вычислений принимают согласно следующим условиям, проверяемым в последовательности 1) — 3):

1) если $\gamma \cdot (\sigma_L)_l/R^T_{pe} < \lambda\gamma - 2$ и для расчета $(\sigma_F)_l$ в предшествующие моменты времени была использована формула (6.33), то принимают $\xi = 2$, $\gamma = -\gamma$, $h = b$.

Условие 2) не проверяется;

2) если $\gamma \cdot (\sigma_L)_l/R^T_{pe} > \lambda\gamma$, то параметры $\xi$, $\gamma$ и индекс $h$ сохраняют свои значения, определенные для предшествующего момента времени;

3) если $|(\sigma_L)_l/R^T_{pe}|$ приняло наибольшее значение среди всех ранее рассмотренных моментов времени, следует принимать $\xi = 1$, $h = 0$;

в) если на этапе б) выполнено хотя бы одно из условий 1) — 3) [что соответствует упругопластическому деформированию на участке нагружения $t_{l-1} - t_l$], $(\sigma_F)_l$ и $(\sigma_{tr})_l$ следует вычислять по формулам:

$$(\sigma_F)_l = \mathrm{sign}\left[(\sigma_L)_l - (\sigma_L)_h\right]\left(\xi R^T_{pe}\right)^{\frac{\nu-1}{\nu+1}} \cdot \left(\frac{1+\nu}{2}\left[(\sigma_L)_l - (\sigma_L)_h\right]^2 + \frac{1-\nu}{2}\left(\xi R^T_{pe}\right)^2\right)^{\frac{1}{1+\nu}} + (\sigma_F)_h, \qquad (6.33)$$

$$(\sigma_{tr})_l = \mathrm{sign}\left[(\sigma_L)_l - (\sigma_L)_h\right]\left(\xi R^T_{pe}\right)^{1-\nu}\left|(\sigma_F)_l - (\sigma_F)_h\right|^{\nu} + (\sigma_{tr})_h. \qquad (6.34)$$

Если не выполнено ни одно из условий 1) — 3) [что соответствует упругому деформированию на участке нагружения $t_{l-1} - t_l$], принимают:

$$(\sigma_F)_l = (\sigma_L)_l - (\sigma_L)_b + (\sigma_F)_b; \quad (6.35)$$

$$(\sigma_{tr})_l = (\sigma_L)_l - (\sigma_L)_b + (\sigma_{tr})_b, \quad (6.36)$$

и вычисления продолжаются на этапе г);

г) после вычисления $(\sigma_F)_l$ по формуле (6.33) следует принимать $b = l$, $\lambda = (\sigma_L)_b/R^T_{pe}$;

д) если $l < m$, то следует принимать $l = l + 1$ и вычисления продолжаются для следующего момента времени $t_l$ на этапе а). При $l = m$ расчет истории изменения местных условных упругих напряжений $(\sigma_F)$ завершен.

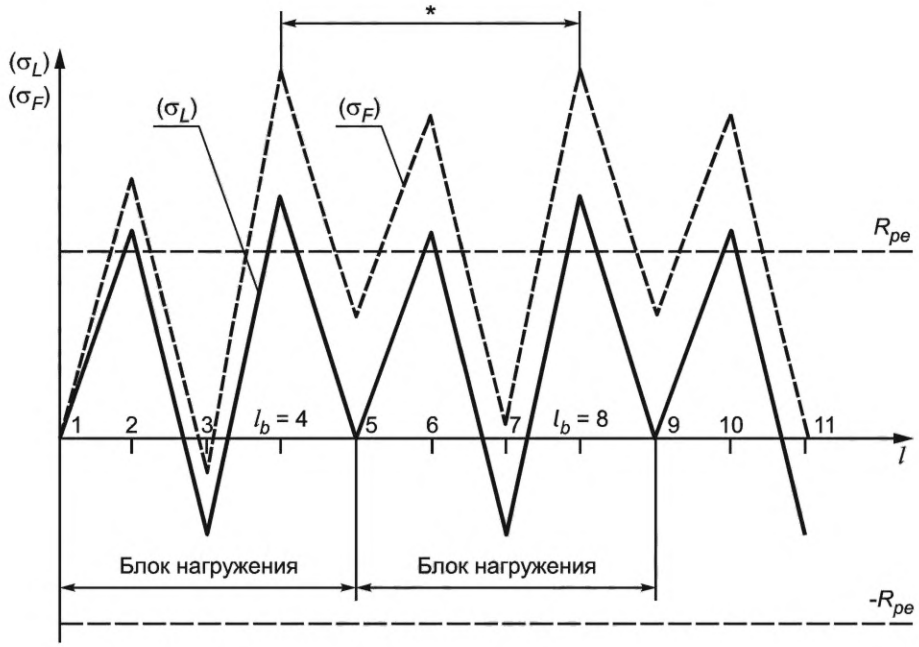
6.5.2.3 Упрощенный упругопластический расчет по формуле (6.33) допускается выполнять для зоны концентрации напряжений при выполнении условия

$$\frac{|(\sigma_L)_l|_{\max}}{K_{(\sigma)}} \le 2R^T_{p0,2}. \quad (6.37)$$

В случае невыполнения условия (6.37) определение условных упругих местных напряжений $(\sigma_F)$ следует проводить полным упругопластическим расчетом компонента в соответствии с 6.5.3.

6.5.2.4 В случае, когда процесс нагружения компонента представляет собой периодическую последовательность, графики изменения напряжений $(\sigma_F)$ допускается строить с использованием повторяющихся блоков. При этом, если при расчете истории $(\sigma_F)$ по 6.5.2.2 использована хотя бы один раз формула (6.33), то следует рассмотреть последовательно два одинаковых блока изменения напряжений $(\sigma_L)$ и рассчитать по ним два блока напряжений $(\sigma_F)$. В этом случае число полуциклов (циклов) каждого типа между абсолютно наибольшими значениями $(\sigma_F)$ принимают равным ожидаемому при эксплуатации числу блоков нагружения за вычетом 1, число остальных равно 1.

Пример истории изменения местных приведенных напряжений $(\sigma_L)$ и $(\sigma_F)$ показан на рисунке 6.4.




* Полуциклы между наибольшими значениями $(\sigma_F)$

Рисунок 6.4 — График изменения местных приведенных напряжений $(\sigma_L)$ и $(\sigma_F)$

### 6.5.3 Полный упругопластический расчет

6.5.3.1 В результате полного упругопластического расчета НДС с учетом концентрации напряжений для каждого расчетного момента времени $t_l$ определяют следующие компоненты деформации в точке: $\varepsilon_{x(l)}$, $\varepsilon_{y(l)}$, $\varepsilon_{z(l)}$, $\varepsilon_{xy(l)}$, $\varepsilon_{yz(l)}$, $\varepsilon_{zx(l)}$.

Значения компонент условных упругих напряжений следует вычислять по формулам:

$$\sigma_{Fx(l)} = \frac{E^T}{(1+\mu)(1-2\mu)}\left[(1-\mu)\varepsilon_{x(l)} + \mu\varepsilon_{y(l)} + \mu\varepsilon_{z(l)} - (1+\mu)\alpha^T T\right]; \quad (6.38)$$

$$\sigma_{Fy(l)} = \frac{E^T}{(1+\mu)(1-2\mu)}\left[(1-\mu)\varepsilon_{y(l)} + \mu\varepsilon_{x(l)} + \mu\varepsilon_{z(l)} - (1+\mu)\alpha^T T\right]; \quad (6.39)$$

$$\sigma_{Fz(l)} = \frac{E^T}{(1+\mu)(1-2\mu)}\left[(1-\mu)\varepsilon_{z(l)} + \mu\varepsilon_{x(l)} + \mu\varepsilon_{y(l)} - (1+\mu)\alpha^T T\right]; \quad (6.40)$$

$$\sigma_{Fxy(l)} = \frac{E^T}{2(1+\mu)}\varepsilon_{xy(l)}; \quad (6.41)$$

$$\sigma_{Fyz(l)} = \frac{E^T}{2(1+\mu)}\varepsilon_{yz(l)}; \quad (6.42)$$

$$\sigma_{Fzx(l)} = \frac{E^T}{2(1+\mu)}\varepsilon_{zx(l)}, \quad (6.43)$$

где значение коэффициента Пуассона $\mu$ соответствует упругому деформированию материала.

6.5.3.2 История изменения местных приведенных условных упругих напряжений ($\sigma_F$) формируется с использованием теории Мизеса в соответствии с правилами, изложенными в 6.4.3, с тем отличием, что вместо компонент местных напряжений $\sigma_{L(l)}$ должны рассматриваться компоненты $\sigma_{F(l)}$, рассчитанные по формулам (6.38)—(6.43), при этом вместо приведенных напряжений $(\sigma_L)_l$ должны определяться условные упругие напряжения $(\sigma_F)_l$.

6.5.3.3 Напряжение ($\sigma_{tr}$) для момента времени $t_l$ определяют по теории Мизеса согласно 6.1.2 по компонентам тензора напряжений в точке $\sigma_{x(l)}$, $\sigma_{y(l)}$, $\sigma_{z(l)}$, $\sigma_{xy(l)}$, $\sigma_{yz(l)}$, $\sigma_{zx(l)}$.

**6.5.4 Эффективный коэффициент концентрации**

6.5.4.1 При определении местных условных упругих приведенных напряжений ($\sigma_F$) с использованием эффективного коэффициента концентрации $K_{ef}$ вместо формулы (6.33) следует использовать формулу

$$(\sigma_F)_l = \frac{K_{ef}}{K_\sigma}[(\sigma_L)_l - (\sigma_L)_h] + (\sigma_F)_h \quad (6.44)$$

или

$$(\sigma_F)_l = K_{ef}[(\sigma)_l - (\sigma)_h] + (\sigma_F)_h. \quad (6.45)$$

6.5.4.2 Эффективный коэффициент концентрации $K_{ef}$ местных приведенных напряжений определяют на основе экспериментальных данных. Геометрия, состояние поверхности, номинальные напряжения и градиенты местных напряжений в зоне концентрации испытываемого компонента, модели или образца, их материал и термообработка, условия нагружения должны соответствовать натурному компоненту конструкции.

6.5.4.3 В расчетах при условии $(\sigma_{aL}) \geq R^T_{p0,2}$ эффективный коэффициент концентрации напряжений допускается вычислять по формуле

$$K_{ef} = 1 + q(K_\sigma - 1), \quad (6.46)$$

где $q$ — коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений ($q \leq 1$).

Коэффициент $q$ следует вычислять:

- при $(\sigma_{aL}) = K_\sigma(\sigma_a) \geq R^T_{-1}$ по формуле

$$q = q_0 + \frac{1-q_0}{R^T_{p0,2} - R^T_{-1}}\left[K_\sigma(\sigma_a) - R^T_{-1}\right]; \quad (6.47)$$

- при $(\sigma_{aL}) = K_\sigma(\sigma_a) < R^T_{-1}$ следует принимать равным $q_0$, где $q_0$ — коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений, определенный при амплитуде местных напряжений, равной пределу выносливости $R^T_{-1}$.

Коэффициент $q_0$ выбирают в соответствии с таблицей 6.1.

Таблица 6.1 — Значения коэффициента чувствительности $q_0$

| $R^T_{p0,2}/R^T_m$ | $q_0$ | Зона концентрации напряжений в компонентах конструкций |
|---|---|---|
| 0,4—0,8 | 1,0 | Опорные устройства сосудов, отверстия для шпилек крепления крышек к корпусам сосудов, отверстия крышек и днищ при радиусе скругления более 40 мм |
| 0,4 | 0,9 | Трубные доски, трубные скругления, переход от трубопровода к фланцам при радиусе скругления от 10 до 40 мм |
| 0,6 | 0,95 | |
| 0,8 | 1,0 | |
| 0,4 | 0,7 | Скругления в вершинах пазов и опорных буртов при радиусе скругления от 4 до 10 мм |
| 0,6 | 0,8 | |
| 0,8 | 0,9 | |
| 0,4 | 0,3 | Метрическая резьба шпилек, болтов, гаек при радиусе скругления менее 1 мм |
| 0,6 | 0,6 | |
| 0,8 | 0,8 | |

Примечание — При промежуточных значениях $R^T_{p0,2}/R^T_m$ значение $q_0$ следует определять линейной интерполяцией.

**6.5.5 Определение местных условных упругих напряжений в резьбах**

6.5.5.1 Местное условное упругое напряжение ($\sigma_F$) в резьбе болтов и шпилек вычисляют в соответствии с 6.5.2. Напряжение ($\sigma_L$) рассчитывают с учетом коэффициента концентрации $K_\sigma$, определяемого для метрической резьбы по формуле

$$K_\sigma = K_s\left(1+1{,}57\sqrt{\frac{s_z}{R}}\right), \tag{6.48}$$

где $K_s$ — коэффициент, зависящий от типа гайки;

$s_z$ — шаг резьбы;

$R$ — радиус закругления в основании витка.

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 устанавливается линейной интерполяцией.

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

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

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

$$K_\sigma = K_s K_w\left(1+1{,}57\sqrt{\frac{s_z}{R}}\right), \tag{6.49}$$

где значение коэффициента $K_w$ следует определять по таблице 6.2.

Таблица 6.2 — 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 |

6.5.5.3 Допускается местное напряжение ($\sigma_F$) в резьбах определять с использованием эффективного коэффициента концентрации $K_{ef}$ согласно 6.5.4.1. Если напряжение ($\sigma_L$) не выходит за пределы упругости, то коэффициент $K_{ef}$ следует вычислять по формуле (6.46). Если напряжение ($\sigma_L$) выходит за пределы

упругости, то для резьбового соединения с метрической резьбой из стали с $Z^T \geq 30$ % при контролируемом профиле резьбы с радиусом закругления в основании витка $R$ допускается принимать $K_{ef} = K_\sigma$.

Для контролируемых метрических резьб с впадиной без закругления из сталей с $Z^T \geq 30$ % значение $K_{ef} = 1{,}2K_\sigma$, где $K_\sigma$ — значение коэффициента концентрации напряжений в резьбе с шагом $s_z$ и радиусом закругления $R = 0{,}11s_z$.

6.5.6 При расчете приведенных местных условных упругих напряжений от механических и температурных нагрузок в сварных соединениях с неполным проплавлением, выполняемых аустенитными электродами и используемых для присоединения элементов антикоррозионных рубашек, эффективный коэффициент концентрации осевых напряжений любой категории следует вычислять в зависимости от амплитуды изгибной $\sigma_{ab}$ и равномерно распределенной $\sigma_{am}$ составляющих напряжения без учета концентрации по формулам:

$$K_{ef} = 3{,}5 + 2{,}8 \cdot 10^3 \left( \frac{\sigma_{am}}{\sigma_{am} + \sigma_{ab}} - 0{,}2 \right)^{2{,}5} \left( \frac{\sigma_{am} + \sigma_{ab}}{E^T} - 2 \cdot 10^{-3} \right)$$

$$\text{при } 2 \cdot 10^{-3} \leq \frac{\sigma_{am} + \sigma_{ab}}{E^T} \leq 4 \cdot 10^{-3} \text{ и } 0{,}2 \leq \frac{\sigma_{am}}{\sigma_{am} + \sigma_{ab}} \leq 1; \quad (6.50)$$

$$K_{ef} = 3{,}5 \text{ при } \frac{\sigma_{am} + \sigma_{ab}}{E^T} < 2 \cdot 10^{-3} \text{ или } \frac{\sigma_{am}}{\sigma_{am} + \sigma_{ab}} < 0{,}2 \text{ или при } \sigma_{am} = 0 \text{ независимо от } \sigma_{ab}. \quad (6.51)$$

Для кольцевых мембранных напряжений влияние концентрации не учитывают. Высота сварного шва должна быть не меньше толщины самой тонкой из соединяемых деталей в месте сварки. При возникновении в сварных соединениях с неполным проплавлением пластических циклических деформаций значения условных упругих напряжений без учета концентрации в сечении сварного соединения необходимо определить из упругопластического расчета.

6.5.7 Напряжение $(\sigma_F^*)_{\max}$ определяют как наибольшее по абсолютному значению условное упругое напряжение за весь процесс изменения напряжений.

### 6.6 Формирование расчетных циклов изменения напряжений

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

6.6.2 Размах приведенного напряжения $\Delta(\sigma_F)$ в расчетном цикле следует вычислять по формуле

$$\Delta(\sigma_F) = (\sigma_F)_{\max} - (\sigma_F)_{\min}, \quad (6.52)$$

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

Амплитуду приведенного напряжения $(\sigma_{aF})$ в расчетном цикле определяют как половина размаха.

6.6.3 Определение расчетных амплитуд циклов $(\sigma_{aF})$ в трубопроводах проводят в соответствии с ГОСТ Р 59115.15.

6.6.4 Допускается определять расчетные амплитуды циклов $(\sigma_{aF})$ на основе истории изменения приведенных напряжений без учета концентрации $(\sigma)$ при помощи упрощенной методики, приведенной в приложении А.

6.6.5 Формирование циклов приведенных напряжений без учета концентрации $(\sigma)$ выполняется так же, как и для условных упругих напряжений, с тем отличием, что вместо графиков изменения $(\sigma_F)$ рассматриваются графики $(\sigma)$.

6.6.6 Рекомендуемый алгоритм формирования расчетных циклов приведенных напряжений, определенных с применением теории наибольших касательных напряжений Треска и энергетической теории Мизеса, приведен в приложении Б.

## 7 Классификация напряжений

7.1 При проведении поверочного расчета напряжения в компонентах конструкции подразделяются на категории. Используют следующие основные категории напряжений, определяемые из упругого расчета:

- $\sigma_m$ — общие мембранные напряжения;

- $\sigma_{mL}$ — местные мембранные напряжения;
- $\sigma_b$ — общие изгибные напряжения;
- $\sigma_{bL}$ — местные изгибные напряжения;
- $\sigma_T$ — общие температурные напряжения;
- $\sigma_{TL}$ — местные температурные напряжения;
- $\sigma_к$ — напряжения компенсации;
- $\sigma_{mw}$ — средние напряжения растяжения по сечению болта или шпильки, вызываемые механическими нагрузками.

7.2 $\sigma_m$ — 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 следует определять вне зон концентрации напряжений.

Примером напряжений, относящихся к категории $\sigma_m$, являются средние напряжения растяжения (или сжатия) по толщине стенки цилиндрической, конической, эллиптической, сферической или торосферической оболочки, вызываемые действием внутреннего или наружного давления, а также напряжения в круглых сплошных и кольцевых пластинах постоянной толщины от осесимметричного растягивающего (сжимающего) усилия.

7.3 $\sigma_{mL}$ — 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].

Примерами напряжений, относящихся к категории $\sigma_{mL}$, являются:

- мембранные напряжения от механических нагрузок в зонах соединения оболочек и фланцев;
- мембранные напряжения от механических нагрузок в зонах присоединения патрубков и опор к сосудам.

7.4 $\sigma_b$ — 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.

Примерами напряжений, относящихся к категории $\sigma_b$, являются:

- напряжения изгиба, вызываемые действием механических нагрузок, действующих на компонент в целом;
- напряжения изгиба, вызываемые действием давления на плоские крышки;
- напряжения изгиба в нажимных кольцах и фланцах разъемных соединений, вызываемые затягом болтов и шпилек.

7.5 $\sigma_{bL}$ — местные изгибные напряжения, вызываемые действием краевых сил и моментов от механических нагрузок.

Примерами напряжений, относящихся к категории $\sigma_{bL}$, являются:

- напряжения изгиба, вызванные действием давления, в зонах соединения различных компонентов (фланец и цилиндрическая обечайка корпуса, соединение обечайки корпуса и днища и т. п.);
- напряжения изгиба в трубопроводах в зоне присоединения фланцев, вызванные действием затяжки болтов и шпилек.

7.6 $\sigma_T$ — 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 конструкции.

Примерами напряжений, относящихся к категории $\sigma_T$, являются:

а) напряжения, вызываемые перепадом температур в цилиндрической обечайке в осевом (продольном) и (или) диаметральном направлении;

б) линейная часть распределения напряжений, вызываемых перепадом температур по толщине стенки компонента в зонах соединения (фланец и цилиндрическая часть сосуда, патрубок и корпус сосуда, трубопровод и фланец, трубная доска и присоединяемые к ней трубы и т. п.);

в) линейная часть напряжений, вызываемых перепадом температур по толщине плоских днищ и крышек;

г) напряжения в зоне стыка цилиндрических обечаек и трубопроводов, выполненных из материалов с различными коэффициентами линейного температурного расширения.

7.7 $\sigma_{TL}$ — 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 конструкции.

Примерами напряжений, относящихся к категории $\sigma_{TL}$, являются:

- напряжения в центральной части длинных цилиндрических или сферических оболочек, вызываемые перепадом температур по толщине стенки, за исключением линейной составляющей напряжений, указанной в 7.6 б);
- напряжения на небольших участках перегрева (или охлаждения) в стенке сосуда или трубопровода;
- напряжения в антикоррозионной наплавке и корпусе, вызванные разностью коэффициентов линейного температурного расширения материалов.

7.8 $\sigma_к$ — напряжения компенсации, вызываемые стеснением свободного перемещения трубопроводов или труб. В число этих напряжений входят напряжения растяжения или сжатия $\sigma_{кm}$, изгиба $\sigma_{kb}$, кручения $\tau_{ks}$.

Примером напряжения, относящегося к категории $\sigma_к$, является напряжения растяжения (сжатия), кручения и изгиба в трубопроводах, вызванные стеснением свободного перемещения трубопровода.

7.9 $\sigma_{mw}$ — средние напряжения растяжения по сечению болта или шпильки, вызываемые механическими нагрузками (с учетом или без учета затяга).

7.10 $\tau_{sw}$ — напряжения кручения в болтах и шпильках.

7.11 $\sigma_L$ — местные напряжения с учетом концентрации напряжений.

Примерами напряжений, относящихся к категории $\sigma_L$, являются напряжения в зонах отверстий, галтелей, резьб и т. п. от механических нагрузок и температурных воздействий, определяемые с учетом эффекта концентрации напряжений.

7.12 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 оборудовании и трубопроводах;
- $(\sigma_{aF})$ — 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 вычисляют по теории максимальных касательных напряжений согласно 6.1.1. При определении амплитуд ($\sigma_{aF}$) также допускается вычислять приведенные напряжения по энергетической теории Мизеса согласно 6.1.2.

7.13 В таблице 7.1 приведены правила по определению групп категорий напряжений по категориям напряжений.

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

7.14 Примеры категорий напряжений применительно к различным типам компонентов конструкций приведены в таблице 7.2.

7.15 Правила по обработке распределения напряжений по сечению и по толщине стенки с целью выделения средних (мембранных) и изгибных составляющих распределения приведены в 6.2.

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

| Тип компонента | Категории напряжений | Группа категории напряжений |
|---|---|---|
| Корпуса оборудования, крышки, днища, трубные доски | $\sigma_m$ | $(\sigma)_1$ |
| | $[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}] \oplus \sigma_b$ | $(\sigma)_2$ |
| | $[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}] \oplus \sigma_b \oplus \sigma_{bL} \oplus \sigma_T \oplus \sigma_{кm} \oplus \sigma_{кb} \oplus \tau_{кs}$ | $(\sigma)_R$ |
| | $[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}] \oplus \sigma_b \oplus \sigma_{bL} \oplus \sigma_T \oplus \sigma_{TL} \oplus \sigma_{кm} \oplus \sigma_{кb} \oplus \tau_{кs}$ с учетом концентрации напряжений | $(\sigma_{aF})$ |
| Трубопроводы | $\sigma_m$ | $(\sigma)_1$ |
| | $[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}] \oplus \sigma_b$ | $(\sigma)_2$ |
| | $[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}] \oplus \sigma_b \oplus \sigma_{bL} \oplus \sigma_T \oplus \sigma_{кm} \oplus \sigma_{кb} \oplus \tau_{кs}$ | $(\sigma)_R$ |
| | $[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}] \oplus \sigma_b \oplus \sigma_{bL} \oplus \sigma_T \oplus \sigma_{TL} \oplus \sigma_{кm} \oplus \sigma_{кb} \oplus \tau_{кs}$ с учетом концентрации напряжений | $(\sigma_{aF})$ |
| Компенсаторы (торовые, сильфонные и др.) | $\sigma_m$ | $(\sigma)_1$ |
| | $[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}] \oplus \sigma_b \oplus \sigma_{bL} \oplus \sigma_T \oplus \sigma_{TL}$ с учетом концентрации напряжений | $(\sigma_{aF})$ |
| Болты и шпильки | $\sigma_{mw}$ | $(\sigma)_1$ |
| | $\sigma_{mw} \oplus \sigma_T$ | $(\sigma)_{3w}$ |
| | $\sigma_{mw} \oplus \sigma_T \oplus \sigma_{bw} \oplus \tau_{sw}$ | $(\sigma)_{4w}$ |
| | $\sigma_{mw} \oplus \sigma_T \oplus \sigma_{TL} \oplus \sigma_{bw} \oplus \tau_{sw}$ с учетом концентрации напряжений | $(\sigma_{aF})_w$ |

Таблица 7.2 — Примеры классификации напряжений по категориям

| Компонент | Зона компонента | Нагрузка | Вид распределения напряжений | Категория напряжений |
|---|---|---|---|---|
| Цилиндрическая, коническая, эллиптическая или сферическая обечайка (крышка) | Гладкая часть (кроме зоны краевого эффекта) | Механические нагрузки | Средние напряжения по сечению | $\sigma_m$ |
| | | | Изгибные напряжения по сечению | $\sigma_b$ |
| | | Температурный перепад по длине и/или диаметру | Линейная часть распределения по толщине | $\sigma_T$ |
| | | Изменение температуры на локальном участке | Максимальное напряжение по толщине | $\sigma_{TL}$ |

*Продолжение таблицы 7.2*

| Компонент | Зона компонента | Нагрузка | Вид распределения напряжений | Категория напряжений |
|---|---|---|---|---|
| Цилиндрическая, коническая, эллиптическая или сферическая обечайка (крышка) | Зона соединения гладкой части с фланцем или другим компонентом | Механические нагрузки | Средние напряжения по толщине | $\sigma_{mL}$ |
| | | | Изгибные напряжения по толщине | $\sigma_{bL}$ |
| | | Температурный перепад | Линейная часть распределения по толщине | $\sigma_T$ |
| | Зона соединения с патрубком или коллектором | Механические нагрузки | Средние напряжения по сечению | $\sigma_{mL}$ |
| | | | Изгибные напряжения по толщине | $\sigma_{bL}$ |
| | | Температурный перепад | Линейная часть распределения по толщине | $\sigma_T$ |
| | | Нагрузки от стеснения свободного расширения трубопроводов | Линейная часть распределения по толщине | $\sigma_к$ |
| Торосферическая крышка или днище | Торовая часть* | Давление | Средние напряжения по толщине | —** |
| | | | Изгибные напряжения по толщине | $\sigma_{bL}$ |
| Плоская крышка или днище | Центральная зона | Механические нагрузки | Средние напряжения по толщине | $\sigma_m$ |
| | | | Изгибные напряжения по толщине | $\sigma_b$ |
| | | Температурный перепад по толщине | Линейная часть распределения по толщине | $\sigma_T$ |
| | Зона соединения гладкой части с фланцем или обечайкой | Механические нагрузки | Средние напряжения по толщине | $\sigma_{mL}$ |
| | | | Изгибные напряжения по толщине | $\sigma_{bL}$ |
| | | Температурный перепад | Линейная часть распределения | $\sigma_T$ |
| | Зона соединения с патрубком | Механические нагрузки | Средние напряжения по сечению | $\sigma_{mL}$ |
| | | | Изгибные напряжения по толщине | $\sigma_b$ |
| | | Температурный перепад | Линейная часть распределения по толщине | $\sigma_T$ |
| | | Нагрузки от стеснения свободного расширения трубопроводов | Линейная часть распределения по толщине | $\sigma_к$ |
| Патрубки, коллекторы | Гладкая часть | Механические нагрузки | Средние напряжения по сечению | $\sigma_m$ |
| | | | Изгибные напряжения по сечению | $\sigma_b$ |
| | | Нагрузки от стеснения свободного расширения трубопроводов | Линейная часть распределения по толщине | $\sigma_T$ |

*Окончание таблицы 7.2*

| Компонент | Зона компонента | Нагрузка | Вид распределения напряжений | Категория напряжений |
|---|---|---|---|---|
| Патрубки, коллекторы | Зона соединения с обечайкой | Механические нагрузки | Средние напряжения по сечению | $\sigma_{mL}$ |
| | | | Изгибные напряжения по сечению | $\sigma_b$ |
| | | | Изгибные напряжения по толщине | $\sigma_{bL}$ |
| | | Температурный перепад | Линейная часть распределения по толщине | $\sigma_T$ |
| | | Нагрузки от стеснения свободного расширения трубопроводов | Линейная часть распределения по толщине | $\sigma_к$ |
| Нажимное кольцо | — | Механические нагрузки | Изгибные напряжения по толщине | $\sigma_b$ |
| | | Температурные нагрузки | Линейная часть распределения по толщине | $\sigma_T$ |
| Трубные доски | Центральная зона | Механические нагрузки | Средние напряжения по толщине | $\sigma_m$ |
| | | | Изгибные напряжения по толщине | $\sigma_b$ |
| | | Температурный перепад по толщине | Линейная часть распределения по толщине | $\sigma_T$ |
| | Зона соединения с обечайкой | Механические нагрузки | Средние напряжения по толщине | $\sigma_{mL}$ |
| | | | Изгибные напряжения по толщине | $\sigma_{bL}$ |
| | | Температурный перепад | Линейная часть распределения по толщине | $\sigma_T$ |
| Трубопроводы | Гладкая часть трубопроводов | Механические нагрузки | Средние напряжения по сечению | $\sigma_m$ |
| | | | Изгибные напряжения по сечению | $\sigma_b$ |
| | | Нагрузки от стеснения свободного удлинения трубопроводов | Средние напряжения по сечению | $\sigma_{кm}$ |
| | | | Изгибные напряжения по сечению | $\sigma_{кb}$ |
| | | | Напряжения кручения, равномерно по сечению | $\tau_{кs}$ |
| | | Температурный перепад по толщине | Максимальное напряжение по толщине | $\sigma_{TL}$ |

* Классификация напряжений в других зонах аналогично сферической крышке.

** Учитывается только при определении $(\sigma)_R$ и $(\sigma_{aF})$, но не учитывается при определении $(\sigma)_1$ и $(\sigma)_2$.

## 8 Расчет на статическую прочность

8.1 При расчете компонента на статическую прочность необходимо проверить выполнение условий прочности согласно 8.2—8.7 во всех расчетных режимах и условиях эксплуатации, предусмотренных проектом АЭУ (см. 4.18), при действии всех расчетных нагрузок (см. 4.17), 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 и компонентов, предназначенных для восприятия перерезывающих усилий (шпонки, кольца, бобышки и т. п.) проверяются 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 компонентов оборудования и трубопроводов, не должны превышать допускаемых значений, приведенных в таблицах 8.1 и 8.2. Значение коэффициента формы $K$, используемого в таблице 8.1, принимают равным 1,5 для пластин и 1,3 для компонентов прочей геометрической формы.

Значения номинальных допускаемых напряжений $[\sigma]$ и $[\sigma]_w$ вычисляют согласно требованиям раздела 5.

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

| Режим | $(\sigma)_1$ | $(\sigma)_2$ * | $(\sigma)_R$ |
|---|---|---|---|
| НУЭ | $[\sigma]$ | $K[\sigma]$ | $\min\left\{\left(2{,}5-\frac{R^T_{p0,2}}{R^T_m}\right)R^T_{p0,2},\quad 2R^T_{p0,2}\right\}$ |
| ННУЭ | $1{,}2[\sigma]$ | $1{,}2K[\sigma]$ | — |
| УПА** | $1{,}4[\sigma]$ | $1{,}4K[\sigma]$ | — |
| УИ | $1{,}35[\sigma]$ | $1{,}7[\sigma]$ | — |

* Кроме компенсирующих устройств.
** Только для корпусов реакторов, парогенераторов, сосудов.

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

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* | $1{,}4[\sigma]_w$ | $1{,}8[\sigma]_w$ | $2{,}4[\sigma]_w$ |
| УИ | $0{,}7R^T_{p0,2}$ | — | — |

* Только для корпусов реакторов.

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

8.5 Средние напряжения смятия не должны превышать $1{,}5R^T_{p0,2}$. 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, предназначенных для восприятия перерезывающих усилий (шпонки, кольца, бобышки и т. п.), не должны превышать допускаемых значений, приведенных в таблице 8.3.

Таблица 8.3 — Допускаемые напряжения среза в компонентах, за исключением болтов и шпилек

| Режим | $\tau$ | |
|---|---|---|
| | от механических нагрузок | от механических нагрузок и температурных воздействий |
| НУЭ | 0,5[σ] | 0,65[σ] |
| ННУЭ | 0,6[σ] | 0,77[σ] |
| УПА | 0,7[σ] | 0,9[σ] |
| УИ | 0,68[σ] | — |

8.7 Напряжения среза в резьбах не должны превышать значений, приведенных в таблице 8.4.

Таблица 8.4 — Допускаемые напряжения среза в резьбах

| Режим | $\tau_p$ | |
|---|---|---|
| | 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 | $0,35R^T_{p0,2}$ | $0,45R^T_{p0,2}$ |
| УИ | $0,35R^T_{p0,2}$ | — |

8.8 Выполнение требований 8.3 и таблицы 8.1 по размахам напряжений $(\sigma)_R$ не является обязательным для компонентов в тех случаях, когда возможное при эксплуатации искажение формы конструкции, связанное с невыполнением данного требования, не может повлиять на нормальную эксплуатацию рассчитываемого узла (нет нарушения плотности различных соединений, отсутствует заклинивание подвижных устройств, нет недопустимого искажения проходных сечений, определяющих расход теплоносителя, нет недопустимых деформаций сопряженных деталей и т. п.).

Необходимость удовлетворения требования по размахам напряжений $(\sigma)_R$ должна устанавливаться конструкторской (проектной) организацией.

8.9 Для трубопроводов, расчет которых проводят по ГОСТ Р 59115.15, условия по размахам напряжений $(\sigma)_R$ проверяются согласно требованиям ГОСТ Р 59115.15.

## 9 Расчет на устойчивость

### 9.1 Основные положения расчета на устойчивость

Расчет на устойчивость следует проводить для компонентов оборудования АЭУ, за исключением трубопроводов, работающих под внутренним давлением, превышающим наружное, в режимах и при воздействиях, предусмотренных проектом АЭУ.

### 9.2 Расчет типовых компонентов без учета ползучести

#### 9.2.1 Цилиндрическая оболочка под действием наружного давления

Расчет следует проводить 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 (следует определять 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.

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;

$D_{a\,\max}$, $D_{a\,\min}$ — максимальный и минимальный наружные диаметры, измеренные в одном поперечном сечении цилиндрической оболочки.

Критическую длину следует вычислять по формуле

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

Критическое напряжение следует вычислять 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 следует вычислять по формуле

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

Допускаемое наружное давление следует вычислять по формуле

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

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

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

Для цилиндрических оболочек с $D_a \le 25$ мм и при $D_a/s < 12$ допускаемое наружное давление следует вычислять по формуле

$$[p_a] = 0,67\xi p_{kr}. \tag{9.7}$$

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 рассматриваются как укрепление от действия осевой силы.

Формулы применимы при выполнении условия

$$0,002 \le \frac{s-c}{D_m} \le 0,2. \tag{9.8}$$

Расчетное осевое напряжение сжатия следует вычислять по формуле

$$\sigma_c = \frac{F}{\pi D_m (s-c)}. \tag{9.9}$$

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 следует вычислять по формуле

$$\sigma_{kr1} = 1{,}2E^T\left(\frac{D_m}{\eta L}\right)^2, \tag{9.10}$$

где $\eta$ = 1,0, если оба конца цилиндрической оболочки шарнирно оперты;

$\eta$ = 0,5, если оба конца оболочки жестко заделаны;

$\eta$ = 0,7, если один конец оболочки шарнирно оперт, а другой жестко заделан;

$\eta$ = 2,0, если один конец оболочки свободен, а другой жестко заделан.

Критическое напряжение второго рода следует вычислять по формуле

$$\sigma_{kr2} = 1{,}2E^T\frac{s-c}{D_m}. \tag{9.11}$$

Допускаемое осевое напряжение сжатия следует вычислять по формуле

$$[\sigma_c] = \min\{[\sigma_c]_1; [\sigma_c]_2\}, \tag{9.12}$$

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

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

$\xi_1$, $\xi_2$ — 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:

$$0{,}002 \le \frac{s-c}{D_m} \le 0{,}1;\ \frac{H_m}{D_m} \ge 0{,}2. \tag{9.13}$$

Критическое напряжение следует вычислять по формуле

$$\sigma_{kr} = 1{,}2E^T\left(\frac{2H_m}{D_m}\right)\left(\frac{s-c}{D_m}\right). \tag{9.14}$$

Критическое давление следует вычислять по формуле

$$p_{kr} = 4\sigma_{kr}\left(\frac{2H_m}{D_m}\right)\left(\frac{s-c}{D_m}\right). \tag{9.15}$$

Допускаемое наружное давление следует вычислять по формуле

$$[p_a] = 0{,}5\xi p_{kr}, \tag{9.16}$$

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

$$\lambda = \frac{R_{p0,2}^{T}}{\sigma_{kr}}.$$

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 $\alpha$, удовлетворяющих условиям:

$$0{,}002 \le \frac{s-c}{D_{0m}} \le 0{,}1;\ \ 0{,}002 \le \frac{s-c}{D_m} \le 0{,}1;\ \ 10° \le \alpha \le 60°, \tag{9.17}$$

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 следует вычислять по формуле

$$\sigma_{kr} = 0{,}5 C_x E^T \sin\alpha \sqrt{\cos\alpha} \left(\frac{s-c}{D_m}\right)^{3/2}, \tag{9.18}$$

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.

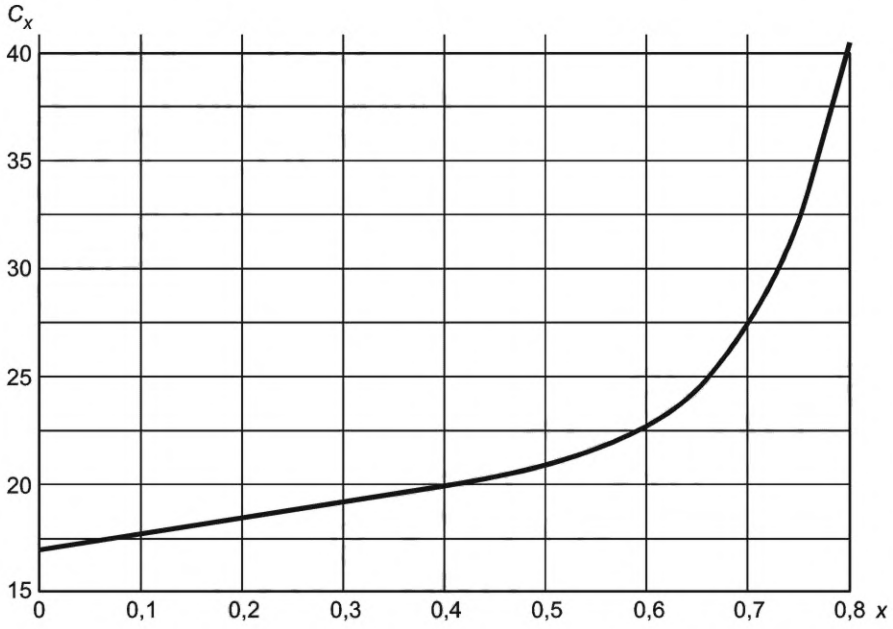



Рисунок 9.1 — График для определения $C_x$

Критическое давление следует вычислять по формуле

$$p_{kr} = 2\sigma_{kr}\left(\frac{s-c}{D_m}\right)\cos\alpha. \tag{9.19}$$

Допускаемое наружное давление следует вычислять по формуле (9.6).

$$[p_a] = 0{,}5\xi p_{kr}, \tag{9.20}$$

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

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

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

**9.2.5 Конический переход под действием осевой силы**

Расчетные формулы применимы для расчета гладких конических переходов, находящихся под действием осевой силы, удовлетворяющих условиям (9.17).

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

Расчетное осевое напряжение сжатия следует вычислять по формуле

$$\sigma_c = \frac{F}{\pi D_{0m}(s-c)\cos\alpha}. \tag{9.21}$$

Критическое напряжение следует вычислять по формуле

$$\sigma_{kr} = 1{,}2E^T\left(\frac{s-c}{D_{0m}}\right)\cos\alpha. \tag{9.22}$$

Допускаемое напряжение сжатия следует вычислять по формуле

$$[\sigma_c] = 0{,}5\xi\sigma_{kr}, \tag{9.23}$$

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

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

где допускаемое наружное давление и допускаемое напряжение сжатия следует вычислять по 9.2.4 и 9.2.5 соответственно.

**9.2.7 Цилиндрическая оболочка при совместном действии наружного давления и осевой силы**

Расчет следует проводить 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.

Оболочка рассматривается на расчетной длине согласно требованиям 9.2.1, при выполнении условий формулы (9.1).

Устойчивость цилиндрической оболочки обеспечена, если выполнено условие

$$\frac{\sigma_c}{[\sigma_c]} + \frac{p_a}{[p_a]} \le 1{,}0, \tag{9.25}$$

где допускаемое наружное давление и допускаемое напряжение сжатия следует вычислять по 9.2.1 и 9.2.2 соответственно.

### 9.3 Расчет численными методами

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

- толщины стенок компонента при расчете следует принимать равными ($s - c$);
- НДС в компоненте 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 обеспечена, если выполнено условие

$$F \le \frac{F_{kr}}{n_{kr}}, \tag{9.26}$$

где $F$ — расчетная нагрузка;

$F_{kr}$ — критическая нагрузка;

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

$\xi$ — поправочный коэффициент, определяемый на основе соответствия рассчитываемой конструкции типовым случаям, рассмотренным в 9.2.1—9.2.6, согласно пояснениям к формулам (9.6), (9.12), (9.16), (9.20), (9.23). Для вычисления $n_{kr}$ следует принимать наименьшее значение $\xi$.

### 9.4 Расчет типовых компонентов в условиях ползучести

#### 9.4.1 Общие положения расчета в условиях ползучести

Расчет на устойчивость в условиях ползучести заключается в определении допускаемого срока службы (ресурса) при действии на рассчитываемый компонент заданных наружного давления и сжимающих нагрузок, или для определения допускаемых нагрузок при заданном сроке службы.

При расчетах следует использовать формулу

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E^T} + B \cdot \sigma^n \cdot t, \tag{9.27}$$

где $\varepsilon$ — сумма упругой деформации и деформации ползучести;

$\sigma$ — расчетное напряжение, МПа, определяемое по 9.4.2—9.4.5;

$B$ — коэффициент ползучести, $(1/\text{МПа})^n \cdot \text{ч}^{-1}$;

$n$ — показатель ползучести;

$t$ — время, ч.

Значения $B$ и $n$ определяют по изохронным кривым деформирования, приведенным в ГОСТ Р 59115.4—2021 (приложение Б).

Расчетные формулы и методики 9.4.2—9.4.5 распространяются на случай $\sigma_{kr} < R_{p0,2}$.

Устойчивость компонента обеспечена, если выполнено условие $t \le [t]$.

Расчет компонентов, отличных от рассмотренных в 9.4.2—9.4.5, допускается проводить методом конечных элементов при учете влияния начальных несовершенств и учете нелинейного поведения конструкционных материалов.

#### 9.4.2 Расчет гладких длинных цилиндрических компонентов, находящихся под действием наружного давления

Расчетные формулы применимы при выполнении условия

$$0{,}005 \le \frac{s - c}{D_m} \le 0{,}2. \tag{9.28}$$

Расчетный срок службы следует вычислять по формуле

$$[t] = \frac{\xi \sigma_{kr} \left[1 - 2\sigma / (\xi \sigma_{kr})\right]}{3^{\frac{n-1}{2}} n B E^T \sigma^n}, \tag{9.29}$$

где $\xi$ — поправочный коэффициент, определяемый согласно пояснениям к формуле (9.6).

Критическое напряжение следует вычислять по формуле

$$\sigma_{kr} = 1{,}1E\left(\frac{s-c}{D_m}\right)^2. \tag{9.30}$$

Расчетное напряжение следует вычислять по формуле

$$\sigma = \frac{pD_m}{2(s-c)}, \tag{9.31}$$

где $p$ — наружное давление, МПа.

**9.4.3 Расчет полных и усеченных конических оболочек**

Расчетные формулы применимы при выполнении условий:

$$0{,}005 \le \frac{(s-c)}{D_m} \le 0{,}1;\ 10° \le \alpha \le 60°, \tag{9.32}$$

где $\alpha$ — угол конусности оболочки, равный половине угла конуса при вершине, град.

Расчетный срок службы следует вычислять по формуле

$$[t] = \frac{\xi\sigma_{kr}\left[1-2\sigma/(\xi\sigma_{kr})\right]}{3^{\frac{n-1}{2}} nBE^T\sigma^n}, \tag{9.33}$$

где $\xi$ — поправочный коэффициент, определяемый согласно пояснениям к формуле (9.20).

Критическое напряжение следует вычислять по формуле

$$\sigma_{kr} = 0{,}5C_x E^T \sin\alpha\sqrt{\cos\alpha}\left(\frac{s-c}{D_{1m}}\right)^{3/2}, \tag{9.34}$$

где значения параметра $C_x$ определяют согласно пояснениям к формуле (9.18).

Расчетное напряжение следует вычислять по формуле

$$\sigma = \frac{pD_m}{2(s-c)\cos\alpha}. \tag{9.35}$$

**9.4.4 Расчет сферических, эллиптических и торосферических оболочек под наружным давлением**

Расчетные формулы применимы при выполнении условия

$$0{,}005 \le \frac{s-c}{D_m} \le 0{,}1. \tag{9.36}$$

Расчетный срок службы следует вычислять по формуле

$$[t] = \frac{\xi\sigma_{kr}\left[1-2\sigma/(\xi\sigma_{kr})\right]}{2^{n-1} nBE^T\sigma^n}, \tag{9.37}$$

где $\xi$ — поправочный коэффициент, определяемый согласно пояснениям к формуле (9.16).

Критическое напряжение следует вычислять по формулам:

- для сферических оболочек

$$\sigma_{kr} = 1{,}2E\frac{s-c}{D_m}; \tag{9.38}$$

- для эллиптических и торосферических оболочек

$$\sigma_{kr} = 0{,}6Eb_2\frac{s-c}{b_1^2}, \tag{9.39}$$

где $b_1$, $b_2$ — большая и малая полуоси эллиптических или торосферических оболочек соответственно, мм.

Расчетное напряжение следует вычислять по формулам:

- для сферических оболочек

$$\sigma = \frac{pD_m}{4(s-c)}; \tag{9.40}$$

- для эллиптических и торосферических оболочек

$$\sigma = \frac{p b_1^2}{2 b_2 (s - c)}. \tag{9.41}$$

**9.4.5 Расчет гладких цилиндрических оболочек, нагруженных осевым сжатием**

Расчетные формулы применимы при выполнении условия

$$0{,}005 \le \frac{s - c}{D_m} \le 0{,}2. \tag{9.42}$$

Расчетный срок службы следует вычислять как наименьшее из двух значений:

$$[t] = \frac{(s - c)\left[1 - 2\sigma / (\xi_1 \sigma_{kr1})\right]}{2^n B \sigma^n A_n (n - 1) D_m} \ln \frac{1 + (B_n / A_n)(2 l_0)^{n-1}}{(B_n / A_n)(2 l_0)^{n-1}} \tag{9.43}$$

и

$$[t] = \frac{\xi_2 \sigma_{kr2}\left[1 - 2\sigma / (\xi_2 \sigma_{kr2})\right]}{2^{n-1} B E^T \sigma^n}, \tag{9.44}$$

где $\xi_1$, $\xi_2$ — поправочные коэффициенты, определяемые согласно пояснениям к формуле (9.12);

$A_n = 0{,}5\sqrt{3n}$;

$$B_n = \frac{(3n)^{n/2} A_{n3}}{(n + 1)^{\frac{n+1}{2}}};$$

$A_{n3}$ определяют по графику на рисунке 9.2;

$$l_0 = \frac{2 \cdot 10^{-4} D_m}{s - c}.$$

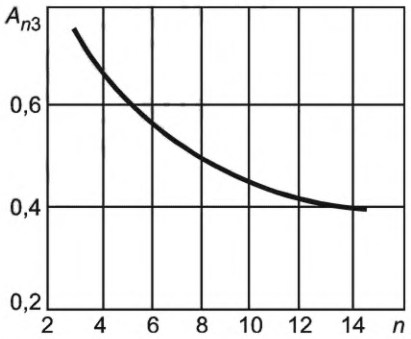



Рисунок 9.2 — График для определения $A_{n3}$

Критические напряжения следует вычислять по формулам (9.10) и (9.11).

Расчетное напряжение следует вычислять по формуле

$$\sigma = \frac{F}{\pi D_m (s - c)}, \tag{9.45}$$

где $F$ — осевое сжимающее усилие, Н.

## 10 Расчет на циклическую прочность

10.1 Расчет на циклическую прочность 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 Методика определения допускаемого числа циклов по заданной амплитуде напряжений применима для компонентов из сплавов циркония с 1 % до 2,5 % ниобия, углеродистых и легированных (в т. ч. кремнемарганцовистых, хромомолибденванадиевых и высокохромистых) сталей, а также сталей аустенитного класса и железоникелевых сплавов.

10.3 Определение допускаемого числа циклов по заданным амплитудам напряжений или допускаемых амплитуд напряжений для заданного числа циклов следует проводить:

- 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.

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

Если процесс нагружения состоит из ряда циклов, характеризуемых амплитудами напряжений $(\sigma_{aF})_i$ и соответствующими числами циклов $N_i$, то должно быть выполнено условие прочности по накопленному усталостному повреждению согласно 10.20.

10.5 Расчетные кривые усталости приведены в ГОСТ Р 59115.5.

10.6 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.

10.7 Для компонентов, находящихся в водной среде, допускаемые значения амплитуды и (или) числа циклов принимают наименьшими из определенных на воздухе (в соответствии с требованиями настоящего подраздела) и из определенных с учетом влияния водной среды.

Определение допускаемой амплитуды и допускаемого числа циклов в водной среде рекомендуется выполнять по методикам, основанным на экспериментальных исследованиях.

Допускается выполнять расчетное определение $[\sigma_{aF}]$ и $[N_0]$ и проверку условия прочности с учетом влияния водной среды по методике, приведенной в приложении В.

10.8 Допускаемая амплитуда условного упругого напряжения или допускаемое число циклов при $[N_0] \le 10^{12}$ следует вычислять по формулам:

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

где $n_\sigma$, $n_N$ — коэффициенты запаса прочности по напряжениям и числу циклов;

$m$, $m_e$ — параметры, определяемые по таблице 10.1;

$r$ — коэффициент асимметрии цикла напряжений;

$R_c^T$ — характеристика прочности, принимаемая равной

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

$e_c^T$ — характеристика пластичности, зависящая от значения $Z_c^T$:

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

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

Для компонентов трубопроводов, расчет которых проводят по ГОСТ Р 59115.15, $e_c^T$ должно быть определено по формуле

$$e_c^T = 1{,}15 \lg \frac{100}{100 - Z_c^T} - 0{,}025. \quad (10.5)$$

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 $Z_c^T = 50$ %.

Если характеристику пластичности $e_c^T$ определяют по значению $Z^T$, полученному при испытании на статическое растяжение, то используют формулы:

$$e_c^T = 0{,}005 Z^T - \frac{(\sigma_F^*)_{\max} - R_{p0,2}^T}{2E^T} \text{ при } (\sigma_F^*)_{\max} > R_{p0,2}^T; \quad (10.6)$$

$$e_c^T = 0{,}005 Z^T \text{ при } (\sigma_F^*)_{\max} \le R_{p0,2}^T. \quad (10.7)$$

Для компонентов трубопроводов, рассчитываемых по ГОСТ Р 59115.15, определение $e_c^T$ по значению $Z^T$, полученному испытаниями на статическое растяжение, должно быть выполнено по формуле

$$e_c^T = 0{,}005 Z^T - 0{,}025. \quad (10.8)$$

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 $n_N = 10$.

При расчете компонентов, которые нагружены только тепловыми нагрузками (например, тепловые экраны) или тепловыми и механическими нагрузками при ограничении деформации другими упругими несущими компонентами (например, антикоррозионная рубашка корпуса) и разрушение которых не приводит к выходу теплоносителя за пределы несущих компонентов, коэффициенты запаса прочности по напряжениям $n_\sigma$ и числу циклов $n_N$ принимают равными 1,5 и 3 соответственно.

При расчете сварных соединений с неполным проплавлением, выполненных аустенитными электродами и примененных в указанных выше компонентах, с учетом эффективного коэффициента концентрации по 6.5.4.3 коэффициенты запаса прочности принимают равными $n_\sigma = 1{,}25$ и $n_N = 2{,}1$.

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

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

Если допускаемое число циклов $[N_0] \le 10^6$, то $[\sigma_{aF}]$ допускается консервативно определять, вместо формул (10.1), по формулам:

$$\left.\begin{aligned} [\sigma_{aF}] &= \frac{E^T e_c^T}{n_\sigma \left(4[N_0]\right)^m} + \frac{R_{-1}^T}{n_\sigma \left(1 + \frac{R_{-1}^T}{R_m^T} \frac{1+r}{1-r}\right)} \\ [\sigma_{aF}] &= \frac{E^T e_c^T}{\left(4 n_N [N_0]\right)^m} + \frac{R_{-1}^T}{1 + \frac{R_{-1}^T}{R_m^T} \frac{1+r}{1-r}} \end{aligned}\right\}. \quad (10.9)$$

Предел выносливости $R_{-1}^T$ следует определять по таблице 10.1.

Из двух значений $[N_0]$ или $[\sigma_{aF}]$, определенных по формулам (10.9), выбирают наименьшее.

10.9 Коэффициент асимметрии цикла напряжений при $(\sigma_F)_{max} < R_{p0,2}^{(T_{min})}$ и $2(\sigma_{aF}) < \left[R_{p0,2}^{(T_{min})} + R_{p0,2}^{(T_{max})}\right]$ следует вычислять по формуле

$$r = \frac{(\sigma_F)_{max} - 2(\sigma_{aF})}{(\sigma_F)_{max}}. \quad (10.10)$$

Если коэффициент асимметрии цикла $r < -1$ или $r > 1$, то в расчете следует принимать $r = -1$.

При $(\sigma_F)_{max} > R_{p0,2}^{(T_{min})}$ и $2(\sigma_{aF}) < \left[R_{p0,2}^{(T_{min})} + R_{p0,2}^{(T_{max})}\right]$ коэффициент асимметрии цикла следует вычислять по формуле

$$r = \frac{(\sigma_{tr})_{max} - 2(\sigma_{aF})}{(\sigma_{tr})_{max}}, \quad (10.11)$$

где $(\sigma_{tr})_{max}$ — максимальное значение $(\sigma_{tr})$ в рассматриваемом цикле.

Допускается в формуле (10.11) принимать $(\sigma_{tr})_{max} = R_{p0,2}^{(T_{min})}$.

При одновременном выполнении условий $(\sigma_F)_{max} < R_{p0,2}^{(T_{min})}$, $\left|(\sigma_F)_{max} - 2(\sigma_{aF})\right| > R_{p0,2}^{(T_{min})}$ и $2(\sigma_{aF}) < \left[R_{p0,2}^{(T_{min})} + R_{p0,2}^{(T_{max})}\right]$ коэффициент асимметрии $r = -1$.

При $2(\sigma_{aF}) \geq \left[R_{p0,2}^{(T_{min})} + R_{p0,2}^{(T_{max})}\right]$ коэффициент асимметрии следует вычислять по формуле

$$r = -R_{p0,2}^{(T_{max})} / R_{p0,2}^{(T_{min})}. \quad (10.12)$$

10.10 Остаточное напряжение учитывают в том случае, если оно является растягивающим и в рассматриваемой зоне компонента 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).

10.11 Остаточное напряжение учитывают при определении значения коэффициента асимметрии цикла напряжений алгебраическим суммированием его с напряжением от эксплуатационных механических и тепловых нагрузок в случае расчета по формулам (10.1) и (10.9).

При определении коэффициента асимметрии в расчете нетермообработанных сварных соединений с неполным проплавлением напряжение $(\sigma_{tr})_{max}$ следует принимать равным пределу текучести при минимальной температуре цикла.

10.12 Для выполнения расчета без определения коэффициента асимметрии цикла напряжений или для учета в расчете максимального влияния асимметрии цикла допускаемую амплитуду условного упругого напряжения или допускаемое число циклов при $[N_0] \leq 10^{12}$ следует вычислять по формулам:

$$\left.\begin{aligned}[\sigma_{aF}] &= \frac{E^T e_c^T}{\left(4 n_N [N_0]\right)^m} + \frac{R_c^T - R_{p0,2}^{T_{min}}}{\left(4 n_N [N_0]\right)^{m_e} - 1} \\ [\sigma_{aF}] &= \frac{E^T e_c^T}{n_\sigma \left(4[N_0]\right)^m} + \frac{R_c^T - R_{p0,2}^{T_{min}}}{n_\sigma \left(\left(4[N_0]\right)^{m_e} - 1\right)}\end{aligned}\right\}, \quad (10.13)$$

где $T_{min}$ — минимальная температура цикла;

$R_c^T$, $e_c^T$, $m$, $m_e$, $n_\sigma$, $n_N$ — параметры, определяемые согласно 10.8.

Минимальную температуру в цикле $T_{min}$ допускается принимать равной 20 °С.

Из двух значений $[N_0]$ или $[\sigma_{aF}]$, определенных по формулам (10.13), выбирают наименьшее.

10.13 Допускаемую амплитуду напряжений для сварного соединения $[\sigma_{aF}]_s$, за исключением сварного соединения с неполным проплавлением (6.5.6), следует вычислять по формуле

$$[\sigma_{aF}]_s = \varphi_s |\sigma_{aF}|, \quad (10.14)$$

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

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

Значения $\varphi_s$ для ряда сварных соединений приведены в таблице 10.2. Коэффициент $\varphi_s$ используется совместно с расчетной кривой усталости основного материала, по отношению к которому определен $\varphi_s$.

Для других методов сварки, сварочных и свариваемых материалов, не указанных в таблице 10.2, значение $\varphi_s$ определяют экспериментально.

При отсутствии данных о значении $\varphi_s$ могут быть использованы данные таблицы 10.3.

10.14 При расчетах корпусов с антикоррозионной наплавкой оценку циклической прочности проводят раздельно для основного металла и металла наплавки по кривым и расчетным формулам настоящего раздела с учетом коэффициента $\varphi_s$.

Коэффициент $\varphi_s$ для наплавки корпуса используют совместно с расчетной кривой усталости основного металла корпуса.

Значение $\varphi_s$ для ручной сварки стали аустенитного класса электродами марок ЭА-395/9 и ЭА-400/10У можно применять при расчете разнородного сварного соединения сталей перлитного класса со сталью аустенитного класса для слоя, наплавленного на сталь перлитного класса, с использованием расчетной кривой усталости стали аустенитного класса.

Таблица 10.2 — Коэффициенты снижения циклической прочности сварных соединений

| Основной металл | Метод сварки | Сварочный материал | Вид термообработки после сварки | $\varphi_s$ |
|---|---|---|---|---|
| Стали марок 20, 22К, 20К | Ручная | Электроды марок УОНИ-13/45, УОНИ-13/45А | Без термообработки; отпуск; нормализация и отпуск | 1,0 |
| | | Электрод марки УОНИ-13/55 | Без термообработки; отпуск до 10 ч | $\varphi_s = 0{,}8$ при $(\sigma_{aF}) > 400$ МПа;<br>$\varphi_s = 1{,}46 - 0{,}26 \lg(\sigma_{aF})$ при $60 < (\sigma_{aF}) \le 400$ МПа;<br>$\varphi_s = 1{,}0$ при $(\sigma_{aF}) \le 60$ МПа |
| | | | Отпуск более 15 ч | 1,0 |
| | Автоматическая под флюсом | Сварочная проволока марок Св-08А, Св-08ГСМТ, ЭП-458* | Без термообработки | 0,9 |
| | | | Отпуск | 1,0 |
| | Электрошлаковая | Сварочная проволока марок Св-10Г2, Св-08ГСМТ | Нормализация и отпуск; закалка и отпуск | 1,0 |
| Стали марок 12Х2МФА, 15Х2МФА, 15Х2МФА-А | Ручная | Электроды марок Н-3, Н-6, Н-10 | Отпуск | 1,0 |
| | Автоматическая под флюсом | Сварочная проволока марок Св-10ХМФ, Св-10ХМФТУ | Отпуск | $\varphi_s = 0{,}7$ при $(\sigma_{aF}) > 500$ МПа;<br>$\varphi_s = 1{,}34 - 0{,}24 \lg(\sigma_{aF})$ при $70 < (\sigma_{aF}) \le 500$ МПа;<br>$\varphi_s = 0{,}9$ при $(\sigma_{aF}) \le 70$ МПа |

*Окончание таблицы 10.2*

| Основной металл | Метод сварки | Сварочный материал | Вид термообработки после сварки | $\varphi_s$ |
|---|---|---|---|---|
| Стали марок 12Х2МФА, 15Х2МФА, 15Х2МФА-А | Электрошлаковая | Сварочная проволока марки Св-13Х2МФТ* | Закалка и отпуск | 0,8 |
| | Автоматическая наплавка ленточным электродом под флюсом | Электроды марок Св-07Х25Н13, Св-08Х19Н10Г2Б | Отпуск | 0,8 |
| | Ручная наплавка электродами | Электроды марок ЭИО8, ЭА-898/21Б | Отпуск | 0,8 |
| Стали марок 15Х2НМФА, 15Х3НМФА, 15Х2НМФА-А, 15Х3НМФА-А | Ручная | Электрод марки Н-23 | Отпуск | 1,0 |
| | Автоматическая под флюсом | Сварочная проволока марки Св-09ХГНМТА | Отпуск | 1,0 |
| | Электрошлаковая | Сварочная проволока марки Св-16Х2НМФТА | Закалка и отпуск | 1,0 |
| Стали аустенитного класса | Ручная | Электрод марки ЭА-395/9 | Без термообработки | 1,0 |
| | | Электроды марок ЭА-400-10У, ЭА-898/21Б, ЭИО-8 | Отпуск | 0,8 |
| | Аргонодуговая | Сварочная проволока марки Св-04Х19Н11М3 | Без термообработки, отпуск | 1,0 |
| * Материал не включен в Сводный перечень документов по стандартизации [3]. Применимость материалов для изготовления оборудования и трубопроводов регламентируется федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии [1]. | | | | |

Таблица 10.3 — Значения коэффициента снижения циклической прочности для сварного соединения

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

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

10.16 Уточненный расчет резьбовых участков шпилек, болтов следует проводить по 6.5.2 и формулам (10.1) или (10.9). 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 $n_N = 5$.

Коэффициент асимметрии цикла местных напряжений следует вычислять по формулам (10.10)—(10.12).

10.17 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 следует проводить с учетом высокочастотного нагружения.

10.18 Исходные данные о высокочастотном нагружении компонента получаются при анализе результатов измерений на постпроектной стадии или их расчетом.

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

10.20 Условие прочности при наличии различных циклических нагрузок проверяется по формуле

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{N_i}{[N_0]_i} = a_N \le [a_N], \tag{10.15}$$

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

$$a_N = a_1 + a_2 + a_3 \le [a_N], \tag{10.16}$$

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 течении 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 $N$ выполнены условия:

$$10^7 \le N \le 10^{12};\ \frac{\langle\sigma_a\rangle}{[\sigma_{aF}]} \le 0{,}5, \tag{10.17}$$

где $[\sigma_{aF}]$ — допускаемая амплитуда при числе циклов $N$, определенная по формуле (10.13).

Накопленные повреждения $a_1$ и $a_2$ следует вычислять по формуле (10.15). Значения амплитуд и частот при определении повреждений $a_2$ и $a_3$ принимают в соответствии с 16.6.

10.21 Сочетание основного циклического нагружения с амплитудой $(\sigma_{aF})$ 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

$$[N] = [N_0]/æ, \tag{10.18}$$

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

Для основного цикла нагружения $i$-го типа повреждение $a_3^*$ следует вычислять по формуле

$$(a_3^*)_i = æ N_i/[N_0]_i. \tag{10.19}$$

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 вычисляют по формуле

$$æ = \left(\frac{f}{f_0}\right)^{\eta\frac{\langle\sigma_a\rangle}{(\sigma_a)}}, \tag{10.20}$$

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);

$(\sigma_a)$ — амплитуда приведенных напряжений основного цикла без учета концентрации напряжений;

$\eta$ — коэффициент, зависящий от материала, принимаемый по таблице 10.4.

При отсутствии экспериментальных данных для предварительных оценок значение $\eta$ следует принимать равным 2.

Таблица 10.4 — Значения коэффициента η

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

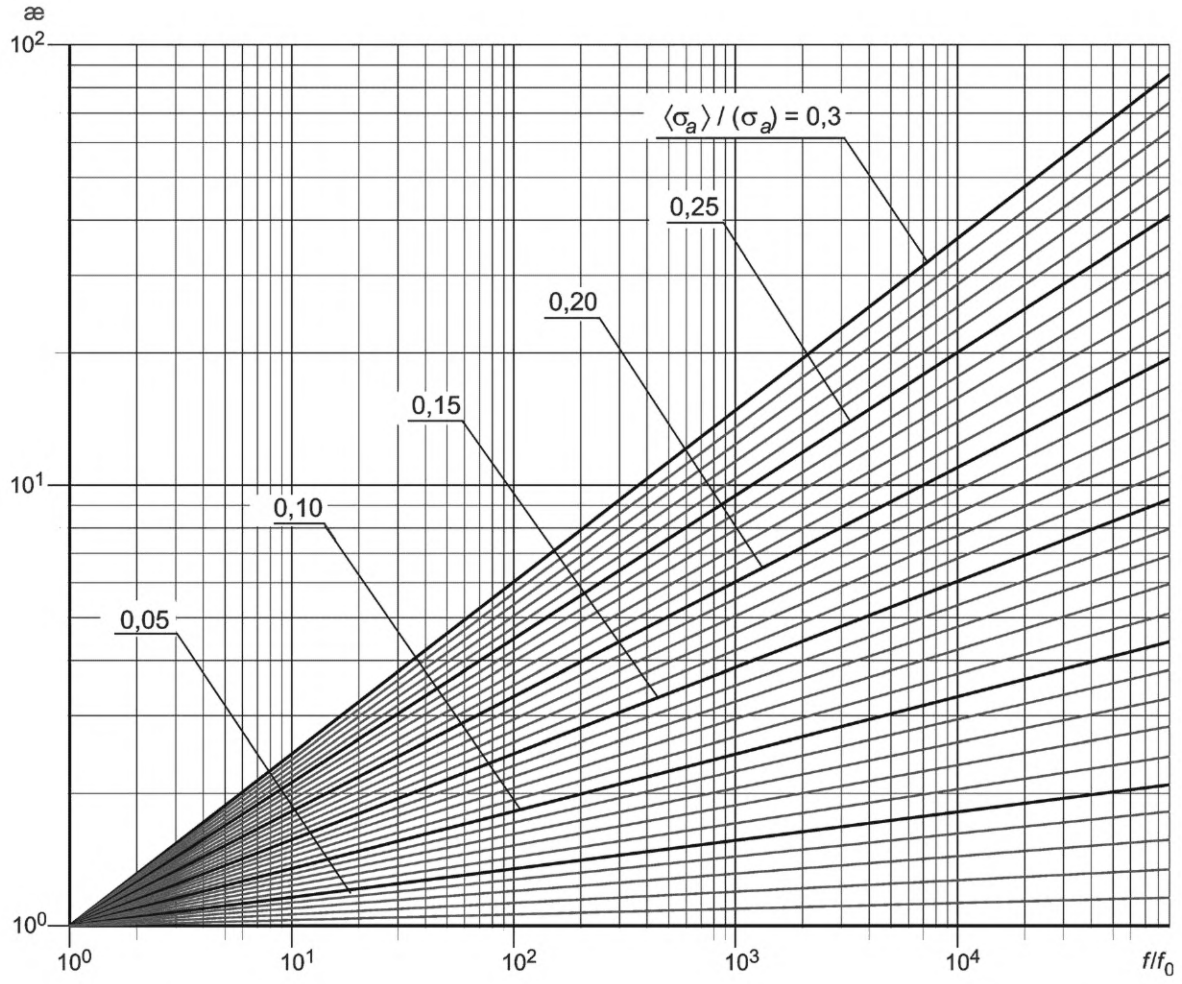



Рисунок 10.1 — Значения æ для сталей перлитного класса и их сварных соединений с $R_m^T \le 500$ МПа

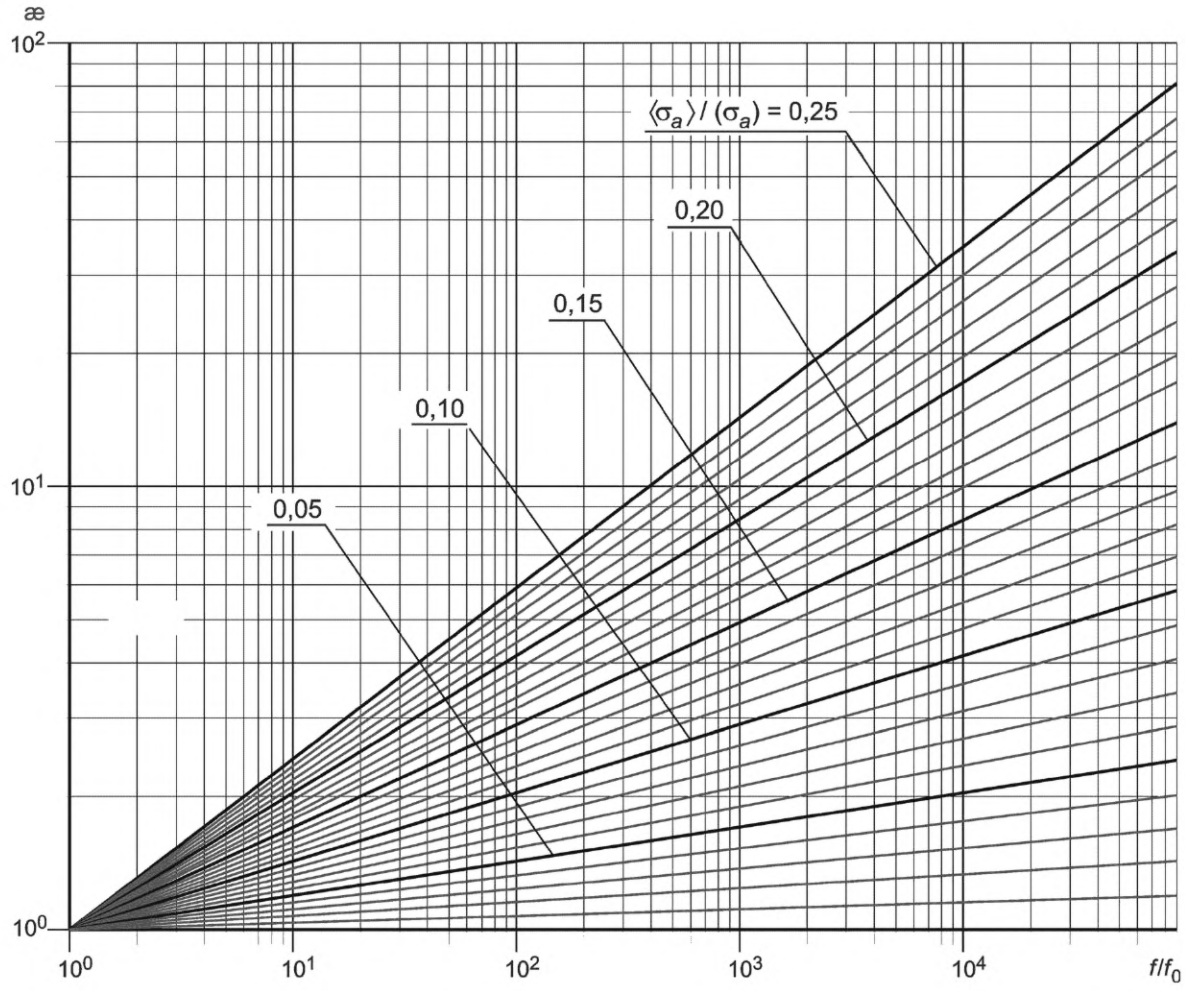



Рисунок 10.2 — Значения æ для сталей аустенитного класса и их сварных соединений с $R_m^T \leq 550$ МПа

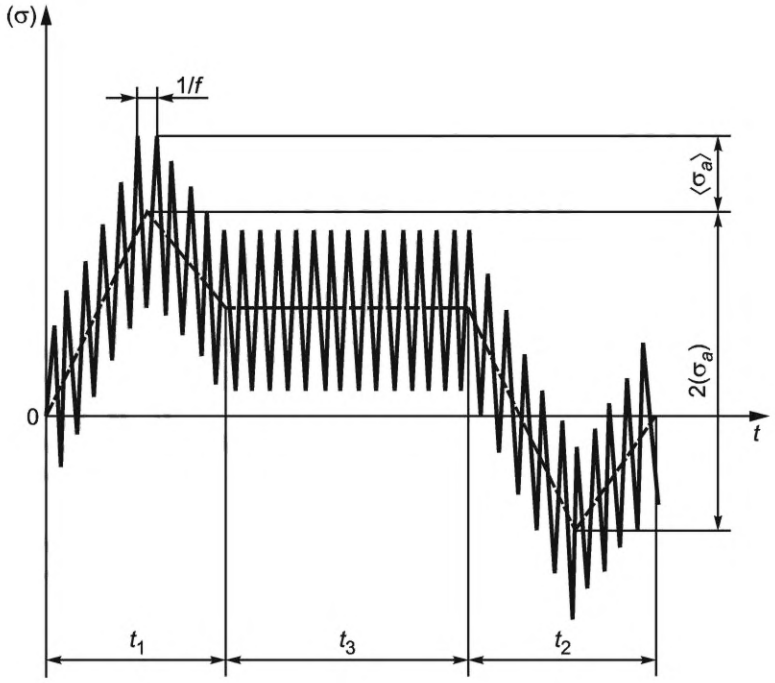



Рисунок 10.3 — Форма цикла при двухчастотном нагружении

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

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

$$0 < \langle\sigma_a\rangle/(\sigma_a) \le 0{,}5; \qquad (10.21)$$

- абсолютное значение максимального и минимального напряжений при двухчастотном нагружении не превышает значения $(0{,}2 \cdot 10^{-2}E^T + R^T_{p0,2})$ при температуре рассматриваемого режима;
- 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 (см. рисунок 10.3).

10.23 При расчетах на циклическую прочность компонентов, подвергаемых облучению, учитывается снижение относительного сужения. Повышение временного сопротивления под действием облучения не учитывается. Допускается применять коэффициенты снижения циклической прочности под действием облучения, приведенные в Г.11 приложения Г.

10.24 Если при расчете на циклическую прочность компонента конструкции не обеспечиваются требуемые коэффициенты запаса прочности, то оценку циклической прочности следует проводить на основе экспериментальных кривых усталости, полученных в соответствии с методом испытаний на усталость согласно ГОСТ Р 59115.5 для рассматриваемых условий нагружения и состояния металла конструкции с учетом соответствующих коэффициентов запаса прочности $n_\sigma$ и $n_N$ или по результатам испытаний натурных компонентов или их моделей, спроектированных и изготовленных в соответствии с требованиями, предъявляемыми к штатным конструкциям.

Геометрическое подобие моделей должно быть обеспечено по крайней мере в зоне проверки циклической прочности и примыкающих к ней участков, оказывающих влияние на значение и распределение напряжений в испытуемой зоне. Моделирование сварного соединения с уменьшением натурных размеров компонентов и антикоррозионной наплавки с изменением ее толщины не рекомендуется, если целью испытания является проверка их прочности.

Режим испытаний по характеру изменения нагрузок и температур должен соответствовать условиям эксплуатации.

Коэффициенты запаса прочности принимают по значению приведенного местного условного упругого напряжения в зоне, определяющей циклическую прочность, или по числу циклов нагружения, или по напряжению и числу циклов одновременно.

Запасы прочности по условному напряжению и числу циклов $N \le 10^4$ следует вычислять по формулам:

$$n_\sigma = 1{,}45 - 0{,}02x; \quad (10.22)$$

$$n_N = 3{,}5 - 0{,}14x, \quad (10.23)$$

где $x$ — число испытанных объектов.

При этом запасы $n_\sigma$ и $n_N$ по моменту образования трещин при циклическом нагружении натурных компонентов конструкций или их моделей должны быть не ниже 1,25 и 2,1 соответственно.

Условия мало- и многоцикловых испытаний по напряжению и числу циклов при одновременном применении коэффициентов запаса $n_\sigma$ и $n_N$ следует определять с использованием расчетной кривой усталости для основного металла или сварного соединения при соответствующих асимметрии цикла нагружения и температуре. Для этого определяют наклон $m_0$ расчетной кривой усталости в точке с $[N_0] = N_e$, где $N_e$ — заданное число циклов в эксплуатации. Отрезок, соединяющий точки с координатами $\{N_e, n_\sigma(\sigma_{aF})\}$ и $\{(n_\sigma)^{1/m0} N_e, (\sigma_{aF})\}$, является сочетанием эквивалентных режимов испытаний.

При испытании геометрически подобных моделей коэффициент запаса прочности по приведенному местному условному упругому напряжению следует вычислять по формуле

$$n_{\sigma_м} = n_\sigma \left(1{,}5 - 0{,}5\frac{l_м}{l_к}\right), \quad (10.24)$$

где $l_м$, $l_к$ — линейные размеры модели и натурной конструкции соответственно в испытываемой зоне.

Коэффициент запаса по числу циклов при испытании модели

$$n_{N_м} = \left(n_{\sigma_м}\right)^{\frac{1}{m_0}}. \quad (10.25)$$

Результаты испытаний на циклическую прочность не могут служить основанием для повышения допускаемых значений категорий напряжений, используемых при расчете на статическую прочность.

## 11 Расчет на длительную циклическую прочность

11.1 Расчет на длительную циклическую прочность заключается в определении допускаемых чисел циклов нагружения по заданным амплитудам напряжений или допускаемых амплитуд напряжений для заданных чисел циклов с учетом заданной длительности нагружения и проверке условия циклической прочности согласно 10.20.

11.2 Компонент, рассчитываемый на длительную циклическую прочность, должен удовлетворять:

- условиям прочности, принимаемым при выборе основных размеров во всем интервале эксплуатационных температур;
- условиям прочности при расчете на длительную статическую прочность.

11.3 Рекомендуемый метод расчета на длительную циклическую прочность приведен в приложении Г.

11.4 Расчет на длительную циклическую прочность трубопроводов допускается проводить по ГОСТ Р 59115.15.

11.5 Допускается проведение расчета на длительную циклическую прочность по методикам, приведенным в ГОСТ Р 59115.10—2021 (раздел 9).

## 12 Расчет на сопротивление разрушению

### 12.1 Общие положения

12.1.1 Расчет на сопротивление разрушению корпусов водо-водяных реакторов следует проводить по ГОСТ Р 59115.14.

12.1.2 Расчет на сопротивление разрушению допускается проводить согласно требованиям ГОСТ Р 59115.10—2021 (раздел 12).

12.1.3 Положения данного раздела не распространяются на расчет болтов и шпилек.

12.1.4 Расчет на сопротивление разрушению допускается не проводить для компонентов:

а) из сталей аустенитного класса и железоникелевых или цветных сплавов, не подвергающихся нейтронному облучению или подвергающихся облучению до флюенса не более $1{,}5 \cdot 10^{25}$ нейтр./м$^2$ при $E \geq 0{,}1$ МэВ;

б) из углеродистых, легированных (в т. ч. кремнемарганцовистых и хромомолибденванадиевых) и высокохромистых сталей, если выполнено условие

$$n_K \cdot \frac{1{,}12 \cdot R_{p0,2}^{T_{\min}} \sqrt{0{,}25 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot s}}{0{,}52 \cdot \left(\frac{50}{\pi \cdot s}\right)^{0{,}25} \cdot \left(10 + 70 \cdot \exp\left(0{,}019 \cdot \left(T_{\min} - T_к + \delta T_{cr-ch}\right)\right)\right) + 20} \le 1, \qquad (12.1)$$

где $n_K = 2$;

$s$ — толщина стенки, мм;

$R_{p0,2}^{T_{\min}}$ — значение предела текучести при температуре $T_{\min}$, МПа;

$T_{\min}$ — минимальная температура эксплуатации, °С;

$T_к = T_{к0} + \Delta T_T + \Delta T_F$ — критическая температура хрупкости материала с учетом термического старения и облучения, °С;

$T_{к0}$ — критическая температура хрупкости материала, принимаемая согласно документам по стандартизации на конструкционные материалы, °С;

$\Delta T_T$, $\Delta T_F$ — максимальные значения сдвига критической температуры хрупкости вследствие температурного старения и влияния нейтронного облучения соответственно за весь период эксплуатации конструкции (см. 12.3.3), °С;

$\delta T_{cr-ch}$ — значение, принимаемое по ГОСТ Р 59115.6, °С.

В случаях, когда материал компонента не подвергается нейтронному облучению или подвергается облучению при температурах (250 — 350) °С до флюенса нейтронов не более $10^{22}$ нейтр./м$^2$ при $E \ge 0{,}5$ МэВ, следует принимать $\Delta T_F = 0$.

12.1.5 Расчет на сопротивление разрушению компонентов оборудования и трубопроводов следует проводить для всех режимов эксплуатации, включая НУЭ, ННУЭ, УПА, УИ.

12.1.6 Расчет следует проводить для зон компонента, в которых возможен нестабильный рост трещины, таких как сварные соединения (швы), области с наибольшими значениями коэффициентов интенсивности напряжений, с наименьшими допускаемыми значениями характеристик трещиностойкости, а также с наименьшими отношениями допускаемых значений характеристик трещиностойкости к расчетным значениям параметров механики разрушения.

12.1.7 Расчет состоит из выбора расчетных зон компонента, принятия (постулирования) расчетного дефекта, определения для него параметров механики разрушения и оценки сопротивления разрушению путем их сравнения с допускаемыми значениями характеристик трещиностойкости.

12.1.8 Расчетный дефект для основного металла и сварного шва цилиндрических, сферических, конических, эллиптических, плоских компонентов оборудования и трубопроводов следует принимать в виде поверхностной полуэллиптической трещины (см. рисунок 12.1), а в окрестности отверстий и в зонах присоединения патрубков — в виде поверхностной четвертьэллиптической трещины (см. рисунок 12.2) глубиной $a = 0{,}25s$ с соотношением полуосей $a/c = 1/3$. При этом для компонентов с антикоррозионной наплавкой при расчете глубины трещины $a$ толщину стенки $s$ принимают равной сумме номинальной толщины стенки компонента и толщины наплавки.

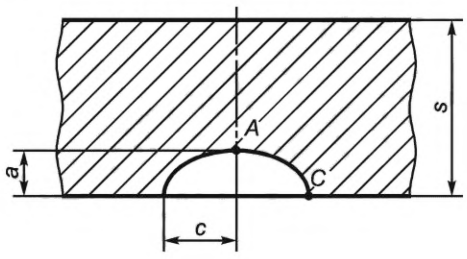



Рисунок 12.1 — Поверхностная полуэллиптическая трещина

Расчетный дефект следует располагать параллельно площадкам действия максимальных нормальных напряжений.

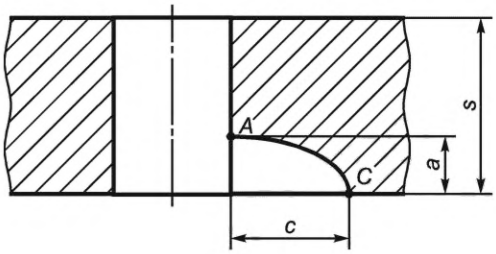



Рисунок 12.2 — Поверхностная четвертьэллиптическая трещина

12.1.9 Коэффициент запаса прочности при расчете на сопротивление разрушению $n_K$ следует принимать, в зависимости от категории расчетного режима, равным:

- для НУЭ $n_K = 2$;
- при ННУЭ, УИ $n_K = 1{,}5$;
- для УПА $n_K = 1$.

**12.2 Условия прочности**

12.2.1 Сопротивление разрушению считается обеспеченным, если в каждый рассматриваемый момент времени для компонента с постулированным расчетным дефектом в виде трещины для всех режимов эксплуатации выполнено условие

$$K_J \le [K_J]_i \qquad (12.2)$$

или

$$K_I \le [K_I]_i, \qquad (12.3)$$

где $K_I$, $K_J$ — коэффициенты интенсивности напряжений, рассчитываемые в линейной и нелинейной постановке соответственно;

$[K_I]_i$, $[K_J]_i$ — допускаемые значения коэффициентов интенсивности напряжений, определяемые согласно 12.3;

$i$ — индекс, указывающий на то, что допускаемые значения коэффициентов интенсивности напряжений различаются в зависимости от категории расчетного режима:

- $i = 1$ для НУЭ;
- $i = 2$ для УИ и ННУЭ;
- $i = 3$ для УПА.

12.2.2 Расчетом должно быть определено максимальное значение коэффициента интенсивности $K_J$ или $K_I$ в точках $A$ и $C$ расчетного дефекта в каждый рассматриваемый момент времени в каждом расчетном режиме с учетом переменного во времени распределения температур и напряжений по толщине стенки оборудования или трубопровода в анализируемой зоне, включая остаточные напряжения в основном металле и сварном шве. Допускается принимать остаточное напряжение равным пределу текучести при температуре 293 К (20 °С).

При расчете по условиям (12.2) и (12.3) механические свойства антикоррозионной наплавки принимают тождественными свойствам основного металла или металла шва сварного соединения в зависимости от расположения постулируемого дефекта. При расчете поля температур и напряжений следует учитывать теплофизические свойства антикоррозионной наплавки.

12.2.3 При выполнении расчета для переходных режимов, относящихся к ННУЭ и УПА, с переменным во времени распределением температур и напряжений по толщине стенки компонента, должно быть показано, что условия (12.2) и (12.3) выполняются при значениях глубины расчетного дефекта $0 < a \le 0{,}25s$.

12.2.4 Коэффициенты интенсивности напряжений $K_I$ вычисляют согласно подразделу 12.4. Допускается определение параметров механики разрушения ($K_J$) согласно ГОСТ Р 59115.14—2021 (приложение П).

12.2.5 Для компонентов из углеродистых, легированных (в т. ч. кремнемарганцовистых и хромомолибденванадиевых) и высокохромистых сталей, расчет необходимо проводить только до температуры $T^*$, при которой выполняется условие

$$n_K \cdot \frac{1{,}12 \cdot R_{p0,2}^{T^*} \sqrt{0{,}25 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot s}}{0{,}52 \cdot \left(\frac{50}{\pi \cdot s}\right)^{0{,}25} \cdot \left(10 + 70 \cdot \exp\left(0{,}019 \cdot \left(T^* - T_к + \delta T_{cr-ch}\right)\right)\right) + 20} = 1, \quad (12.4)$$

где $n_K$ — коэффициент запаса, определяемый по 12.1.9;

$R_{p0,2}^{T^*}$ — значение предела текучести при температуре $T^*$.

### 12.3 Допускаемые значения коэффициентов интенсивности напряжений

#### 12.3.1 Допускаемые значения $[K_J]$

12.3.1.1 Допускаемое значение коэффициента интенсивности напряжений $K_J$ следует вычислять по формуле

$$[K_J]_i = \frac{K_{Jc}}{n_K}, \quad (12.5)$$

где $K_{Jc}$ — статическая трещиностойкость;

$n_K$ — коэффициент запаса, принимаемый по следующим правилам:

- для углеродистых, легированных (в т. ч. кремнемарганцовистых и хромомолибденванадиевых) и высокохромистых сталей при температуре $T$, не превышающей $T_t$, $n_K$ следует вычислять по 12.1.9;
- при температуре $T$, превышающей $T_t$, $n_K$ = 1,1;
- для сталей аустенитного класса $n_K$ = 1,1.

12.3.1.2 Значение $K_{Jc}$ для сталей аустенитного класса следует вычислять по ГОСТ Р 59115.6—2021 (подраздел 13.1).

12.3.1.3 Значение $K_{Jc}$ для углеродистых, легированных (в т. ч. кремнемарганцовистых и хромомолибденванадиевых) и высокохромистых сталей при температуре $T$ следует вычислять по формуле

$$K_{Jc}(T) = \begin{cases} K_{Jc}^{0,05}(T) \text{ при } K_{Jc}^{0,05}(T) < K_{Jc}^{вш}(T) \\ K_{Jc}^{вш}(T) \text{ при } K_{Jc}^{0,05}(T) \geq K_{Jc}^{вш}(T) \end{cases}, \quad (12.6)$$

где $K_{Jc}^{0,05}$ — критическое значение коэффициента интенсивности напряжений (статической трещиностойкости) при длине фронта трещины $B_p$ и вероятности хрупкого разрушения 0,05, которое следует вычислять по формуле

$$K_{Jc}^{0,05}(T) = 0{,}52 \cdot \left(\frac{B_0}{B_p}\right)^{1/4} \cdot \left(K_{Jc(med)}(T) - K_{\min}\right) + K_{\min}, \quad (12.7)$$

где $B_p$ — длина фронта постулируемого расчетного дефекта, мм;

$B_0$ = 25 мм;

$K_{Jc(med)}$ — медианное (соответствующее вероятности хрупкого разрушения 0,5) значение статической трещиностойкости $K_{Jc}$ для длины фронта трещины равной 25 мм, МПа$\cdot\sqrt{\text{м}}$;

$K_{\min}$ — минимально возможное критическое значение статической трещиностойкости, равное 20 МПа$\cdot\sqrt{\text{м}}$.

Если $B_p$ > 200 мм, в расчете следует принимать $B_p$ = 200 мм.

Значения $K_{Jc(med)}$ и $K_{Jc}^{вш}$ принимают согласно ГОСТ Р 59115.6—2021 (подраздел 13.3).

#### 12.3.2 Допускаемые значения $[K_I]$

12.3.2.1 Допускаемые значения коэффициентов интенсивности напряжений $[K_I]_i$ рассчитываются на основе температурных зависимостей $K_{Ic}$ или $K_{Jc}$ материалов на конец срока службы.

12.3.2.2 Допускаемые значения коэффициентов интенсивности напряжений зависят от приведенной температуры $(T - T_к)$ и категории рассматриваемого режима. Изменение свойств материалов в процессе эксплуатации учитывается введением в расчет сдвигов критической температуры хрупкости $T_к$ вследствие различных воздействий в процессе эксплуатации. Зависимость $[K_I]_i$ от $[T - T_к]$ получается, как огибающая двух кривых, определяемых по исходной температурной зависимости $K_{Ic}$ или $K_{Jc}$.Одна из этих кривых должна быть получена делением ординат исходной кривой на коэффициент запаса

прочности $n_K$, другая — смещением исходной кривой вдоль оси абсцисс на значение температурного запаса $\Delta T$.

Коэффициенты запаса $n_K$ принимают согласно 12.1.9.

Температурный запас $\Delta T$ следует принимать:

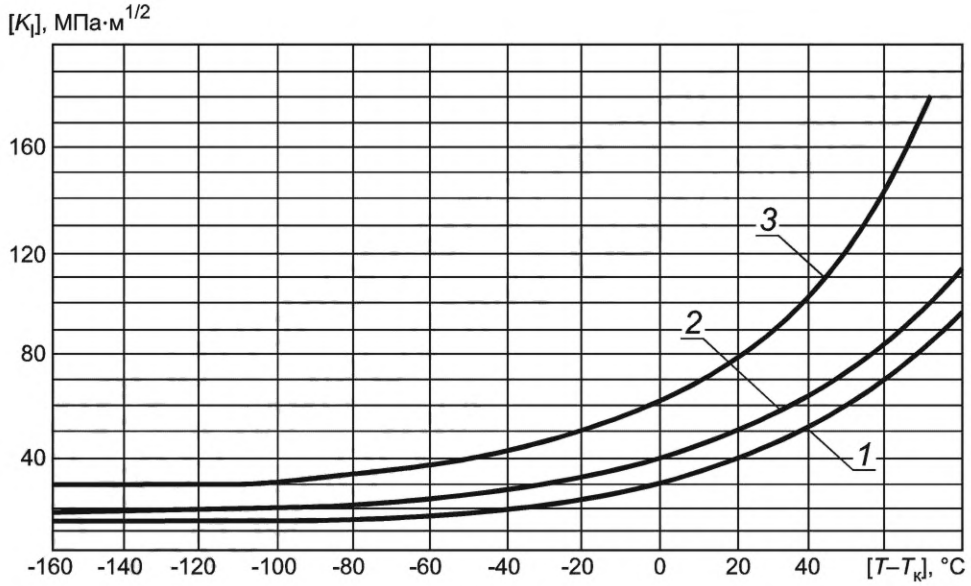
- для НУЭ ($i$ = 1) $\Delta T$ = 30 °С;
- при ННУЭ, УИ ($i$ = 2) $\Delta T$ = 30 °С;
- для УПА ($i$ = 3) $\Delta T$ = 0 °С.

Значение критической температуры хрупкости $T_к$ следует принимать согласно подразделу 12.3.3.

12.3.2.3 При определении $[K_I]_i$ значения флюенса $F_n$ и температуры $T$ принимают равными их значениям в расчетной точке фронта трещины.

12.3.2.4 Для углеродистых, легированных (в т. ч. кремнемарганцовистых и хромомолибденванадиевых) и высокохромистых сталей и их сварных соединений (кроме стали марки 07Х12НМФБ и ее сварных соединений, а также материалов, перечисленных в ГОСТ Р 59115.14) с пределом текучести при температуре 20 °С, определяемым по ГОСТ Р 59115.3 и не превышающим 600 МПа, при толщинах стенки, не превышающих 60 мм, используют обобщенные кривые допускаемых коэффициентов интенсивности напряжений $[K_I]_i$, приведенные на рисунке 12.3.

Для стали марки 10ГН2МФА и ее сварных соединений кривые, приведенные на рисунке 12.3, допускается использовать при толщинах стенки, не превышающих 150 мм.




*1* — НУЭ, $[K_I]_1 = 13{,}0 + 18{,}0 \cdot e^{0{,}02 \cdot [T - T_к]}$; *2* — ННУЭ, УИ, $[K_I]_2 = 17{,}0 + 24{,}0 \cdot e^{0{,}018 \cdot [T - T_к]}$; *3* — УПА, $[K_I]_3 = 26{,}0 + 36{,}0 \cdot e^{0{,}02 \cdot [T - T_к]}$

Рисунок 12.3 — Обобщенные зависимости допускаемых коэффициентов интенсивности напряжений

### 12.3.3 Критическая температура хрупкости

12.3.3.1 Критическую температуру хрупкости материала следует вычислять по формуле

$$T_к = T_{к0} + \Delta T_T + \Delta T_F, \qquad (12.8)$$

где $T_{к0}$ — критическая температура хрупкости материала в исходном состоянии;

$\Delta T_T$ — сдвиг критической температуры хрупкости вследствие температурного старения;

$\Delta T_F$ — сдвиг критической температуры хрупкости вследствие влияния нейтронного облучения.

12.3.3.2 Значения $T_{к0}$, $\Delta T_T$, $\Delta T_F$ (или коэффициента радиационного охрупчивания $A_F$) принимают по документам по стандартизации на конструкционные материалы или определяют экспериментально. Допускается принимать данные характеристики по ГОСТ Р 59115.6.

### 12.4 Определение коэффициента интенсивности напряжений $K_I$

12.4.1 Расчет с использованием $K_I$ допускается проводить, если выполняется условие

$$\sigma^H_{eff} \le 0{,}8R^T_{p0,2}, \tag{12.9}$$

где $\sigma^H_{eff}$ — эффективные нетто-напряжения.

Значение $\sigma^H_{eff}$ следует вычислять по формуле

$$\sigma^H_{eff} = \frac{\sigma_{eff}}{1-\dfrac{a/s}{1+\dfrac{2}{\pi}\dfrac{s}{c}\left(1-\dfrac{a}{s}\right)^{0,1}}}, \tag{12.10}$$

где $\sigma_{eff}$ — эффективные брутто-напряжения.

Эффективные брутто-напряжения $\sigma_{eff}$ следует вычислять из условия

$$K_I\{\sigma_{eff}\} = K_I\{\sigma\}, \tag{12.11}$$

где $K_I\{\sigma\}$ — максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений в точке А (см. рисунки 12.1, 12.2) при действии напряжений расчетного режима, неравномерно распределенных по толщине стенки компонента;

$K_I\{\sigma_{eff}\}$ — зависимость коэффициента интенсивности напряжений в точке А от напряжений $\sigma_{eff}$, равномерно распределенных по толщине стенки компонента.

Коэффициенты интенсивности напряжений $K_I$ в точке А допускается определять согласно положениям настоящего подраздела.

12.4.2 В случае невыполнения условия (12.9), расчет должен быть проведен методами нелинейной механики разрушения с использованием $K_J$ (вычислением $J$-интеграла) на основе НДС в компоненте, рассчитанного в упругопластической постановке.

12.4.3 Допускается в случае невыполнения условия (12.9) проводить расчет методами линейной механики разрушения с использованием следующей процедуры коррекции коэффициента интенсивности напряжений $K_I$ с учетом пластической зоны перед фронтом расчетного дефекта.

Радиус $r$, мм, пластической зоны в вершине трещины следует вычислять по формуле

$$r = \frac{10^3}{6\pi}\left(\frac{K_I}{R^T_{p0,2}}\right)^2, \tag{12.12}$$

где $R^T_{p0,2}$ — значение предела текучести в вершине трещины;

$K_I$ — значение коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины.

Скорректированное значение коэффициента интенсивности напряжений $K_{Ip}$ следует вычислять по формуле

$$K_{Ip} = \alpha K_I\sqrt{\frac{a+r}{a}}, \tag{12.13}$$

где коэффициент $\alpha$ следует вычислять по следующим правилам:

- $\alpha = 1$ при $r \le 0{,}05(s-a)$;
- $\alpha = 1+0{,}15\left(\dfrac{r-0{,}05(s-a)}{0{,}035(s-a)}\right)^2$ при $0{,}05(s-a) < r \le 0{,}12(s-a)$;
- $\alpha = 1{,}6$ при $r > 0{,}12(s-a)$.

12.4.4 Коэффициент интенсивности напряжений $K_I$ для выбранных расчетных трещин следует рассчитывать аналитически, численно (МКЭ, метод весовых функций) или экспериментально. Допускается применение методик расчета коэффициентов интенсивности напряжений, приведенных в ГОСТ Р 59115.14—2021 (приложение М).

12.4.5 Коэффициент интенсивности напряжений $K_I$, МПа·м$^{1/2}$, для цилиндрических, сферических, конических, эллиптических, плоских компонентов, нагружаемых внутренним давлением и температурными воздействиями, допускается консервативно вычислять по формуле

$$K_I = \frac{\eta\left(\sigma_p M_p + \sigma_q M_q\right)\left(\pi \frac{a}{10^3}\right)^{\frac{1}{2}}}{Q}, \quad (12.14)$$

где $\eta$ — коэффициент концентрации напряжений, определяемый согласно 12.4.9 и 12.4.10;

$\sigma_p$ — составляющая напряжений растяжения, МПа;

$\sigma_q$ — составляющая изгибных напряжений, МПа;

$M_p = 1 + 0{,}12(1 - a/c)$;

$M_q = 1 - 0{,}64 \cdot a/h$;

$a = 0{,}25s$ — глубина трещины, мм;

$c$ — полудлина трещины, мм;

$h$ — длина зоны, в пределах которой составляющая изгибных напряжений сохраняет положительное значение, мм;

$Q = [1 + 4{,}6 \cdot a/2c)^{1{,}65}]^{1/2}$.

При расчетах для режимов НУЭ и УИ допускается принимать $h = 0{,}5s$.

При расчете зон, где отсутствует концентрация напряжений, следует принимать $\eta = 1$.

12.4.6 Составляющую напряжений растяжения (кольцевых или осевых) следует вычислять по формуле

$$\sigma_{jp} = \frac{1}{s}\int_s \sigma_j dx, \quad (12.15)$$

где $\sigma_j$ — функция изменения напряжений по толщине стенки;

$j$ — координата $\theta$ или $Z$;

$\theta$ — окружное направление;

$Z$ — осевое направление;

$s$ — толщина стенки в расчетном сечении.

12.4.7 Значение составляющей напряжений изгиба следует вычислять по формуле

$$\sigma_{jq} = \sigma_{jn} - \sigma_{jp}, \quad (12.16)$$

где $\sigma_{jn}$ — значение функции изменения напряжений по толщине стенки в точке $n$.

Точку $n$ следует располагать на наружной или внутренней поверхности компонента в зоне действия максимальных растягивающих напряжений.

12.4.8 Допускается консервативно определять $K_I$ по формуле

$$K_I = \eta(0{,}86\sigma_p + 0{,}54\sigma_q) \cdot (s/10^3)^{1/2}, \quad (12.17)$$

где $\sigma_p$ и $\sigma_q$, МПа;

$s$, мм;

$K_I$, МПа $\cdot$ м$^{1/2}$.

12.4.9 Коэффициент $\eta$ для зон перехода жесткостей (соединение фланцев с цилиндрической частью корпуса, галтели и др.) следует вычислять по формулам:

$$\eta = 1 + (K_\sigma - 1)^{0{,}7} \cdot 1{,}8(s/R_2) \text{ при } 0 < s/R_2 \le 5; \quad (12.18)$$

$$\eta = 1 + (K_\sigma - 1)^{0{,}7} \cdot 9(s/R_2)^2 \text{ при } s/R_2 > 5, \quad (12.19)$$

где $R_2$ — радиус кривизны концентратора напряжения (галтели) в рассчитываемом сечении;

$K_\sigma$ — теоретический коэффициент концентрации (допускается принимать равным значению $K_\sigma$ при растяжении).

При $\eta > K_\sigma$ следует принимать $\eta = K_\sigma$.

Допускается определять $\eta$ по графикам на рисунке 12.4.

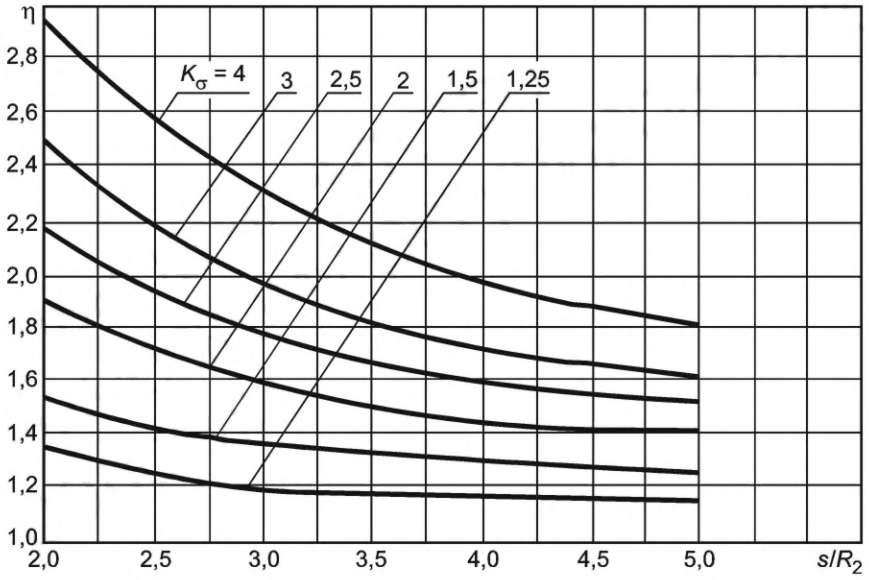
12.4.10 Коэффициент $\eta$ для зон отверстий (присоединения патрубков, штуцеров, труб) следует вычислять по формулам:

$$\eta = [1 + 5(K_\sigma - 1) \cdot \exp(-0{,}86s/R_1)]^{1/2} \text{ при } s/R_1 \le 0{,}8; \quad (12.20)$$

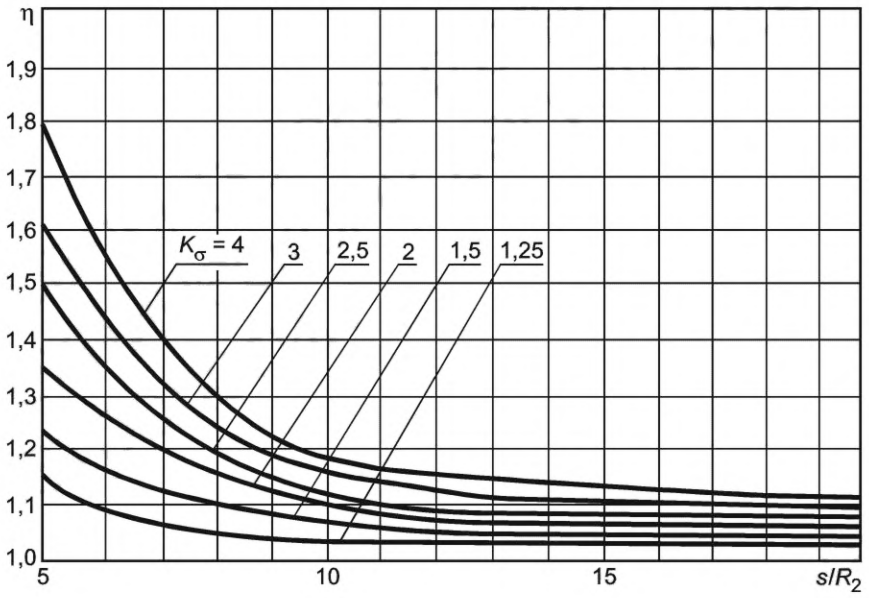
$$\eta = [1 + 2(K_\sigma - 1)/(s/R_1)]^{1/2} \text{ при } s/R_1 > 0{,}8, \quad (12.21)$$

где $R_1$ — радиус отверстия.

Допускается η определять по графикам на рисунке 12.5.




а) $2 < s/R_2 \leq 5$




б) $s/R_2 > 5$

Рисунок 12.4 — Зависимость коэффициента η от отношения $s/R_2$ для зон перехода жесткостей

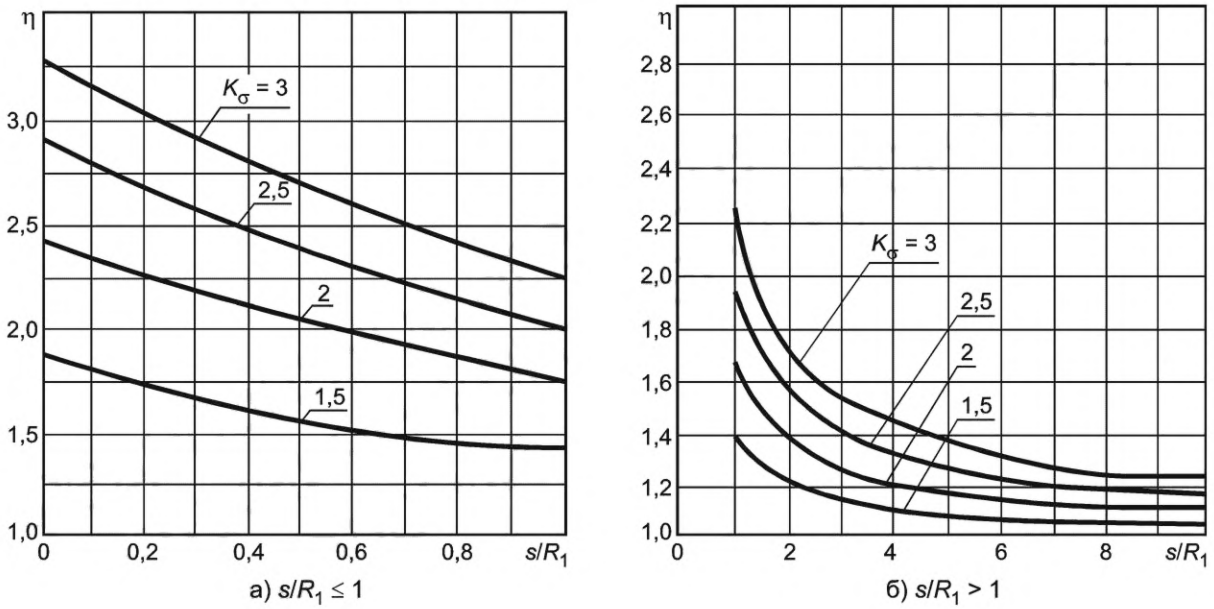



Рисунок 12.5 — Зависимость коэффициента η от отношения $s/R_1$ для зон расположения отверстий

### 12.5 Определение минимальной допускаемой температуры конструкции при гидравлических (пневматических) испытаниях

12.5.1 Гидравлические (пневматические) испытания должны проводиться в таких условиях, чтобы минимальная температура конструкции при гидравлических (пневматических) испытаниях $T_h$ была больше или равна минимально допускаемой температуре конструкции $[T_h]$, определяемой из расчета на сопротивление разрушению.

12.5.2 В случае использования в расчете температурных зависимостей трещиностойкости по ГОСТ Р 59115.6—2021 (раздел 13) минимально допускаемую температуру $[T_h]$ следует вычислять из условия

$$K_J^h = \frac{K_{Jc}}{n}, \tag{12.22}$$

где $K_J^h$ — коэффициент интенсивности напряжений в расчетных зонах компонента при УИ, рассчитанный при температуре $T = [T_h]$;

$n$ = 1,5.

Значение $K_J^h$ следует вычислять в соответствии с 12.2.2.

Температурную зависимость $K_{Jc}(T)$ для постулируемого расчетного дефекта следует рассчитывать с учетом деградации свойств на момент проведения гидравлических испытаний в соответствии с 12.3.1.2 и 12.3.1.3.

12.5.3 В случае использования обобщенных зависимостей допускаемых коэффициентов интенсивности напряжений на рисунке 12.3 допускаемую температуру $[T_h]$ следует рассчитывать согласно следующей процедуре.

Значение $[T_h]$ следует вычислять из условия

$$K_I^h = [K_I]_2, \tag{12.23}$$

где $K_I^h$ — коэффициент интенсивности напряжений в рассматриваемых сечениях конструкции при УИ, определяемый согласно 12.4.

Значение $[K_I]_2$ следует принимать равным значению $K_I^h$ и с использованием зависимости $[K_I]_2 = f[T - T_к]$ находится значение $[[T_h] - T_к]$. Затем, по определенному значению $T_к$, устанавливают значение $[T_h]$. $T_к$ следует рассчитывать на момент проведения гидравлических испытаний в соответствии с 12.3.3.

12.5.4 Условие (12.22) [или (12.23)] должно быть выполнено в течение выдержки при испытании давлением, при выдержке для осмотра оборудования и трубопроводов и при разогреве до температуры испытаний.

12.5.5 Расчет по определению температуры $[T_h]$ допускается не проводить и принять ее равной 5 °С, если выполняется условие 12.1.4 а) или условие 12.1.4 б) при $T_{min}$ = 5 °С, $n_K$ = 1,5, и значении $R^{T^*}_{p0,2}$ при температуре 20 °С.

## 13 Расчет на прогрессирующее изменение формы и размеров

13.1 Расчет на прогрессирующее изменение форм и размеров следует проводить для всех компонентов конструкции, за исключением болтов и шпилек, для которых остаточные изменения формы и размеров в работе недопустимы или ограничены заданными пределами по условиям нормальной эксплуатации конструкции (по условиям работоспособности подвижных соединений, разбираемости разъемных соединений, стабильности зазоров, обеспечивающих гидравлические характеристики, и т. п.).

13.2 Прогрессирующее изменение формы и размеров в компоненте отсутствует, если максимальное значение размаха приведенных напряжений $(\sigma)_R$ в компоненте не превышает допускаемого значения

$$(\sigma)_R \le \min\left\{\left(2{,}5 - \frac{R^T_{p0,2}}{R^T_m}\right)R^T_{p0,2},\ 2R^T_{p0,2}\right\}. \qquad (13.1)$$

В случае невыполнения данного условия допускается проведение уточненной оценки приспособляемости.

13.3 Уточненную оценку приспособляемости следует проводить для НУЭ и ННУЭ для всех расчетных нагрузок согласно 4.17, кроме внешних динамических и вибрационных. Должно быть выполнено любое из условий приспособляемости согласно 13.3.1 и 13.3.2.

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

- в случае линейного распределения температуры по толщине стенки компонента:

$$y \le \frac{1}{x} \text{ при } 0 < x \le 0{,}5,$$

$$y \le 4(1 - x) \text{ при } 0{,}5 < x < 1{,}0; \qquad (13.2)$$

- в случае параболического распределения температуры по толщине стенки компонента:

$$y \le 5{,}2(1 - x) \text{ при } 0{,}615 < x < 1{,}0,$$

$$y \le 4{,}65 \text{ при } 0{,}5 < x < 1{,}0,$$

$$y \le 3{,}55 \text{ в случае } x = 0{,}4,$$

$$y \le 2{,}7 \text{ в случае } x = 0{,}5, \qquad (13.3)$$

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 вычислять линейной интерполяцией.

13.3.2 Уточненную оценку приспособляемости упругопластическим или упруговязкопластическим расчетом следует проводить по накопленным в компоненте деформациям и перемещениям.

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

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

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

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

13.4 Для компонентов, температура эксплуатации которых превышает $T_t$, допускается проводить расчет на прогрессирующее изменение формы и размеров по ГОСТ Р 59115.10—2021 (раздел 10).

## 14 Расчет на длительную статическую прочность

14.1 При расчете на длительную статическую прочность следует рассматривать все эксплуатационные режимы, проходящие при температурах, превышающих $T_t$, включая нарушения нормальных условий эксплуатации. Условия прочности компонентов конструкций приведены в таблице 14.1 и пояснены в следующих пунктах.

14.2 Компонент, рассчитываемый на длительную статическую прочность, должен удовлетворять:

- условиям прочности, принимаемым при выборе основных размеров, во всем интервале эксплуатационных температур;
- условиям прочности, принимаемым при расчете на статическую прочность, во всем интервале эксплуатационных температур.

14.3 Приведенные напряжения категорий $(\sigma)_1$, $(\sigma)_2$ и $(\sigma)_R$ при расчете на длительную статическую прочность компонентов оборудования и трубопроводов, за исключением болтов и шпилек, должны удовлетворять следующим условиям:

$$(\sigma)_1 \le [\sigma]_t; \tag{14.1}$$

$$(\sigma)_2 \le K_t[\sigma]_t; \tag{14.2}$$

$$(\sigma)_R \le K_t'[\sigma]_t, \tag{14.3}$$

где $[\sigma]_t$ — номинальное допускаемое напряжение, определяемое в соответствии с 5.4;

$K_t$ — коэффициент приведения напряжений $(\sigma)_2$ к мембранным, определяемый в зонах мембранных или местных мембранных напряжений по формуле

$$K_t = 1{,}25 - 0{,}25\frac{(\sigma)_m}{[\sigma]_t} \text{ или } K_t = 1{,}25 - 0{,}25\frac{(\sigma)_{mL}}{[\sigma]_t}; \tag{14.4}$$

$K_t'$ — коэффициент приведения напряжений $(\sigma)_R$ к мембранным, определяемый в зонах мембранных или местных мембранных напряжений по формуле

$$K_t' = 1{,}75 - 0{,}25\frac{(\sigma)_m}{[\sigma]_t} \text{ или } K_t' = 1{,}75 - 0{,}25\frac{(\sigma)_{mL}}{[\sigma]_t}. \tag{14.5}$$

При вычислении $[\sigma]_t$ значение предела длительной прочности $R_{mt}^{\langle T\rangle}$ определяют для суммарной длительности $t$ нагружения компонента при температуре $\langle T\rangle$, превышающей $T_t$ в рассматриваемом режиме в течение срока службы.

В тех случаях, когда при эксплуатации компонента имеет место два или более режима нагружения, отличающихся по приведенному напряжению и (или) температуре $\langle T\rangle$, должно быть выполнено условие прочности по накопленному длительному статическому повреждению

$$\sum_i \frac{t_i}{[t]_i} \le 1, \tag{14.6}$$

где $t_i$ — длительность нагружения компонента при рассматриваемом значении приведенного напряжения на $i$-м режиме при температуре $\langle T\rangle_i$, превышающей $T_t$ в течение срока службы;

$[t]_i$ — допускаемое время нагружения, определяемое по кривой длительной прочности или таблицам минимальных значений пределов длительной прочности согласно ГОСТ Р 59115.4, соответствующее температуре $\langle T\rangle_i$ и значению приведенного напряжения на $i$-м режиме, умноженному на коэффициент $1{,}5/K_t$ или $1{,}5/K_t'$;

$i$ — число режимов нагружения, отличающихся температурой $\langle T\rangle_i$ или приведенным напряжением.

Таблица 14.1 — Условия прочности компонентов конструкции

| Тип конструкции | Расчетная группа категорий напряжений | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $(\sigma)_1$ | $(\sigma)_2$ | $(\sigma)_R$ | $(\sigma)_{3w}$ | $(\sigma)_{4w}$ |
| Компоненты корпусов реакторов, парогенераторов, сосудов | $\begin{cases}[\sigma]_t \\ \sum\limits_i \frac{t_i}{[t]_i} \le 1\end{cases}$ | $\begin{cases}K_t[\sigma]_t \\ \sum\limits_i \frac{t_i}{[t]_i} \le 1\end{cases}$ | $\begin{cases}K'_t[\sigma]_t \\ \sum\limits_i \frac{t_i}{[t]_i} \le 1\end{cases}$ | — | — |
| Трубопроводы и трубчатые компенсаторы | $\begin{cases}[\sigma]_t \\ \sum\limits_i \frac{t_i}{[t]_i} \le 1\end{cases}$ | $\begin{cases}K_t[\sigma]_t \\ \sum\limits_i \frac{t_i}{[t]_i} \le 1\end{cases}$ | $\begin{cases}K'_t[\sigma]_t \\ \sum\limits_i \frac{t_i}{[t]_i} \le 1\end{cases}$ | — | — |
| Компенсирующие устройства (торовые, волнистые) | $\begin{cases}[\sigma]_t \\ \sum\limits_i \frac{t_i}{[t]_i} \le 1\end{cases}$ | $\begin{cases}K_t[\sigma]_t \\ \sum\limits_i \frac{t_i}{[t]_i} \le 1\end{cases}$ | — | — | — |
| Болты и шпильки | $\begin{cases}[\sigma]_{wt} \\ \sum\limits_i \frac{t_i}{[t]_i} \le 1\end{cases}$ | — | — | $\begin{cases}1{,}8[\sigma]_{wt} \\ \sum\limits_i \frac{t_i}{[t]_i} \le 1\end{cases}$ | $\begin{cases}2{,}7[\sigma]_{wt} \\ \sum\limits_i \frac{t_i}{[t]_i} \le 1\end{cases}$ |

14.4 Выполнение условия (14.3) по размахам напряжений $(\sigma)_R$ для компонента не является обязательным, если в расчете на прогрессирующее изменение формы и размеров показано выполнение условий по накопленным деформациям согласно 13.3.2. Если для компонента не выполняются условия (14.3) и 13.3.2, допускается проводить уточненный расчет на длительную статическую прочность согласно требованиям ГОСТ Р 59115.10—2021 (раздел 8).

14.5 Напряжение группы категорий $(\sigma)_1$ в болтах или шпильках не должно превышать $[\sigma]_{wt}$, где номинальное допускаемое напряжение $[\sigma]_{wt}$ определяют в соответствии с 5.5. Для болтов и шпилек разъемных соединений с мембранным уплотнением допускается определять напряжение $(\sigma)_1$ только от механических нагрузок, без учета усилия затяга.

14.6 Значение средней по сечению шпильки (болта) осевой деформации в болтах и шпильках, подвергаемых многократной затяжке, за срок службы не должно превышать $0{,}5A_t^{\langle T\rangle}$, но не более 1 %. Среднюю по сечению шпильки (болта) осевую деформацию допускается определять по значению вытяжки, определенному экспериментально или расчетом.

14.7 Напряжение группы категорий $(\sigma)_{3w}$ в болтах или шпильках не должно превышать $1{,}8[\sigma]_{wt}$, где номинальное допускаемое напряжение $[\sigma]_{wt}$ определяют в соответствии с 5.5.

Если при эксплуатации болта или шпильки имеет место два или более режима нагружения, отличающихся по приведенному напряжению и (или) температуре $\langle T\rangle$, должно быть выполнено условие прочности по накопленному длительному статическому повреждению (14.6) с той разницей, что в этом случае:

- $t_i$ — длительность нагружения болта или шпильки при рассматриваемом значении напряжения $(\sigma)_{3wi}$ при температуре $\langle T\rangle_i$ в течение срока службы;
- $[t]_i$ — допускаемое время нагружения, определяемое по кривой длительной прочности или таблицам минимальных значений пределов длительной прочности согласно ГОСТ Р 59115.4, соответствующее температуре $\langle T\rangle_i$ и напряжению $1{,}65(\sigma)_{3wi}$;
- $i$ — число режимов нагружения, отличающихся температурой $\langle T\rangle_i$ и (или) напряжением $(\sigma)_{3wi}$.

14.8 Напряжение группы категорий $(\sigma)_{4w}$ в болтах или шпильках не должно превышать $2{,}7[\sigma]_{wt}$, где номинальное допускаемое напряжение $[\sigma]_{wt}$ определяют в соответствии с 5.5.

Если при эксплуатации болта или шпильки имеет место два или более режима нагружения, отличающихся по приведенному напряжению и (или) температуре $\langle T\rangle$, должно быть выполнено условие прочности по накопленному длительному статическому повреждению (14.6) с той разницей, что в этом случае:

- $t_i$ — длительность нагружения болта или шпильки при рассматриваемом значении напряжения $(\sigma)_{4wi}$ при температуре $\langle T\rangle_i$ в течение срока службы;

- $[t]_i$ — допускаемое время нагружения, определяемое по кривой длительной прочности или таблицам минимальных значений пределов длительной прочности согласно ГОСТ Р 59115.4, соответствующее температуре $\langle T \rangle_i$ и напряжению $1{,}1(\sigma)_{4wi}$;

- $i$ — число режимов нагружения, отличающихся температурой $\langle T \rangle_i$ и (или) напряжением $(\sigma)_{4wi}$.

14.9 Среднее касательное напряжение в шпонках, штифтах и т. п., вызванное действием срезывающих усилий от механических и компенсационных нагрузок, действующих на оборудование, не должно превышать $0{,}5[\sigma]_t$ для шпонок, штифтов и т. п. и $0{,}5[\sigma]_{wt}$ для болтов и шпилек. Номинальные допускаемые напряжения $[\sigma]_t$ и $[\sigma]_{wt}$ определяют в соответствии с 5.4 и 5.5 соответственно.

14.10 Расчет на длительную статическую прочность омываемых натрием компонентов контура из аустенитных сталей, если в том же контуре находятся компоненты из углеродистых или легированных сталей, проводят по 14.1—14.3, если глубина зоны науглероживания $h_{cc}$ для заданного времени и температуры не превышает расчетной толщины стенки компонента.

Для контура с натрием реакторной чистоты значение $h_{cc}$ определяют по ГОСТ Р 59115.4.

14.11 Допускается проводить расчет на длительную статическую прочность с использованием методик, приведенных в ГОСТ Р 59115.10.

## 15 Расчет на внешние динамические воздействия

### 15.1 Расчет на сейсмические воздействия

15.1.1 Расчет на прочность при сейсмических воздействиях (сейсмопрочность) следует проводить в соответствии с положениями федеральных норм и правил, устанавливающих требования к обеспечению сейсмостойкости атомных станций.

15.1.2 Сейсмические нагрузки рассматриваются для всех уровней землетрясений, предусмотренных федеральными нормами и правилами, устанавливающими требования к обеспечению сейсмостойкости атомных станций. Исходными данными для расчета являются: наборы поэтажных акселерограмм, поэтажных спектров ответа (или обобщенный спектр ответа) для узлов опирания компонента, определенных для трех взаимно перпендикулярных направлений — вертикального и двух горизонтальных, а также механические эксплуатационные нагрузки.

15.1.3 Расчет компонентов оборудования и трубопроводов следует производить на сочетания эксплуатационных и сейсмических нагрузок, предусмотренных федеральными нормами и правилами, устанавливающими требования к обеспечению сейсмостойкости атомных станций.

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.

15.1.4 Расчет проводят для АЭУ с сейсмичностью площадки 5 баллов и выше. Необходимость расчетов оборудования и трубопроводов для АЭУ с сейсмичностью площадки 4 балла следует определять проектной (конструкторской) организацией.

15.1.5 Сейсмические нагрузки на оборудование и трубопроводы должны быть заданы с учетом одновременного сейсмического воздействия по трем пространственным направлениям. Угловые составляющие сейсмического воздействия допускается не учитывать.

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

15.1.7 Динамическую реакцию компонента следует анализировать с учетом связей с другими компонентами и составными частями конструкции, с которыми он взаимодействует, и влияния этих связей на колебания компонента.

15.1.8 При определении динамической реакции компонента следует учитывать следующие факторы: масса конструкции, в том числе теплоизоляции, масса жидкости в трубах, присоединенная масса жидкости для оборудования, находящегося в жидкой среде, НДС (в том числе от внутреннего и наружного давления), влияющее на жесткость конструкции.

15.1.9 Расчет на сейсмопрочность протяженных компонентов оборудования и трубопроводов АЭУ следует выполнять с учетом возможного различия сейсмического воздействия в точках их опирания. Дополнительные критерии прочности при сейсмическом смещении опор приведены в ГОСТ Р 59115.15.

15.1.10 Сейсмопрочность компонентов, частично наполненных жидкостью (например, резервуаров) следует обосновывать с учетом гидродинамических воздействий при сейсмических колебаниях жидкости.

15.1.11 Значения относительного вязкого демпфирования $\xi$, при отсутствии специального обоснования, для металлических компонентов следует принимать равным 2,0 %. При расчете сейсмических колебаний жидкости со свободной поверхностью $\xi$ следует принимать равным 0,5 %.

15.1.12 Расчет следует выполнять линейно-спектральным методом (по спектрам ответа) и (или) методом динамического анализа (по зависимости сейсмического воздействия от времени — например по акселерограммам).

15.1.13 Ускорение нулевого периода (УНП) для спектра ответа следует определять как значение спектрального ускорения, при котором кривая спектра ответа приближается к горизонтальной прямой, продолжающейся до сколь угодно больших частот; УНП равно максимальному по времени абсолютному значению ускорения исходного сейсмического воздействия.

Частоту отсечки для спектра ответа следует определять как наименьшая частота, при которой максимальное значение отклика колебательной системы с одной степенью свободы на исходное сейсмическое воздействие совпадает по времени и направлению с максимальным значением воздействия.

Допускается определять частоту отсечки для спектра ответа как наибольшую частоту, при которой значение спектрального ускорения равно 1,3 УНП.

В расчете следует использовать наибольшее из значений частоты отсечки, определенных для всех спектров ответа по всем направлениям.

При расчете линейно-спектральным методом или динамическим методом с использованием собственных форм и частот колебаний (модальный метод) следует определять все собственные формы конструкции, частоты которых не превышают частоту отсечки.

15.1.14 При расчете на внешние динамические воздействия следует учитывать высшие (не рассчитанные явно) формы колебаний.

15.1.15 Если первая собственная частота колебаний конструкции выше частоты отсечки спектра ответа, расчет на сейсмопрочность допускается выполнять статическим методом, принимая ускорение сейсмической нагрузки равным значению спектрального ускорения на первой собственной частоте конструкции.

15.1.16 Оценку сейсмопрочности оборудования и трубопроводов следует проводить по допускаемым напряжениям, по допускаемым перемещениям, по критериям циклической прочности, устойчивости и сопротивления разрушению.

15.1.17 Напряжения в компонентах оборудования и трубопроводов не должны превосходить допускаемых значений, приведенных в таблицах 15.1—15.4. Номинальные допускаемые напряжения $[\sigma]$ и $[\sigma]_w$ должны быть определены согласно 5.4 и 5.5 соответственно, по кратковременным механическим характеристикам материалов, в соответствии с температурой эксплуатации соответствующего компонента и с учетом эксплуатационных факторов.

Значение коэффициента формы $K$, используемого в таблице 15.1, следует принимать равным 1,5 для пластин и 1,3 для компонентов прочей геометрической формы.

Таблица 15.1 — Сочетания нагрузок и допускаемые напряжения для оборудования и трубопроводов за исключением болтов и шпилек

| Категория сейсмостойкости | Сочетания нагрузок | $(\sigma_s)_1$ | $(\sigma_s)_2$ |
|---|---|---|---|
| I | НУЭ + МРЗ | 1,4[σ] | 1,4$K$ [σ] |
| | ННУЭ + МРЗ | | |
| | УПА + МРЗ* | | |
| | УПА + ПЗ** | | |
| | НУЭ + ПЗ | 1,2[σ] | 1,2$K$ [σ] |
| | ННУЭ + ПЗ | | |
| II | НУЭ + ПЗ | 1,5[σ] | 1,5$K$ [σ] |
| | ННУЭ + ПЗ | | |

* Только для компонентов, обеспечивающих функционирование герметичного ограждения.

** Только для корпусов реакторов.

Примечание — Для трубопроводов, прошедших оценку статической прочности, допускается проверку прочности от сейсмических нагрузок по мембранным напряжениям $(\sigma_s)_1$ не проводить.

Таблица 15.2 — Значения допускаемых напряжений для болтов и шпилек

| Категория сейсмостойкости | Сочетания нагрузок | $(\sigma_s)_{mw}$ | $(\sigma_s)_{4w}$ |
|---|---|---|---|
| I | НУЭ + МРЗ | $1,4[\sigma]_w$ | $2,2[\sigma]_w$ |
| | ННУЭ + МРЗ | | |
| | УПА + МРЗ* | | |
| | УПА + ПЗ** | $1,4[\sigma]_w$ | $2,4[\sigma]_w$ |
| | 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 | | |
| * Только для компонентов, обеспечивающих функционирование герметичного ограждения.<br>** Только для корпусов реакторов. | | | |

Таблица 15.3 — Значения допускаемых напряжений смятия $(\sigma_s)_s$

| Категория сейсмостойкости | Сочетание нагрузок | Допускаемое напряжение |
|---|---|---|
| I | НУЭ + МРЗ | 2,7[σ] |
| | ННУЭ + МРЗ | |
| | УПА + ПЗ (МРЗ)* | |
| | НУЭ + ПЗ | 2,5[σ] |
| | ННУЭ + ПЗ | |
| II | НУЭ + ПЗ | 3,0[σ] |
| | ННУЭ + ПЗ | |
| * Сочетание нагрузок УПА + МРЗ рассматривается только для компонентов, обеспечивающих функционирование герметичного ограждения. | | |

Таблица 15.4 — Значения допускаемых напряжений среза $\tau_p$, $(\tau_s)_s$

| 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 + ПЗ (МРЗ)* | | |
| | НУЭ + ПЗ | $0,6[\sigma]_w$ | 0,6[σ] |
| | ННУЭ + ПЗ | | |
| II | НУЭ + ПЗ | $0,8[\sigma]_w$ | 0,8[σ] |
| | ННУЭ + ПЗ | | |
| * Сочетание нагрузок УПА + МРЗ рассматривается только для компонентов, обеспечивающих функционирование герметичного ограждения. | | | |

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

15.1.19 Расчет на устойчивость при сейсмических воздействиях следует проводить в соответствии с положениями раздела 9 с учетом совместного действия эксплуатационных и сейсмических нагрузок. Допускаемые напряжения сжатия следует определять по формулам:

$$[\sigma_c]_s = k\xi^*\sigma_{kr}, \text{ если } \xi^*\sigma_{kr} < R^T_{p0,2};$$
$$[\sigma_c]_s = kR^T_{p0,2}, \text{ если } \xi^*\sigma_{kr} \geq R^T_{p0,2}, \quad (15.1)$$

где $\xi^* = 0,25$;

$k$ следует принимать:

- 0,6 — для сочетаний эксплуатационных нагрузок с ПЗ;
- 0,7 — для сочетаний эксплуатационных нагрузок с МРЗ.

При сейсмических нагрузках, вызывающих общий изгиб и (или) сдвиг обечаек оборудования, расчет на устойчивость проводят только по критическому напряжению второго рода. Допускается применение методики, приведенной в Д.3 приложения Д.

15.1.20 Оценку устойчивости трубопроводов при сейсмическом воздействии допускается не проводить.

15.1.21 Расчет на циклическую прочность при сейсмических воздействиях следует проводить с использованием кратковременных механических характеристик материалов в соответствии с положениями раздела 10.

Допускается проводить расчет, используя максимальную амплитуду напряжений, определенную с учетом воздействий НУЭ + ПЗ. При этом число циклов нагружения следует принимать равным 50.

Расчет на циклическую прочность при сейсмических воздействиях допускается не проводить, если суммарное повреждение от эксплуатационных нагрузок, действующих на конструкцию без учета сейсмических воздействий, не превышает 0,8.

15.1.22 Расчет на сопротивление разрушению при сейсмическом воздействии следует проводить в соответствии с положениями раздела 12. Принимают коэффициенты запаса, соответствующие НУЭ и ННУЭ.

15.1.23 Допускаемые значения перемещений компонентов конструкции при сейсмическом воздействии задаются проектной (конструкторской) организацией в зависимости от условий эксплуатации данных компонентов.

15.1.24 Для расчетной оценки собственных частот колебаний типовых компонентов и определения сейсмического отклика допускается применять методы, представленные в приложении Д.

### 15.2 Расчет на внешние динамические воздействия техногенного происхождения

15.2.1 Расчет компонента на внешние динамические воздействия техногенного происхождения (воздушная ударная волна, падение летательного аппарата) проводят при совместном действии эксплуатационных и динамических нагрузок. Рассматриваются динамические нагрузки на компонент, возникающие при действии ударной волны или при падении летательного аппарата на строительные конструкции. Общие положения и методы расчета принимают в соответствии с положениями 15.1. При выборе расчетных сочетаний и допускаемых напряжений динамические нагрузки рассматриваются как соответствующие МРЗ.

15.2.2 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.

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

## 16 Расчет на вибропрочность

16.1 Расчет на вибропрочность проводят для компонентов, подвергающихся вибрационному нагружению.

16.2 Расчет на вибропрочность содержит:

- определение спектра собственных частот колебаний и проверку условий их отстройки от детерминированных частот возбуждения;
- проверку на отсутствие виброударных взаимодействий компонентов с целью исключения повышенного износа;

- расчет на циклическую прочность с учетом вибронапряжений в соответствии с 10.17—10.24.

16.3 Расчет собственных частот колебаний компонентов конструкции и возникающих в них вибронапряжений рекомендуется определять численно, например с помощью МКЭ. Допускается использование экспериментальных методов определения собственных частот колебаний компонентов и возникающих в них вибронапряжений.

Для определения собственных частот колебаний и вибронапряженности типовых компонентов допускается применять методы, представленные в приложении Е.

16.4 Отстройка от детерминированных частот возбуждения обеспечена, если выполнены следующие условия:

- для первых трех собственных форм колебаний компонентов в каждой плоскости

$$\Omega_i \geq 1{,}3\omega \text{ или } \Omega_i \leq 0{,}7\omega,\ i = 1, 2, 3, \tag{16.1}$$

где $\Omega_i$ — низшая ($i$ = 1, 2, 3) собственная круговая частота колебаний компонента, $с^{-1}$;

$\omega$ — круговая частота возбуждения, $с^{-1}$;

- для более высоких форм колебаний при наличии соответствующих их частотам возбудителей вибраций

$$\Omega_i \geq 1{,}1\omega \text{ или } \Omega_i \leq 0{,}9\omega,\ i = 4, 5, \ldots . \tag{16.2}$$

В случае невыполнения условий (16.1) и (16.2) необходимо показать, что уровни вибраций (вибронапряжений) компонентов находятся в допустимых пределах, то есть подтвердить вибропрочность расчетным или экспериментальным путем.

Для трубок теплообменных аппаратов расчет на циклическую прочность с учетом вибронапряжений следует проводить независимо от выполнения условий отстройки (16.1) и (16.2).

16.5 Для исключения возможных соударений однотипных компонентов, объединенных в группы (пакеты), должно быть выполнено условие

$$A < \frac{t - d}{2}, \tag{16.3}$$

где $A$ — максимальная амплитуда виброперемещения компонента;

$d$ — размер компонента в поперечном сечении;

$t$ — шаг компонентов с наибольшим размером $d$ в поперечном сечении.

Для произвольных компонентов, расположенных с зазором $\Delta$, данное условие формулируется в виде

$$|A_1| + |A_2| < \Delta, \tag{16.4}$$

где $A_1$ и $A_2$ — амплитуды виброперемещений соответствующих компонентов.

Для колебательных процессов, имеющих случайный характер, значения амплитуд $A$, $A_1$ и $A_2$ должны быть установлены с учетом их рассеивания с заданной вероятностью; например для нормального закона распределения при вероятности 0,997 значения амплитуд должны быть приняты равными

$$\overline{A} + 3\varphi, \tag{16.5}$$

где $\varphi$ — среднеквадратическое отклонение от среднего значения $\overline{A}$.

16.6 Расчет на циклическую прочность с учетом вибронапряжений проводят в соответствии с разделом 10.

При расчете повреждения $a_2$ в случае узкополосного спектра (т. е. спектра, амплитуды вибронапряжений которого в расчетах можно отнести к одной частоте) используют максимальную среднеквадратическую амплитуду высокочастотных местных напряжений и соответствующую ей частоту.

При широкополосном спектре значение $a_2$ определяют как сумму повреждений для тех амплитуд местных напряжений и соответствующих им частот, которые вызывают повреждения более 10 % максимального повреждения на одном из сочетаний амплитуды-частоты из всего спектра. Асимметрию цикла определяют с учетом среднего напряжения, принимаемого равным постоянному местному напряжению от механических нагрузок с учетом остаточных напряжений растяжения.

Повреждение $a_3^*$ определяют с учетом трех максимальных амплитуд высокочастотных напряжений без учета концентрации $\langle\sigma_a\rangle_1$, $\langle\sigma_a\rangle_2$, $\langle\sigma_a\rangle_3$ и соответствующих им частот $f_1$, $f_2$, $f_3$ для каждого типа цикла переменного напряжения на переходных режимах. Для низкочастотного цикла $i$-го типа по формуле (10.20) должны определяться значения $æ_{1i}$, $æ_{2i}$, $æ_{3i}$, а при определении ($a_3$) коэффициент $æ_i$ следует вычислять по формуле

$$æ_i = \sqrt{(æ_1)_i^2 + (æ_2)_i^2 + (æ_3)_i^2}. \quad (16.6)$$

Долю повреждений $a_3^{**}$ определяют с учетом максимальной амплитуды высокочастотного напряжения при прохождении резонанса. Число циклов определяют с учетом эксплуатации в условиях резонанса. Асимметрию цикла высокочастотного нагружения определяют местным напряжением от механических и температурных нагрузок при эксплуатации с учетом остаточных напряжений растяжения для середины интервала времени, соответствующего резонансу.

## Приложение А
## (рекомендуемое)

## Упрощенная методика расчета амплитуд циклов на основе истории изменения приведенных напряжений без учета концентрации

А.1 Допускается вычислять амплитуды циклов местного условного упругого напряжения ($\sigma_{aF}$) на основе истории изменения приведенных напряжений без учета концентрации ($\sigma$), определенной по теории Мизеса согласно 6.4.3.3. При использовании данной методики физически возможная последовательность нагружения не требуется. Данная методика применима при условии

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

где $\Delta(\sigma)_k$ — размах $k$-го замкнутого цикла приведенного напряжения ($\sigma$), сформированного согласно положениям 6.5.7;

$T$ — максимальная температура цикла.

А.2 Размахи приведенных напряжений с учетом концентрации $\Delta(\sigma_L)$ следует вычислять в предположении упругого поведения материала по формуле

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

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

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

А.3 Расчетные амплитуды местного условного упругого напряжения ($\sigma_{aF}$) следует вычислять по формуле

$$(\sigma_{aF})_k = \begin{cases} 0,5 \cdot \Delta(\sigma_L)_k, \text{ если } \Delta(\sigma_L)_k \le 2R^T_{p0,2} \\ \dfrac{[\Delta(\sigma_L)_k]^2}{4R^T_{p0,2}}, \text{ если } \Delta(\sigma_L)_k > 2R^T_{p0,2} \end{cases},\ k = 1, 2, ..., n, \tag{А.3}$$

где $T$ — максимальная температура цикла.

А.4 Расчет на циклическую прочность по амплитудам местного условного упругого напряжения, определенным по формуле (А.3), следует проводить по уравнениям кривых усталости с учетом максимального влияния асимметрии цикла согласно 10.12.

## Приложение Б
## (рекомендуемое)

## Формирование расчетных циклов напряжений

Б.1 Формирование расчетных циклов приведенных напряжений, определенных с применением теории Треска выполняется на основе полной истории нагружения за период от $t_1$ до $t_m$. Формирование циклов следует проводить таким образом, чтобы каждый раз при выделении очередного полуцикла из участков трех графиков изменения напряжений $(\sigma_F)_{ij}$, $(\sigma_F)_{jk}$, $(\sigma_F)_{ik}$ была получена наибольшая возможная амплитуда местного приведенного напряжения.

Для формирования расчетных циклов (полуциклов) напряжений каждый из графиков $(\sigma_F)_{ij}$, $(\sigma_F)_{jk}$, $(\sigma_F)_{ik}$ во временном диапазоне от $t_1$ до $t_m$ должен быть замкнут, то есть в нем должны совпадать начальное (в момент времени $t_1$) и конечное (в момент времени $t_m$) значения напряжений. В противном случае графики следует искусственно замкнуть, введя в них соответствующие фиктивные участки изменения напряжений в интервале времени от $t_m$ до некоторого фиктивного значения $t_ф$.

Эти фиктивные участки истории нагружения вносят дополнительное усталостное повреждение, что делает последующую оценку циклической прочности консервативной. При необходимости результат расчета может быть уточнен путем вычитания величины повреждения от фиктивных участков из суммарного усталостного повреждения.

В процессе формирования расчетных циклов (полуциклов) предполагается, что каждый из трех графиков многократно освещается потоком света, лучи которого направлены вдоль горизонтальной оси времени. Освещения являются парными; при первом освещении из каждой пары рассматриваются только возрастающие, а при втором — только убывающие участки, соединяющие соседние локальные максимумы и минимумы. Считается, что свет не проходит сквозь рассматриваемые участки графиков (возрастающие либо убывающие), вследствие чего на каждом графике при каждом освещении образуется вертикальное пятно тени.

Б.2 Порядок формирования расчетных циклов приведен в Б.2.1—Б.2.5.

Б.2.1 Выполняется первый этап основного парного освещения: на всех трех графиках освещаются возрастающие участки. Образующиеся на трех графиках пятна тени сравниваются по величине. Если при одном освещении на каком-либо графике образуется два или больше пятен, то в сравнении каждое пятно участвует независимо. Из всех пятен тени, образующихся на трех графиках, выбирают пятно максимального размера. Если несколько пятен имеют одинаковый размер, то выбирают то, у которого верхняя граница расположена выше.

Б.2.2 По выбранному пятну тени формируется расчетный возрастающий полуцикл напряжений следующим образом: его минимальное и максимальное значения принимают равными соответственно нижней и верхней границам выбранного пятна.

Б.2.3 На графике, на котором был сформирован этот возрастающий полуцикл, выполняется второй этап основного парного освещения: освещаются убывающие участки. Образующееся при этом пятно тени совпадает с пятном от возрастающих участков и на тех же принципах формирует расчетный убывающий полуцикл.

Сформированные таким образом возрастающий и убывающий расчетные полуциклы имеют одинаковые минимальные и максимальные значения. Такие полуциклы называются парными расчетными полуциклами.

Парные расчетные полуциклы могут быть объединены в один расчетный цикл.

Б.2.4 После того, как выполнено основное парное освещение и сформированы парные расчетные полуциклы напряжений, графики $(\sigma_F)_{ij}$, $(\sigma_F)_{jk}$, $(\sigma_F)_{ik}$ должны быть для дальнейшего анализа преобразованы следующим образом:

- на графике, на котором были сформированы очередные парные расчетные полуциклы, удаляются те участки, тень от которых вошла в выбранные пятна тени для этих полуциклов;

- на двух остальных графиках части, расположенные в тех же интервалах времени, что и удаленные участки первого графика, подвергаются дополнительному парному освещению. При этом остальные части этих двух графиков игнорируются. На каждом из двух графиков сравниваются пятна тени от возрастающих и убывающих участков. Если эти пятна совпадают полностью или какой-либо своей областью, то части возрастающих и убывающих участков рассматриваемого графика, создавшие эту общую область тени, удаляются. Если совпадающих областей тени образуется несколько, то удаляются только те освещенные участки, размер области тени от которых больше, а при равенстве — у которых область тени размещена выше.

Б.2.5 Процесс формирования циклов (полуциклов) повторяется по Б.2.1—Б.2.4 до тех пор, пока не окажутся удаленными все участки рассматриваемых графиков.

Каждый из сформированных расчетных циклов (полуциклов) напряжений должен для выполнения последующего расчета на циклическую прочность сопровождаться информацией об условиях эксплуатации (о температуре, параметрах среды и т. п.), соответствующих всем тем частям графиков напряжений, из которых он был составлен.

Б.3 Формирование расчетных циклов (полуциклов) приведенных напряжений, определенных с применением теории Мизеса, следует проводить аналогично изложенному в 6.6.4 алгоритму для напряжений, определенных по теории Треска с тем отличием, что вместо трех графиков изменения $(\sigma_F)$ рассматривается один.

Б.4 Порядок формирования расчетных циклов напряжений приведен ниже для истории нагружения, определяемой графиками изменения условных упругих приведенных напряжений $(\sigma_F)_{ij}$, $(\sigma_F)_{ik}$, $(\sigma_F)_{jk}$, показанными на рисунке Б.1.

Поскольку исходные графики незамкнуты (что может являться следствием одностороннего накопления деформаций в условиях пластичности), то они искусственно замыкаются введением соответствующих фиктивных участков на интервале времени от $t_m$ до $t_ф$ (на рисунках Б.1—Б.3 эти участки показаны пунктиром).

Для выделения замкнутых циклов используется аналогия с «освещением» истории нагружения светом вдоль оси *x*.

При первом основном освещении возрастающие участки графиков образуют пятна тени, показанные на рисунке Б.2. Из трех графиков историй нагружения выбирают пятно с максимальным размахом напряжений: оно возникает на графике для $(\sigma_F)_{jk}$ и имеет размах 600 МПа. Освещение убывающих участков этого же графика дает такое же пятно тени. По этому пятну из двух парных расчетных полуциклов формируется 1-й расчетный цикл, имеющий минимальное напряжение минус 300 МПа и максимальное — плюс 300 МПа.

Тонким пунктиром на рисунке Б.2 показано дополнительное парное освещение участков (местами вспомогательное освещение совпадает с основным).

На рисунке Б.3 показаны оставшиеся участки графиков после того, как из графика для $(\sigma_F)_{jk}$ были удалены части, освещенные основным парным освещением, а из двух других графиков удалены части, освещенные дополнительным парным освещением и соответствующие по времени удаленным частям графика $(\sigma_F)_{jk}$.

При втором основном парном освещении этих оставшихся возрастающих участков максимальное пятно возникает на графике для $(\sigma_F)_{ij}$ и имеет размах 500 МПа. Такое же пятно возникает при освещении убывающих участков этого графика и определяет 2-й расчетный цикл с напряжениями: минимальным — 0 МПа и максимальным — плюс 500 МПа.

Поскольку после выполнения дополнительного освещения и удаления освещенных участков никаких других участков на графиках не остается, то процесс формирования расчетных циклов на этом завершается.

При необходимости для снижения консерватизма может быть учтено введенное фиктивное нагружение, замыкающее исходные графики изменения напряжений. Для данного примера максимальный размах имеет фиктивный полуцикл, введенный на графике $(\sigma_F)_{jk}$ (см. рисунок Б.1). Поэтому расчетный фиктивный полуцикл имеет параметры: минимальное напряжение — минус 200 МПа; максимальное напряжение — 0 МПа.

Для графиков изменения условных упругих приведенных напряжений $(\sigma_F)_{ij}$, $(\sigma_F)_{ik}$, $(\sigma_F)_{jk}$, показанных на рисунке Б.1, сформированы следующие расчетные циклы:

- 1-й расчетный цикл: минимальное напряжение — минус 300 МПа; максимальное напряжение — плюс 300 МПа;
- 2-й расчетный цикл: минимальное напряжение — 0 МПа; максимальное напряжение — плюс 500 МПа;
- фиктивный расчетный полуцикл (используется при необходимости): минимальное напряжение — минус 200 МПа; максимальное напряжение — 0 МПа.

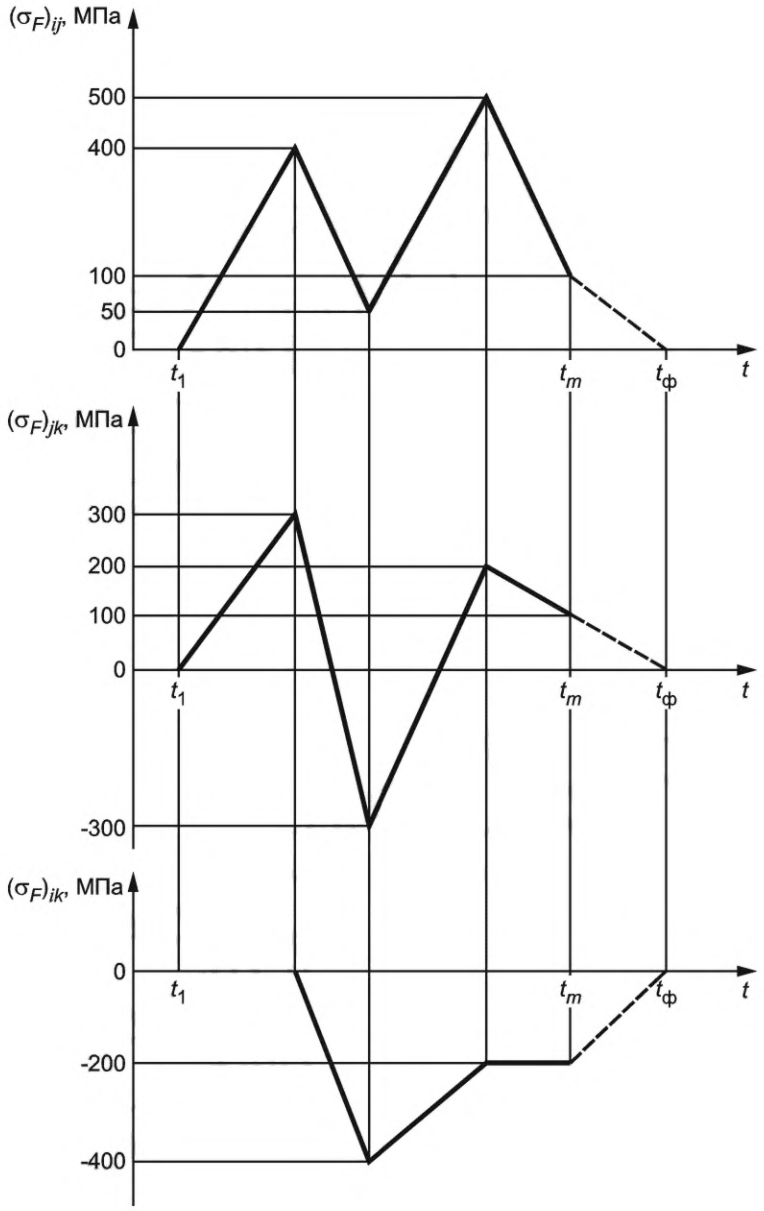



Рисунок Б.1 — Пример анализа полной истории нагружения (исходные графики изменения напряжений)

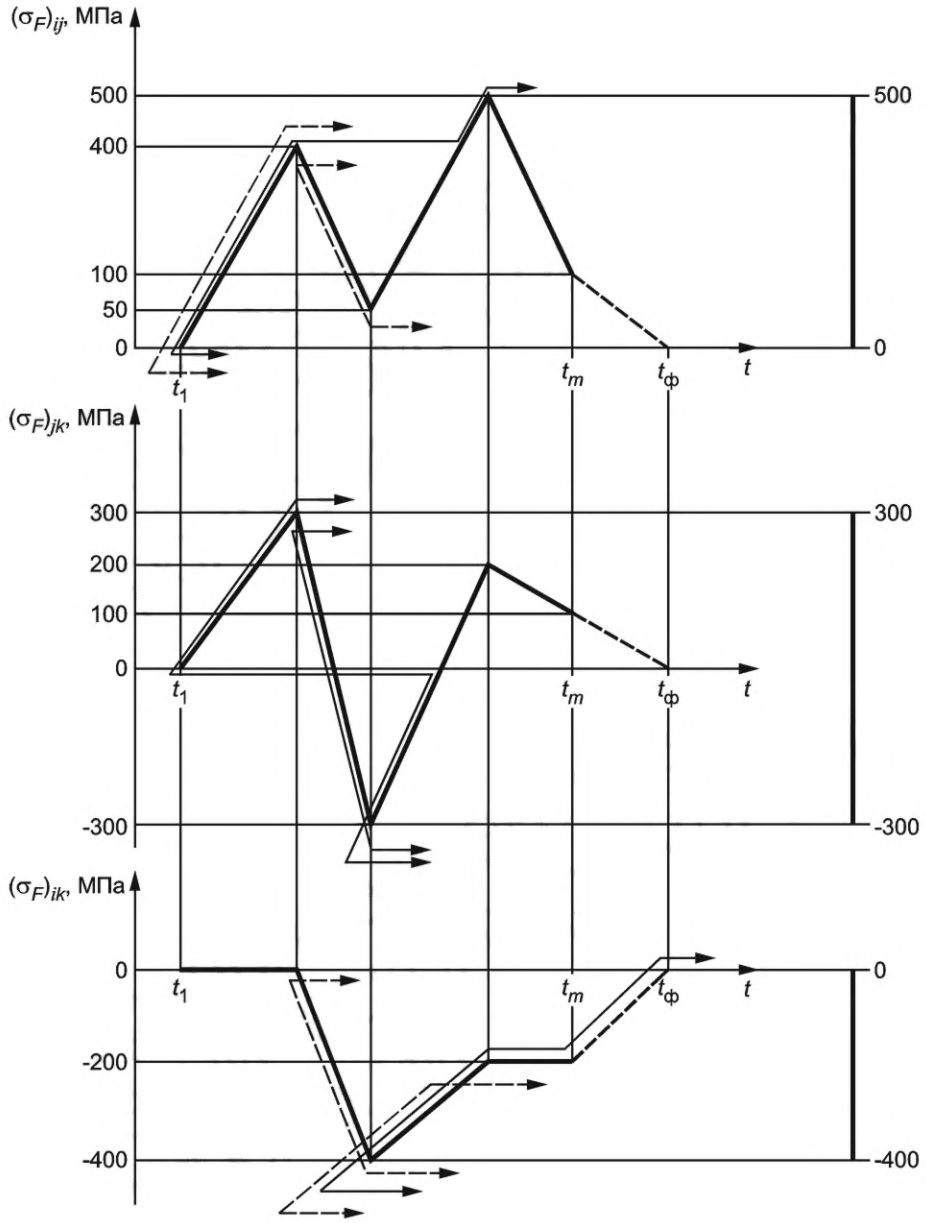



Рисунок Б.2 — Пример анализа полной истории нагружения (формирование 1-го расчетного цикла напряжений)

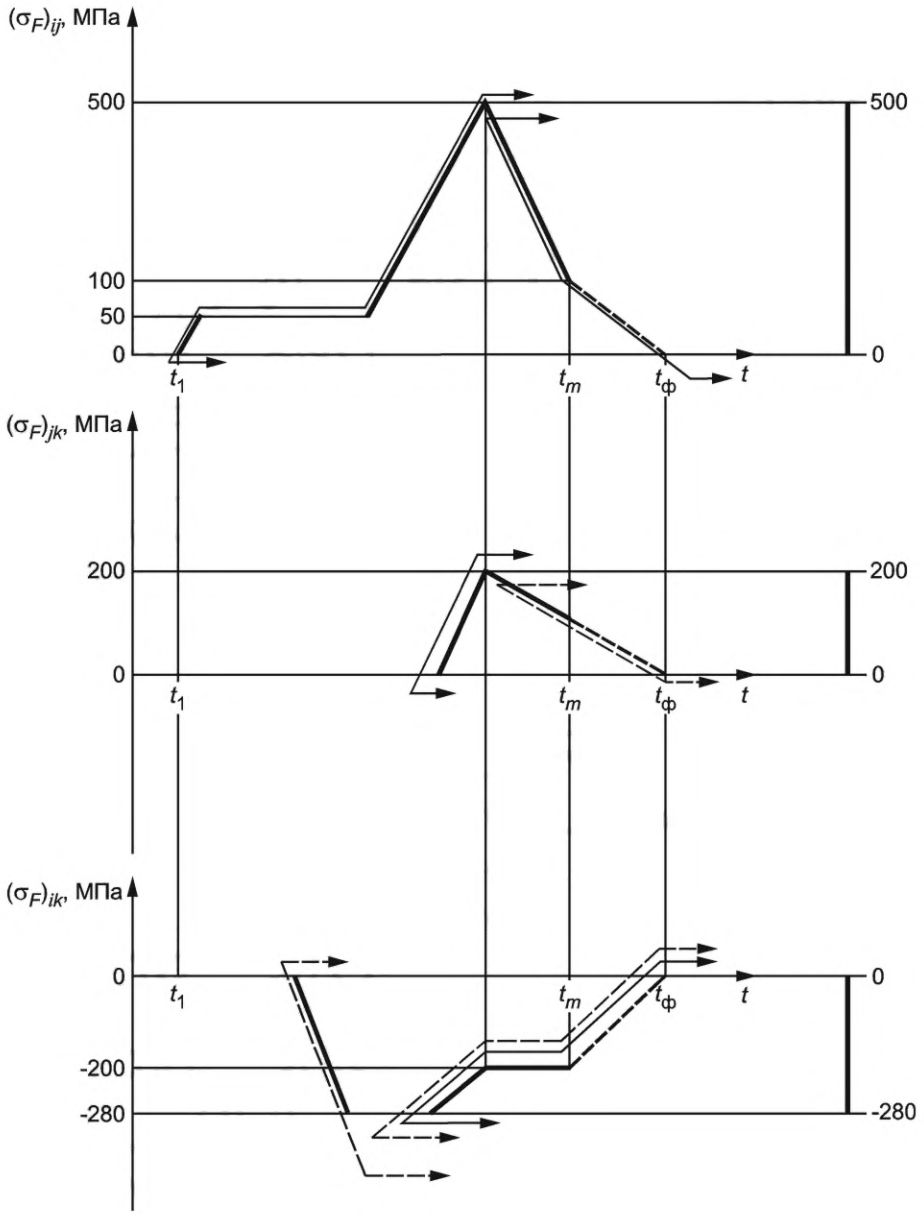



Рисунок Б.3 — Пример анализа полной истории нагружения (формирование 2-го расчетного цикла напряжений)

**Приложение В**
**(рекомендуемое)**

## Определение допускаемого числа циклов с учетом влияния водной среды

В.1 Рекомендуемая методика определения допускаемых амплитуд напряжений или допускаемых чисел циклов нагружения в водной среде основана на использовании коэффициентов, отражающих снижение допускаемого числа циклов при нагружении контролируемой деформацией в реакторной воде при симметричном цикле по сравнению с аналогичным нагружением (такими же амплитудами) на воздухе при температуре 20 °С.

Определение допускаемого числа циклов по заданной амплитуде напряжений или допускаемой амплитуды напряжений для заданного числа циклов следует проводить по уравнениям, связывающим допускаемую амплитуду условных упругих напряжений с допускаемым числом циклов и учитывающим асимметрию цикла напряжений и снижение числа циклов в водной среде.

В.2 Методика применима для компонентов из углеродистых и легированных хромомолибденовых и хромомолибденванадиевых сталей, а также сталей аустенитного класса, работающих при температурах до 350 °С в контакте с водной средой легководных реакторов.

В.3 Влияние водной среды на циклическую прочность должно учитываться при температуре водной среды $T$, превышающей 150 °С.

В.4 Допускаемая амплитуда условного упругого напряжения $[\sigma_{aF}]$ при числе циклов $N_0$ или допускаемое число циклов $[N_0]$ при амплитуде $(\sigma_{aF})$ и максимальном напряжении цикла $[(\sigma_{tr})_{max}]$ для сталей при $[N_0] \le 10^{12}$ с учетом влияния водной среды равны наименьшему значению из двух, определяемых по формулам (В.1) и (В.2):

$$[\sigma_{aF}] = \frac{E^T e_c^{20}}{\left(4 n_N F_{pn} [N_0]\right)^{0,5}} + \frac{R_{cF}^T - (\sigma_{tr})_{max} \cdot i_\sigma}{\left(4 n_N [N_0]\right)^{m_{eF}} - i_\sigma}, \quad (В.1)$$

где следует принять:

$$(\sigma_{tr})_{max} = R_{p0,2}^{T_{min}} \text{ при } (\sigma_{tr})_{max} \ge R_{p0,2}^{T_{min}};$$

$$i_\sigma = 0 \text{ при } (\sigma_{aF}) \ge (\sigma_{tr})_{max};$$

$$i_\sigma = 1 \text{ при } (\sigma_{aF}) < (\sigma_{tr})_{max};$$

$$[\sigma_{aF}] = \frac{E^T e_c^{20}}{n_\sigma \left(4 F_{pn} [N_0]\right)^{0,5}} + \frac{R_{cF}^T - n_\sigma (\sigma_{tr})_{max} \cdot i_\sigma}{n_\sigma \left(\left(4 [N_0]\right)^{m_{eF}} - i_\sigma\right)}, \quad (В.2)$$

где следует принять:

$$n_\sigma (\sigma_{tr})_{max} = R_{p0,2}^{T_{min}} \text{ при } n_\sigma (\sigma_{tr})_{max} \ge R_{p0,2}^{T_{min}};$$

$$i_\sigma = 0 \text{ при } (\sigma_{aF}) \ge (\sigma_{tr})_{max};$$

$$i_\sigma = 1 \text{ при } (\sigma_{aF}) < (\sigma_{tr})_{max}.$$

В формулах (В.1) и (В.2):

$n_\sigma = 2$, $n_N = 10$ — коэффициенты запаса прочности по напряжениям и по числу циклов соответственно;

$e_c^{20}$ — характеристика пластичности, определяемая согласно 10.8 как значение $e^T{}_c$ при температуре 20 °С. При $Z^{20} \le 50$ % в расчете следует принимать $Z_c^{20} = Z^{20}$. При $Z^{20} > 50$ % — $Z_c{}^{20} = 50$ %;

$F_{pn}$ — коэффициент снижения числа циклов в водной среде, определяемый по В.6;

$R_{cF}^T = R_m^{20}(1 + 0{,}014 Z_F)$ — характеристика прочности;

$m_{ef} = 0{,}132 \lg[2{,}5(1 + 0{,}014 Z_F)]$;

$$Z_F = 100 - \frac{100}{\exp\left(2 e_c^{20} / \sqrt{F_{pn}}\right)}.$$

В.5 Допускается использование в расчете значения $Z^{20}$, полученного при испытаниях на статическое растяжение. При этом следует принимать $Z_F = Z^{20} F_{pn}^{-0,5}$.

В.6 Максимальное напряжение цикла $(\sigma_{tr})_{max}$ следует вычислять по следующим правилам:

- при $(\sigma_F)_{max} \le R_{p0,2}^{T_{min}}$ и $2(\sigma_{aF}) < R_{p0,2}^{T_{min}} + R_{p0,2}^{T_{max}}$ следует принимать $(\sigma_{tr})_{max} = (\sigma_F)_{max}$;

- при $(\sigma_F)_{max} > R_{p0,2}^{T_{min}}$ и $2(\sigma_{aF}) < R_{p0,2}^{T_{min}} + R_{p0,2}^{T_{max}}$ $(\sigma_{tr})_{max}$ должно определяться из упрощенного упругопластического расчета согласно 6.5.2 или полного упругопластического расчета согласно 6.5.3;

- при $2(\sigma_{aF}) \ge R_{p0,2}^{T_{min}} + R_{p0,2}^{T_{max}}$ следует принимать $(\sigma_{tr})_{max} = R_{p0,2}^{T_{min}}$.

В.7 При расчете должны использоваться минимальные значения кратковременных механических характеристик материала, с учетом влияния облучения.

В.8 Коэффициент $F_{pn}$ следует вычислять в зависимости от температуры водной среды, принимаемой равной температуре металла в цикле $T$, °С, содержания серы в металле $S$, %, концентрации кислорода в водной среде, $KO$, мг/кг, скорости деформации $\dot{\varepsilon}$, % $с^{-1}$ в полуцикле приведенного напряжения по формулам:

- для углеродистых сталей

$$F_{pn} = \exp(0{,}632 - 0{,}101 \cdot S^* \cdot T^* \cdot O^* \cdot \varepsilon^*); \quad (В.3)$$

- для легированных хромомолибденовых и хромомолибденванадиевых сталей

$$F_{pn} = \exp(0{,}702 - 0{,}101 \cdot S^* \cdot T^* \cdot O^* \cdot \varepsilon^*), \quad (В.4)$$

где $S^* = 0{,}015$ при $KO > 1{,}0$ мг/кг;

$S^* = S$, % при $KO \le 1{,}0$ мг/кг и $0 < S \le 0{,}015$ %;

$S^* = 0{,}015$ при $KO < 1{,}0$ мг/кг и $S > 0{,}015$ %;

$T^* = T - 150$, °С;

$O^* = 0$ при $KO \le 0{,}04$ мг/кг;

$O^* = \ln\dfrac{KO}{0{,}04}$ при $0{,}04 < KO \le 0{,}5$ мг/кг;

$O^* = \ln 12{,}5$ при $KO > 0{,}5$ мг/кг;

$\varepsilon^* = 0$ при $\dot{\varepsilon} \ge 1$ % $с^{-1}$;

$\varepsilon^* = \ln \dot{\varepsilon}$ при $0{,}001 < \dot{\varepsilon} < 1$ % $с^{-1}$;

$\varepsilon^* = \ln 0{,}001$ при $\dot{\varepsilon} \le 0{,}001$ % $с^{-1}$;

- для сталей аустенитного класса

$$F_{pn} = \exp(0{,}734 - T^* \cdot O^* \cdot \varepsilon^*), \quad (В.5)$$

где $T^* = \dfrac{T - 150}{175}$ при $T < 325$ °С;

$T^* = 1$ при $T \ge 325$ °С;

$O^* = 0{,}281$ при всех значениях $KO$;

$\varepsilon^* = 0$ при $\dot{\varepsilon} \ge 0{,}4$ % $с^{-1}$;

$\varepsilon^* = \ln\left(\dfrac{\dot{\varepsilon}}{0{,}4}\right)$ при $4 \cdot 10^{-4} < \dot{\varepsilon} < 0{,}4$ % $с^{-1}$;

$\varepsilon^* = \ln 0{,}001$ при $\dot{\varepsilon} \le 4 \cdot 10^{-4}$ % $с^{-1}$.

Содержание серы $S$ следует принимать по документам по стандартизации.

Температуру $T$ и скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ при определении $F_{pn}$ следует принимать для расчетных полуциклов, определяемых как интервалы изменения приведенного напряжения между ближайшими во времени локальными экстремумами.

Температуру $T$ следует принимать равной максимальному значению температуры за полуцикл.

Концентрацию кислорода $KO$ следует принимать равной ее максимальному значению за полуцикл.

Скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ следует принимать равной абсолютному значению среднеинтегральной скорости деформации за длительность полуцикла. Время выдержки при постоянных напряжениях следует исключать из общей длительности полуцикла.

Допускается определять консервативное значение $F_{pn}$, принимая $\dot{\varepsilon}$ равной минимальному значению скорости деформации за полуцикл возрастания напряжения.

В.9 При расчете $[\sigma_{aF}]$ или $[N_0]$ с учетом максимального влияния асимметрии цикла следует принимать в формуле (В.1) $i_\sigma = 1$, $(\sigma_{tr})_{\max} = R_{p0,2}^{T_{\min}}$ и в формуле (В.2) $i_\sigma = 1$, $n_\sigma(\sigma_{tr})_{\max} = R_{p0,2}^{T_{\min}}$. Минимальную температуру в цикле $T_{\min}$ допускается принимать равной 20 °С.

В.10 Допускаемое число циклов $[N_0]$ с учетом влияния водной среды допускается консервативно вычислять как

$$[N_0] = \frac{[N_0]^*}{F_{pn}}, \quad (В.6)$$

где $[N_0]^*$ — допускаемое число циклов на воздухе, определенное в соответствии с 10.8 (10.12 в случае расчета при наибольшем влиянии асимметрии цикла) при амплитуде напряжения $(\sigma_{aF})$.

Значение $F_{pn}$ следует определять при минимальном значении скорости деформации и максимальном значении температуры за расчетный цикл. Формирование расчетных циклов следует выполнять на основе принципа наибольшего размаха.

Амплитуды $(\sigma_{aF})$ рассчитывают согласно требованиям 6.6, а усталостное повреждение определяют по формуле (10.15).

В.11 Допускается определять $[N_0]$ с учетом влияния водной среды по 10.8 или 10.12 для значения амплитуды напряжения $(\sigma_{aF})_к$ для основного металла и $(\sigma_{aF})_{ks}$ для сварного соединения, определяемых по формулам:

$$(\sigma_{aF})_к = \frac{(\sigma_{aF})}{\overline{\varphi}_к};$$

$$(\sigma_{aF})_{ks} = \frac{(\sigma_{aF})}{\overline{\varphi}_{ks}}, \qquad (В.7)$$

где $(\sigma_{aF})$ — амплитуда напряжения на воздухе;

$\overline{\varphi}_к$, $\overline{\varphi}_{ks}$ — коэффициенты коррозионного снижения циклической прочности основного металла и сварного соединения соответственно, определяемые экспериментально в соответствии с ГОСТ Р 59115.5.

В.12 Допускаемая амплитуда условного упругого напряжения для сварного соединения равна

$$[\sigma_{aF}]_s = \min\{\varphi_s [\sigma_{aF}]^*, [\sigma_{aF}]\}, \qquad (В.8)$$

где $[\sigma_{aF}]^*$ — допускаемая амплитуда напряжения на воздухе, определенная в соответствии с 10.8 (10.12 в случае расчета при наибольшем влиянии асимметрии цикла);

$\varphi_s$ — коэффициент снижения циклической прочности, определяемый в соответствии с положениями 10.13;

$[\sigma_{aF}]$ — допускаемая амплитуда напряжений с учетом влияния водной среды, определенная согласно В.4.

Допускаемое число циклов $[N_0]_s$ для сварного соединения при заданной амплитуде напряжений $(\sigma_{aF})$ составляет

$$[N_0]_s = \min\{[N_0]^*, [N_0]\}, \qquad (В.9)$$

где $[N_0]^*$ — допускаемое число циклов на воздухе, определенное в соответствии с 10.8 для амплитуды напряжения $(\sigma_{aF})_s = (\sigma_{aF})/\varphi_s$;

$[N_0]$ — допускаемое число циклов с учетом влияния водной среды, определенное согласно В.4.

В.13 В случаях, когда при расчете принимают консервативные значения $F_{pn}$ (см. В.8), а также при расчете трубопроводов по ГОСТ Р 59115.15, амплитуды напряжений $(\sigma_{aF})$ вычисляют согласно требованиям 6.6. Допускаемые числа циклов принимают наименьшими из определенных на воздухе по 10.8 или 10.12 и в воде по В.4—В.8, а усталостное повреждение вычисляют по формуле (10.15). При этом влияние водной среды на составляющие повреждения $a_2$ и $a_3$ не учитывается.

В остальных случаях усталостное повреждение $a_{en}$ с учетом влияния водной среды следует вычислять по формуле

$$a_{en} = \frac{a}{\hat{a}} \hat{a}_{en}, \qquad (В.10)$$

где $a$ — накопленное усталостное повреждение на воздухе, определяемое в соответствии с положениями раздела 10. Расчетные циклы для определения $a$ должны формироваться по принципу наибольшего размаха;

$\hat{a}$ — усталостное повреждение на воздухе, рассчитанное по последовательным полуциклам изменения приведенного напряжения (без следования принципу наибольшего размаха);

$\hat{a}_{en}$ — усталостное повреждение с учетом влияния водной среды, рассчитанное по последовательным полуциклам изменения приведенного напряжения (без следования принципу наибольшего размаха).

Повреждения $\hat{a}$ и $\hat{a}_{en}$ следует вычислять по формулам:

$$\hat{a} = 0{,}5 \sum_{i=1}^{k} \frac{N_i}{[N_0]_i^*}; \qquad (В.11)$$

$$\hat{a}_{en} = 0{,}5 \sum_{i=1}^{k} \frac{N_i}{\min\left\{[N_0]_i^*,\ [N_0]_i\right\}}, \qquad (В.12)$$

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

$k$ — общее число типов полуциклов;

$[N_0]_i^*$ — допускаемое число циклов на воздухе с амплитудой $(\sigma_{aF})_i$, определяемое в соответствии с 10.8 (10.12 в случае расчета при наибольшем влиянии асимметрии цикла);

$[N_0]_i$ — допускаемое число циклов в водной среде с амплитудой $(\sigma_{aF})_i$, определяемое в соответствии с В.4—В.8.

Расчетные полуциклы для определения амплитуд напряжений $(\sigma_{aF})_i$ должны рассматриваться как интервалы изменения приведенного напряжения между ближайшими во времени локальными экстремумами.

Условие прочности проверяется по формуле (10.16), при этом следует принимать $a_1 = a_{en}$. Влияние водной среды на составляющие повреждения $a_2$ и $a_3$ не учитывается.

## Приложение Г
## (рекомендуемое)

## Расчет на длительную циклическую прочность

Г.1 Метод расчета на длительную циклическую прочность для изотермического и неизотермического нагружения применим в интервале температур от $T_t$ до 823 К (550 °С) для компонентов из сталей марок 12Х1МФ и 15Х1М1Ф, до 773 К (500 °С) для компонентов из легированных (в т. ч. кремнемарганцовистых, хромомолибденванадиевых и высокохромистых) сталей, до 873 К (600 °С) для компонентов из сталей аустенитного класса и железоникелевых сплавов и до 623 К (350 °С) для компонентов из сплавов циркония с 1 % и 2,5 % ниобия при числе циклов до $10^7$.

Г.2 При расчете на длительную циклическую прочность применяются положения 10.3, 10.4, 10.9, 10.17—10.22 и 10.24.

Г.3 Определение допускаемой амплитуды условных упругих напряжений или допускаемого числа циклов следует проводить по формулам (10.1), (10.9) или (10.13). При этом следует принять:

$$R_c^T = \frac{R_{mt}^T}{1-0,01Z_{ct}^T};\ e_c^T = e_{mt}^T;\ R_{-1}^T = R_{-1t}^T;\ m = 0,5;\ m_e = 0,132\lg\left[\frac{2,5}{1-0,01Z_{ct}^T}\right], \quad (Г.1)$$

где $R_{mt}^T$ — предел длительной прочности при максимальной температуре цикла нагружения за время $t$, равное части срока службы рассматриваемого компонента, отрабатываемого при температуре выше $T_t$;

$Z_{ct}^T = Z_t^T$, если $Z_t^T \le 50$ %. При $Z_t^T > 50$ % следует принимать $Z_{ct}^T = 50$ %;

$Z_t^T$ — относительное сужение поперечного сечения образца при длительном статическом разрушении при температуре $T$ за время $t$, %;

$R_{-1t}^T$ — предел выносливости при максимальной температуре цикла и $10^7$ циклов нагружения за время $t$, принимаемый равным $0,4R_{mt}^T$;

$e_{mt}^T$ — характеристика длительной пластичности, определяемая по формулам:

- для сталей аустенитного класса и железоникелевых сплавов, а также сталей марок 07Х12НМФБ, 10Х9МФБ, 05Х12Н2М:

$$e_{mt}^T = 1,15\lg\frac{1}{1-0,01Z_t^T},\ \text{если}\ Z_t^T < 30\ \%; \quad (Г.2)$$

$$e_{mt}^T = 1,15\cdot\max\left\{\lg\left(1+0,01A_t^T\right), \lg\frac{1}{1-0,3}\right\},\ \text{если}\ Z_t^T \ge 30\ \%; \quad (Г.3)$$

- для прочих конструкционных материалов, перечисленных в Г.1

$$e_{mt}^T = 1,15\lg(1 + 0,01A_t^T), \quad (Г.4)$$

где $A_t^T$ — относительное удлинение образца при длительном статическом разрушении при температуре $T$ за время $t$, %.

Значения $A_t^T$ и $Z_t^T$ принимают по таблицам средних значений условных пределов длительной пластичности ГОСТ Р 59115.4.

Значение $e_{mt}^T$ следует принимать минимальным в интервале рабочих температур и длительности нагружения до $t$.

Если экспериментально обосновано, что $R_{-1t}^T > 0,4R_{mt}^T$, то показатель степени $m_e$ следует вычислять по формуле

$$m_e = \frac{0,132\lg R_{mt}^T}{R_{-1t}^T\left(1-0,01Z_t^T\right)}. \quad (Г.5)$$

Значения $R_{mt}^T$ принимают по таблицам средних значений условных пределов длительной прочности ГОСТ Р 59115.4.

Допускается вычислять $m_e$ и $R_c^T$ по формулам:

$$m_e = \frac{0,132\lg R_{mt}^T}{R_{-1t}^T\left(1-0,01Z_{mt}^T\right)}; \quad (Г.6)$$

$$R_c^T = \frac{R_{mt}^T}{1-0,01Z_{mt}^T}. \quad (Г.7)$$

Г.4 Значения $e_{mt}^T$ в интервале температур от 623 К (350 °С) до 673 К (400 °С) для легированных сталей, от 723 К (450 °С) до 773 К (500 °С) для сталей аустенитного класса и от 523 К (250 °С) до 573 К (300 °С) для сплавов циркония должны вычисляться линейной интерполяцией по температуре между значением $e_c^T$, определенным при наименьшей температуре интервала, и значением $e_{mt}^T$, определенным при наибольшей температуре указанного интервала. Значения $e_c^T$ вычисляют согласно 10.8.

Г.5 Расчетные кривые усталости для легированных сталей, сталей аустенитного класса и железоникелевых сплавов, а также сплавов циркония и ниобия при симметричном цикле приведены в ГОСТ Р 59115.5.

Г.6 При расчете компонентов конструкций из однородных материалов или их зон, нагруженных только температурными напряжениями от радиальных перепадов температур (исключая зоны краевого эффекта и изменения средней температуры), например тепловых экранов, разделительных оболочек и т. п., разрушение которых не приводит к выходу рабочей среды за пределы удерживающих ее несущих компонентов, а также смешиванию натрия с водной средой, коэффициенты запаса при расчете этих компонентов или их зон на длительную циклическую прочность в соответствии с Г.3, Г.4 и формулам (10.1) или (10.9) принимают равными $n_\sigma = 1{,}5$ и $n_N = 5$.

Г.7 Если при расчете в соответствии с Г.2—Г.5 не удовлетворяются условия циклической прочности или не выполняются условия применимости расчетных кривых, допускается проводить уточненный расчет допускаемых чисел циклов или амплитуд по формулам (10.1) или (10.9) и положениям Г.3, Г.4 на основе анализа процесса изменения температур и напряжений в рассматриваемой зоне компонента в соответствии с Г.7.1—Г.7.4.

Г.7.1 Если нагружение при эксплуатации производится при различных температурах, то значения $R^T_{mt}$ и $e^T_{mt}$ могут быть определены с учетом нестационарности теплового режима. Значение $R^T_{mt} = (R^T_{mt})_{\text{пр}}$принимают по кривой длительной прочности при максимальной температуре $(T_\sigma)_0$ цикла для длительности нагружения $(t_\sigma)_{\text{пр}} \le t_0$ по формуле

$$(t_\sigma)_{\text{пр}} = \sum_{j=0}^{m} (\tau_\sigma)_j \frac{(t_\sigma)_0}{(t_\sigma)_j}, \qquad (Г.8)$$

где $(\tau_\sigma)_j$ — общее время нагружения при температуре $(T_\sigma)_j$;

$(t_\sigma)_j$ — время до разрушения по кривой длительной статической прочности при температуре $(T_\sigma)_j$ при напряжении $(R^T_{mt})$, вызывающем разрушение при температуре $(T_\sigma)_0$ за время $(t_\sigma)_0$.

Подобным способом определяют значение $e^T_{mt}$. Для получения $(t_e)_{\text{пр}}$ используется кривая изменения $e^T_{mt}$ при температуре $(T_e)_0$, приводящей к наибольшей потере пластичности при длительном статическом нагружении. Значение $e^T_{mt} = (e^T_{mt})_{\text{пр}}$ принимают по кривой ее изменения в зависимости от времени до длительного статического разрушения при температуре $(T_e)_0$ для длительности нагружения $(t_e)_{\text{пр}} \le t_0$ [в общем случае $(t_\sigma)_{\text{пр}} \ne (t_e)_{\text{пр}}$]:

$$(t_e)_{\text{пр}} = \sum_{j=0}^{m} (\tau_e)_j \frac{(t_e)_0}{(t_e)_j}, \qquad (Г.9)$$

где $(\tau_e)_j$ — общее время нагружения при температуре $(T_e)_j$;

$(t_e)_j$ — время до достижения по кривой изменения $e^T_{mt}$ при температуре $(T_e)_j$ значения $(e^T_{mt})_0$, соответствующего температуре $(T_e)_0$ и времени $(t_e)_0$.

Если значения $e^T_{mt}$ достигают минимума при некотором времени до разрушения $t'$, то при $t < t'$ значение $e^T_{mt}$ принимают равным минимальному.

Значения $(R^T_{mt})_{\text{пр}}$ и $(e^T_{mt})_{\text{пр}}$ используют для расчета $[N_0]$ и $[\sigma_{aF}]$ по формулам (10.1) или (10.9) и положениям Г.3—Г.4.

На рисунках Г.1 и Г.2 приведены примеры определения $(R^T_{mt})_{\text{пр}}$ и $(e^T_{mt})_{\text{пр}}$. Показан случай двух рабочих температур, приводимых к температуре $(T_\sigma)_0$ при определении $(t_\sigma)_{\text{пр}}$ и температуре, приводящей к наибольшей потере пластичности, при определении $(t_e)_{\text{пр}}$.

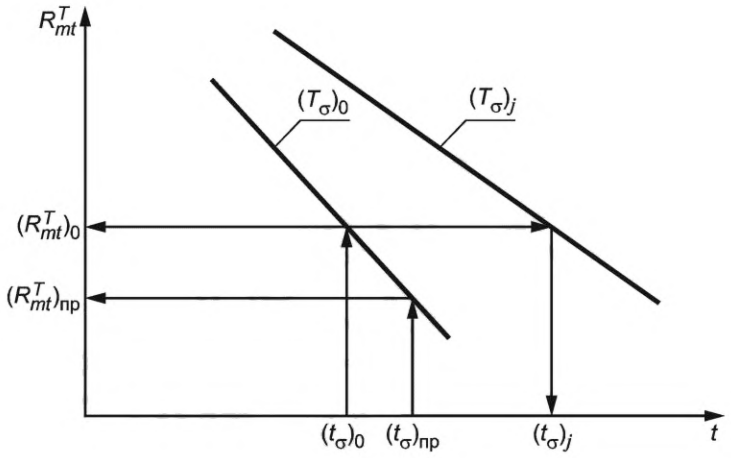



Рисунок Г.1 — Схема учета нестационарности теплового режима при определении приведенного предела длительной прочности

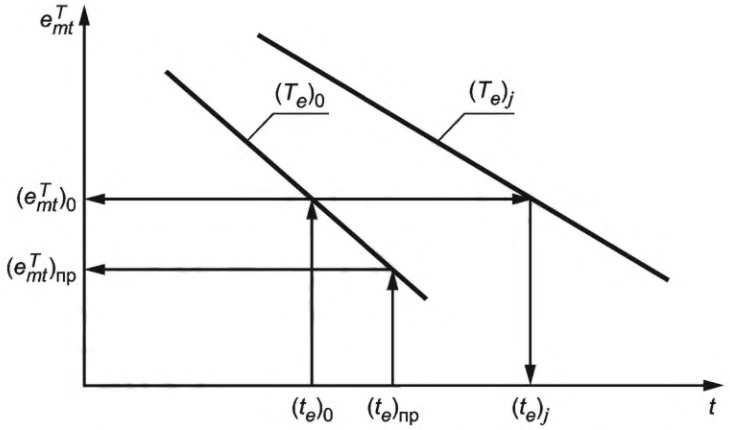



Рисунок Г.2 — Схема учета нестационарности теплового режима при определении приведенного значения характеристики длительной пластичности

Г.7.2 Если при расчете по Г.2—Г.5 условие прочности не удовлетворяется, то с целью уточнения полученного результата расчетное время для рассматриваемого цикла следует принимать равным наибольшему из $(t_\sigma)_{пр}$ и $(t_e)_{пр}$.

Наибольшее время из указанных, например $(t_e)_{пр}$, разбивают на интервалы времени, для которых известно ожидаемое эксплуатационное число циклов данного типа, и для моментов времени, отвечающих концу интервалов, выбирают по кривой длительной прочности при температуре $(T_\sigma)_0$ и по кривой изменений $e^T_{mt}$ при температуре $(T_e)_0$ значения $R^T_{mt}$ и $e^T_{mt}$ (см. рисунок Г.3 ).

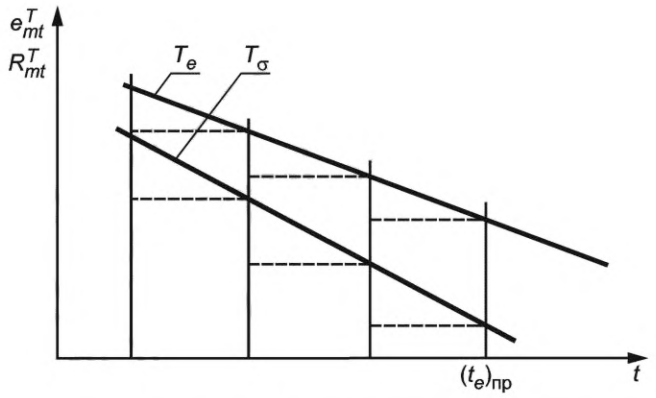



Рисунок Г.3 — Схема учета зависимости предела длительной прочности и характеристики длительной пластичности от времени

По формулам (10.1) или (10.9) и положениям Г.3, Г.4 проводят расчет допускаемого числа циклов $[N_0]$ данного типа, характеризуемого амплитудой напряжений $(\sigma_{aF})$ и асимметрией $r$, используя значения $R^T_{mt}$ и $e^T_{mt}$, отвечающие принятому разбиению длительности нагружения на интервалы.

Суммарное усталостное повреждение с учетом повреждения от других типов циклов должно удовлетворять условию циклической прочности по 10.20.

Г.7.3 Если при расчете по Г.7.1 и Г.7.2 значение $e^T_{mt}$ не изменяется с течением времени и следует определять лишь температурой, то время нагружения $t$ следует разделить на отдельные интервалы, соответствующие различным температурам рассматриваемого цикла; в пределах этих интервалов, для которых известно ожидаемое эксплуатационное число циклов, расчет допускаемого числа циклов $[N_0]$ данного типа, характеризуемого амплитудой напряжений $(\sigma_{aF})$ и коэффициентом асимметрии $r$, проводят по формулам (10.1), (10.9) и положениям Г.3, Г.4, используя значения $R^T_{mt}$ и $e^T_{mt}$, отвечающие длительности интервалов и значениям температуры в пределах этих интервалов.

Суммарное усталостное повреждение с учетом повреждений от других типов циклов должно удовлетворять условию циклической прочности по 10.20.

Г.7.4 В том случае, когда деформации и напряжения получены из расчета с учетом ползучести, значения $R^T_{mt}$ и $e^T_{mt}$ могут быть определены по фактическому уровню длительных статических повреждений. С этой целью вычисляют длительные статические повреждения $D_t$, накапливаемые при эксплуатационном нагружении. Эксплуатационное нагружение включает все типы циклов при числе повторений, равном ожидаемому за рабочий ресурс

детали, и отражает фактическую среднюю длительность нагружения для цикла каждого типа и соответствующие температуры в рассматриваемой зоне детали.

Длительное статическое повреждение следует вычислять по формуле

$$D_t = \int_0^t \frac{dt}{t}, \qquad (Г.10)$$

где $t$ — время до разрушения при длительном статическом нагружении фактическим приведенным местным напряжением при соответствующей температуре в рассматриваемой зоне детали.

При этом учитываются в одинаковой степени повреждения от напряжений растяжения и сжатия, если для данных значений температур и напряжений экспериментально не показано отсутствие повреждений от напряжений сжатия или их меньшее значение по сравнению с растяжением.

Значения $R^T_{mt}$ и $e^T_{mt}$ при оценке длительной циклической прочности по формулам (10.1), (10.9) и положениям Г.3, Г.4 принимают по кривой длительной прочности при максимальной температуре цикла и по кривой изменения $e^T_{mt}$ в зависимости от времени при температуре цикла нагружения, приводящей к наибольшему снижению пластичности, для длительности нагружения $t^* = D_t\, t$. Длительное статическое повреждение должно удовлетворять условию $D_t \le 1$. При $D_t = 1$ время $t^*$ равно $t$. При нестационарном нагружении (при наличии нескольких типов циклов) должно удовлетворяться условие циклической прочности по 10.20.

Уточнение расчета по данному пункту может быть проведено так же, как указано в Г.7.2.

Г.8 При расчете на длительную циклическую прочность сварных соединений расчетную амплитуду напряжений следует вычислять по формуле

$$(\sigma_{aF})_s = (\sigma_{aF})\varphi_s, \qquad (Г.11)$$

где $\varphi_s$ — коэффициент снижения длительной циклической прочности сварного соединения, принимаемый по таблице Г.1 в зависимости от максимальной температуры цикла.

Г.9 При расчете на длительную циклическую прочность компонентов, работающих в контакте с коррозионно-активной средой реакторной чистоты, допускается определять $[N_0]$ по Г.3—Г.5 для амплитуды напряжения, определяемой для компонентов по формуле

$$(\sigma_{aF})_к = (\sigma_{aF})/\,\overline{\varphi}_к, \qquad (Г.12)$$

для сварных соединений по формуле

$$(\sigma_{aF})_{кs} = (\sigma_{aF})/\,\overline{\varphi}_{кs}, \qquad (Г.13)$$

где $\overline{\varphi}_к$ и $\overline{\varphi}_{кs}$ — коэффициенты коррозионного снижения циклической прочности основного металла и сварного соединения, соответственно, определяемые экспериментально в соответствии с требованиями ГОСТ Р 59115.5.

Г.10 Влияние контакта с натрием или аргоном реакторной чистоты при расчетах на длительную циклическую прочность не учитывается. Разрешается увеличение допускаемого числа циклов для зон деталей, работающих в контакте с натрием или аргоном, состав которых удовлетворяет требованиям проектной (конструкторской) документации за весь проектный срок службы. За допускаемое число циклов следует принимать минимальное из двух значений:

- число циклов $[N_0]$, определенное в соответствии с положениями Г.2—Г.9, умноженное на коэффициент $æ_{Na}$

$$[N_0]_{Na} = æ_{Na}[N_0]; \qquad (Г.14)$$

- число циклов по расчетной кривой усталости согласно Г.5 для амплитуды приведенного условного упругого напряжения ($\sigma_{aF}$), поделенной на коэффициент $\varphi_{Na}$.

Значения коэффициентов $æ_{Na}$ и $\varphi_{Na}$ приведены в таблице Г.2.

Таблица Г.1 — Значения коэффициентов $\varphi_s$

| Основной металл | Метод сварки | Сварочный материал | Вид термообработки после сварки | Температура, °С | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 350 | 400 | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Стали аустенитного класса | Ручная | 48А-1* | Без термообработки | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,60 | 0,50 |
| | | | Аустенизация | — | — | 1,0 | 0,85 | 0,70 | 0,55 |
| | | 48А-2-ВИ* | Без термообработки | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,60 | 0,55 |
| | | | Аустенизация | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,55 | 0,45 |
| | | ЭА-400/10У | Без термообработки | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,60 | 0,50 |
| | | | Аустенизация | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,60 | 0,55 |
| | Аргоно-дуговая | Св-04Х17Н10М2 | Без термообработки | — | — | 0,9 | 0,80 | 0,70 | 0,60 |
| | | | Аустенизация | — | — | 1,0 | 0,90 | 0,75 | 0,65 |
| | | Св-02Х17Н10М2-ВИ | Без термообработки | — | — | 0,9 | 0,80 | 0,70 | 0,65 |
| | | | Аустенизация | — | — | 0,9 | 0,80 | 0,65 | 0,55 |
| | | Св-04Х19Н11М3 | Без термообработки | — | — | 1,0 | 0,85 | 0,70 | 0,55 |
| | | | Аустенизация | — | — | 1,0 | 0,85 | 0,70 | 0,60 |
| | | ЭП-198* | Без термообработки | — | — | 0,5 | 0,45 | 0,40 | 0,40 |
| | | | Аустенизация | — | — | 0,5 | 0,50 | 0,45 | 0,45 |
| | Автоматическая | Св-04Х17Н10М2 | Без термообработки | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,55 | 0,45 |
| | | | Аустенизация | — | — | 1,0 | — | — | — |
| | | Св-02Х17Н10М2-ВИ | Без термообработки | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,60 | 0,50 |
| | | | Аустенизация | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,55 | 0,45 |
| | | Св-04Х19Н11М3 | Без термообработки | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,60 | 0,50 |
| | | | Аустенизация | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,60 | 0,55 |
| | Электро-шлаковая | Св-04Х17Н10М2 | Без термообработки | — | — | 0,7 | 0,70 | 0,55 | 0,45 |
| | | | Аустенизация | — | — | 1,0 | 0,85 | 0,70 | 0,55 |
| | | Св-04Х19Н11М3 | Без термообработки | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,55 | 0,45 |
| | | | Аустенизация | — | — | 0,9 | 0,80 | 0,65 | 0,55 |

*Окончание таблицы Г.1*

| Основной металл | Метод сварки | Сварочный материал | Вид термообработки после сварки | Температура, °С | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 350 | 400 | 450 | 500 | 550 | 600 |
| Железо-никелевые дисперсионно-твердеющие сплавы | Аргоно-дуговая | Св-Х15Н35* | Без термообработки | — | — | 0,7 | 0,65 | 0,55 | 0,50 |
| | | | Аустенизация | — | — | 0,8 | 0,70 | 0,60 | 0,55 |
| | | ЭП-198* | Без термообработки | — | — | 0,5 | 0,45 | 0,40 | 0,40 |
| | | | Аустенизация | — | — | 0,5 | 0,50 | 0,45 | 0,45 |
| Сталь 12Х2М | Ручная | 48Н-10 | Высокий отпуск | 1,0 | 0,80 | 0,7 | 0,60 | 0,55 | 0,50 |
| | | 48А-1*, | Без термообработки | 1,0 | 0,85 | 0,7 | — | — | — |
| | | ЭА-395/9 | Высокий отпуск | 1,0 | 0,80 | 0,6 | — | — | — |
| | | 48А-1*, КТИ-7 | Без термообработки | — | — | — | 0,60 | 0,55 | 0,50 |
| | | | Высокий отпуск | — | — | — | 0,50 | 0,40 | 0,30 |
| | Автоматическая под флюсом | Св-04Х2МА | Высокий отпуск | 0,7 | 0,65 | 0,6 | 0,60 | 0,55 | 0,55 |
| Стали 12Х1МФ, 15Х1М1Ф | Ручная | Н-6 | Высокий отпуск | 1,0 | 0,8 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | — |
| | Аргоно-дуговая | Св-08ХМФА | Высокий отпуск | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | — |

* Материал не включен в Сводный перечень документов по стандартизации [3]. Применимость материалов для изготовления оборудования и трубопроводов регламентируется федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии [1].

Таблица Г.2 — Значения коэффициентов $æ_{Na}$ и $\varphi_{Na}$

| Материал | Температура, °С | Коэффициент | Длительность нагружения, ч | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $10^1$ | $10^2$ | $10^3$ | $10^4$ | $10^5$ | $2 \cdot 10^5$ |
| Легированные стали | 20—360 | $æ_{Na}$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 400 | $æ_{Na}$ | 1 | 1 | 1,4 | 1,7 | 2,0 | 2,1 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | 1 | — | — | — | — |
| | 450 | $æ_{Na}$ | 1 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,2 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | — | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 |
| | 500 | $æ_{Na}$ | 1 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 5,4 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | — | 1,05 | 1,10 | 1,10 | 1,10 |
| | 550 | $æ_{Na}$ | 1 | 2,5 | 4,0 | 5,5 | 7,0 | 7,5 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | — | 1,10 | 1,15 | 1,15 | 1,15 |
| Стали аустенитного класса | 20—450 | $æ_{Na}$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 500 | $æ_{Na}$ | 1 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,2 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | — | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 |
| | 550 | $æ_{Na}$ | 1 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 5,4 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | — | 1,05 | 1,10 | 1,10 | 1,10 |
| | 600 | $æ_{Na}$ | 1 | 2,5 | 4,0 | 5,5 | 7,0 | 7,5 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | — | 1,10 | 1,15 | 1,15 | 1,15 |
| Железоникелевые дисперсионно-твердеющие сплавы | 20—450 | $æ_{Na}$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 500 | $æ_{Na}$ | 1 | 1 | 1,1 | 1,3 | 1,5 | 1,6 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | 1 | — | — | — | — |
| | 550 | $æ_{Na}$ | 1 | 1,1 | 1,4 | 1,7 | 2,0 | 2,1 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | — | — | — | — | — |
| | 600 | $æ_{Na}$ | 1 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,2 |
| | | $\varphi_{Na}$ | 1 | — | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,05 |
| Примечание — Для промежуточных температур значения коэффициентов $æ_{Na}$ и $\varphi_{Na}$ получают линейной интерполяцией. | | | | | | | | |

Г.11 При расчете на длительную циклическую прочность компонентов конструкций, работающих в условиях нейтронного облучения, за допускаемое число циклов данного типа принимают минимальное из двух значений:

- число циклов $[N_0]_F = [N_0]/æ$, где $[N_0]$ — число циклов для амплитуды напряжений по Г.3—Г.10 или, при расчетах для условий умеренно повышенных температур, не вызывающих ползучесть, по формулам (10.1) или (10.9);
- число циклов по расчетной кривой усталости или соответствующим уравнениям для амплитуды напряжений, определенной по Г.3—Г.10, или, при расчетах для условий умеренно повышенных температур, не вызывающих ползучесть, по формулам (10.1) или (10.9), и поделенной на коэффициент $\varphi_F$.

Значения коэффициентов $æ_F$ и $\varphi_F$ приведены в таблице Г.3.

Г.12 При определении допускаемого числа циклов по расчетным кривым усталости или формулам (10.1) или (10.9) для деталей с поверхностным диффузионным хромонитридным покрытием амплитуду напряжений ($\sigma_{aF}$) вычисляют по формуле

$$(\sigma_{aF})_п = (\sigma_{aF}) / \varphi_п, \qquad (Г.15)$$

где $(\sigma_{aF})$ — амплитуда условных упругих напряжений, определяемая в соответствии с положениями Г.2—Г.11;

$\varphi_п$ — коэффициент, принимаемый равным 0,75 для аустенитных сталей и железоникелевых сплавов.

Таблица Г.3 — Значения коэффициентов $æ_F$ и $\varphi_F$

| Тип материала | Температура, К (°С) | Коэффициент | $F_N$, м$^{-2}$ ($E \geq 0{,}1$ МэВ) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $10^{22}$ | $10^{23}$ | $10^{24}$ | $10^{25}$ | $10^{26}$ | $2 \cdot 10^{26}$ | $4 \cdot 10^{26}$ | $6 \cdot 10^{26}$ | $8 \cdot 10^{26}$ | $10^{27}$ |
| Легированные стали | 293—623 (20—350) | $æ_F$ | 1,0 | 2,2 | 5,0 | — | — | — | — | — | — | — |
| Сплавы циркония | 293—623 (20—350) | $æ_F$ | 1,0 | 1,4 | 1,9 | 2,6 | 3,6 | — | — | — | — | — |
| Стали аустенитного класса | 748—873 (475—600) | $\varphi_F$ | 1,0 | 0,90 | 0,85 | 0,80 | 0,75 | 0,7 | 0,67 | 0,65 | 0,63 | 0,6 |
| | 293—873 (20—600) | $æ_F$ | 1,0 | 1,6 | 2,6 | 4,2 | 6,5 | 10 | 17 | 30 | — | — |
| Железоникелевые дисперсионно-твердеющие сплавы | 748—873 (475—600) | $\varphi_F$ | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,97 | 0,95 | 0,9 | 0,8 | 0,60 | 0,4 |
| | 293—873 (20—600) | $æ_F$ | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 2,0 | 3,6 | — | — |

Примечание — Для промежуточных значений переноса нейтронов коэффициенты $æ_F$ и $\varphi_F$ получают линейной интерполяцией.

## Приложение Д
## (рекомендуемое)

## Расчет на сейсмические воздействия

### Д.1 Унифицированные методы расчета оборудования и трубопроводов на прочность от сейсмических воздействий

#### Д.1.1 Условные обозначения

В настоящем приложении применены следующие условные обозначения:

*NLC* — нелинейная система;

*LC* — линейная система;

*DAM* — метод динамического анализа;

*LCM* — линейно-спектральный метод;

$m_{ii}$ — коэффициент инерции *i*-й парциальной системы (диагональный элемент матрицы [*M*]);

[*C*] — матрица жесткости;

[*M*] — матрица масс (инерции);

$\{x\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{\ddot{x}\}$ — векторы относительных перемещений, скоростей и ускорений соответственно;

*N* — число степеней свободы;

[*B*] — матрица демпфирования;

{*R*} — вектор реактивных сил от «нелинейных связей»;

$\{\cos\alpha\}$ — вектор направляющих косинусов;

$\ddot{\psi}(t)$ — ускорение основания расчетной модели (акселерограмма);

{*F*} — результирующий вектор внешних нагрузок;

*f* — собственная частота, Гц;

*a* — ускорение, м/с$^2$;

*H'* — отметки оборудования или трубопровода, м;

$\omega$ — круговая собственная частота колебаний оборудования или трубопровода в воздушной среде, рад/с;

$\tilde{\omega}$ — круговая собственная частота колебаний оборудования или трубопровода в жидкой среде, рад/с;

*C* — коэффициент жесткости, Н/м;

$C_Q$ — коэффициент сдвига;

*M* — масса части оборудования или трубопровода;

$\tilde{M}$ — присоединенная масса жидкости, кг;

$\tilde{M}_{red}$ — приведенная масса части оборудования или трубопровода с учетом присоединенной массы жидкости, кг;

$M_1$ — погонная масса части оборудования или трубопровода, кг/м;

$M_0$ — масса жидкости, вытесненной погруженной в нее частью оборудования или трубопровода, кг;

g = 9,81 м/с$^2$ — ускорение свободного падения;

*G* — вес, Н;

*q* — сила, Н;

*m* — момент силы, Н·м;

*E* — модуль упругости материала, Н/м$^2$;

$\mu$ — коэффициент Пуассона;

$\xi$ — коэффициент присоединенной массы;

*M'* — функция от координат части оборудования, представляющая распределение ее массы, кг;

*A* — функция от координат части оборудования, определяющая форму рассматриваемого колебания и представляющая отношение перемещений точек части оборудования к перемещению точки приведения, которое следует принимать равным единице;

$\delta$ — перемещение, м;

$A_s$ — площадь поперечного сечения, м$^2$;

*l* — длина рассчитываемого компонента, м;

*d* — диаметр, м;

*t* — шаг отверстий, м;

*s* — толщина, м;

*J* — момент инерции поперечного сечения, м$^4$;

$J_0$ — момент инерции вращения массы,кг·м$^2$;

*i* — радиус инерции, м;

*z* — число компонентов;

$D = \dfrac{Eh^3}{12\left(1-\mu^2\right)}$ — цилиндрическая жесткость, Н·м.

Индексы:
*i* — для параметров, относящихся к *i*-й части оборудования;
*st* — для параметров, относящихся к статической нагрузке (от собственного веса);
*kr* — для критического значения при расчете на устойчивость;
*red* — для параметров, относящихся к точке приведения;
*l* — для параметров, относящихся к лапам;
*w* — для параметров, относящихся к болтам;
*a* — наружный.

**Д.1.2 Определения**

В настоящем приложении применены дополнительные термины с соответствующими определениями:

Д.1.2.1 **опорная связь (опора):** Конструкция, соединяющая оборудование или трубопровод с точкой крепления (анкерный болт, крепежная лапа, опорный фланец, амортизатор и т. п.).

Д.1.2.2 **неопорная связь:** Конструкция, соединяющая агрегаты оборудования между собой (патрубок, сильфон, трубопроводы и т. п.).

Д.1.2.3 **амортизатор**: Механизм или гидромеханизм, соединяющий оборудование с точкой его крепления в целях повышения прочности этого оборудования при сейсмических нагрузках. Конструкция амортизатора должна обеспечивать малую жесткость его при температурных перемещениях оборудования и большую жесткость при сейсмических нагрузках.

**Д.1.3 Выбор метода расчета**

Д.1.3.1 Метод расчета выбирают в соответствии с таблицей Д.1. Трубопроводы допускается рассматривать как линейные системы.

Таблица Д.1 — Рекомендации по выбору метода расчета и исходных данных сейсмического воздействия

| Тип расчетной модели | Метод расчета | Исходные данные по воздействию |
|---|---|---|
| *LC* | *DAM* или *LCM* | Акселерограммы или спектры ответа |
| *NLC* | *DAM* | Акселерограммы |

Д.1.3.2 Исходными данными по сейсмическому воздействию являются акселерограммы или спектры ответа.

**Д.1.4 Принципы построения механической модели и расчет ее параметров**

Д.1.4.1 Для проведения расчетов компонентов оборудования на прочность от сейсмических воздействий составляется механическую модель оборудования, состоящая из масс, соединенных между собой и с точками крепления связями. Компоненты оборудования, имеющие малую массу (узел крепления, амортизатор и т. п.), вносятся в модель только как связь, обладающую определенной жесткостью. Если оборудование состоит из отдельных агрегатов, жестко закрепленных и имеющих неопорные связи, эти связи в дальнейших расчетах не учитываются.

Расчетная механическая модель оборудования или трубопроводов должна отражать основные динамические свойства рассматриваемой конструкции, удовлетворять объему необходимой расчетной проверки и возможностям программ расчета на ЭВМ и (или) выбранным методам расчета.

Д.1.4.2 Для части оборудования, которая может быть схематизирована в виде сосредоточенной массы со связью, массу и коэффициент жесткости следует определять на основе чертежей. Для вычисления коэффициента жесткости используют методы сопротивления материалов.

Круговую собственную частоту следует вычислять по формуле

$$\omega_i = \sqrt{\frac{C_i}{M_i}}. \qquad (Д.1)$$

Для определения массы, коэффициента жесткости и круговой собственной частоты деталей и сборочных единиц с распределенными параметрами следует использовать метод приведения, который заключается в следующем:

- задается определенная кривая прогиба, которая может иметь место при колебаниях (в первом приближении — это кривая статического прогиба от весовых нагрузок);
- выбирают точку приведения (точка может быть выбрана произвольно, но должно быть выполнено условие: при колебаниях конструкции перемещение точки приведения отлично от нуля);
- следует вычислять для принятой точки приведения приведенную массу $M_{red}$;
- следует вычислять круговую собственную частоту по формуле

$$\omega_i = \sqrt{\frac{C_{red}}{M_{red}}}. \qquad (Д.2)$$

В общем случае для части оборудования с распределенными параметрами:

$$M_{red} = \iiint M' A^2 dx\, dy\, dz; \qquad (Д.3)$$

$$C_{red} = 2\Pi\delta_{red}^{st}, \tag{Д.4}$$

где $\Pi\delta_{red}^{st} = 1$ — потенциальная энергия части оборудования при перемещении точки приведения, равном единице.

Значения $M_{red}$ и $C_{red}$ могут быть вычислены также по формулам:

$$M_{red} = \frac{\sum G_i \left(\delta_i^{st}\right)^2}{g\left(\delta_{red}^{st}\right)^2}; \tag{Д.5}$$

$$C_{red} = \frac{\sum G_i \delta_i^{st}}{\left(\delta_{red}^{st}\right)^2}. \tag{Д.6}$$

Приведенные коэффициенты жесткости могут быть определены методами сопротивления материалов. Причем для деталей малой длины ($s/l \geq 0{,}3$) следует учитывать влияние сдвига, умножая приведенный коэффициент жесткости на коэффициент сдвига $C_Q$, определяемый в зависимости от формы детали.

Если для части оборудования с постоянным поперечным сечением (постоянная погонная масса $M_1$) в качестве кривой прогиба выбрана кривая статического прогиба от сосредоточенной силы $F$, приложенной в точке приведения, то

$$M_{red} = M' l \int_0^1 A_p^2(\vartheta)\, d\vartheta, \tag{Д.7}$$

где $A_p(\vartheta)$ — относительная кривая статического прогиба от силы $F$;

$\vartheta$ — относительная координата.

В этом случае приведенный коэффициент жесткости равен силе (или моменту), вызывающей в направлении действия перемещение точки приведения, равное единице.

Приведенную массу части оборудования, находящегося в жидкой среде, следует вычислять с учетом присоединенной массы жидкости по формуле

$$\tilde{M}_{red} = M_{red} + \tilde{M}. \tag{Д.8}$$

Присоединенную массу жидкости следует вычислять по формуле

$$\tilde{M} = \xi \cdot M_0. \tag{Д.9}$$

Для частей оборудования, находящихся в безграничной жидкости, $\xi$ следует принимать в соответствии с таблицей Д.2.

Таблица Д.2 — Значения коэффициента $\xi$

| Форма части оборудования | Направление перемещения при колебаниях | $\xi$ |
|---|---|---|
| Длинный цилиндр ($l \geq 8d$) | Перпендикулярно к продольной оси | 1,0 |
| Короткий цилиндр ($l < 8d$) | Перпендикулярно к продольной оси | По рисунку Д.1 |
| Пакет цилиндрических стержней | Перпендикулярно к продольной оси | По рисунку Д.2 |
| Шар | Любое | 0,5 |

Коэффициент присоединенной массы $\xi$ для одиночного цилиндрического стержня при колебаниях в безграничном объеме жидкости следует определять по рисунку Д.1.

Коэффициент присоединенной массы $\xi$ для пакета цилиндрических стержней следует определять по рисунку Д.2.

Коэффициент $\xi$ для цилиндрических компонентов, находящихся в ограниченных объемах воды, можно определить по рисунку Д.3. При $l/a < 2$ во всех случаях следует принимать $\xi = 1{,}0$.

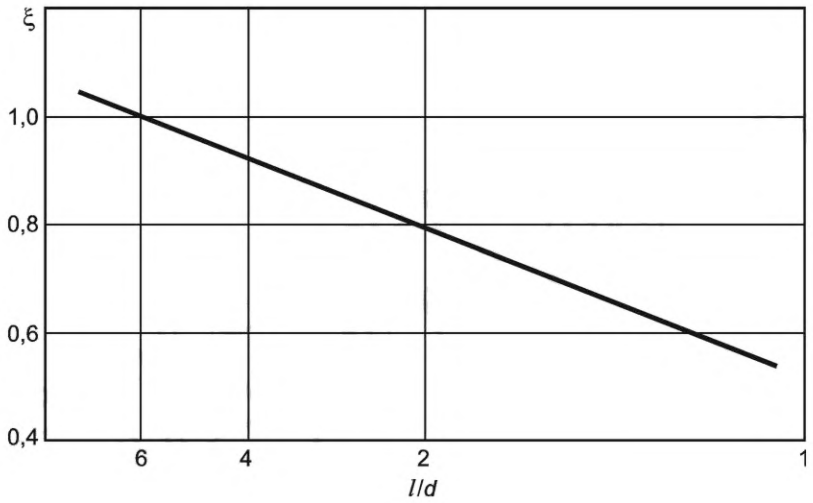
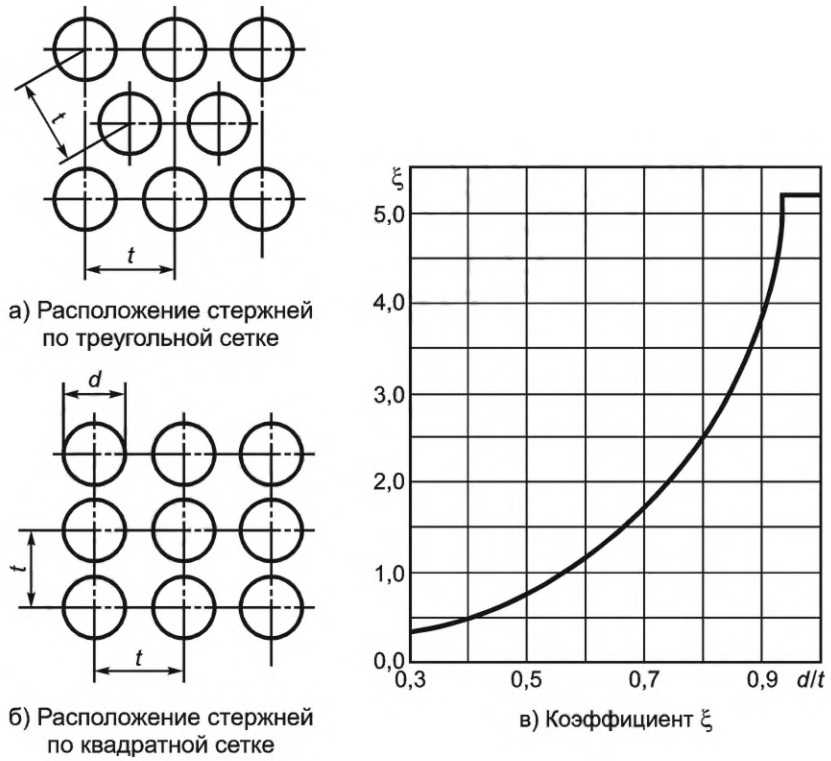
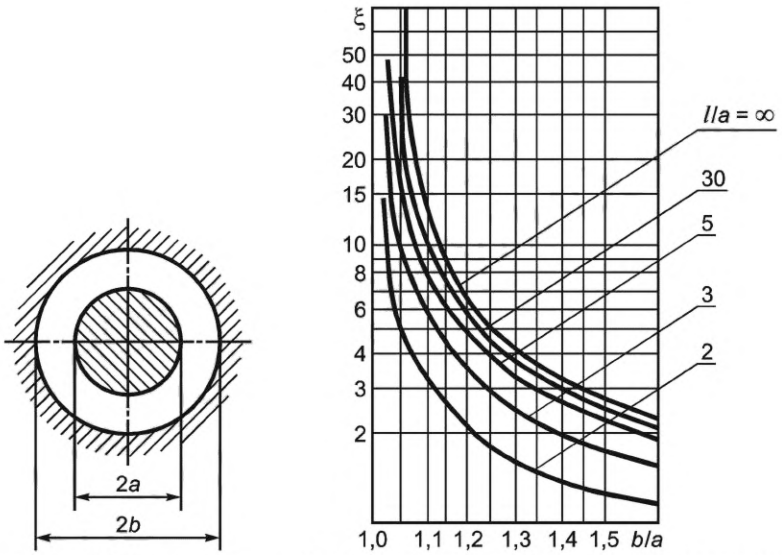



Рисунок Д.1 — Коэффициент присоединенной массы ξ для одиночных цилиндрических стержней при колебаниях в безграничном объеме жидкости




а) Расположение стержней по треугольной сетке; б) Расположение стержней по квадратной сетке; в) Коэффициент ξ

Рисунок Д.2 — Коэффициент присоединенной массы ξ для пакетов цилиндрических стержней




а) Схема

б) Зависимость коэффициента присоединенной массы от *b*/*a*

Рисунок Д.3 — Коэффициент присоединенной массы ξ для одиночных цилиндрических стержней при колебаниях в ограниченном объеме жидкостей

Погонную массу стержня $\tilde{M}_1$ с учетом присоединенной массы следует вычислять по формуле

$$\tilde{M}_1 = M_1 + M_2, \tag{Д.10}$$

где $M_2 = \xi \cdot M_{01}$ — присоединенная погонная масса жидкости;

$M_{01}$ — масса жидкости, вытесненная стержнем единичной длины.

Для сосуда или стержня, полностью заполненного жидкостью, а также для вертикальных цилиндрических сосудов с отношением высоты жидкости к радиусу сосуда больше четырех присоединенная масса жидкости равна массе жидкости.

Круговую собственную частоту части оборудования, погруженной в жидкость, следует вычислять по формуле

$$\tilde{\omega}_i = \sqrt{\frac{C_{red}}{M_{red}}} \tag{Д.11}$$

или

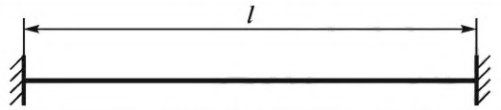
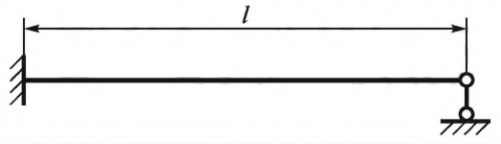
$$\tilde{\omega}_i = \frac{\omega_i}{\sqrt{1 + \tilde{M} / M_{red}}}. \tag{Д.12}$$

Частоту свободных колебаний части оборудования, которая может быть схематизирована в виде прямолинейной однопролетной балки постоянного поперечного сечения, следует вычислять по формуле

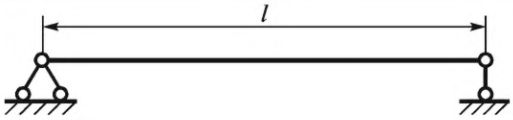
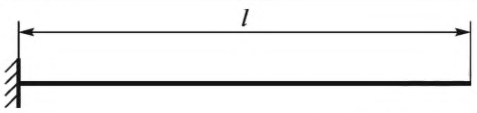
$$\omega_i = \frac{x}{l_2}\sqrt{\frac{EG}{M_1}}, \tag{Д.13}$$

где $x$ — коэффициент, определяемый в соответствии с таблицей Д.3.

Таблица Д.3 — Значения приведенных жесткостей и масс

| Расчетная схема | $x$ | $C_{red}$ | $M_{red}$ |
|---|---|---|---|
|  | 22,4 | $200\frac{EG}{l^3}$ | $0{,}4M_1 l$ |
|  | 15,4 | $102\frac{EG}{l^3}$ | $0{,}44M_1 l$ |

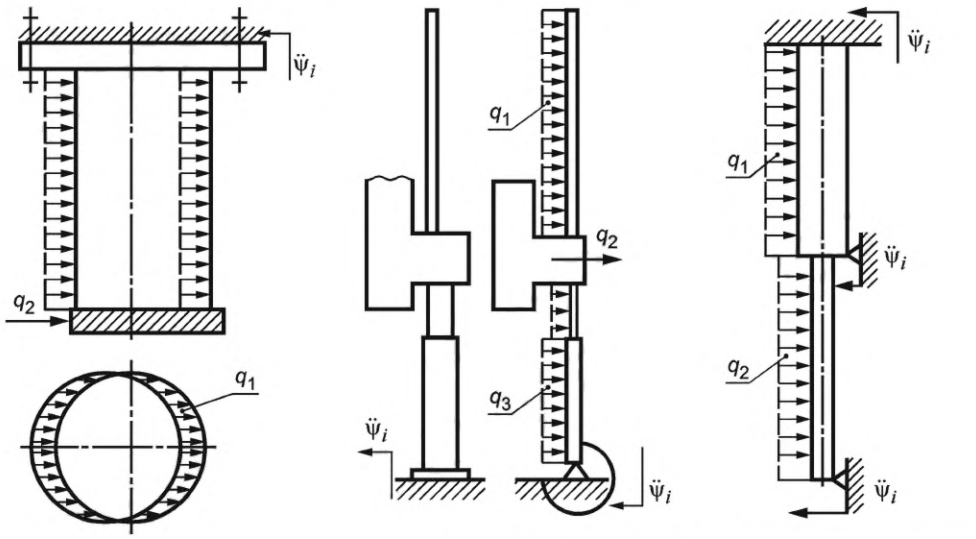
*Окончание таблицы Д.3*

| Расчетная схема | $x$ | $C_{red}$ | $M_{red}$ |
|---|---|---|---|
|  | 9,86 | $48,5\frac{EG}{l^3}$ | $0,5M_1l$ |
|  | 3,52 | $3,1\frac{EG}{l^3}$ | $0,25M_1l$ |

Для этих же частей оборудования в таблице Д.3 приведены значения приведенных жесткостей и приведенных масс.

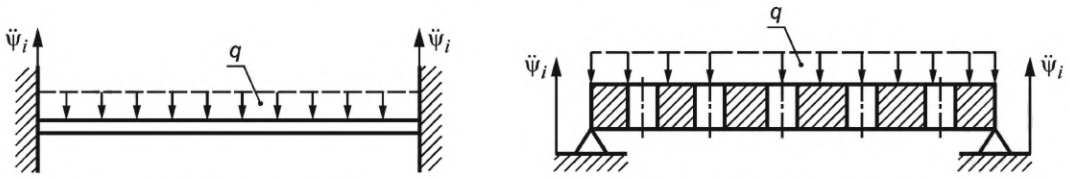
**Д.1.5 Расчет типовых конструкций, сборочных единиц и деталей оборудования**

Д.1.5.1 Расчетные схемы основных типовых частей оборудования приведены на рисунках Д.4 и Д.5.




а) Выемная часть б) Привод СУЗ в) Технологический канал

Рисунок Д.4 — Расчетные схемы типовых узлов




а) Трубка теплообменника б) Перфорированная плита

Рисунок Д.5 — Расчетные схемы типовых узлов

Выемную часть реактора, состоящую, например, из выемного экрана, в нижней своей части соединенного с плитой, при расчете в горизонтальном направлении следует рассматривать как консольную цилиндрическую балку, которая нагружена равномерно распределенной массой экрана и сосредоточенной массой плиты. Верхний контур балки жестко защемлен, а нижний контур подкреплен жесткой плитой.

Технологический канал следует рассматривать как стержень переменного поперечного сечения, имеющий жесткую заделку в опорной плите и промежуточные шарнирные опоры в местах прохода канала через дистанционирующие перфорированные плиты. Стержень нагружен распределенной массой.

Привод системы управления и защиты (СУЗ) следует рассматривать как консольную стержневую систему, состоящую из трубчатых стержней ступенчато-переменного сечения, которые нагружены распределенной собственной массой и сосредоточенной массой приводных механизмов. Стержневая система имеет податливую заделку в крышке за счет податливости узла крепления привода СУЗ к крышке.

Трубки теплообменных аппаратов следует считать балками постоянного сечения, защемленными в опорах (трубных досках, диафрагмах) и нагруженными равномерно распределенной массой.

Плиты, диафрагмы, трубные доски, крышки, плоские экраны и другие аналогичные конструкции следует рассматривать как сплошные плиты. В зависимости от конструкции крепления контур плиты считается защемленным или свободно опирающимся. В случае расчета трубных досок или иных перфорированных конструкций в расчет вводятся приведенные характеристики, сводящие перфорированную плиту по жесткости к сплошной. Следует принимать, что плита нагружена равномерно распределенной массой.

Д.1.5.2 При расчете собственной частоты колебаний корпусного оборудования масса узлов крепления ввиду ее малости по сравнению с массой оборудования не учитывается.

Приведенную жесткость узла крепления следует вычислять по формуле

$$C_{red} = \frac{C_{red,l} C_{red,w} z_l z_w}{C_{red,l} z_l + C_{red,w} z_w}. \quad (Д.14)$$

Для болта в направлении его оси

$$C_{red,w} = \frac{E_w A_{sw}}{l \cdot z_w}. \quad (Д.15)$$

Приведенные коэффициенты жесткости лап (опорных фланцев, нажимных фланцев):

- для лапы типа балка (см. рисунок Д.6):

$$C_{red,l} = \frac{3EG}{l_3} C_Q, \quad (Д.16)$$

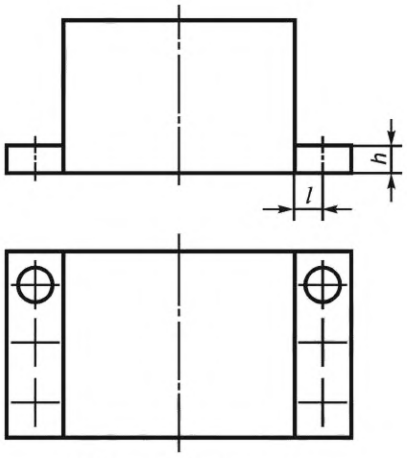
$$C_Q = \frac{1}{1 + 0{,}75\left(\frac{s}{l}\right)^2}; \quad (Д.17)$$

- для опорного фланца (см рисунок Д.7):

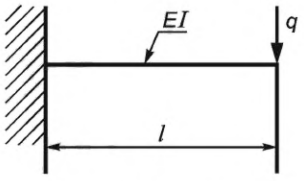
$$C_{red,l} = \frac{Es^3}{a^2 \alpha} C_Q, \quad (Д.18)$$

$$C_Q = \frac{1}{1 + 0{,}6\frac{1}{\alpha}\left(\frac{s}{a}\right)^2 \ln\frac{a}{b}}, \quad (Д.19)$$

где $a$, $b$ — размеры опорного фланца.

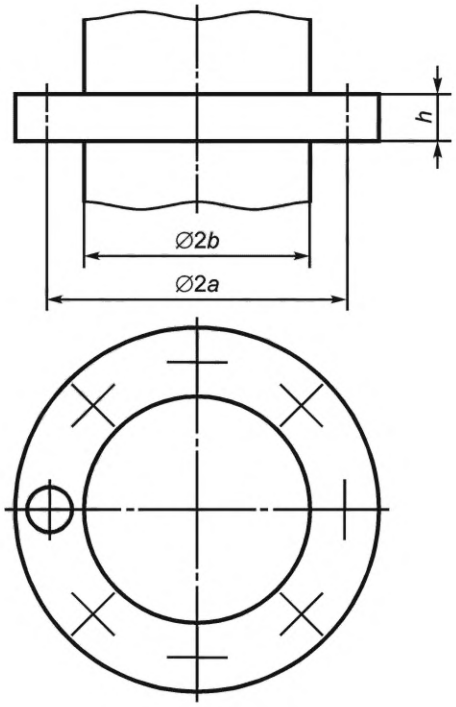



а) Эскиз конструкции

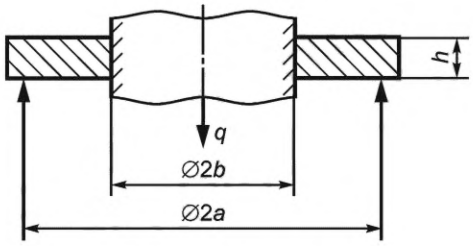



б) Расчетная схема

Рисунок Д.6 — Узел крепления с лапами типа балок




а) Эскиз конструкции




б) Расчетная схема

Рисунок Д.7 — Узел крепления с опорными фланцами

Численные значения коэффициентов $\alpha$ приведены в таблице Д.4.

Таблица Д.4 — Значения коэффициента $\alpha$

| $\frac{a}{b}$ | 1,05 | 1,1 | 1,15 | 1,2 | 1,25 | 1,5 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\alpha$ | 0,0001 | 0,0004 | 0,0014 | 0,003 | 0,005 | 0,025 | 0,088 | 0,209 | 0,293 | 0,35 |

Для секторных лап (см. рисунок Д.8)

$$C_{red,l} = \frac{Es^3}{a^2\alpha}\frac{mZ_l}{2\pi a}C_Q, \qquad (Д.20)$$

где $m$ — длина дуги одной лапы, измеренная по окружности радиусом $a$.

Значение $C_Q$ вычисляют так же, как для опорного фланца.

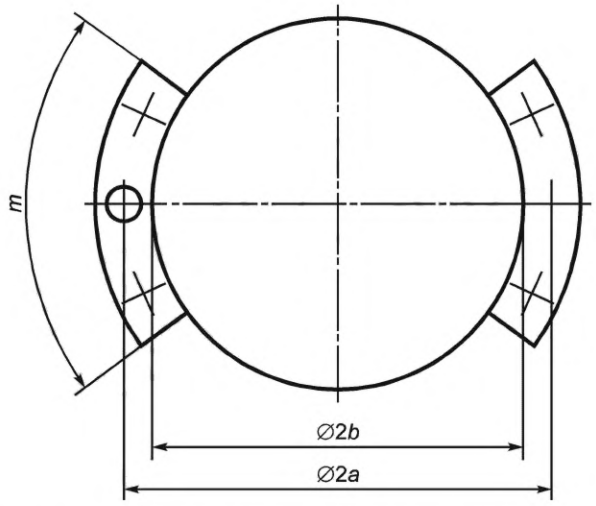



Рисунок Д.8 — Схема узла крепления с секторными лапами

Для лап и опорных фланцев, подкрепленных ребрами жесткости (см. рисунок Д.9):

$$C_{red,l} = \frac{3EG}{l_3} C_Q z; \tag{Д.21}$$

$$C_Q = \frac{1}{1+1{,}75\dfrac{GK}{l^2 A_s}}; \tag{Д.22}$$

$$K = \frac{A_s}{G^2} \int_{-h_2}^{h_1} \frac{s^2(x)}{b(x)} dx, \tag{Д.23}$$

где $z$ — число секций;

$h_1$, $h_2$ — расстояния соответственно от верхней и нижней кромок поперечного сечения;

$s(x)$ — статический момент инерции площади поперечного сечения;

$b(x)$ — ширина секции.

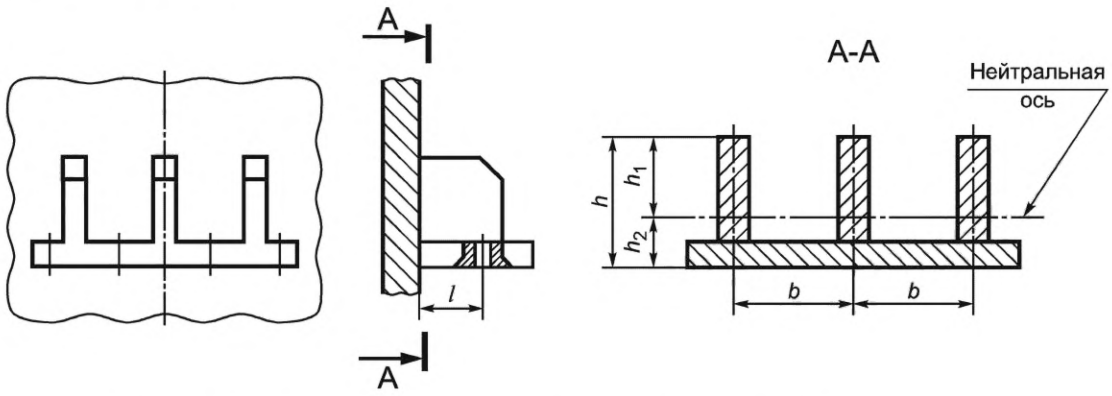



Рисунок Д.9 — Схема подкрепления лап и опорных фланцев ребрами жесткости

Для крепления с помощью башмаков (см. рисунок Д.10)

$$C_{red,l} = \frac{C'_{red,l} C''_{red,l} z^2 C'_{red,w}}{C'_{red,w} C'_{red,l} z + C''_{red,l} C_{red,w} z^2 + C'_{red,l} C''_{red,l} z}, \tag{Д.24}$$

где $C'_{red,l}$ — приведенный коэффициент жесткости башмаков, вычисляемый по формулам для лап типа балок;

$C''_{red,l}$ — приведенный коэффициент жесткости опорного фланца, вычисляемый по формулам для опорных фланцев;

z — число башмаков;

$C'_{red,w} = C_{red,w}(a_w/b_w)^2$;

$a_w$, $b_w$ — размеры башмаков (см. рисунок Д.10).

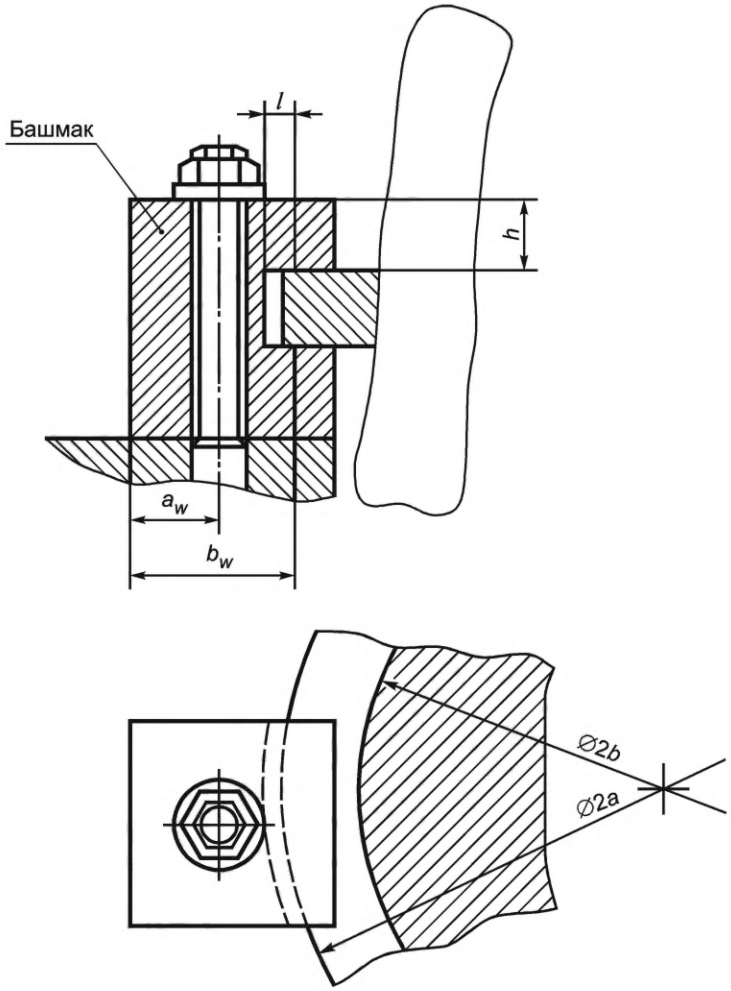



Рисунок Д.10 — Схема узла крепления с помощью башмаков

Для нажимного фланца (см. рисунок Д.11):

$$C_{red} = 17{,}1\frac{aD}{(a-b)^3}C_Q; \quad (Д.25)$$

$$C_Q = \frac{1}{1+0{,}75\left(\frac{h}{a-b}\right)^2}, \quad (Д.26)$$

где $a$, $b$, $h$ — размеры нажимного фланца (см. рисунок Д.11).

Приведенные коэффициенты жесткости и массу цилиндрического корпуса оборудования с креплением к фундаменту по схемам, представленным на рисунке Д.12а) и б), следует вычислять в следующем порядке.

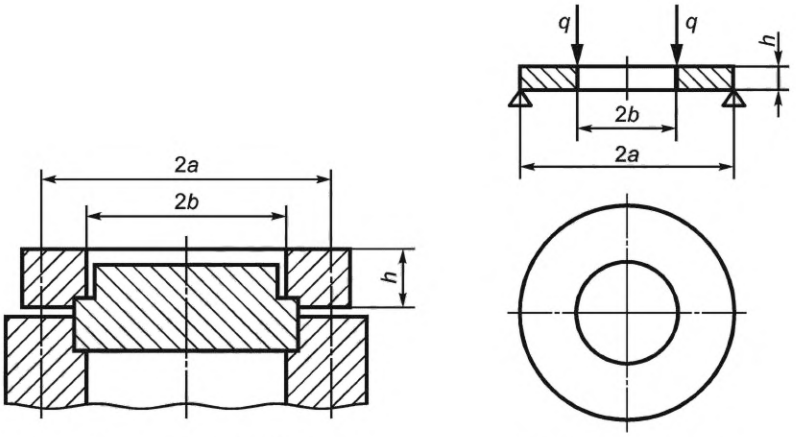
При расчете колебаний в направлении оси корпуса в соответствии со схемой, представленной на рисунке Д.12в):

$$C_{red} = \frac{EA_s}{l}; \quad (Д.27)$$

$$M_{red} = 0{,}33M_1l. \quad (Д.28)$$

Для корпусов с креплением в средней части [см. рисунок Д.12б)]:

$$l = l_1 + l_2. \quad (Д.29)$$




а) Эскиз конструкции б) Расчетная схема

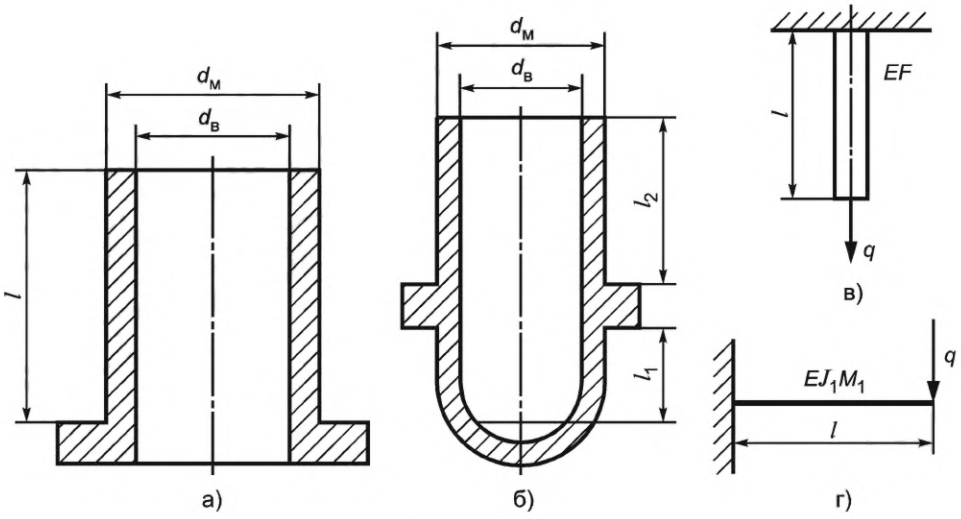
Рисунок Д.11 — Узел крепления с нажимными фланцами

При расчете колебаний в поперечном направлении [см. рисунок Д.12г)]:

$$C_{red} = \frac{3EG}{l^3} C_Q; \quad (Д.30)$$

$$C_Q = \frac{1}{1 + 0,94 \cdot \frac{d_a^2 + d^2}{l^2}}; \quad (Д.31)$$

$$M_{red} = 0,26 M_1 l. \quad (Д.32)$$




а) Схема крепления корпуса к фундаменту в нижней части; б) Схема крепления корпуса к фундаменту в средней части; в) Расчетная схема для продольных колебаний; г) Расчетная схема для поперечных колебаний

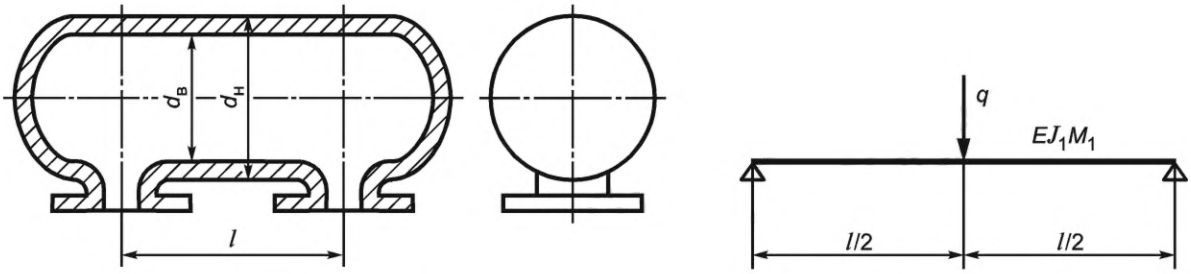
Рисунок Д.12 — Крепление цилиндрического корпуса оборудования к фундаменту

Для двухопорного корпуса (см. рисунок Д.13) при колебаниях в направлении, перпендикулярном к оси:

$$C_{red} = \frac{48EG}{l^3} C_Q; \quad (Д.33)$$

$$C_Q = \frac{1}{1 + 3,75 \cdot \frac{d_a^2 + d^2}{l^2}}; \quad (Д.34)$$

$$M_{red} = 0,5 M_1 l. \quad (Д.35)$$




а) Эскиз конструкции б) Расчетная схема

Рисунок Д.13 — Крепления двухопорного корпуса к фундаменту

Приведенный коэффициент жесткости и массу для консольно закрепленного экрана следует вычислять так же, как для корпусов, показанных на рисунке Д.12. Для экранов с ограничителями перемещений (см. рисунок Д.14) при расчете колебаний в поперечном направлении:

$$C_{red} = \frac{103EG}{l^3} C_Q; \quad (Д.36)$$

$$C_Q = \frac{0,1 + 0,5\beta + 4\beta^2}{0,1 + 2,5\beta + 15,2\beta^2}, \quad (Д.37)$$

где $\beta = \frac{d_a^2 + d^2}{l^2}$;

$M_{red} = 0,43M_1 l$.

Расчетные значения $C_{red}$ и $M_{red}$ при колебаниях в направлении оси экрана определяют так же, как для корпусов при колебании их в продольном направлении [см. рисунок Д.12в)].

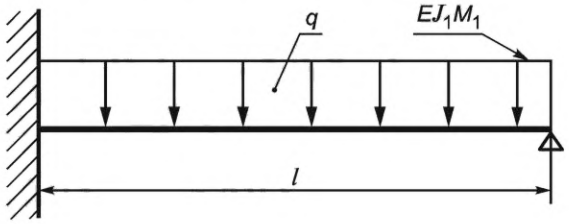



Рисунок Д.14 — Схема экрана с ограничителем перемещений

При расчете приведенных коэффициентов жесткости и массы крышки или перфорированной плиты при $h/a > 0,3$ (см. рисунок Д.15) крышку или плиту следует считать сосредоточенной массой. При $h/a \le 0,3$ в случае поперечных колебаний значения $C_{red}$ и $M_{red}$ следует вычислять из следующих зависимостей:

- для крышек, заглушек и других компонентов типа сплошных круглых пластин

$$C_{red} = 32,4\frac{D}{a^2}, \quad (Д.38)$$

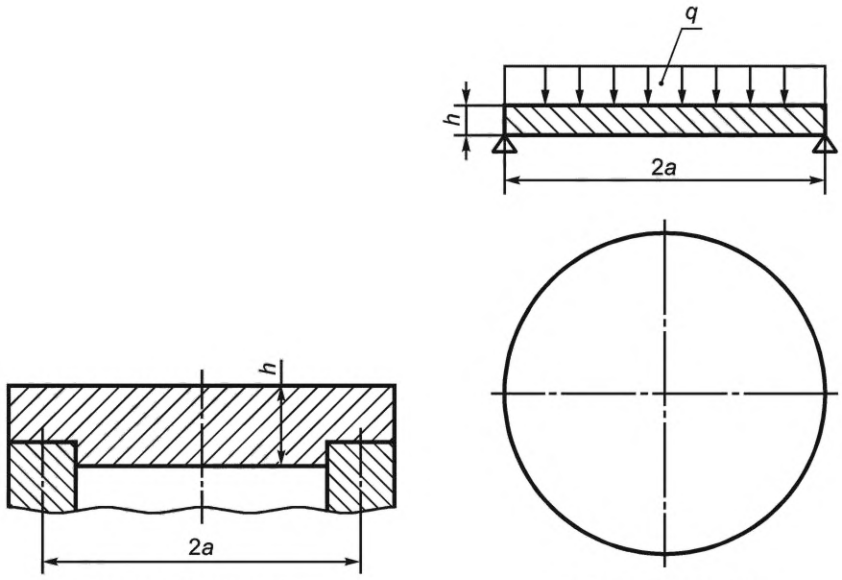
$$M_{red} = 0,33M; \quad (Д.39)$$

- для перфорированных плит

$$C_{red} = 32,4\frac{D\varphi_и}{a^2}, \quad (Д.40)$$

$$M_{red} = 0,3M, \quad (Д.41)$$

где $\varphi_и$ — коэффициент ослабления при изгибе.




а) Эскиз конструкции б) Расчетная схема

Рисунок Д.15 — Крышка и перфорированная плита

**Д.1.6 Линейно-спектральный метод расчета**

Д.1.6.1 В основу линейно-спектрального метода положен метод приведения, который позволяет свести линейную систему с $N$ степенями свободы к $N$ эквивалентным системам с одной степенью свободы, наложение колебаний которых дает в сумме колебание исходной системы.

Д.1.6.2 Для использования метода приведения следует вычислять собственные значения и векторы системы однородных алгебраических уравнений вида

$$\left([C]-\frac{1}{\lambda}[M]\right)\{x\}_j = 0,\ j = 1,2,\ldots,N, \tag{Д.42}$$

где $\{x\}_j = \{x_{1j}\ldots x_{ij}\ldots x_{Nj}\}$ — $j$-й собственный вектор, соответствующий собственному значению $\lambda_j$.

При этом собственная частота $j$-й формы колебаний

$$\omega_j = \sqrt{\frac{1}{\lambda_j}}. \tag{Д.43}$$

Д.1.6.3 При определении сейсмических нагрузок в расчете учитывается $S$ низших форм колебаний ($S \le N$), собственная частота которых не превышает наибольшую частоту, для которой заданы спектры ответа.

Д.1.6.4 Сейсмическую нагрузку, действующую в направлении $i$-й обобщенной координаты и соответствующую $j$-й форме собственных колебаний системы, следует вычислять по формуле

$$S_{ij} = m_{ii}\ddot{\varphi}_j\Phi_j x_{ij}, \tag{Д.44}$$

где $\ddot{\varphi}_j$ — ускорение, определенное по спектру ответа для частоты $\omega_j$;

$\Phi_j = \dfrac{\sum\limits_{i=1}^{N} m_{ii}x_{ij}\cos\alpha_i}{\sum\limits_{i=1}^{N} m_{ii}x_{ij}^2}$ — постоянная $j$-й формы колебаний;

$\alpha_i$ — угол между направлениями сейсмического воздействия и $i$-й обобщенной координаты.

Д.1.6.5 Внутренние усилия (напряжения) в связях расчетной модели вычисляют от действия статически приложенных в узлах сейсмических нагрузок $S_{ij}$ раздельно и суммируют для каждой формы колебаний по формуле

$$N_k^p = \sqrt{\sum_{j=1}^{s} N_{kj}^2}, \tag{Д.45}$$

где $N_k^p$ — расчетное усилие в $k$-м рассматриваемом сечении;

$N_{kj}$ — усилие определенного вида в сечении $k$ для $i$-й формы колебаний.

Д.1.6.6 Относительные перемещения расчетной модели в направлении *i*-й обобщенной координаты *j*-й формы колебаний следует вычислять по формуле

$$q_{ij} = \frac{1}{\omega_j^2}\ddot{\varphi}_j \Phi_j x_{ij}. \quad (Д.46)$$

Расчетное значение перемещения в направлении *i*-й обобщенной координаты

$$q_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{s} q_{ij}^2}. \quad (Д.47)$$

Эта зависимость может быть использована для определения скоростей и ускорений, если одновременно выполнено условие

$$\frac{\omega_k - \omega_{k-1}}{\omega_k} > 0{,}1. \quad (Д.48)$$

В случае, если это условие не выполнено, то расчетное значение следует вычислять по формуле

$$q_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{s} q_{ij} + \sum_{r=1}^{p}\left\{\sum_{m=1}^{nr}\left|q_{mr}\right|\right\}^2}, \quad (Д.49)$$

где $p$ — количество групп собственных частот, для которых выполняется условие $\frac{\omega_k - \omega_{k-1}}{\omega_k} < 0{,}1$.

Д.1.6.7 Результирующие значения внутренних усилий, напряжений, а также перемещений, скоростей и ускорений в конструкции, которая была представлена совокупностью плоских стержневых расчетных моделей и рассчитывалась отдельно по каждому из взаимно перпендикулярных направлений, следует вычислять по формуле

$$P_k^p = \sqrt{\sum_{n=1}^{n} P_{kn}^2}, \quad (Д.50)$$

где $P_k^p$ — результирующее значение параметра в *k*-м рассматриваемом сечении (узле);

$P_{kn}$ — значение параметра определенного вида в *k*-м сечении (узле), полученное для *n*-го направления перемещений.

При этом должны быть учтены условия, оговоренные в Д.1.6.6.

Данный способ суммирования может быть также применен при использовании других методов расчета.

**Д.1.7 Метод динамического анализа сейсмостойкости**

Д.1.7.1 При проведении расчетов методом динамического анализа в качестве внешнего сейсмического воздействия задаются акселерограммы движения оснований (опор) расчетной модели.

Д.1.7.2 Динамический анализ систем с конечным числом степеней свободы, в том числе нелинейных при одинаковой закономерности кинематического возбуждения опор, следует проводить методами численного интегрирования систем дифференциальных уравнений вида

$$[M]\{\ddot{x}\} + [B]\{\dot{x}\} + [C]\{x\} + R = -\ddot{\psi}(t)[M]\{\cos\alpha\}. \quad (Д.51)$$

Д.1.7.3 Вектор реактивных сил {*R*}, действующих в направлении обобщенных координат системы, представляет собой сумму реакций дополнительных нелинейных связей системы: демпферов, амортизаторов, упругих упоров с зазорами (включающихся связей), элементов сухого трения и т. п.

Д.1.7.4 Результирующий вектор внешних нагрузок, действующих на систему в любой момент времени, следует вычислять по формуле

$$\{F\} = |C|\{x\}. \quad (Д.52)$$

Д.1.7.5 По вычисленному значению вектора {*F*} следует вычислять внутренние усилия и напряжения в расчетных сечениях системы.

**Д.2 Методики расчета трубопроводов на сейсмические воздействия**

**Д.2.1 Общие положения**

Д.2.1.1 Приведенные в настоящем разделе методики могут быть использованы для расчета трубопроводов категории II.

Д.2.1.2 Методики основаны на статистической теории сейсмостойкости конструкций.

**Д.2.2 Методика расчета трубопроводов по спектрам ответа**

Д.2.2.1 В настоящем приложении применены следующие дополнительные условные обозначения:

*x*, *y*, *z* — индексы системы координат трубопровода;

$(\sigma_s)_{s2}$ — группа приведенных мембранных и общих изгибных напряжений только от сейсмических воздействий (спектра ответа ПЗ);

$(\sigma_s)_{s2,x}$, $(\sigma_s)_{s2,y}$, $(\sigma_s)_{s2,z}$ — компоненты напряжения $(\sigma_s)_{s2}$;

$\sigma_{mas,x(y,z)}$ — максимальное приведенное напряжение в трубопроводе от нагрузок собственной массы, приложенной по осям $x$, $y$, $z$;

$f_{1,x(y,z)}$ — первая собственная частота колебаний относительно оси $x$ ($y$ или $z$);

$K_h$ — коэффициент изменения максимального ускорения (сейсмического воздействия) по высоте сооружения;

$A^0_{\max,\ x(y,z)}$ — коэффициент, равный значению максимального ускорения в долях $g$ по спектру ответа ПЗ для нулевой отметки при направлении сейсмического воздействия;

$A^h_{\max,\ x(y,z)}$ — коэффициент, равный значению максимального ускорения в долях $g$ по спектру ответа ПЗ для максимальной отметки закрепления неподвижной опоры трубопровода;

$A^h_{f1,x(y,z)}$ — коэффициент, равный значению ускорения в долях $g$ для соответствующей первой собственной частоты по спектру ответа ПЗ, при направлении сейсмического воздействия $x(y, z)$ с учетом максимальной отметки закрепления неподвижной опоры трубопровода;

$\delta^s_{j,x(y,z)}$ — перемещение центра тяжести $j$-го участка трубопровода от сейсмических воздействий по оси $x(y, z)$;

$\delta^{x(y,z)}_j$ — перемещение центра тяжести $j$-го участка трубопровода от нагрузок собственной массы по оси $x(y, z)$.

Д.2.2.2 В таблице Д.5 приведены значения коэффициента $K_h$ для АЭУ с ВВЭР.

Таблица Д.5 — Коэффициент $K_h$ для АЭУ с ВВЭР

| Характеристика сооружения | Максимальная отметка закрепления трубопровода | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 м | | 20 м | | 30 м | | 40 м | |
| | Горизонтальные компоненты | Вертикальная компонента | Горизонтальные компоненты | Вертикальная компонента | Горизонтальные компоненты | Вертикальная компонента | Горизонтальные компоненты | Вертикальная компонента |
| Бокс (массивная железобетонная конструкция) | 1,2 | 1,0 | 1,5 | 1,2 | 1,75 | 1,6 | 2,0 | 2,0 |
| Оболочка (защитная) | 1,2 | 1,0 | 1,6 | 1,2 | 2,0 | 1,6 | 2,5 | 2,0 |
| Пространственная стержневая конструкция (каркасная компоновка несущих элементов) | 1,4 | 1,4 | 1,8 | 1,8 | 2,25 | 2,2 | 3,0 | 3,0 |
| Примечание — Данная таблица применима для грунтов, имеющих модуль упругости $E \geq 10^4$ МПа. При $E < 10^5$ МПа значения коэффициента $K_h$ из этой таблицы следует умножить на 1,5. | | | | | | | | |

Д.2.2.3 Расчет трубопроводов на сейсмические воздействия следует проводить после выполнения расчетов на статические и циклические нагрузки и подтверждения их прочности при этих нагрузках.

Данный метод расчета заключается в статическом расчете напряжений $(\sigma_s)_{s2}$ в компонентах трубопровода.

Расчет следует проводить с использованием программ и результатов статических расчетов трубопроводов на прочность. При этом к обычным статическим расчетам добавляется расчет при проектировании массовых нагрузок на координатные оси $x$, $y$, $z$.

Для программ, где предусмотрено задание нагрузки от собственной массы только в одном (вертикальном) направлении, необходимо изменить направления осей координат так, чтобы нагрузка собственной массы могла быть задана и в горизонтальном направлении.

Расчет $\sigma_{mas,x(y,z)}$ следует проводить при температуре 20 °С, нулевых значениях «собственных» смещений концевых защемленных сечений и внутреннем давлении, равном нулю.

Расчет следует проводить для модуля упругости материала, соответствующего расчетной температуре стенки трубопровода.

Расчеты на прочность, а также выбор дополнительных опор, необходимых для обеспечения прочности при сейсмических воздействиях, проводятся отдельно для каждого направления сейсмического воздействия.

Для оценки прочности при совместном действии трехкомпонентного сейсмического воздействия напряжения от сейсмических нагрузок вычисляют как корень квадратный из суммы квадратов напряжений от сейсмических нагрузок, полученных для отдельных направлений сейсмического воздействия.

При автоматизированных расчетах суммарные приведенные напряжения от учитываемых статических и сейсмических нагрузок вычисляют по усилиям, полученным от совместного действия этих нагрузок.

Сейсмическое воздействие задаются спектрами ответа ПЗ.

Рекомендации по выбору расчетных схем трубопроводной системы следующие:

- при раздельном рассмотрении колебаний трубопроводов относительно любой из трех координатных осей ($x$, $y$, $z$) учитываются только те опоры, которые ограничивают перемещения трубопроводов по этой оси;
- расчетную схему трубопроводной системы следует составлять с учетом всех ответвлений и присоединенного оборудования; влияние невключенных в расчетную схему ответвлений должно быть учтено в виде присоединенных масс и соответствующих связей.

Д.2.2.4 Критерий сейсмической прочности следует определять с учетом требований таблицы 15.1. Значения этого критерия следует вычислять по зависимости

$$B_{x(y,z)} = \frac{1{,}9[\sigma] - (\sigma)_2}{(\sigma_s)_{s2}}. \qquad (Д.53)$$

Условия прочности трубопровода

$$B_{x(y,z)} \geq 1. \qquad (Д.54)$$

Д.2.2.5 Для проведения расчетов необходимы следующие исходные данные:

- геометрические и эксплуатационные параметры трубопроводной системы;
- жесткостные характеристики опор;
- значения напряжения $(\sigma)_2$ по результатам статических расчетов на прочность трубопроводов для режимов нормальных условий эксплуатации;
- спектры ответов ПЗ на нулевой отметке и на отметках закрепления неподвижных опор трубопроводов.

Д.2.2.6 Расчет следует проводить в следующей последовательности:

а) определяют $(\sigma_s)_{s2}$ для направлений сейсмических воздействий ПЗ, совпадающих с направлением действия нагрузок собственной массы, проецируемых на координатные оси трубопроводной системы;

б) проводят оценку прочности трубопровода по критерию сейсмической прочности (Д.54);

в) проверяют прочность опорных конструкций с учетом нагрузок от сейсмических воздействий;

г) положительное заключение о прочности дается при условии выполнения требований прочности по этапам перечислений б) и в).

Д.2.2.7 Расчет напряжений от сейсмических нагрузок следует проводить по следующим зависимостям:

- при отсутствии спектра ответа на отметке закрепления неподвижных опор

$$(\sigma_s)_{s2,x} = 1{,}3A^0_{\max,x}K_h\sigma_{mas,x} \qquad (Д.55)$$

и так же для других направлений сейсмического воздействия;

- при наличии спектра ответа для отметки закрепления неподвижных опор

$$(\sigma_s)_{s2,x} = 1{,}3A^h_{\max,x}\sigma_{mas,x} \qquad (Д.56)$$

и так же для других направлений сейсмического воздействия;

- если условие прочности (Д.54) не выполняется, следует проводить расчет с учетом первой собственной частоты колебаний

$$(\sigma_s)_{s2,x} = 1{,}3A^h_{f1,x}\sigma_{mas,x} \qquad (Д.57)$$

и так же для других направлений сейсмического воздействия.

Первую собственную частоту колебаний для конкретного направления сейсмического воздействия допускается определять с использованием значений перемещений, полученных в результате расчетов при воздействии на трубопровод нагрузок собственной массы, проецируемых на координатные оси $x$ ($y$ или $z$)

$$f_{1,x} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{g\frac{\sum\limits_{j=1}^{n} G_j\delta_j^x}{\sum\limits_{j=1}^{n} G_j\left(\delta_j^x\right)^2}}, \qquad (Д.58)$$

где $G_j$ — вес $j$-го отрезка трубопровода с пролета между соответствующими точками схемы, применяемой для статических расчетов;

$\delta^x_j(\delta^y_j, \delta^z_j)$ — перемещения центра тяжести $j$-го отрезка при воздействии на трубопровод нагрузок собственной массы, проецируемой на одно из направлений осей координат по формуле (например, по оси $x$);

$$\delta_j^x = \sqrt{\left(\delta_{j,x}^x\right)^2 + \left(\delta_{j,y}^x\right)^2 + \left(\delta_{j,z}^x\right)^2}, \quad (Д.59)$$

где $\delta_{j,x}^x$, $\delta_{j,y}^x$, $\delta_{j,z}^x$ — проекции перемещений $j$-го сечения на ось $x$ от нагрузок собственной массы, приложенных по оси $x$.

Для других направлений сейсмического воздействия расчет частоты выполняется аналогично.

Для случаев, когда все входящие в состав расчетной схемы ответвления значительно различаются по жесткостным и инерционным характеристикам, расчет частот $f_{1,x}$, $f_{1,y}$, $f_{1,z}$ следует проводить для каждого ответвления по перемещениям, создаваемым нагрузками собственной массы при учете совместной работы всех ответвлений.

Для трубопроводов, содержащих ответвления, у которых параметр вида $\sqrt{EJ/M_1}$ отличается от соответствующего параметра магистрального трубопровода не более чем в два раза, оценку сейсмической прочности следует проводить по первой собственной частоте ($f_x$, $f_y$, $f_z$).

Для расчета указанных частот могут быть использованы и другие методы, которые хорошо согласуются с возможностями программы статического расчета.

Если условия прочности не выполняются, то устанавливаются дополнительные опоры или амортизаторы в направлении тех координатных осей, для которых условия прочности не выполняются. Затем по схеме с дополнительными опорами и амортизаторами повторяется статический расчет трубопровода на самокомпенсацию и повторно проводятся расчеты на сейсмические воздействия по Д.2.2.6.

Д.2.2.8 Коэффициенты эквивалентности сейсмических нагрузок статическим следует вычислять по формулам:

$$K_x = \frac{(\sigma_s)_{s2,x}}{\sigma_{mas,z}}; \quad K_y = \frac{(\sigma_s)_{s2,y}}{\sigma_{mas,z}}; \quad K_z = \frac{(\sigma_s)_{s2,z}}{\sigma_{mas,z}}. \quad (Д.60)$$

Для неподвижных опор и оборудования сейсмическую нагрузку следует вычислять как произведение статических нагрузок от режимов нормальных условий эксплуатации и коэффициентов $K_x$, $K_y$, $K_z$:

$$\left.\begin{aligned} \pm M_x^s = M_x K_x;\ \pm Q_x^s = Q_x K_x; \\ \pm M_y^s = M_y K_y;\ \pm Q_y^s = Q_y K_y; \\ \pm M_z^s = M_z K_z;\ \pm N^s = N K_z \end{aligned}\right\}, \quad (Д.61)$$

где $M$, $Q$, $N$ — момент, поперечная и продольная силы.

Следует принимать, что сейсмические нагрузки совпадают по знаку со статическими нагрузками от режимов нормальных условий эксплуатации.

Д.2.2.9 Значение сейсмической нагрузки на промежуточные скользящие опоры или простые подвески следует вычислять по зависимости

$$\pm N^s = N_j K_z, \quad (Д.62)$$

где $N_j$ — нагрузка на эту опору по результатам статических расчетов от режимов нормальных условий эксплуатации.

Для определения дополнительных нагрузок на пружинные опоры вводится коэффициент $K_0^s$

$$K_0^s = K_z + 0{,}7\sqrt{K_x^2 + K_y^2}. \quad (Д.63)$$

Сейсмические нагрузки для этого случая равны усилиям на опоры от статических нагрузок режимов нормальных условий эксплуатации, умноженным на коэффициент $K_0^s$, т. е.

$$\pm N_j^s = K_0^s N_j. \quad (Д.64)$$

Д.2.2.10 Процедуры назначения мероприятий сейсмозащиты проводятся, если сейсмопрочность не обеспечена, и сводятся к следующему:

- выбирают тип дополнительных опор: неподвижные опоры (тогда схема разбивается на несколько самостоятельных), промежуточные скользящие опоры, простые или пружинные подвески, амортизаторы;
- определяются места установки опор или амортизаторов, их предварительное количество и в соответствии с Д.2.2.4 находятся критерии сейсмической прочности $B_{x(y,z)}$.

Приняв всю длину трубопровода за $L$, считается, что при $B_x = 1$ длина проекции трубопровода на ось $x$, равная $L_x$, удовлетворяет условию сейсмической прочности.

При $B_x < 1$ условие сейсмической прочности не выполняется, соответственно длина $L_x$ может содержать два или более участков, а число дополнительных опор или амортизаторов на длине $L_x$ более или равно единице. Длина участка, удовлетворяющая условию сейсмической прочности:

$$l_x = B_x L_x. \quad (Д.65)$$

Тогда необходимое число дополнительных опор или амортизаторов $n = L_x/l_x$ (число опор округляется до целого в большую сторону). Это минимальное число опор, при котором, возможно, будет удовлетворяться условие сейсмической прочности.

Места установки опор определяют конструктивно, причем длина межопорных участков должна быть не менее $l_x$;

- проводят статический расчет $\sigma_{mas}$ для той координатной оси, относительно которой устанавливаются дополнительные опоры или амортизаторы;

- проверяют условие сейсмической прочности в соответствии с Д.2.2.6.

Окончательное число амортизаторов определяют после поверочного расчета.

Целесообразно унифицировать мощность амортизаторов по значению максимальных усилий.

В тех случаях, когда требуется проводить оценку сейсмостойкости по перемещениям, для расчета перемещений от сейсмических нагрузок допускается использовать формулу вида

$$\delta^s_{j,x} = 1{,}3A^h_{f1,x(y,z)}\delta_j^{x(y,z)}. \quad (Д.66)$$

В случае отсутствия поэтажных спектров ответа расчеты перемещений могут быть выполнены по формуле

$$\delta^s_{j,x} = 1{,}3A^0_{f1,x(y,z)}K_h\delta_j^{x(y,z)} \quad (Д.67)$$

или

$$\delta^s_{j,x} = 1{,}3A^0_{\max,\ x(y,z)}K_h\delta_j^{x(y,z)}. \quad (Д.68)$$

Суммарные перемещения от сейсмических нагрузок в каждом $j$-м сечении трубопровода допускается рассчитывать по зависимости

$$\delta^s_j = \sqrt{\left(\delta^s_{j,x}\right)^2 + \left(\delta^s_{j,y}\right)^2 + \left(\delta^s_{j,z}\right)^2}. \quad (Д.69)$$

**Д.2.3 Методика расчета трубопроводов по обобщенной сейсмической нагрузке**

Д.2.3.1 Выполняют три отдельных расчета трубопровода на действие весовой нагрузки (расчеты 1, 2, 3). Нагрузка поэтапно прикладывается в вертикальном (по оси $z$) и двух горизонтальных направлениях (по осям $x$ и $y$). В каждом отдельном расчете вычисляют приведенные напряжения $(\sigma)_x$, $(\sigma)_y$, $(\sigma)_z$, усилия в опорах и составляющие перемещения сечений трубопровода в направлении главных осей ($x$, $y$, $z$). Давление в трубопроводе и усилия затяжки упругих опор принимают равными нулю. При расчетах учитывают жесткости всех опор и амортизаторов.

Д.2.3.2 Приближенное значение первой собственной частоты колебаний трубопровода следует вычислять по формуле

$$f_1 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{\delta_{\max}}}, \quad (Д.70)$$

где $\delta_{\max}$ — максимальное абсолютное значение составляющих перемещений трубопровода по одной из осей при действии весовой нагрузки отдельно по каждому из принятых направлений.

Д.2.3.3 Результирующее значение спектрального ускорения следует вычислять по формуле

$$A_p = \sqrt{A_x^2(f_1) + A_y^2(f_1) + A_z^2(f_1)}, \quad (Д.71)$$

где $A_x(f_1)$, $A_y(f_1)$, $A_z(f_1)$ — ускорения (в долях $g$), определенные по спектрам ответа ПЗ при частоте $f_1$, заданных для трех направлений сейсмического воздействия на наивысшей отметке закрепления трубопровода.

Д.2.3.4 Значения приведенных напряжений в сечениях трубопровода от действия сейсмических и эксплуатационных нагрузок следует вычислять по формуле

$$(\sigma_s)_2 = A_p\sqrt{(\sigma)_x^2 + (\sigma)_y^2 + (\sigma)_z^2} + (\sigma)_2, \quad (Д.72)$$

где $(\sigma)_x$, $(\sigma)_y$, $(\sigma)_z$ — приведенные напряжения, полученные расчетами 1, 2, 3.

Для прямолинейных отрезков трубопровода допускается вычислять напряжение $(\sigma_s)$ следующим образом:

если $A_p\sqrt{(\sigma)_x^2 + (\sigma)_y^2 + (\sigma)_z^2} \le 0{,}5\sigma_\theta$, то

$$(\sigma_s)_2 = \sigma_\theta; \quad (Д.73)$$

если $A_p\sqrt{(\sigma)_x^2 + (\sigma)_y^2 + (\sigma)_z^2} > 0{,}5\sigma_\theta$, то

$$(\sigma_s)_2 = A_p\sqrt{(\sigma)_x^2 + (\sigma)_y^2 + (\sigma)_z^2} + 0{,}5\sigma_\theta, \quad (Д.74)$$

где $\sigma_\theta$ — кольцевое общее мембранное напряжение в трубе от расчетного давления.

Д.2.3.5 Усилия воздействия трубопровода на оборудование при совместном действии эксплуатационных и сейсмических нагрузок следует вычислять по формуле

$$Q_s = A_p\sqrt{Q_x^2 + Q_y^2 + Q_z^2} + |Q|, \quad (Д.75)$$

где $Q_s$ — компонента вектора усилий (любая из сил по осям $x$, $y$, $z$, любой момент относительно осей $x$, $y$, $z$) при совместном действии нагрузок;

$Q$ — значение той же компоненты, определяемое расчетом трубопровода на действие только эксплуатационных нагрузок;

$Q_x$, $Q_y$, $Q_z$ — значения той же компоненты, определенные в расчетах 1, 2, 3.

Д.2.3.6 Нагрузки $P_{sz}$ (по оси $z$) упругих (пружинных) подвесок при совместном действии сейсмических и эксплуатационных нагрузок следует вычислять по формуле

$$P_{sz} = K_0 A_p \sqrt{\delta_{zx}^2 + \delta_{zy}^2 + \delta_{zz}^2} + P, \quad (Д.76)$$

где $\delta_{zx}$, $\delta_{zy}$, $\delta_{zz}$ — перемещения по оси $z$ трубопровода в месте установки подвески, определяемые в расчетах 1, 2, 3;

$P$ — нагрузка подвески по оси $z$ при нормальных условиях эксплуатации;

$K_0$ — коэффициент жесткости подвески.

Д.2.3.7 Реакции опор скольжения и направляющих опор вычисляют аналогично Д.2.2.6. Например, реакцию по оси $z$ следует вычислять по формуле

$$P_s = A_p \sqrt{R_{zx}^2 + R_{zy}^2 + R_{zz}^2} + |R|, \quad (Д.77)$$

где $R_{zx}$, $R_{zy}$, $R_{zz}$ — реакции опоры по оси $z$, определяемые в расчетах 1, 2, 3;

$R$ — реакция опоры по оси $z$, определяемая расчетом трубопроводов на действие только эксплуатационных нагрузок.

Д.2.3.8 Реакцию амортизатора следует определять по Д.2.3.7, причем его реакция при эксплуатационных нагрузках следует принимать равной нулю.

Д.2.3.9 Оценку сейсмопрочности по полученным приведенным напряжениям $(\sigma_s)_2$ следует проводить в соответствии с 15.1.

### Д.3 Расчет на устойчивость при сейсмическом воздействии

#### Д.3.1 Цилиндрическая оболочка под действием изгибающей нагрузки

Формулы применимы для расчета гладких цилиндрических оболочек без продольных ребер жесткости под действием нагрузки, вызывающей изгибающей момент $M$ в заделанном поперечном сечении оболочки.

Формулы применимы при выполнении условия

$$0,002 \le \frac{s-c}{D_m} \le 0,015. \quad (Д.78)$$

Расчетное максимальное напряжение сжатия при изгибе следует вычислять по формуле

$$\sigma_c = \frac{4M}{\pi D_m^2 (s-c)}. \quad (Д.79)$$

Расчет проводят только по критическому напряжению второго рода, которое следует вычислять по формуле

$$\sigma_{kr} = 1,5 E^T \frac{s-c}{D_m}. \quad (Д.80)$$

Допускаемое напряжение сжатия при изгибе

$$[\sigma_c]_s = k\xi^* \sigma_{kr}, \text{ если } \xi^* \sigma_{kr} < R_{p0,2}^T;$$
$$[\sigma_c]_s = k R_{p0,2}^T, \text{ если } \xi^* \sigma_{kr} < R_{p0,2}^T, \quad (Д.81)$$

где $\xi^* = 0,25$;

$k$ следует принимать:

- 0,6 — для сочетаний эксплуатационных нагрузок с ПЗ;
- 0,7 — для сочетаний эксплуатационных нагрузок с МРЗ.

Устойчивость цилиндрической оболочки при сейсмическом воздействии обеспечена, если выполняется условие $\sigma_c \le |\sigma_c|_s$.

#### Д.3.2 Цилиндрическая оболочка при сдвиге под действием поперечной силы

Формулы применимы для расчета гладких цилиндрических оболочек, нагруженных поперечным (перерезывающим) усилием $Q$, действующем на расстоянии $L$ от заделанного поперечного сечения оболочки, при выполнении условий:

$$0,002 \le \frac{s-c}{D_m} \le 0,015; \; L \le 2D_m. \quad (Д.82)$$

Расчетное максимальное касательное напряжение в оболочке следует вычислять по формуле

$$\tau = \frac{2Q}{\pi D_m (s-c)}. \quad (Д.83)$$

Критическое касательное напряжение следует вычислять по формулам:

$$\tau_{kr} = 4{,}5E\frac{s-c}{D_m L}\sqrt{D_m(s-c)} \text{ при } 2{,}5\sqrt{D_m(s-c)} \le L \le 10\sqrt{D_m(s-c)}; \quad (Д.84)$$

$$\tau_{kr} = 1{,}36E\frac{s-c}{D_m}\sqrt[4]{\frac{D_m(s-c)}{L^2}} \text{ при } 10\sqrt{D_m(s-c)} \le L \le 2{,}1D_m\sqrt{D_m/(s-c)}. \quad (Д.85)$$

Допускаемое касательное напряжение следует вычислять по формулам:

$$[\tau]_s = k\xi^*\tau_{kr}, \text{ если } \xi^*\tau_{kr} < 0{,}6R^T_{p0,2};$$
$$[\tau]_s = k \cdot 0{,}6R^T_{p0,2}, \text{ если } \xi^*\tau_{kr} \ge 0{,}6R^T_{p0,2}, \quad (Д.86)$$

где $\xi^* = 0{,}7$;

$k$ следует принимать:

- 0,6 — для сочетаний эксплуатационных нагрузок с ПЗ;
- 0,7 — для сочетаний эксплуатационных нагрузок с МРЗ.

Устойчивость цилиндрической оболочки при сейсмическом воздействии обеспечена, если выполняется условие $\tau \le [\tau]_s$.

## Приложение Е
## (рекомендуемое)

## Расчетно-экспериментальные методы оценки вибропрочности типовых элементов конструкций

### Е.1 Общие положения

Е.1.1 Настоящее приложение содержит рекомендуемые методы расчетной и экспериментальной оценки параметров вибраций и вибропрочности оборудования и трубопроводов атомных электростанций.

Е.1.2 Настоящее приложение содержит методы расчетной оценки собственных частот колебаний типовых элементов и экспериментальные методы определения вибронапряженности узлов на моделях и натурных элементах конструкций.

Е.1.3 Для оценки собственных частот колебаний элементов оборудования в настоящем приложении представлен ряд расчетных схем, относящихся к наиболее типичным узлам, таким, как трубопроводы (стержневые системы), пластинки и пологие оболочки.

Е.1.4 Для оценки уровня вибраций и вибронапряженности в случае отсутствия расчетных методик и сведений о параметрах действующих динамических нагрузок предлагаются методы экспериментальных исследований, которые проводятся во всех режимах, предусмотренных программой пусконаладочных работ, включая начальный этап эксплуатации установок в стационарных режимах.

Е.1.5 В качестве основного условия вибропрочности элементов конструкций рекомендуется частотная отстройка собственных колебаний от частот детерминированного возбуждения.

На основании экспериментальных данных о вибронапряженном состоянии элементов конструкций предлагается проведение расчета их долговечности.

Е.1.6 В качестве детерминированных частот возбуждения принимают:

- основную частоту вращения вала насоса

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}, \tag{Е.1}$$

где $n$ — число оборотов вала, мин$^{-1}$;

- частоту гидродинамических сил, определяемую количеством лопаток $Z$ рабочего колеса насоса

$$\omega = \frac{2\pi Z n}{60}; \tag{Е.2}$$

- частоту гидродинамических сил, связанную со срывом вихрей при поперечном обтекании теплоносителем элементов конструкций

$$\omega = \frac{2\pi St\upsilon}{d}, \tag{Е.3}$$

где $St$ — безразмерное число Струхаля (например, для одиночного стержня его следует принимать равным 0,2, для чисел Рейнольдса $300 \div 5 \cdot 10^5$);

$\upsilon$ — скорость потока;

$d$ — характерный размер обтекаемого элемента в поперечном сечении.

Е.1.7 Возбуждение, связанное с пульсациями давлений и скоростей потока теплоносителя, в частности возникающими при обтекании элементов конструкций, в общем случае рассматривают как процесс нагружения с широкополосным спектром, имеющим случайный характер.

В этом случае вибропрочность оценивается расчетом долговечности элементов по значениям амплитуд переменных напряжений, полученным экспериментально на моделях или натурных конструкциях или расчетом с использованием аналитических методик и методов вычислительной динамики жидкости (*CFD*).

Е.1.8 В настоящем приложении не рассматриваются вопросы, связанные с истиранием и износом элементов, вызываемыми вибрациями.

Е.1.9 Для сложных случаев расчета собственных частот колебаний пространственных и разветвленных стержневых систем могут быть использованы приближенные методики и рабочие программы, основанные на энергетическом и других методах.

Е.1.10 При составлении схем (моделей) для расчета собственных частот колебаний конструктивные узлы реакторов, парогенераторов и трубопроводов следует представлять в виде простых элементов, таких, как стержневые системы, пластинки и пологие оболочки.

Е.1.11 Системы трубопроводов, трубки, сплошные цилиндры, несущие балки произвольного сечения в расчетах следует рассматривать как балки или стержневые системы с заданными граничными условиями. Тепловые экраны — как пологие оболочки. Пластины, опорные плиты — как пластинки.

Е.1.12 Запорно-регулирующую арматуру, установленную на трубопроводах и других конструктивных элементах, рассматривают в расчетах как сосредоточенные массы.

Е.1.13 Расчет собственных колебаний элементов проводят с учетом присоединенной массы теплоносителя, но без учета его движения при условии, что скорость потока

$$\upsilon \le 0{,}3\upsilon_{kr}, \tag{Е.4}$$

где $\upsilon_{kr} = \frac{1}{l}\sqrt{\frac{\pi EJ}{m}}$ — критическая скорость потока теплоносителя, при которой наступает потеря устойчивости прямолинейного шарнирно опертого элемента трубопровода с длиной пролета $l$;

$m$ — погонная масса теплоносителя;

$EJ$ — изгибная жесткость стержня.

Например, при наружном обтекании одиночного элемента присоединенную массу следует принимать равной массе вытесненной жидкости.

Е.1.14 Расчет собственных частот изгибных колебаний следует проводить без учета демпфирования систем.

**Е.2 Расчет собственных частот колебаний стержневых систем**

Е.2.1 Представленные расчетные схемы относятся только к плоским стержневым системам.

Е.2.2 Собственную частоту, соответствующую $k$-й форме изгибных колебаний стержневых систем с учетом массы теплоносителя, следует вычислять по формуле

$$\Omega_k = \frac{(\alpha l)_k^2}{l^2}\sqrt{\frac{EJ}{m_c + m_T}}, \tag{Е.5}$$

где $\Omega_k = 2\pi \cdot f_k$;

$f_k$ — число колебаний в одну секунду;

$(\alpha l)_k$ — $k$-й корень частотного уравнения;

$EJ$ — изгибная жесткость;

$m_c$, $m_T$ — погонная масса стержня и учитываемого теплоносителя соответственно.

Е.2.3 Для составления частотного уравнения следует использовать общее выражение собственных форм изгибных колебаний

$$X(x) = C_1S(\alpha x) + C_2T(\alpha x) + C_3U(\alpha x) + C_4V(\alpha x), \tag{Е.6}$$

где $X(x)$ — число функция координаты $x$, принимающей значение от 0 до $l$;

$C_1$, $C_2$, $C_3$, $C_4$ — произвольные постоянные, определяемые граничными условиями;

$S(\alpha x)$, $T(\alpha x)$, $U(\alpha x)$, $V(\alpha x)$ — табулированные функции Крылова, определяемые выражениями:

$$\left.\begin{aligned} S(\alpha x) &= \frac{1}{2}(\operatorname{ch}\alpha x + \cos\alpha x);\\ T(\alpha x) &= \frac{1}{2}(\operatorname{sh}\alpha x + \sin\alpha x);\\ U(\alpha x) &= \frac{1}{2}(\operatorname{ch}\alpha x - \cos\alpha x);\\ V(\alpha x) &= \frac{1}{2}(\operatorname{sh}\alpha x - \sin\alpha x). \end{aligned}\right\} \tag{Е.7}$$

В качестве граничных условий в опорных сечениях стержня принимают значения:

- прогиба $X(0,l)$;
- угла поворота $X'(0,l)$;
- момента $EJX''(0,l)$;
- перерезывающей силы $EJX'''(0,l)$,

где $X'(0,l)$, $X''(0,l)$, $X'''(0,l)$ — первая, вторая и третья производные уравнения (Е.6).

Из полученной системы четырех уравнений с учетом (Е.7) составляется определитель из коэффициентов при постоянных $C_1$, $C_2$, $C_3$ и $C_4$ и приравнивается нулю.

Раскрытие определителя дает частотное уравнение, корнями которого является множество значений $(\alpha l)_k$. Для оценочных расчетов ограничиваются нахождением первых двух-трех корней $(\alpha l)$, соответствующих основным формам колебаний. Число подлежащих учету корней частотного уравнения следует определять шириной спектра нагрузок, способных вызвать сколько-нибудь заметные вибрации.

Е.2.4 Для типовых расчетных схем стержневых систем и балок с различными условиями закрепления в таблицах Е.1—Е.3 приведены значения корней частотных уравнений, соответствующих основным формам колебаний.

В таблице Е.1 даны значения корней частотных уравнений однопролетных балок при различных вариантах закрепления. Таблицы Е.2 и Е.3 содержат значения корней частотного уравнения Г-образных участков стержней в зависимости от угла гиба $\psi$ для определения основной собственной частоты колебаний в плоскости, перпендикулярной к плоскости гиба.

Е.2.5 В расчетах стержневых систем со ступенчатым изменением сечений при наличии промежуточных опор и дополнительных масс при составлении частотных уравнений следует учитывать условия сопряжения смежных участков.

Аналитические условия сопряжения записывают в виде:

- равенства перемещений $X_- = X_+$;
- углов поворота $X'_- = X'_+$;
- моментов $(EJX'')_- = (EJX'')_+$;
- перерезывающих сил с учетом реакций опор и сосредоточенных массовых нагрузок $(EJX'')_- = (EJX'')_+ \pm R$.

Таблица Е.1 — Значения $\alpha l$ для стержней с различными условиями крепления

| Схема стержня | Номер формы колебаний | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Оперт—оперт  | 3,142 | 6,283 | 9,425 | 12,566 |
| Защемлен—защемлен  | 4,730 | 7,853 | 10,996 | 14,137 |
| Защемлен—оперт  | 3,927 | 7,069 | 10,210 | 13,352 |
| Защемлен—свободен  | 1,875 | 4,694 | 7,855 | 10,996 |
| Свободен—свободен  | 0 | 4,730 | 7,853 | 10,996 |
| Свободен—оперт  | 0 | 3,927 | 7,069 | 10,210 |
| Левый не может поворачиваться, в остальном свободен, правый оперт  | 1,571 | 4,712 | 7,854 | 10,996 |
| Левый и правый не могут поворачиваться, в остальном свободны  | 3,142 | 6,283 | 9,425 | 12,566 |
| Левый защемлен, правый не может поворачиваться, в остальном свободен  | 2,365 | 5,498 | 8,639 | 11,781 |
| Левый свободен, правый не может поворачиваться, в остальном свободен  | 2,365 | 5,498 | 8,639 | 11,781 |

Таблица Е.2 — Значения $\alpha l$ Г-образных стержней с защемленными концами

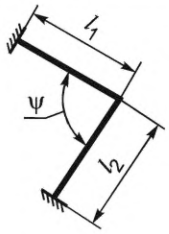
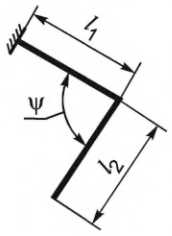
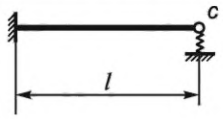
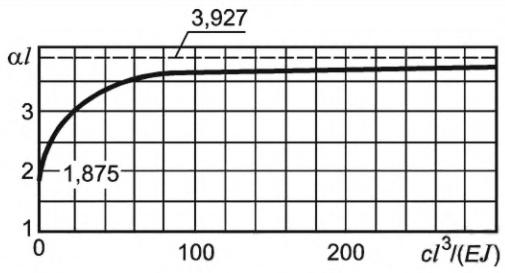
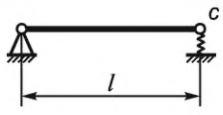
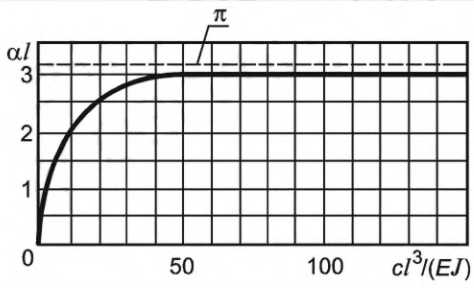
| Схема стержня | ψ, град | $l_1/l = l_1/(l_1 + l_2)$ | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 0,10 | 0,15 | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | 0,50 |
|  | 0 | 4,730 | 5,030 | 5,317 | 5,727 | 5,786 | 5,193 | 4,570 | 4,118 | 3,843 | 3,750 |
| | 30 | 4,730 | 4,987 | 5,244 | 5,680 | 5,486 | 5,004 | 4,473 | 4,091 | 3,869 | 3,781 |
| | 60 | 4,730 | 4,896 | 5,060 | 5,165 | 5,074 | 4,737 | 4,375 | 4,100 | 3,933 | 3,877 |
| | 90 | 4,730 | 4,810 | 4,903 | 4,939 | 4,847 | 4,635 | 4,399 | 4,209 | 4,091 | 4,046 |
| | 120 | 4,730 | 4,756 | 4,801 | 4,809 | 4,758 | 4,648 | 4,518 | 4,422 | 4,339 | 4,306 |
| | 150 | 4,730 | 4,733 | 4,747 | 4,748 | 4,732 | 4,702 | 4,662 | 4,626 | 4,600 | 4,591 |
| | 180 | 4,730 | 4,730 | 4,730 | 4,730 | 4,730 | 4,730 | 4,730 | 4,730 | 4,730 | 4,730 |

Таблица Е.3 — Значения $\alpha l$ Г-образных стержней с односторонним защемлением $l = (l_1 + l_2)$

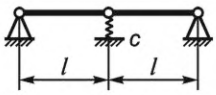
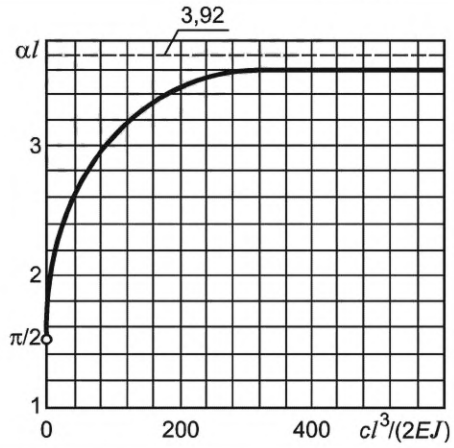
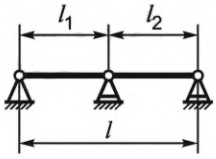
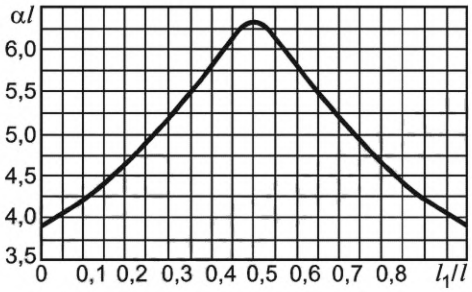
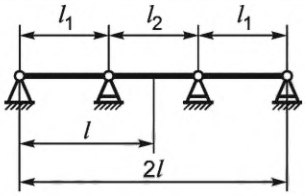
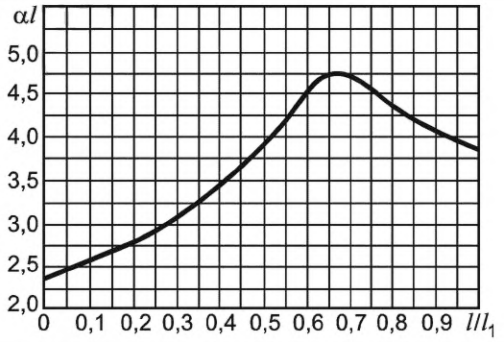
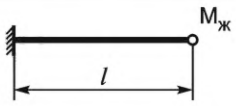
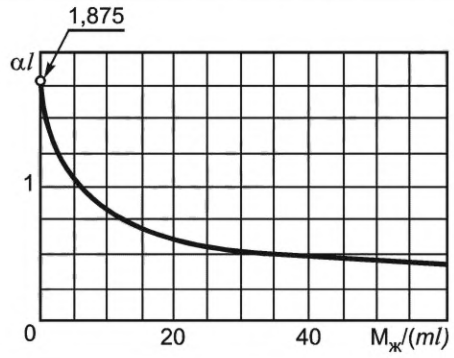
| Схема стержня | ψ, град | $l_1/l_2$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 2/8 | 4/6 | 5/5 | 6/4 | 8/2 | ∞ |
|  | 0 | 1,875 | 2,053 | 2,623 | π | 2,623 | 2,053 | 1,875 |
| | π/3 | 1,875 | 1,946 | 2,226 | 2,362 | 2,316 | 2,005 | 1,875 |
| | π/2 | 1,875 | 1,890 | 2,038 | 2,102 | 2,104 | 1,959 | 1,875 |
| | 2π/3 | 1,875 | 1,868 | 1,929 | 1,962 | 1,967 | 1,915 | 1,875 |
| | π | 1,875 | 1,875 | 1,875 | 1,875 | 1,875 | 1,875 | 1,875 |

В таблице Е.4 приведены графики первых корней частотных уравнений для типовых стержней с промежуточными опорами и сосредоточенными массами.

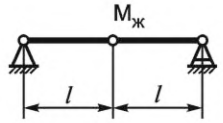
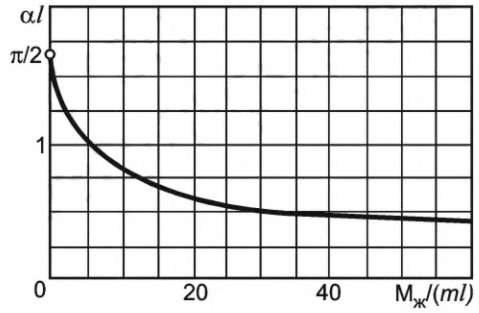
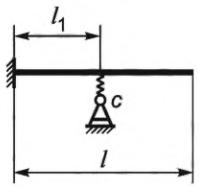
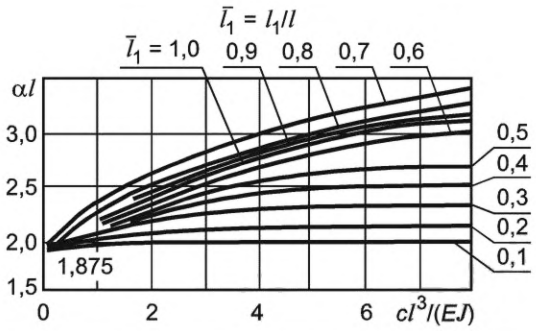
Таблица Е.4 — Значения $\alpha l$ стержневых систем с промежуточными опорами и сосредоточенными массами

| Схема стержня | График |
|---|---|
|  |  |
|  |  |

*Продолжение таблицы Е.4*

| Схема стержня | График |
|---|---|
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

*Окончание таблицы Е.4*

| Схема стержня | График |
|---|---|
|  |  |
|  |  |

### Е.3 Расчет собственных частот колебаний изотропных прямоугольных пластин

Е.3.1 Для пластин, опертых по контуру, собственную частоту колебаний $\Omega$ следует вычислять по формуле

$$\Omega = \pi^2 \left( \frac{m_1^2}{a_1^2} + \frac{m_2^2}{a_2^2} \right) \left( \frac{D}{\rho h} \right)^{\frac{1}{2}}, \tag{Е.8}$$

где $m_1$, $m_2$ = 1, 2, 3, ... — числа полуволн соответствующих форм собственных колебаний;

$a_1$, $a_2$ — размеры сторон;

$D = \dfrac{Eh^3}{12\left(1-\mu^2\right)}$ — цилиндрическая жесткость;

$h$ — толщина пластины;

$\rho$ — плотность материала;

$\mu$ — коэффициент Пуассон.

Е.3.2 Для пластин, опертых по двум противоположным сторонам $x_1 = 0$; $a_1$, при различных условиях на сторонах $x_2 = 0$; $a_2$ собственную частоту следует вычислять по формуле

$$\Omega = \frac{\pi^2 a_2^2}{a_1^2} \cdot \left( \frac{\alpha D}{\rho h} \right)^{\frac{1}{2}}, \tag{Е.9}$$

где $\alpha$ — безразмерный параметр частоты, значения которого для различных граничных условий на сторонах $x_2 = 0$; $a_2$ приведены в таблице Е.5.

Таблица Е.5 — Значения $\alpha$ для различных граничных условий

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Оперт—защемлен | $a_2/a_1$ | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
| | $\alpha$ | 6,85 | 5,92 | 5,51 | 5,41 | 5,50 | 5,74 |
| Оперт—свободен | $a_2/a_1$ | 0,5 | 0,8 | 1,2 | 2,0 | 3,0 | 5,0 |
| | $\alpha$ | 4,40 | 2,15 | 1,14 | 0,70 | 0,56 | 0,51 |

*Окончание таблицы Е.5*

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Защемлен—защемлен | $a_2/a_1$ | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| | $\alpha$ | 9,44 | 7,69 | 7,05 | 7,00 | 7,29 | 7,83 |
| Защемлен—свободен | $a_2/a_1$ | 0,8 | 1,0 | 1,3 | 1,6 | 1,9 | 2,2 |
| | $\alpha$ | 2,70 | 1,70 | 1,41 | 1,33 | 1,36 | 1,45 |

Е.3.3 Для пластин, защемленных по контуру, собственную частоту колебаний следует вычислять по формуле

$$\Omega = \frac{\alpha}{a_1^2} \cdot \left( \frac{D}{\rho h} \right)^{\frac{1}{2}}, \qquad (E.10)$$

где $\alpha$ — безразмерный параметр частоты, значения которого для различных отношений сторон $a_2/a_1$ при различных числах полуволн соответствующих форм колебаний $m_1$ и $m_2$ приведены в таблице Е.6.

Таблица Е.6 — Значения параметра $\alpha$ для защемленной по контуру прямоугольной пластины

| $m_2$ | $a_2/a_1$ | $m_1$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 1 | 35,999 | 73,405 | 131,902 | 210,526 | 309,038 | 428 |
| | 1,5 | 27,012 | 65,5 | 126 | 206 | 303 | 422 |
| | 2 | 24,58 | 64,1 | 124 | 204 | 302 | 421 |
| 2 | 1 | 73,405 | 108,237 | 165,023 | 242,66 | 340,59 | 458,27 |
| | 1,5 | 41,715 | 79,81 | 138,64 | 218 | 316,11 | 436 |
| | 2 | 31,833 | 71,08 | 130,35 | 210 | 308,12 | 427 |
| 3 | 1 | 131,902 | 165,023 | 220,06 | 296,35 | 393,36 | 509,9 |
| | 1,5 | 66,533 | 103 | 161,234 | 241 | 339 | 457 |
| | 2 | 44,779 | 83,2 | 142,38 | 221 | 320,12 | 439 |
| 4 | 1 | 210,526 | 242,66 | 296,35 | 371,38 | 467,29 | 593,8 |
| | 1,5 | 100,81 | 136,096 | 193,24 | 271,17 | 369,34 | 488 |
| | 2 | 63,34 | 100,80 | 159,49 | 238,35 | 337,08 | 456 |
| 5 | 1 | 309,038 | 340,59 | 393,36 | 467,29 | 562,18 | 676 |
| | 1,5 | 144,21 | 178 | 234,65 | 312 | 409 | 529 |
| | 2 | 87,26 | 124,2 | 181,79 | 261 | 358 | 478 |
| 6 | 1 | 428 | 458,27 | 509,9 | 583,83 | 676 | 792,5 |
| | 1,5 | 195 | 230,04 | 285,4 | 361,90 | 456 | 576,6 |
| | 2 | 117 | 151,91 | 209,6 | 287,54 | 382 | 504,3 |

### Е.4 Расчет собственных частот колебаний пологих прямоугольных оболочек

Для свободно опертых пологих оболочек с положительной кривизной и постоянными радиусами кривизны $R_1$ и $R_2$ собственные частоты колебаний следует вычислять по формуле

$$\Omega_{nm} = \alpha_{nm} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \qquad (E.11)$$

где $\alpha_{nm}$ — параметр, определяемый выражением

$$\alpha_{nm}^2 = \frac{\delta^2}{12\left(1-\mu^2\right)}\left[\left(\frac{m\pi}{a_1}\right)^2+\left(\frac{n\pi}{a_2}\right)^2\right]^2+\frac{\left[\frac{1}{R_1}\left(\frac{m\pi}{a_1}\right)^2+\frac{1}{R_2}\left(\frac{n\pi}{a_2}\right)^2\right]^2}{\left[\left(\frac{m\pi}{a_1}\right)^2+\left(\frac{n\pi}{a_2}\right)^2\right]^2}, \quad (E.12)$$

где $\delta$ — толщина оболочки;

$m$, $n$ — число полуволн в направлениях $a_1$, $a_2$ для соответствующих форм колебаний;

$a_1$, $a_2$ — расстояния между краями оболочки вдоль линий с радиусами кривизны $R_1$ и $R_2$.

Для цилиндрической оболочки следует положить $R_1 = \infty$, $R_2 = R$; для сферической оболочки $R_1 = R_2 = R$.

### Е.5 Экспериментальные методы исследования вибраций

#### Е.5.1 Цель экспериментальных исследований

Е.5.1.1 Экспериментальные исследования параметров вибраций (вибродеформаций и вибронапряжений, перемещений, скоростей, ускорений и частотных спектров) элементов конструкций проводят в тех случаях, когда на стадии предварительных расчетов отсутствуют сведения о характеристиках действующих нагрузок и их спектров.

Е.5.1.2 Экспериментальные исследования вибраций проводят с целью:

- определения уровня вибраций оборудования, для которого их предельно допустимые значения оговорены технической документацией;
- определения динамических характеристик элементов конструкций;
- определения параметров вибраций конструкций для последующей оценки их вибропрочности;
- накопления данных, необходимых для разработки и совершенствования методов расчета и проектирования конструкций с учетом вибрационных нагрузок.

#### Е.5.2 Методы исследования

Е.5.2.1 Для определения параметров вибраций и вибронапряженности конструкций применяют методы виброметрирования и динамического тензометрирования.

Е.5.2.2 Выбор метода исследований следует проводить с учетом целей и условий проведения исследований.

#### Е.5.3 Объекты экспериментальных исследований

Е.5.3.1 Экспериментальное определение пиковых, средних или среднеквадратических значений параметров вибраций можно проводить на натурных конструкциях или на их моделях, выполненных в соответствии с требованиями условий подобия по гидродинамике и динамическим свойствам конструкций.

Е.5.3.2 Экспериментальные исследования на моделях и натурных конструкциях при решении задач Е.5.1.1 и Е.5.1.2 могут проводиться на всех стадиях проектирования и отработки конструкций.

#### Е.5.4 Условия проведения эксперимента

Е.5.4.1 В качестве исходной информации при постановке эксперимента должны быть использованы данные по режимам работы конструкций, характеристикам оборудования и параметрам теплоносителя.

Е.5.4.2 На основании исходной информации по объекту испытаний (см. Е.5.4.1) следует проводить предварительный анализ вибронапряженности конструкции с целью определения зон повышенной напряженности и сечений с максимальными виброперемещениями.

Е.5.4.3 В качестве контрольных точек измерений в соответствии с Е.5.4.2 следует выбирать:

- зоны соединений различных конструктивных элементов;
- зоны гибов трубопроводов;
- места крепления (заделок) элементов конструкций;
- сечения с возможными максимальными прогибами при колебаниях по низшим формам.

#### Е.5.5 Виброметрирование

Е.5.5.1 В качестве первичных преобразователей механических колебаний могут быть использованы приборы, в основу которых заложены такие принципы преобразования, как омический, емкостный, индуктивный, индукционный, оптический, пьезоэлектрический и т. д.

Е.5.5.2 Для практического использования применяют преобразователи и вторичную измерительную аппаратуру, имеющие нижнюю граничную частоту начиная с долей или единиц герц.

Е.5.5.3 Для частотного анализа применяют спектроанализаторы с записью уровней вибрационных процессов на соответствующих самописцах.

Е.5.5.4 Терминология и определения основных понятий в области виброизмерительных приборов должны соответствовать ГОСТ 16819.

Е.5.5.5 Выбор виброизмерительных приборов для проведения экспериментальных исследований должен удовлетворять требованиям документов по стандартизации.

Е.5.5.6 Методы и средства поверки виброизмерительных устройств с пьезоэлектрическими измерительными вибропреобразователями, работающими в диапазоне частот 1—12 000 Гц, должны удовлетворять требованиям ГОСТ Р 8.669.

Е.5.5.7 Проверка виброизмерительных приборов должна проводиться не реже чем один раз в год.

**Е.5.6 Обработка результатов**

Е.5.6.1 При расшифровке осциллографических записей и спектрограмм определяют действительные значения параметров вибраций и основные частоты энергетического спектра вибраций, позволяющие установить характер колебательного процесса.

Е.5.6.2 Обработку записей вибрационных процессов, имеющих случайный характер, проводят с привлечением методов спектрального и корреляционного анализа.

## Библиография

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

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

[3] Сводный перечень документов по стандартизации в области использования атомной энергии

УДК 621.039:531:006.354 ОКС 27.120.99

Ключевые слова: прочность, оборудование и трубопроводы, атомные энергетические установки, поверочный расчет на прочность, допускаемые напряжения

Редактор *Е.В. Якубова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *И.А. Королева*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 20.12.2021. Подписано в печать 19.01.2022. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 13,02. Уч.-изд. л. 11,78.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «РСТ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru