ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 71788— 2024

ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИЕ СБОРКИ РЕАКТОРОВ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Расчет на прочность при действии статических нагрузок

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2025

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 28 декабря 2024 г. № 2079-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

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

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

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2025

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

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины, определения, сокращения и обозначения 2
4 Общие положения 4
5 Номинальные допускаемые напряжения 6
6 Классификация напряжений 7
7 Порядок определения напряжений 10
8 Расчет на статическую прочность 20
9 Расчет на устойчивость 23
10 Расчет на циклическую прочность 26
11 Расчет на сопротивление разрушению 31
12 Расчет по предельной деформации 37
13 Расчет на прогрессирующее изменение формы и размеров 37

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИЕ СБОРКИ РЕАКТОРОВ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Расчет на прочность при действии статических нагрузок

Fuel assemblies of the sodium-cooled reactors. Rules for strength analysis under static loads

Дата введения — 2025—04—01

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт устанавливает требования к проведению расчетов на прочность тепловыделяющих сборок реакторов с натриевым теплоносителем при действии статических нагрузок.

1.2 Настоящий стандарт предназначен для применения при обосновании прочности тепловыделяющих сборок реакторов с натриевым теплоносителем в соответствии с федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии, устанавливающими основные требования к обоснованию прочности и термомеханического поведения тепловыделяющих сборок и тепловыделяющих элементов в активной зоне реакторов с натриевым теплоносителем.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 24346 Вибрация. Термины и определения

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

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

ГОСТ Р 71787 Тепловыделяющие сборки и тепловыделяющие элементы реакторов с натриевым теплоносителем. Требования к характеристикам конструкционных материалов для расчетов на прочность

ГОСТ Р 71789 Тепловыделяющие сборки реакторов с натриевым теплоносителем. Расчет на прочность при действии динамических нагрузок

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.

Издание официальное

3 Термины, определения, сокращения и обозначения

3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ Р 59115.1, ГОСТ 24346, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 **истинное напряжение:** Напряжение, определенное по диаграмме растяжения конструкционного материала при заданной деформации, учитывающее поправку на изменение площади поперечного сечения образца.

3.1.2 **компонент:** Часть тепловыделяющей сборки (за исключением тепловыделяющих, поглощающих и замедляющих элементов и источников нейтронов), анализируемая при расчете на прочность.

3.1.3 **механические нагрузки:** Давление, весовые и инерционные силы и моменты (сосредоточенные и распределенные), действующие на тепловыделяющую сборку.

Примечание — В расчетах на прочность усилие затяга резьбовых соединений условно относится к механическим нагрузкам.

3.1.4 **накопленная деформация:** Суммарное значение деформаций пластичности и ползучести за рассматриваемый период времени.

3.1.5 **номинальный размер:** Значение, указанное в проектной конструкторской документации без учета допусков.

3.1.6 **повреждающая доза:** Интегральная характеристика, отражающая степень радиационного повреждения материала, определяемая как накопленное число смещений одного атома из узла кристаллической решетки под действием нейтронного и гамма-излучения; единицей повреждающей дозы является безразмерная величина «сна» — смещение на атом.

3.1.7 **упругий расчет:** Расчет по определению напряженно-деформированного состояния компонента в предположении упругого поведения конструкционного материала.

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

3.2 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

ЛП — линия приведения;

НДС — напряженно-деформированное состояние;

ННУЭ — нарушение нормальных условий эксплуатации;

НУЭ — нормальные условия эксплуатации;

ПКД — проектная конструкторская документация;

РУ — реакторная установка;

СП — сечение приведения;

ТВС — тепловыделяющая сборка;

УИ — условия испытаний;

УПА — условия проектной аварии.

3.3 Обозначения

В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

a — накопленное усталостное повреждение;

A — относительное удлинение после разрыва, %;

A_t^T — условный предел остаточного удлинения при разрыве при температуре T за время t, %;

c — суммарная прибавка к толщине стенки, мм;

c_{11} — прибавка к толщине стенки, равная отрицательному допуску, мм;

c_2 — прибавка к толщине стенки, учитывающая утонение стенки вследствие коррозии за срок службы компонента, мм;

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

K_I — коэффициент интенсивности напряжений, МПа · м$^{1/2}$;

K_{Ic} — критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа · м$^{1/2}$;

K_{Jc} — критическое значение коэффициента интенсивности напряжений, полученное пересчетом из J_c, МПа · м$^{1/2}$;

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

K_σ — теоретический коэффициент концентрации напряжений;

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

n_m — коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению;

n_{mt} — коэффициент запаса прочности по пределу длительной прочности;

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

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

N — число циклов нагружения компонента в эксплуатации;

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

p — давление, МПа;

R_{ct}^T — предел ползучести, МПа;

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

R_{mt}^T — предел длительной прочности при максимальной температуре цикла нагружения за время t, МПа;

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

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

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

s — номинальная толщина стенки, мм;

s_R — расчетная толщина стенки, мм;

t_T — время работы при температуре T, ч;

t_K — время до разрушения, ч;

T — температура, °С;

T_t — температура, при достижении которой необходимо учитывать характеристики длительной прочности, пластичности и ползучести, °С;

Z_t^T — условный предел длительного статического сужения при температуре T за время t, %;

Z_{mt}^T — условный предел равномерного относительного сужения поперечного сечения при длительном статическом разрушении, %;

$(\sigma)_1$ — группа приведенных напряжений, определяемая по составляющим общих мембранных напряжений при механических воздействиях, МПа;

$(\sigma)_2$ — группа приведенных напряжений, определяемая по составляющим общих или местных мембранных и общих изгибных напряжений, действующих в сечении ТВС при механических воздействиях, МПа;

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

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

$(\sigma)_{RV}$ — размах приведенных напряжений, МПа;

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

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

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

$(\sigma_F)_{max}$ — максимальное условное упругое приведенное напряжение, рассчитанное с учетом коэффициента концентрации условных упругих напряжений, МПа;

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

$[\sigma]$ — номинальное допускаемое напряжение, МПа;
$[\sigma]_w$ — номинальное допускаемое напряжение в болте (шпильке), МПа;
σ — напряжение, МПа;
$\sigma_к$ — напряжение самокомпенсации, МПа;
$\sigma_{кb}$ — напряжение компенсации изгиба, МПа;
$\sigma_{кm}$ — общие напряжение компенсации растяжения или сжатия, МПа;
$\sigma_{кmL}$ — местное напряжение компенсации растяжения или сжатия, МПа;
σ_b — общее изгибное напряжение, МПа;
σ_{bL} — местное изгибное напряжение, МПа;
σ_i, σ_j, σ_k — напряжение на главных площадках i, j, k, МПа;
σ_{nl} — нелинейная составляющая напряжений, МПа;
σ_m — общее мембранное напряжение, МПа;
σ_{mL} — местное мембранное напряжение, МПа;
σ_{SW} — общие напряжения, вызванные распуханием, МПа;
σ_{SWL} — местные напряжения, вызванные распуханием, МПа;
σ_T — общие температурные напряжения, МПа;
σ_{TL} — местные температурные напряжения, МПа;
φ_s — коэффициент снижения циклической прочности сварного соединения;
φ_w — коэффициент снижения прочности сварного соединения;
$\tau_{кs}$ — напряжение компенсации кручения, МПа;
χ — коэффициент снижения долговечности при наложении высокочастотных циклов.

4 Общие положения

4.1 Прочность ТВС считается обеспеченной, если в течение всего рассматриваемого проектного периода времени не достигается ни одно из предельных состояний во всех предусмотренных проектом РУ режимах эксплуатации. Обоснование недостижения предельных состояний состоит в проверке критериев прочности, с учетом запасов прочности.

4.2 Расчет на прочность ТВС должен проводиться в два этапа:

- расчет по выбору толщин стенок компонентов;
- поверочный расчет.

4.3 Расчет по выбору толщин стенок компонентов проводится методами поверочного расчета на статическую и длительную статическую прочность. Выбор расчетной толщины стенки компонента начинается с принятия начального значения s_R, которое затем должно быть подтверждено расчетом. Значение расчетной толщины стенки s_R считается подтвержденным расчетом в том случае, если определенные упругим расчетом значения напряжений расчетных групп категорий $(\sigma)_1$ и $(\sigma)_2$ удовлетворяют условиям статической и длительной статической прочности по 8.1 и 8.2.

Номинальная толщина стенки компонента должна удовлетворять условию $s \geq s_R + c$.

Суммарную прибавку к расчетной толщине стенки компонента определяют по формуле

$$c = c_{11} + c_2. \quad (4.1)$$

Прибавку c_{11} определяют по конструкторской документации и принимают равной отрицательному допуску на толщину стенки.

Прибавка c_2 учитывает коррозионное влияние рабочих сред на материал компонента в условиях эксплуатации. Значение прибавки c_2 устанавливается конструкторской организацией с учетом скорости коррозии и времени эксплуатации.

При двустороннем контакте стенки компонента с коррозионной средой значение прибавки c_2 следует принимать равным сумме значений прибавок для каждой из сторон.

4.4 Если температура компонента ТВС при эксплуатации, в том числе на отдельных режимах, ниже T_t, то расчет на прочность в этих режимах следует проводить по предельным состояниям без учета характеристик длительной прочности и ползучести металла.

Если температура компонента ТВС, в том числе в отдельных режимах, равна или превышает T_t, то его расчет на прочность в этих режимах следует проводить, с использованием независимых и зависимых от времени характеристик конструкционных материалов.

4.5 При определении значений номинальных допускаемых напряжений используют следующие характеристики материалов:

- временное сопротивление;
- предел текучести;
- предел длительной прочности;
- предел ползучести (при ограничении деформации).

4.6 Значения физических и механических характеристик конструкционных материалов, характеристики радиационной и термической ползучести и радиационного распухания и температура T_t принимаются в соответствии с действующими нормативными правовыми актами и/или федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии, устанавливающими основные требования к обоснованию прочности и термомеханического поведения тепловыделяющих сборок и тепловыделяющих элементов в активной зоне реакторов с натриевым теплоносителем, и/или проектной конструкторской документацией, и/или обосновывающим отчетом, разработанным в соответствии с ГОСТ Р 71787.

4.7 Поверочный расчет ТВС проводят по их номинальным размерам, за исключением расчетов устойчивости.

При поверочном расчете ТВС должны быть учтены все действующие на компонент нагрузки и рассмотрены все проектные режимы эксплуатации.

4.8 Поверочный расчет ТВС при статических нагрузках должен включать в себя:

а) расчет на статическую прочность;

б) расчет на устойчивость;

в) расчет на циклическую прочность и/или длительную циклическую прочность при температуре, равной или превышающей T_t и (или) при наличии радиационной ползучести;

г) расчет на сопротивление хрупкому (вязкохрупкому) разрушению (нестабильное развитие трещины);

д) расчет на длительную статическую прочность;

е) расчет на прогрессирующее изменение формы и размеров;

ж) расчет на накопление вязкопластических (пластических) деформаций.

4.9 При расчете ТВС на статическую прочность при всех значениях нагрузок и температур в режимах работы РУ, регламентированных проектом, приведенные напряжения в компоненте не должны превышать допускаемых значений, установленных в 8.1 и 8.2.

4.10 Расчет ТВС на устойчивость должен проводиться для подтверждения того, что значения нагружающих факторов не превышают допускаемых значений, учитывающих опасность потери геометрической устойчивости компонентов ТВС.

4.11 Расчет ТВС на циклическую прочность проводят на основе анализа напряжений с учетом концентрации напряжений с целью исключения возникновения трещин в компоненте вследствие циклического нагружения.

Допускаемые амплитуды напряжений для заданного количества циклов, времени и температуры эксплуатации определяют исходя из характеристик сопротивления усталостному разрушению, зависящих в общем случае от температуры, времени, влияния рабочей среды и нейтронного облучения, с введением коэффициентов запаса прочности по числу циклов и по напряжениям.

В результате расчета ТВС на циклическую прочность (длительную циклическую прочность) определяют допускаемое число повторений режимов работы РУ при эксплуатации для заданных повторных эксплуатационных температурных и механических нагрузок, или допускаемые температурные и механические нагрузки для заданных чисел повторений режимов работы РУ при эксплуатации.

4.12 При оценке циклической прочности ТВС за пределами упругости используют условное упругое напряжение. Это напряжение должно быть равно произведению значения упругопластической деформации в рассматриваемой точке на модуль упругости.

4.13 Расчет ТВС на сопротивление нестабильному росту трещины проводят на основе сопоставления коэффициента интенсивности напряжений рассчитываемого в линейной или нелинейной постановке с критическим значением или в целях исключения возможности хрупкого (вязкохрупкого) разрушения.

4.14 Расчет на длительную статическую прочность проводится в целях предотвращения возможности достижения предельно допустимой деформации ползучести. При расчете ТВС на длительную статическую прочность при всех значениях нагрузок при температурах равных или выше T_t напряжения в компоненте не должны превышать допускаемые значения.

Допускаемое напряжение определяют исходя из характеристик длительной прочности, зависящих от температуры и длительности нагружения, с введением коэффициента запаса прочности.

4.15 Расчет ТВС на прогрессирующее изменение формы и размеров проводят на основе анализа напряженно-деформированного состояния с целью недопущения накопления пластической деформации в компонентах свыше установленных пределов, либо исключения недопустимых изменений формы и размеров компонента при эксплуатации.

Допускаемые изменения формы и размеров ТВС, включая прогибы, в результате процесса накопления необратимых пластических деформаций должны быть установлены проектной (конструкторской) организацией.

4.16 Расчет ТВС на динамические воздействия и вибропрочность проводят при совместном действии статических и динамических нагрузок в соответствии с ГОСТ Р 71789.

4.17 Приведенное напряжение, сопоставляемое с допускаемыми значениями, определяют по теории наибольших касательных напряжений Треска или энергетической теории Мизеса, за исключением расчета на сопротивление разрушению, когда приведенные напряжения определяют по теории наибольших нормальных напряжений.

4.18 Полученные в результате поверочного расчета ТВС данные (напряжения, числа циклов, время нагружения, нагрузки, деформации или перемещения) следует сопоставлять с соответствующими допускаемыми значениями, зависящими от режима работы и категории действующих напряжений.

4.19 Влияние теплоносителя должно учитываться в поверочном расчете ТВС на основе экспериментальных данных.

4.20 Влияние облучения на изменение характеристик пластичности, сопротивления хрупкому, усталостному, длительному статическому разрушению и ползучести материалов ТВС должно учитываться при проведении расчетов с использованием этих характеристик.

4.21 Выбор метода или вычислительной программы для определения напряженно-деформированного состояния осуществляет организация, выполняющая соответствующий расчет.

4.22 Должны быть учтены все нагружающие факторы, в том числе:

- весовая нагрузка;
- давление (внутреннее и внешнее);
- температурные воздействия;
- радиационное распухание вследствие облучения;
- выталкивающая сила от теплоносителя;
- перемещения и изменения условий взаимодействия компонентов, вызванные формоизменением сопряженных изделий и частей конструкции активной зоны;
- усилия взаимодействия с соседними ТВС;
- нагрузки при загрузке и выгрузке активной зоны;
- воздействие твэльного пучка на чехловую трубу и/или другие компоненты ТВС.

4.23 Расчетными режимами эксплуатации ТВС являются:

- пусковой режим;
- стационарный режим;
- срабатывание системы аварийной защиты;
- изменение мощности реактора;
- останов;
- УИ;
- ННУЭ;
- УПА.

4.24 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).

4.25 При проведении поверочного расчета ТВС все напряжения в компоненте разделяют на категории по разделу 6. Напряжения, относящиеся к различным категориям, должны быть объединены в группы категорий напряжений по разделу 6.

5 Номинальные допускаемые напряжения

5.1 Номинальное допускаемое напряжение $[\sigma]$ следует определять по установленным в настоящем разделе характеристикам конструкционного материала при соответствующей температуре.

5.2 Номинальное допускаемое напряжение [σ] в компонентах с температурой ниже T_t, следует определять по условному пределу текучести $R^T_{p0,2}$ и временному сопротивлению R^T_m по формуле

$$[\sigma] = \min\left(\frac{R^T_{p0,2}}{n_{0,2}};\ \frac{R^T_m}{n_m}\right), \tag{5.1}$$

где $n_{0,2}$ = 1,5; n_m = 2,6.

Допускается для компонентов, нагруженных наружным давлением, превышающим внутреннее, принимать $n_{0,2}$ = 2.

Для компонентов с температурой равной или выше T_t, значение [σ] следует определять по условному пределу текучести $R^T_{p0,2}$, временному сопротивлению R^T_m при температуре и пределу длительной прочности R^T_{mt} для времени нагружения t, равном времени эксплуатации при этой температуре.

Номинальное допускаемое напряжение в компонентах с температурой равной или выше T_t, за исключением болтов и шпилек, следует рассчитывать по формуле

$$[\sigma] = \min\left(\frac{R^T_{p0,2}}{n_{0,2}};\ \frac{R^T_m}{n_m};\ \frac{R^T_{mt}}{n_{mt}}\right), \tag{5.2}$$

где $n_{0,2}$ = 1,5; n_m = 2,6; n_{mt} = 1,5.

5.3 При температурах, равных или превышающих T_t, и заданном ограничении деформации ползучести за время t компоненты следует определять по пределу ползучести R^T_{ct}. Коэффициент запаса по пределу ползучести следует принимать равным единице.

5.4 При температурах, равных или превышающих T_t, или если в компоненте возникает радиационная ползучесть в тех случаях, когда при эксплуатации ТВС имеет место два и более режима нагружения, отличающихся по температуре или нагрузке, основные размеры должны удовлетворять следующему условию прочности по накопленному длительному статическому повреждению

$$\sum \frac{t_i}{[t]_i} \le 1, \tag{5.3}$$

где t_i — продолжительность работы на i-м режиме нагружения, с;

$[t]_i$ — допускаемое время нагружения определяемое по кривым длительной прочности, как время соответствующее напряжению равному $n_{mt}\cdot\sigma_i$, где σ_i — общее мембранное напряжение в компоненте на i-м режиме нагружения, с.

6 Классификация напряжений

6.1 При проведении поверочного расчета используют следующие основные категории напряжений:

- σ_m — общие мембранные напряжения;
- σ_{mL} — местные мембранные напряжения;
- σ_b — общие изгибные напряжения;
- σ_{bL} — местные изгибные напряжения;
- σ_T — общие температурные напряжения;
- σ_{TL} — местные температурные напряжения;
- σ_{SW} — общие напряжения, вызванные распуханием и (или) радиационным ростом;
- σ_{SWL} — местные напряжения, вызванные распуханием и (или) радиационным ростом.

Дополнительные категории напряжений, используемые при проведении расчетов, входящих в состав поверочного расчета, указаны непосредственно в соответствующих подразделах настоящего стандарта.

Для удобства проведения расчетов ниже приведены примеры разделения напряжений по категориям.

6.2 Примером напряжений, относящихся к категории общих мембранных напряжений, являются средние напряжения растяжения (или сжатия) по толщине стенки цилиндрической оболочки, вызываемые действием внутреннего или наружного давления, либо балки под действием осевой нагрузки.

6.3 Примерами напряжений, относящихся к категории местных мембранных напряжений являются мембранные напряжения от механических нагрузок в зонах присоединения чехла ТВС к решеткам ТВС.

6.4 Примером напряжений, относящихся к категории общих изгибных напряжений, являются напряжения изгиба, вызываемые действием внешних сил и моментов, действующих на компонент в целом.

6.5 Примером напряжений, относящихся к категории местных изгибных напряжений, являются напряжения изгиба, вызванные действием давления, в зонах соединения различных компонентов (пластин и обечаек, решетки ТВС с чехлом или каркасом и т. п.).

6.6 Примерами напряжений, относящихся к категории общих температурных напряжений, являются:

а) напряжения, вызываемые осевым перепадом температур в обечайке;

б) линейная часть напряжений в зонах соединения компонентов с различными жесткостями;

в) напряжения, вызываемые перепадом температур по толщине плоских пластин, например решеток ТВС.

6.7 Примерами напряжений, относящихся к категории местных температурных напряжений, являются:

- напряжения в центральной части длинных цилиндрических оболочек, вызываемые перепадом температур по толщине стенки, за исключением линейной составляющей напряжений, указанной в перечислении б) 6.6;

- напряжения в биметаллических компонентах, вызванные разностью коэффициентов линейного расширения материалов.

6.8 Примерами напряжений, относящихся к категории местных напряжений в зонах концентрации напряжений, являются напряжения в зонах отверстий, галтелей, резьб и т. п. от тепловых и механических усилий, определяемые с учетом коэффициента концентрации напряжений.

6.9 При проведении поверочного расчета определяют напряжения каждой расчетной группы категории напряжений, по которым определяют приведенные напряжения, сопоставляемые с соответствующими допускаемыми напряжениями.

6.10 На основании анализа действующих нагрузок и температурных полей следует выбрать наиболее напряженные области ТВС для каждого рассматриваемого расчетного случая.

6.11 Используемые при расчетах на статическую и циклическую прочность группы категорий напряжений и их обозначения применительно к различным типам компонентов приведены в таблице 6.1, а для рассчитываемых зон — в таблице 6.2.

Таблица 6.1 — Расчетные группы категорий напряжений в компонентах

Тип компонента	Расчетная группа категорий напряжений	Обозначение расчетной группы категорий напряжений	Категории напряжений, входящие в данную расчетную группу категорий напряжений
Чехол ТВС, решетки	Приведенное общее мембранное напряжение	$(\sigma)_1$	σ_m
	Приведенное напряжение, определяемое по сумме составляющих общих или местных мембранных и общего изгибного напряжений	$(\sigma)_2$	$[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}] + \sigma_b$
	Размах приведенного напряжения, определяемого по сумме составляющих общих или местных мембранных, общего и местного изгибных, общих температурных, общие напряжения, вызванные распуханием	$(\sigma)_{RV}$	$[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}] + \sigma_b + \sigma_{bL} + \sigma_{SW} + \sigma_T + [\sigma_{км}$ или $\sigma_{кmL}] + \sigma_{кb} + \tau_{кs}$
	Амплитуда приведенного напряжения, определяемая по сумме составляющих общего или местного мембранных, общего и местного изгибных, общих и местных температурных, общих и местных напряжений от распухания и компенсационного напряжений с учетом концентрации напряжений	(σ_{aF})	$[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}] + \sigma_b + \sigma_{bL} + \sigma_{SW} + \sigma_{SWL} + \sigma_T + \sigma_{TL} + [\sigma_{км}$ или $\sigma_{кmL}] + \sigma_{кb} + \tau_{кs}$ с учетом концентрации напряжения

Окончание таблицы 6.1

Тип компонента	Расчетная группа категорий напряжений	Обозначение расчетной группы категорий напряжений	Категории напряжений, входящие в данную расчетную группу категорий напряжений
Центральные части плоских компонентов	Приведенное общее изгибное напряжение	$(\sigma)_2$	$[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}] + \sigma_b$
	Размах приведенного напряжения, определяемого по сумме составляющих общего или местного мембранных, общего и местного изгибных, общих температурных, общие напряжения, вызванные распуханием	$(\sigma)_{RV}$	$[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}] + \sigma_b + \sigma_{bL} + \sigma_{SW} + \sigma_T + [\sigma_{km}$ или $\sigma_{kmL}] + \sigma_{kb} + \tau_{ks}$
	Амплитуда приведенного напряжения, определяемого по сумме составляющих общих или местных мембранных, общих и местных изгибных, общих и местных температурных напряжений с учетом концентрации напряжения	(σ_{aF})	$[\sigma_m$ или $\sigma_{mL}] + \sigma_b + \sigma_{bL} + \sigma_{SW} + \sigma_{SWL} + \sigma_T + \sigma_{TL} + [\sigma_{km}$ или $\sigma_{kmL}] + \sigma_{kb} + \tau_{ks}$ с учетом концентрации напряжения

Таблица 6.2 — Группы категорий напряжений в рассчитываемых зонах ТВС

Рассчитываемая зона	Вид нагружения	Категория определяемых напряжений	Расчетная группа категорий напряжений
Шестигранная часть чехла ТВС	Осевая сила, весовая нагрузка	Общие мембранные	$(\sigma)_1$
	Осевая сила, весовая нагрузка, усилия со стороны соседних ТВС	Общие мембранные + общие изгибные	$(\sigma)_2$
	Осевая сила, весовая нагрузка, усилия со стороны соседних ТВС, температурный перепад по длине, неравномерное распухание по длине	Общие мембранные + общие изгибные + общие температурные	$(\sigma)_{RV}$
	Осевая сила, весовая нагрузка, усилия со стороны соседних ТВС + температурный перепад по длине, температурный перепад по толщине, неравномерное распухание по длине, неравномерное распухание по толщине	Общие мембранные + общие температурные + местные температурные (амплитуды)	(σ_{aF})
Зона соединения решеток с чехлом ТВС	Поле температур, усилия затяга, неравномерное распухание	Местные мембранные + местные изгибные + общие температурные	$(\sigma)_{RV}$
		Местные мембранные + местные изгибные + общие температурные + местные напряжения в зонах концентрации	(σ_{aF})
Решетка ТВС	Поперечная распределенная сила	Общие изгибные	$(\sigma)_2$
	Осевая сила, поле температур, неравномерное распухание	Общие изгибные + общие температурные	$(\sigma)_{RV}$
		Общие изгибные + общие температурные + местные температурные + местные напряжения в зонах концентрации	(σ_{aF})

7 Порядок определения напряжений

7.1 Требования к порядку определения напряжений

7.1.1 На основе анализа условий ввода в эксплуатацию реактора и эксплуатации ТВС должна быть установлена проектная последовательность во времени режимов нагружения ТВС, включая режимы нарушения нормальных условий эксплуатации и проектные аварии.

7.1.2 Для принятой последовательности режимов нагружения расчетами в предположении упругого поведения конструкционного материала определяют напряженно-деформированное состояние в опасных сечениях компонентов.

7.1.3 Должно быть определено анализируемое расчетное сечение напряжений СП. Следует проводить СП через зону, 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 следует выбирать перпендикулярно к одной из внешних поверхностей.

7.1.4 Напряженное состояние в каждой точке СП характеризуется тензором напряжений $\{\sigma\}$.

7.1.5 Деформированное состояние в каждой точке СП характеризуется тензором деформаций $\{\varepsilon\}$.

7.1.6 Если СП плоское, то напряженное состояние в каждой точке сечения следует представить как сумму тензоров средних, изгибных и нелинейных составляющих напряжений $\{\sigma_m + \sigma_b + \sigma_{nl}\}$. При этом величины k и b, характеризующие мембранную и изгибную составляющие напряжений, являются постоянными для всех точек СП

$$\sigma_{(m+b)\alpha\beta} = kx + b, \tag{7.1}$$

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

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

α, β — индексы, принимающие значения x, y и z при использовании ортогональной системы координат.

Тензор средних напряжений $\{\sigma_m\}$ — тензор, компоненты которого постоянны и равны

$$\sigma_{m\,\alpha\beta} = b = \frac{1}{S}\int_S \sigma_{\alpha\beta} dS, \tag{7.2}$$

где S — площадь СП.

Тензор изгибных напряжений $\{\sigma_b\}$ — тензор, компоненты которого линейно изменяются по сечению и равны

$$\sigma_{b\,\alpha\beta} = kx = \frac{x}{I}\int_S \sigma_{\alpha\beta} x\, dS, \tag{7.3}$$

где $I = \int_S x^2 dS$ — момент инерции СП относительно центральной оси.

Тензор нелинейных напряжений $\{\sigma_{nl}\}$ определяют как тензор, компоненты которого равны разности составляющих тензоров $\{\sigma\}$ и $\{\sigma_m + \sigma_b\}$.

7.1.7 В случае СП произвольного вида в сечении должен быть определен набор ЛП. ЛП следует проводить через стенку компонента, перпендикулярно к внутренней, внешней или срединной поверхности компонента. Примеры выбора ЛП приведены на рисунке 7.1.

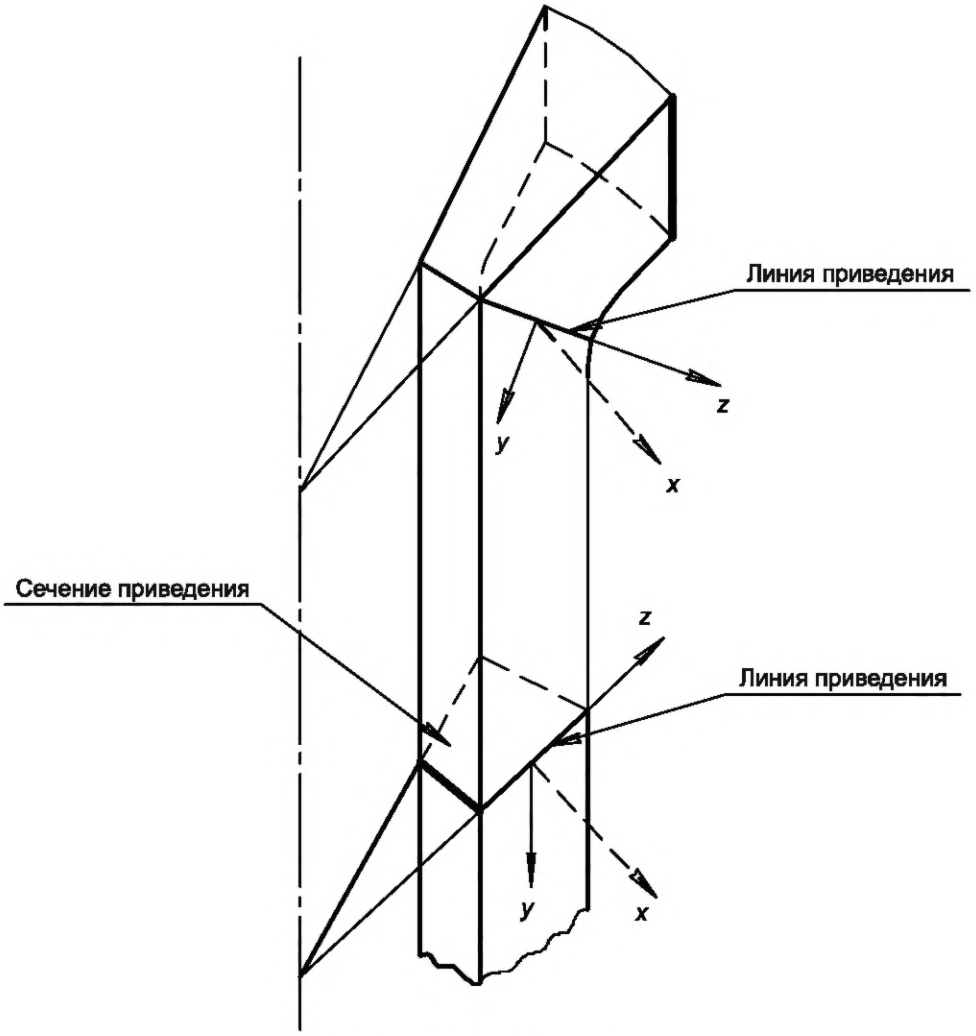


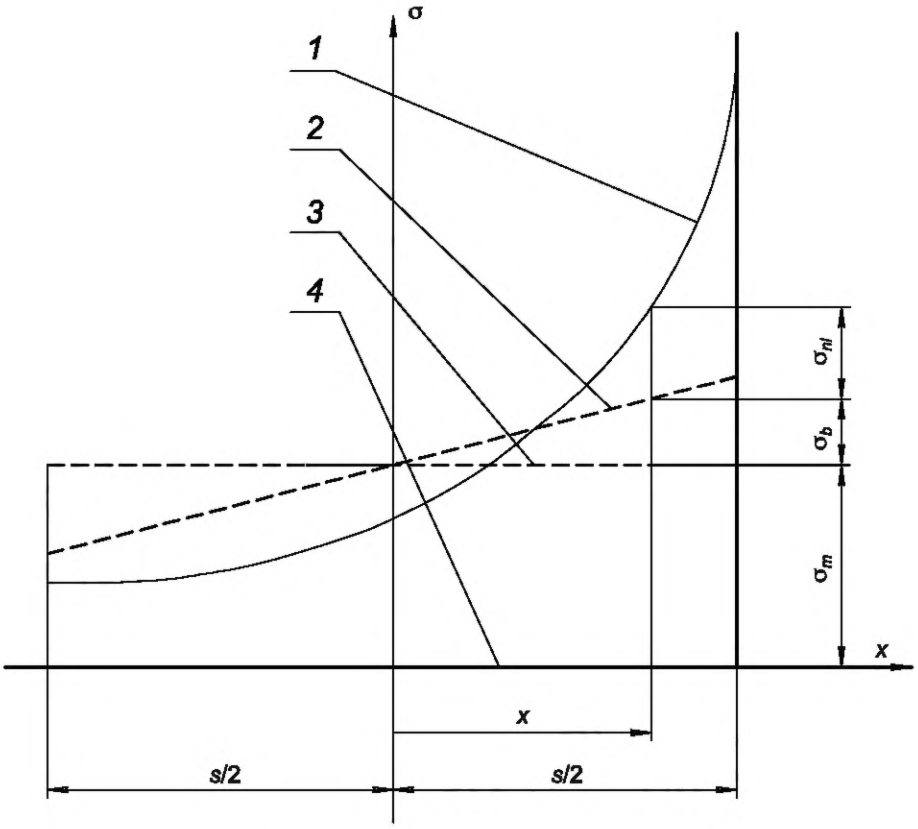
Рисунок 7.1 — Пример выбора СП и ЛП

Напряженное состояние {σ} в каждой точке на ЛП представлено (см. рисунок 7.2) как сумма тензоров средних, изгибных и нелинейных составляющих напряжений $\{\sigma_m + \sigma_b + \sigma_{nl}\}$. При этом мембранная и изгибная составляющие напряжений постоянны для всех точек ЛП

$$\sigma_{(m+b)\alpha\beta} = kx + b, \quad (7.4)$$

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

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



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

Рисунок 7.2 — Разделение напряжений на среднюю, изгибную и нелинейную составляющие

Тензор средних напряжений $\{\sigma_m\}$ — тензор, компоненты которого постоянны и равны

$$\sigma_{m\,\alpha\beta} = b = \frac{1}{s}\int_{-s/2}^{+s/2}\sigma_{\alpha\beta}dx, \tag{7.5}$$

где s — толщина стенки в месте проведения ЛП.

Тензор изгибных напряжений $\{\sigma_b\}$ — тензор, компоненты которого линейно изменяются по сечению и равны

$$\sigma_{b\ \alpha\beta} = kx = \frac{12x}{s^3}\int_{-s/2}^{+s/2}\sigma_{\alpha\beta}x\,dx, \tag{7.6}$$

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

На внутренней и наружной поверхности стенок изгибные напряжения принимают значения

$$\sigma_{b\ \alpha\beta} = \pm\frac{6}{s^2}\int_{-s/2}^{+s/2}\sigma_{\alpha\beta}\ x\,dx. \tag{7.7}$$

Составляющие тензора $\{\sigma_{nl}\}$ следует вычислять по формуле

$$\sigma_{nl\,\alpha\beta} = \sigma_{\alpha\beta} - (\sigma_{m\,\alpha\beta} + \sigma_{b\,\alpha\beta}). \tag{7.8}$$

Деформированное состояние $\{\varepsilon\}$ в каждой точке, лежащей на ЛП, подобно напряженному состоянию, также 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

$$\varepsilon_{(m+b)\,\alpha\beta} = kx + b, \tag{7.9}$$

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

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

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

$$\varepsilon_{m\,\alpha\beta} = b = \frac{1}{s}\int_{-s/2}^{+s/2} \varepsilon_{\alpha\beta} dx, \tag{7.10}$$

где s — толщина стенки в месте проведения ЛП.

На концах ЛП изгибные деформации принимают значения

$$\varepsilon_{b\ \alpha\beta} = \pm\frac{6}{s^2}\int_{-s/2}^{+s/2} \varepsilon_{\alpha\beta} x\, dx. \tag{7.11}$$

Компоненты тензоров напряжений следует алгебраически суммировать с последующим определением средних, средних плюс изгибных, суммарных (в том числе с учетом концентрации) приведенных напряжений в соответствующие моменты времени в соответствии с определяемой категорией или группой категорий напряжений для последующей проверки прочности по соответствующим допускаемым напряжениям.

7.2 Расчет приведенных напряжений с использованием теории максимальных касательных напряжений Треска

7.2.1 Значения главных напряжений определяют по шести составляющим тензора напряжений $\{\sigma_m + \sigma_b\}$. Наибольшему за всю историю главному напряжению присваивают индекс i, двум другим при том же моменте времени — индексы j и k ($\sigma_i \geq \sigma_j \geq \sigma_k$). Соответствующие данному моменту времени площадки следует считать зафиксированными для всей истории нагружения. Для всех других моментов времени главные напряжения условно следует относить к зафиксированным площадкам i, j и k следующим образом — значения главных напряжений должны быть, соответственно, отнесены к тем площадкам i, j и k, которые наклонены к реальным главным площадкам под наименьшим углом.

7.2.2 На выбранных зафиксированных главных площадках для всей принятой последовательности режимов нагружения определяют зависимости изменения главных напряжений σ_i, σ_j, σ_k для тензоров напряжений $\{\sigma_m + \sigma_b\}$ и $\{\sigma_m + \sigma_b + \sigma_{nl}\}$.

Наряду с прямым методом расчета с учетом концентрации напряжений, должны быть рассчитаны значения компонент тензора напряжений $\{\sigma_m + \sigma_b + \sigma_{nl}\}$ на основании компонент тензора напряжений $\{\sigma_m + \sigma_b\}$ и коэффициентов концентрации напряжений.

7.2.3 Значения приведенных напряжений (σ) определяют для моментов времени t_1, t_2, ..., t_l, ..., t_m, в которых увеличение/уменьшение абсолютного значения любого из главных напряжений сменяется его уменьшением/увеличением, по формулам:

- местные приведенные напряжения без учета концентрации напряжений для момента времени t_l, МПа

$$(\sigma)_{ij,l} = \sigma_{i,l} - \sigma_{j,l}; \tag{7.12}$$

$$(\sigma)_{jk,l} = \sigma_{i,l} - \sigma_{k,l}; \tag{7.13}$$

$$(\sigma)_{ik,l} = \sigma_{i,l} - \sigma_{k,l}, \tag{7.14}$$

где $\sigma_{i,l}$, $\sigma_{j,l}$, $\sigma_{k,l}$ — главные напряжения тензора напряжений $\{\sigma_m + \sigma_b\}$ для момента времени t_l, МПа;

- местные приведенные напряжения по упругому расчету с учетом концентрации напряжений для момента времени t_l, МПа

$$\begin{aligned}(\sigma_L)_{ij,l} &= \sigma_{Li,l} - \sigma_{Lj,l};\\ (\sigma_L)_{jk,l} &= \sigma_{Lj,l} - \sigma_{Lk,l};\\ (\sigma_L)_{ik,l} &= \sigma_{Li,l} - \sigma_{Lk,l},\end{aligned} \tag{7.15}$$

где $\sigma_{Li,l}$, $\sigma_{Lj,l}$, $\sigma_{Lk,l}$ — главные напряжения тензора напряжений $\{\sigma_m + \sigma_b + \sigma_{nl}\}$ для момента времени t_l, МПа.

Для начального t_1 и конечного t_m моментов времени $\sigma_i = \sigma_j = \sigma_k = 0$ или равны постоянным напряжениям, например, от веса или монтажного натяга.

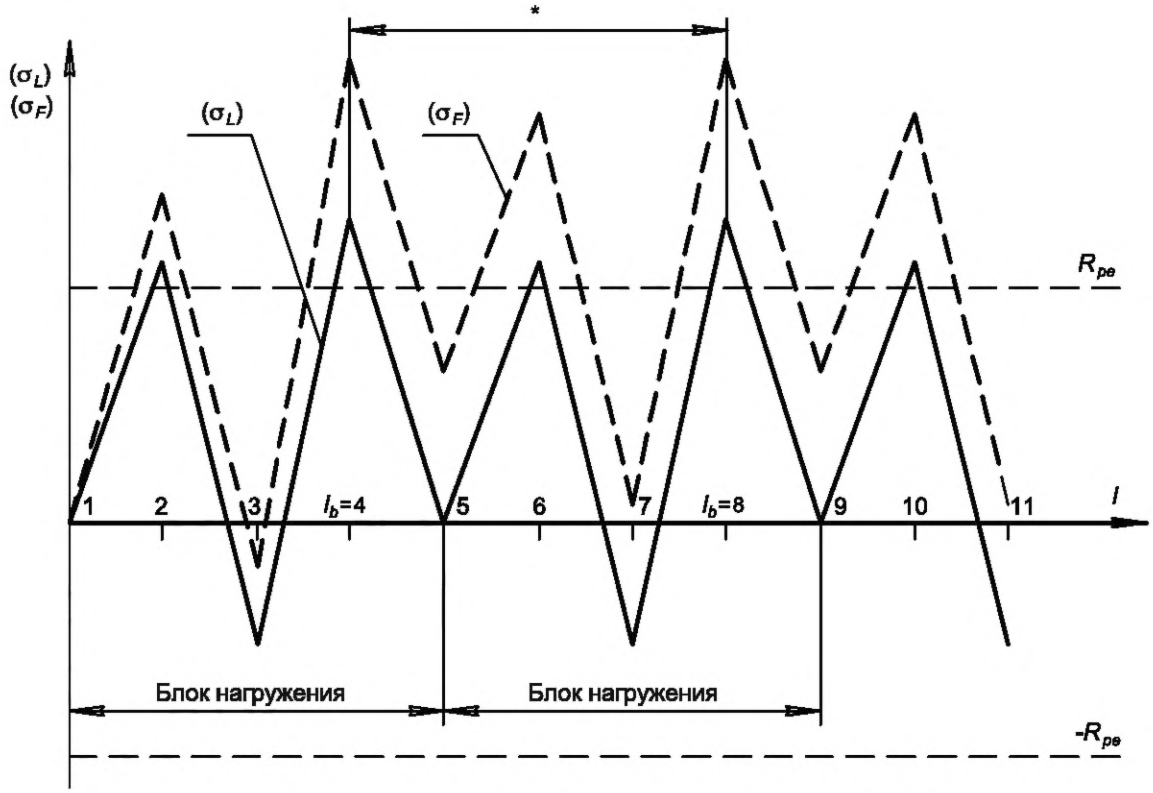
Пример изменения одного из местных приведенных напряжений приведен на рисунке 7.3.

7.2.4 Значение приведенного напряжения для определения $(\sigma)_1$ и $(\sigma)_2$ следует вычислять по формуле

$$(\sigma)_{1,2} = \max\left(\left|(\sigma)_{ij,\max}\right|;\ \left|(\sigma)_{jk,\max}\right|;\ \left|(\sigma)_{ik,\max}\right|\right), \tag{7.16}$$

где $(\sigma)_{ij,\max}$, $(\sigma)_{jk,\max}$, $(\sigma)_{ik,\max}$ — алгебраически максимальные приведенные напряжения для всей истории изменения приведенных напряжений для рассматриваемого режима нагружения, МПа.

Для определения $(\sigma)_1$ следует использовать зависимость изменения главных напряжений σ_i, σ_j, σ_k для тензора напряжений $\{\sigma_m\}$, а для $(\sigma)_2$ — тензора $\{\sigma_{mL} + \sigma_b\}$.



* Полуциклы между наибольшими значениями (σ_F).

Рисунок 7.3 — График изменения местных приведенных напряжений (σ_L) и (σ_F)

7.2.5 Размах напряжений $(\sigma)_{RV}$ и $(\sigma)_{RK}$ определяют с учетом всей истории изменения приведенных напряжений, как наибольшее из следующих значений

$$(\sigma)_{RV},(\sigma)_{RK} = \max\begin{cases}(\sigma)_{ij,\max} - (\sigma)_{ij,\min}\\(\sigma)_{jk,\max} - (\sigma)_{jk,\min}\\(\sigma)_{ik,\max} - (\sigma)_{ik,\min}\end{cases}, \tag{7.17}$$

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, МПа.

7.3 Расчет приведенных напряжений с использованием энергетической теории Мизеса

7.3.1 Значение приведенного напряжения для определения $(\sigma)_1$ и $(\sigma)_2$ следует вычислять по формуле

$$(\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2)}. \quad (7.18)$$

Для определения $(\sigma)_1$ следует использовать зависимость изменения составляющих напряжений тензора $\{\sigma_m\}$, а для $(\sigma)_2$ следует использовать зависимость изменения составляющих напряжений тензора $\{\sigma_m + \sigma_b\}$.

7.3.2 Для определения значений размаха местных условных упругих приведенных напряжений следует определять приращения компонент тензоров напряжений $\{\sigma_m + \sigma_b\}$ и $\{\sigma_m + \sigma_b + \sigma_{nl}\}$ от начального состояния t_1 до момента времени t по формулам:

$$\begin{gathered}(\Delta\sigma_x)_t = \sigma_{xt} - \sigma_{xt_1};\ (\Delta\sigma_y)_t = \sigma_{yt} - \sigma_{yt_1};\\ (\Delta\sigma_z)_t = \sigma_{zt} - \sigma_{zt_1};\ (\Delta\sigma_{xy})_t = \sigma_{xyt} - \sigma_{xyt_1};\\ (\Delta\sigma_{yz})_t = \sigma_{yzt} - \sigma_{yzt_1};\ (\Delta\sigma_{zx})_t = \sigma_{zxt} - \sigma_{zxt_1};\\ (\Delta\sigma_{Lx})_t = \sigma_{Lxt} - \sigma_{Lxt_1};\ (\Delta\sigma_{Ly})_t = \sigma_{Lyt} - \sigma_{Lyt_1};\\ (\Delta\sigma_{Lz})_t = \sigma_{Lzt} - \sigma_{Lzt_1};\ (\Delta\sigma_{Lxy})_t = \sigma_{Lxyt} - \sigma_{Lxyt_1};\\ (\Delta\sigma_{Lyz})_t = \sigma_{Lyzt} - \sigma_{Lyzt_1};\ (\Delta\sigma_{Lzx})_t = \sigma_{Lzxt} - \sigma_{Lzxt_1}.\end{gathered} \quad (7.19)$$

7.3.3 Приращения приведенных напряжений вычисляют по формулам:

$$\begin{aligned}\Delta(\sigma)_t = \frac{1}{\sqrt{2}}\Bigg(&\Big[(\Delta\sigma_x)_t - (\Delta\sigma_y)_t\Big]^2 + \Big[(\Delta\sigma_y)_t - (\Delta\sigma_z)_t\Big]^2 +\\ &+\Big[(\Delta\sigma_z)_t - (\Delta\sigma_x)_t\Big]^2 + 6\cdot\Big[(\Delta\sigma_{xy})_t^2 + (\Delta\sigma_{yz})_t^2 + (\Delta\sigma_{zy})_t^2\Big]\Bigg)^{1/2};\end{aligned} \quad (7.20)$$

$$\begin{aligned}\Delta(\sigma_{Lt}) = \frac{1}{\sqrt{2}}\Bigg(&\Big[(\Delta\sigma_{Lx})_t - (\Delta\sigma_{Ly})_t\Big]^2 + \Big[(\Delta\sigma_{Ly})_t - (\Delta\sigma_{Lz})_t\Big]^2 +\\ &+\Big[(\Delta\sigma_{Lz})_t - (\Delta\sigma_{Lx})_t\Big]^2 + 6\cdot\Big[(\Delta\sigma_{Lxy})_t^2 + (\Delta\sigma_{Lyz})_t^2 + (\Delta\sigma_{Lzy})_t^2\Big]\Bigg)^{1/2}.\end{aligned} \quad (7.21)$$

7.3.4 После расчета $\Delta(\sigma_t)$ для нескольких последующих моментов времени $t > t_1$, следует определять момент времени t_l, когда значение $\Delta(\sigma_t)$ в первый раз достигает максимума $(\Delta\sigma_t) = (\Delta\sigma_t)_1$, которому следует придавать знак «плюс», если выполняется условие

$$[(\sigma_{xl} - \sigma_{xt_1}) + (\sigma_{yl} - \sigma_{yt_1}) + (\sigma_{zl} - \sigma_{zt_1})] \geq 0 \quad (7.22)$$

или «минус» в противном случае, и фиксируются значения составляющих напряжений в этот момент времени σ_{xt}, σ_{yt}, σ_{zt}, τ_{xyt}, τ_{yzt}, τ_{zxt}, которые должны становиться начальными в следующем полуцикле.

Приведенные напряжения в момент времени t_1 принимаются равными $(\sigma_t)_1 = (\Delta\sigma_t)_1$.

7.3.5 Расчет по 7.3.2, 7.3.3 проводят для последующего изменения нагрузок ($t > t_1$) и определяют момент времени t_2, при котором достигается максимум приращения приведенных напряжений $(\Delta\sigma_t)_1 = (\Delta\sigma_t)_2$. Вновь следует фиксировать значения $(\sigma_{xt}, \sigma_{yt}, \sigma_{zt}, \tau_{xyt}, \tau_{yzt}, \tau_{zxt})_{t = t_2}$, которые для следующего полуцикла следует считать начальными. Размаху приведенных напряжений $(\Delta\sigma_t)_2$ следует придавать знак, противоположный знаку $(\Delta\sigma_t)_1$.

Приведенное напряжение в момент времени t_2 должно быть равно $(\sigma_t)_2 = (\sigma_t)_1 + (\Delta\sigma_t)_2$.

Аналогичным образом по 7.3.2, 7.3.3 проводят расчет для всей истории нагружения компонента, и в результате должна быть получена зависимость приведенных напряжений (σ) или (σ_L) от времени для всей истории нагружения.

7.3.6 Размах напряжений $(\sigma)_{RV}$ или $(\sigma)_{RK}$ должен быть определен по графику изменений приведенных напряжений (σ) для всей истории изменения напряжений по формуле

$$(\sigma)_{RV},\ (\sigma)_{RK} = (\sigma)_{\max} - (\sigma)_{\min}, \tag{7.23}$$

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

7.3.7 По рассчитанным значениям приведенных напряжений (σ_L) определяют значения местных условных упругих приведенных напряжений (σ_F) с учетом возможной поправки на упругопластическое деформирование конструкционного материала в соответствии с требованиями 7.4 с учетом того, что рассматривается один единственный график изменения (σ_F).

7.4 Определение местных условных упругих приведенных напряжений упрощенным упругопластическим расчетом

7.4.1 Значения местных условных упругих приведенных напряжений (σ_F) определяют в зоне концентрации напряжений на основе значений (σ_L) (индексы *ij*, *jk* и *ki* здесь и далее для краткости опущены), с учетом возможной поправки на упругопластическое деформирование конструкционного материала. Учет пластических деформаций выполняют с помощью упрощенного упругопластического расчета по 7.4.2.

7.4.2 Упрощенный упругопластический расчет следует проводить в соответствии с требованиями настоящего пункта.

Поправку на пластическое течение конструкционного материала проводят с использованием параметров степенной аппроксимации диаграммы растяжения конструкционного материала. Диаграмма растяжения конструкционного материала должна быть аппроксимирована в виде

$$\sigma = \begin{cases} \varepsilon \cdot E^T, & \text{если } \varepsilon \le \varepsilon_e \\ R^T_{pe}\left(\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_e}\right)^{\nu}, & \text{если } \varepsilon > \varepsilon_e \end{cases}, \tag{7.24}$$

где R^T_{pe} — предел пропорциональности;

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

Показатель упрочнения ν и R^T_{pe} следует вычислять по формулам:

$$\nu = \frac{0{,}73 \cdot \lg\left[\left(1 + 1{,}4 \cdot 10^{-2} \cdot Z^T\right)\dfrac{R^T_m}{R^T_{p0,2}}\right]}{\lg\left(\dfrac{2{,}3 \cdot \lg\dfrac{100}{100 - Z^T}}{2 \cdot 10^{-3} + R^T_{p0,2}/E^T}\right)}; \tag{7.25}$$

$$R^T_{pe} = \left[\frac{R^T_{p0,2}}{\left(2 \cdot 10^{-3} \cdot E^T + R^T_{p0,2}\right)^{\nu}}\right]^{\frac{1}{1-\nu}}. \tag{7.26}$$

Если в рассматриваемой зоне расположен сварной шов, то значения R^T_{pe} и ν должны быть приняты минимальными из значений для металла шва и основного металла.

При переменной в течение полуцикла температуре вычисление значений R^T_{pe} и ν проводится для максимальной и минимальной температур полуцикла по соответствующим значениям $R^T_{p0,2}$, R^T_m, Z^T, E^T. Расчетное значение R^T_{pe} следует принимать равным полусумме соответствующих значений для максимальной и минимальной температур полуцикла. Расчетное значение ν следует принимать равным минимальному из его значений в интервале температур полуцикла. Допускается использование

в качестве расчетных значений R_{pe}^{T} и ν, соответствующие максимальной температуре полуцикла, а также принимать $\nu = 0$ при условии использования в качестве расчетного значения R_{pe}^{T} либо полусуммы пределов текучести $R_{p0,2}^{T}$ при максимальной и минимальной температурах полуцикла, либо значения $R_{p0,2}^{T}$ при максимальной температуре полуцикла.

При температуре, равной или выше температуры T_t, значение R_{pe}^{T} 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 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 определяют по формуле

$$\nu = \frac{\lg\left(\dfrac{\sigma^{T}}{R_{p0,2t}^{T}}\right)}{\lg\left(\dfrac{e^{T}}{e_{0,2t}^{T}}\right)}, \tag{7.27}$$

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

$e_{0,2t}^{T}$ — деформация, соответствующая пределу текучести $R_{p0,2t}^{T}$;

e^{T} — деформация, соответствующая σ^{T} (не менее 2 %).

Построение изохронных кривых ползучести для заданной температуры и длительности полуцикла следует проводить с помощью зависимостей, приведенных в документах, перечисленных в 4.6.

Длительность полуцикла должна быть равна времени изменения напряжений от минимального/максимального до максимального/минимального значения. При расчете напряжений в процессе пуска, выхода на режим после какого-либо переходного режима и работы на стационарном режиме до следующего переходного режима при температурах равных и выше T_t, следует учитывать среднее время работы на стационарном режиме между соответствующими переходными режимами.

Графики изменения напряжений (σ_F) строят путем последовательной обработки точек графиков (σ_L) для моментов времени t_1, t_2, …, t_l, …, t_m. При этом следует использовать вспомогательные параметры ξ и λ, а также характерные значения моментов времени t_h и t_b, порядок определения которых приведен ниже. Общая последовательность расчетов должна быть следующая:

а) в начале расчета полагают: $t_h = t_b = t_1$, $t_1 = t_2$, $\xi = \lambda = 1$, $(\sigma_L)_h = (\sigma_F)_h = (\sigma_L)_b = (\sigma_F)_b = 0$;

б) в случае если величина $(\sigma_L)_l \big/ R_{pe}^{T}$ не выходит за границы отрезка [λ, $\lambda - 2\text{sign}(\lambda)$], что соответствует упругому деформированию в полуцикле нагружения, принимают

$$(\sigma_F)_l = (\sigma_L)_l - (\sigma_L)_b + (\sigma_F)_b. \tag{7.28}$$

При выходе величины $(\sigma_L)_l \big/ R_{pe}^{T}$ за границы отрезка [λ, $\lambda - 2\text{sign}(\lambda)$] происходит упругопластическое деформирование, для которого напряжение $(\sigma_F)_l$ определяют по формуле

$$(\sigma_F)_l = \text{sign}\left[(\sigma_L)_l - (\sigma_L)_h\right]\left(\xi R_{pe}^{T}\right)^{\frac{\nu-1}{\nu+1}} \cdot \left(\frac{1+\nu}{2}\left[(\sigma_L)_l - (\sigma_L)_h\right]^2 + \frac{1-\nu}{2}\left(\xi R_{pe}^{T}\right)^2\right)^{\frac{1}{1+\nu}} + (\sigma_F)_h. \tag{7.29}$$

При этом, в случае если выход произошел со стороны граничного значения $\lambda - 2\text{sign}(\lambda)$, а в предыдущие моменты времени хотя бы раз уже возникало упругопластическое деформирование, то следует принимать $\xi = 2$ и $t_h = t_b$. Если выход произошел со стороны граничного значения λ или если раньше ни разу не возникло упругопластического деформирования, то в момент времени t_h, соответствующие ему напряжения $(\sigma_L)_h$ и $(\sigma_F)_h$, а также значения параметра ξ следует оставлять без изменения (т. е. теми, которыми они сложились на предшествующих этапах расчета).

Расчет по формуле (7.29) допускается применять только для зоны концентрации напряжений при выполнении следующего условия

$$\frac{\left|(\sigma_L)_l\right|_{\max}}{K_\sigma} \le 2R^T_{pe}. \tag{7.30}$$

Для прочих случаев при определении $(\sigma_F)_l$ вместо применения формулы (7.29) следует проводить полный упругопластический расчет компонента;

в) после определения $(\sigma_F)_l$ при упругопластическом деформировании по формуле (7.29) или по данным упругопластического расчета, принимают для $t_b = t_1$

$$\lambda = \left|\frac{(\sigma_L)_l}{R^T_{pe}}\right|^\nu \operatorname{sign}(\sigma_F)_l; \tag{7.31}$$

если $t_l < t_m$, то следует перейти к рассмотрению следующего момента времени t_{l+1} в соответствии с порядком, изложенным в перечислениях б) в) 7.4.2.

При $t_l = t_m$ расчет напряжений $(\sigma_F)_l$ завершают.

Для удобства расчетов допускается разбиение на блоки графиков изменения напряжений (σ_L). Пример подобного разбиения показан на рисунке 7.3.

Если при расчете $(\sigma_F)_l$ и определении графика его изменения используется хотя бы один раз формула (7.31), то следует рассмотреть последовательно два одинаковых блока изменения напряжений (σ_L) (см. пример на рисунке 7.3). В этом случае число полуциклов (циклов) каждого типа между абсолютно наибольшими значениями $(\sigma_L)_{lb}$ принимают равным ожидаемому при эксплуатации числу блоков нагружения за вычетом 1, число остальных равно 1.

7.5 Определение местных условных упругих приведенных напряжений с использованием эффективного коэффициента концентрации напряжений

Местные условные упругие приведенные напряжения (σ_F) при использовании эффективного коэффициента концентрации K_{ef} вычисляют по формуле

$$(\sigma_F)_l = \frac{K_{ef}}{K_\sigma}[(\sigma_L)_l - (\sigma_L)_h] + (\sigma_F)_h \tag{7.32}$$

или по формуле

$$(\sigma_F)_l = K_{ef}[(\sigma)_l - [(\sigma)_h] + (\sigma_F)_h. \tag{7.33}$$

Эффективный коэффициент концентрации K_{ef} местных приведенных напряжений определяется по результатам испытаний на усталость.

Геометрия, состояние поверхности, номинальные напряжения и градиенты местных напряжений в зоне концентрации испытываемого компонента, модели или образца, их материал и термообработка, условия нагружения и контакт с теплоносителем должны соответствовать компоненту, для обоснования прочности которого определяется эффективный коэффициент концентрации.

Применение K_{ef} при расчете местных приведенных напряжений должно быть согласовано со способом обработки экспериментальных данных при его определении.

В расчете при $(\sigma_{aL}) \le R^T_{p0,2}$ эффективный коэффициент концентрации напряжений вычисляют по формуле

$$K_{ef} = 1 + q(K_\sigma - 1), \tag{7.34}$$

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

Если $(\sigma_{aL}) = K_\sigma(\sigma_a) \ge R^T_{-1}$, то коэффициент q вычисляют по формуле

$$q = q_0 + \frac{1 - q_0}{R^T_{p0,2} - R^T_{-1}}\left[K_\sigma(\sigma_a) - R^T_{-1}\right], \tag{7.35}$$

а если $(\sigma_{aL}) = K_\sigma(\sigma_a) < R^T_{-1}$, то q принимается равным q_0, где q_0 — коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений, определенный при амплитуде местных напряжений, равной пределу выносливости R^T_{-1} и выбираемый в соответствии с таблицей 7.1.

Таблица 7.1 — Значения коэффициента чувствительности q_0

$R^T_{p0,2}/R^T_m$	q_0	Зона концентрации напряжений в компонентах
0,4 0,6 0,8	0,9 0,95 1,0	Угловой переход при радиусе скругления от 10 до 40 мм
0,4 0,6 0,8	0,7 0,8 0,9	Скругления в вершинах пазов и опорных буртов при радиусе скругления от 4 до 10 мм
Примечание — При промежуточном значении $R^T_{p0,2}/R^T_m$ значение q_0 определяется путем линейной интерполяции.		

7.6 Формирование расчетных циклов изменения напряжений для расчета на циклическую прочность

7.6.1 Если приведенные местные условные упругие напряжения определялись с применением теории наибольших касательных напряжений Треска, то формирование расчетных циклов изменения напряжений для расчета на циклическую прочность должно проводиться в порядке, изложенном в 7.6.2.

7.6.2 По трем графикам местных приведенных напряжений должно быть определено наибольшее по абсолютному значению условное упругое напряжение $(\sigma_F)_{max}$ для всего процесса изменения напряжений.

Формирование расчетных циклов или полуциклов напряжений выполняют на основе полной истории нагружения за период от t_l до t_m. При этом каждый раз при выделении очередного полуцикла из участков трех графиков изменения напряжений $(\sigma_F)_{ij}$, $(\sigma_F)_{jk}$, $(\sigma_F)_{ik}$ должна быть 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_l 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 должен быть уточнен путем вычитания величины повреждения от фиктивных участков из суммарного усталостного повреждения.

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

Порядок формирования расчетных циклов следующий:

а) выполняют первый этап основного парного освещения: на всех трех графиках должны быть освещены возрастающие участки. Образовавшиеся на трех графиках пятна тени сравнивают по величине. Если при одном освещении на каком-либо графике образовалось два или больше пятен, то в сравнении каждое пятно должно участвовать независимо. Из всех пятен тени, образовавшихся на трех графиках, следует выбирать пятно максимального размера. Если несколько пятен имеют одинаковый размер, то следует выбирать то, у которого верхняя граница расположена выше;

б) по выбранному пятну тени формируют расчетный возрастающий полуцикл напряжений следующим образом: его минимальное и максимальное значения должны быть приняты равными, соответственно, нижней и верхней границам выбранного пятна;

в) на графике, на котором был сформирован этот возрастающий полуцикл, выполняют второй этап основного парного освещения: освещают убывающие участки. Образовавшееся при этом пятно тени должно совпадать с пятном от возрастающих участков и на тех же принципах формируют расчетный убывающий полуцикл.

Сформированные таким образом расчетные возрастающий и убывающий полуциклы имеют одинаковые минимальные и максимальные значения. Такие полуциклы следует называть парными расчетными полуциклами. Парные расчетные полуциклы могут быть объединены в один расчетный цикл;

г) 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 $(\sigma_F)_{ij}$, на котором были сформированы очередные парные расчетные полуциклы, удаляют те участки, тень от которых вошла в выбранные пятна тени для этих полуциклов;

- на двух остальных графиках $(\sigma_F)_{jk}$ и $(\sigma_F)_{ik}$ части, расположенные в тех же интервалах времени, что и удаленные участки первого графика, подвергают дополнительному парному освещению. При этом остальные части этих двух графиков следует игнорировать. На каждом из двух графиков сравнивают 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, удаляют. Если совпадающих областей тени образовалось несколько, то удаляют только те освещенные участки, размер области тени от которых больше, а при равенстве — у которых область тени размещена выше;

д) процесс формирования циклов (полуциклов) повторяют по перечислениям а) — г) 7.6.2 до тех пор, пока не окажутся удаленными все участки рассматриваемых графиков.

7.6.3 Формирование расчетных циклов напряжений по результатам расчета с применением энергетической теории Мизеса проводится по одному графику изменения (σ_F) в последовательности, изложенной в 7.6.2, за исключением перечисления г) 7.6.2.

Каждый из сформированных расчетных циклов (полуциклов) напряжений для выполнения последующего расчета на циклическую прочность сопровождают информацией об эксплуатационных условиях (температуре, параметрах среды и флюенсе нейтронов, длительности реализации), соответствующих всем тем частям графиков напряжений, из которых он был составлен.

8 Расчет на статическую прочность

8.1 Расчет на статическую прочность без учета ползучести

8.1.1 Расчет на статическую прочность выполняется по номинальным допускаемым напряжениям, определенным без учета увеличения предела текучести и временного сопротивления под действием облучения.

8.1.2 При расчете на статическую прочность следует проверять выполнение условий прочности применительно к расчетным нагрузкам и ко всем расчетным режимам за исключением вибрационных и динамических нагрузок (включая сейсмические).

8.1.3 Значения приведенных напряжений расчетных групп категорий напряжений, определенные при расчете на статическую прочность компонента, не должны превышать значений, указанных в таблицах 8.1 и 8.2. Значения номинальных допускаемых напряжений $[\sigma]$ и $[\sigma]_w$ следует определять в соответствии с указаниями раздела 5.

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

Режим нагружения	$(\sigma)_1$	$(\sigma)_2$	$(\sigma)_{RV}$, $(\sigma)_{RK}$
НУЭ	$[\sigma]$	$1{,}3[\sigma]$	$\min\left\{\left(2{,}5-\frac{R^T_{p0,2}}{R^T_m}\right)R^T_{p0,2},\quad 2R^T_{p0,2}\right\}$
ННУЭ	$1{,}2[\sigma]$	$1{,}6[\sigma]$	—
УПА	$1{,}4[\sigma]$	$1{,}8[\sigma]$	—

Таблица 8.2 — Допускаемые напряжения для болтов и шпилек

Режим нагружения	$(\sigma)_1$	$(\sigma)_{3w}$	$(\sigma)_{4w}$
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	$1{,}4[\sigma]_w$	$1{,}8[\sigma]_w$	$2{,}4[\sigma]_w$

8.1.4 Средние напряжения смятия не должны превышать $1{,}5R^{T}_{p0,2}$. Если расстояние от края зоны приложения нагрузки до свободной кромки превышает размеры зоны, на которой действует нагрузка, допускаемые напряжения следует увеличить на 25 %.

8.1.5 Средние касательные напряжения среза, вызванные действием механических нагрузок на компонент за исключением резьбы, не должны превышать 0,5[σ] (в резьбах — при НУЭ $0{,}25R^{T}_{p0,2}$, при ННУЭ $0{,}30R^{T}_{p0,2}$, при УПА $0{,}35R^{T}_{p0,2}$).

8.1.6 При гидравлических испытаниях приведенные общие мембранные напряжения в компонентах не должны превышать $1{,}35[\sigma]^{Th}$, а приведенные напряжения, определенные по суммам составляющих общих или местных мембранных и общих изгибных напряжений, — $1{,}7[\sigma]^{Th}$. Напряжения σ_{mw} в болтах и шпильках не должны превышать $0{,}7R^{Th}_{p0,2}$.

8.1.7 При оценке статической прочности по размахам напряжений $(\sigma)_{RV}$ максимальные и минимальные абсолютные значения приведенных напряжений, входящих в определение этой категории, не должны превышать R^{T}_{m}.

8.1.8 Выполнение требований таблицы 8.1 по группе категорий напряжений $(\sigma)_{RV}$ и требования 8.1.7 должно быть обеспечено. В тех случаях, когда это требование не обеспечено, допускается отступление от этих требований (по согласованию с конструкторской (проектной) организацией) при условии, что возможное при эксплуатации искажение формы конструкции, связанное с невыполнением вышеуказанных требований, не повлияют на нормальную эксплуатацию активной зоны, органов управления и защиты (не будет нарушений герметичности различных соединений, отсутствий заклиниваний подвижных устройств, недопустимых искажений проходных сечений, определяющих расход теплоносителя и движение исполнительных и рабочих органов системы управления и защиты, недопустимых деформаций сопряженных деталей и т. п.).

8.2 Расчет на длительную статическую прочность

8.2.1 Расчет на длительную статическую прочность должен проводиться для компонентов в зонах с температурой T_t и выше и (или) в зонах, где компонент работает в условиях радиационной ползучести. При поверочном расчете на длительную статическую прочность следует рассматривать все эксплуатационные режимы, проходящие при температурах равных или выше T_t и (или) работающих в условиях радиационной ползучести, включая ННУЭ. Условия прочности компонентов приведены в таблице 8.3.

Таблица 8.3 — Условия прочности компонентов при расчете на длительную статическую прочность

Тип компонента	Расчетная группа категорий напряжений				
	$(\sigma)_1$	$(\sigma)_2$	$(\sigma)_{RV}$ или $(\sigma)_{RK}$	$(\sigma)_{3w}$	$(\sigma)_{4w}$
Силовые компоненты (опорные решетки, чехлы ТВС и т. д.)	$\begin{cases}[\sigma] \\ \sum\limits_{i=1}^{k}\dfrac{t_i}{[t]_i}\le 1\end{cases}$	$\begin{cases}K_t[\sigma] \\ \sum\limits_{i=1}^{k}\dfrac{t_i}{[t]_i}\le 1\end{cases}$	$\begin{cases}K'_t[\sigma] \\ \sum\limits_{i=1}^{k}\dfrac{t_i}{[t]_i}\le 1\end{cases}$	—	—
Компенсирующие устройства	$\begin{cases}[\sigma] \\ \sum\limits_{i=1}^{k}\dfrac{t_i}{[t]_i}\le 1\end{cases}$	$\begin{cases}K_t[\sigma] \\ \sum\limits_{i=1}^{k}\dfrac{t_i}{[t]_i}\le 1\end{cases}$	—	—	—
Болты и шпильки	$\begin{cases}[\sigma]_{wt} \\ \sum\limits_{i=1}^{k}\dfrac{t_i}{[t]_i}\le 1\end{cases}$	—	—	$\begin{cases}1{,}8[\sigma]_{wt} \\ \sum\limits_{i=1}^{k}\dfrac{t_i}{[t]_i}\le 1\end{cases}$	$\begin{cases}2{,}7[\sigma]_{wt} \\ \sum\limits_{i=1}^{k}\dfrac{t_i}{[t]_i}\le 1\end{cases}$

8.2.2 Компонент, рассчитываемый на длительную статическую прочность, должен удовлетворять условиям, принимаемым при расчете на статическую прочность во всем диапазоне температур ниже и выше T_t.

8.2.3 Приведенные напряжения групп категорий $(\sigma)_2$ и $(\sigma)_{RV}$ при расчете на длительную статическую прочность должны удовлетворять следующим условиям:

$$(\sigma)_2 \le K_t[\sigma]; \tag{8.1}$$

$$(\sigma)_{RV} \le K'_t[\sigma], \tag{8.2}$$

где $[\sigma]$ — номинальное допускаемое напряжение, вычисляемое по формуле

$$[\sigma] = \frac{R^T_{mt}}{1{,}5}; \tag{8.3}$$

K_t — коэффициент приведения напряжения $(\sigma)_2$ к мембранным, который определяется в зонах мембранных или местных мембранных напряжений по формулам

$$K_t = 1{,}25 - 0{,}25\frac{(\sigma)_m}{[\sigma]} \text{ или} \tag{8.4}$$

$$K_t = 1{,}25 - 0{,}25\frac{(\sigma)_{mL}}{[\sigma]}; \tag{8.5}$$

K'_t — коэффициент приведения напряжения $(\sigma)_{RV}$, $(\sigma)_{RK}$ к мембранным, который определяется в зонах мембранных или местных мембранных напряжений по формулам

$$K'_t = 1{,}75 - 0{,}25\frac{(\sigma)_m}{[\sigma]} \text{ или} \tag{8.6}$$

$$K'_t = 1{,}75 - 0{,}25\frac{(\sigma)_{mL}}{[\sigma]}. \tag{8.7}$$

Предел длительной прочности R^T_{mt} при определении $[\sigma]$ следует выбирать для суммарной длительности нагружения рассматриваемыми напряжениями при соответствующей температуре.

При расчете на длительную статическую прочность ТВС должны быть использованы минимальные значения механических свойств конструкционных материалов, которые следует принимать с учетом влияния облучения и теплоносителя.

Если срок службы компонента ТВС включает два или более режима нагружения, отличающихся по приведенному напряжению, дозе облучения или температуре, то должно выполняться условие по накопленному длительному статическому повреждению

$$\sum_i^k \frac{t_i}{[t]_i} \le 1, \tag{8.8}$$

где t_i — время нагружения рассматриваемым приведенным напряжением в течение i-го режима при температуре T_i за весь период эксплуатации [следует учитывать только время нагружения при температурах металла равных и выше T_t и (или) время работы в условиях радиационной ползучести];

$[t]_i$ — допускаемое время нагружения, определяемое по формулам для значений длительной прочности, соответствующее температуре T_i, дозе облучения и приведенному напряжению на i-м режиме, умноженному:
- для напряжений категории $(\sigma)_{2i}$ на множитель $1{,}5/K_t$;
- для напряжений $(\sigma)_{RVi}$ на множитель $1{,}5K'_t$;

i — число режимов нагружения, отличающихся температурой T_i, дозой облучения или приведенным напряжением.

Напряжения групп категорий $(\sigma)_{3w}$ и $(\sigma)_{4w}$ в болтах или шпильках должны удовлетворять следующим условиям:

$$(\sigma)_{3w} \le 1{,}8[\sigma]_{wt}; \tag{8.9}$$

$$(\sigma)_{4w} \le 2{,}7[\sigma]_{wt}; \tag{8.10}$$

где $[\sigma]_{wt}$ — номинальное допускаемое напряжение, вычисляемое по формуле

$$[\sigma]_{wt} = \frac{R^T_{mt}}{3}. \tag{8.11}$$

Если срок службы ТВС включает два или более режимов нагружения, отличающихся по напряжению, дозе облучения или температуре, то должно выполняться условие прочности по накопленному длительному статическому повреждению, приведенное в 8.2.3, при этом:

- t_i — время нагружения болта или шпильки рассматриваемым приведенным напряжением [$(\sigma)_{3w}$, $(\sigma)_{4w}$] в течение i-го режима при температуре T_i и соответствующей дозе облучения за весь период эксплуатации (следует учитывать только время нагружения при температурах металла равных и выше T_t и (или) в компонентах, работающих в условиях радиационной ползучести);

- $[t]_i$ — допускаемое время нагружения, определяемое по формулам для значений длительной прочности, соответствующей температуре T_i и приведенному напряжению на i-м режиме, умноженному:

- для напряжений категорий $(\sigma)_{3wi}$ на множитель 1,65;

- для напряжения категории $(\sigma)_{4wi}$ на множитель 1,1.

8.2.4 Среднее касательное напряжение в шпонках, штифтах и т. п., вызванное действием срезывающих усилий от механических и компенсационных нагрузок, действующих на компонент, не должно превышать 0,5[σ] (для шпонок, штифтов и т. п.), где номинальные допускаемые напряжения [σ] определяют согласно 8.2.3.

9 Расчет на устойчивость

9.1 Общие положения расчета на устойчивость

9.1.1 Расчет на устойчивость ТВС допускается выполнять аналитическими, либо численными методами (например, методом конечных элементов) с целью определения возможности потери устойчивости ТВС в целом, либо потери устойчивости отдельных компонентов.

9.1.2 При проведении расчета компонентов на устойчивость допускается определять критические значения нагрузки 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.

Устойчивость компонента обеспечена, если выполнено условие

$$F \le \frac{F_{kr}}{n_{kr}}, \tag{9.1}$$

где F — расчетная нагрузка;

F_{kr} — критическая нагрузка;

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

ξ — поправочный коэффициент, определяемый на основе соответствия рассчитываемого компонента типовым случаям либо экспериментально.

Для вычисления n_{kr} следует принимать наименьшее значение ξ.

9.1.3 Допускается расчет на устойчивость типовых компонентов проводить по ГОСТ Р 59115.9—2021 (подраздел 9.2).

9.1.4 При расчете на устойчивость должно учитываться формоизменение ТВС.

9.2 Расчет на устойчивость в условиях ползучести

9.2.1 Расчет на устойчивость в условиях ползучести следует проводить для компонентов, температура которых равна или превышает T_t и (или) работающих в условиях радиационной ползучести.

9.2.2 Расчет на устойчивость в условиях ползучести заключается в определении допускаемого времени работы при действии на рассчитываемый компонент заданных наружного давления и сжимающих нагрузок или в определении допускаемых нагрузок для заданного времени работы ТВС в условиях ползучести.

9.2.3 При расчетах следует использовать функцию установившейся ползучести, имеющую вид

$$e = \frac{\sigma}{E^T} + A\sigma^n t + Bk\sigma_i t, \tag{9.2}$$

где e — деформация;

σ — расчетное напряжение, МПа;

A — коэффициент температурной ползучести, $(1/\text{МПа})^n \cdot \text{с}^{-1}$;

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

n — показатель ползучести;

σ_i — интенсивность напряжений, МПа;

k — скорость набора повреждающей дозы, сна/с;

t — время, с.

9.2.4 На основе указанной зависимости между e и σ определяются значения B и n по кривым ползучести конкретного материала ТВС (см. 4.6).

9.2.5 Расчет применим при $\sigma_{kr} < R^T_{p0,2}$.

9.2.6 Расчет на устойчивость гладких длинных цилиндрических элементов, находящихся под действием наружного давления, в условиях ползучести следует проводить в соответствии с требованиями настоящего пункта.

9.2.6.1 Формулы (9.4)—(9.7) следует применять при выполнении следующего условия

$$0{,}005 \le \frac{s-c}{D_m} \le 0{,}2. \tag{9.3}$$

9.2.6.2 Расчетный срок службы следует вычислять по формуле

$$[t] = \frac{\xi\sigma_{kr}\left[1-\dfrac{2\sigma}{\xi\sigma_{kr}}\right]}{3^{\frac{n-1}{2}} nE^T\left(A\sigma^n + Bk\sigma_i\right)}. \tag{9.4}$$

9.2.6.3 Критическое напряжение следует вычислять по формуле

$$\sigma_{kr} = 1{,}1E^T\left(\frac{s-c}{D_m}\right)^2, \tag{9.5}$$

где ξ — поправочный коэффициент, определяемый из условия

$$\xi = \min\left\{0{,}7;\ \frac{\lambda}{1+\lambda}\right\},\ \lambda = \frac{R^T_{p0,2}}{\sigma_{kr}}. \tag{9.6}$$

9.2.6.4 Расчетное напряжение следует вычислять по формуле

$$\sigma = \frac{pD_m}{2(s-c)}. \tag{9.7}$$

9.2.7 Расчет на устойчивость гладких цилиндрических оболочек, нагруженных осевым сжатием, в условиях ползучести следует проводить в соответствии с требованиями данного пункта.

9.2.7.1 Формулы (9.9)—(9.18) следует применять при выполнении следующего условия

$$0{,}005 \le \frac{s-c}{D_m} \le 0{,}2. \tag{9.8}$$

9.2.7.2 Расчетное осевое напряжение следует вычислять по формуле

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

9.2.7.3 Расчетный срок службы следует вычислять как наименьшее из двух значений:

$$[t] = \frac{(s-c)\left[1-2\sigma/(\xi_1\sigma_{kr1})\right]}{2^n\left(A\sigma^n + Bk\sigma_i\right)A_n(n-1)D_m}\ln\frac{1+(B_n/A_n)(2l_0)^{n-1}}{(B_n/A_n)(2l_0)^{n-1}} \text{ и} \tag{9.10}$$

$$[t]=\frac{\xi_2\,\sigma_{kr2}\left[1-2\sigma/\left(\xi_2\,\sigma_{kr2}\right)\right]}{2^{n-1}E^T\left(A\sigma^n+Bk\sigma_i\right)}, \tag{9.11}$$

где ξ_1 — поправочный коэффициент, вычисляемый из условия

$$\xi_1=\min\left\{0{,}7;\ \frac{\lambda_1}{1+\lambda_1}\right\},\ \lambda_1=\frac{R^T_{p0,2}}{\sigma_{kr1}}; \tag{9.12}$$

σ_{kr1} — критическое напряжение, вычисляемое по формуле

$$\sigma_{kr1}=1{,}2E^T\left(\frac{D_m}{\eta L}\right)^2; \tag{9.13}$$

η = 1,0, если оба конца цилиндрической оболочки шарнирно оперты;
η = 0,5, если оба конца оболочки жестко заделаны;
η = 0,7, если один конец оболочки шарнирно оперт, а другой жестко заделан;

ξ_2 — поправочный коэффициент, определяется из условия

$$\xi_2=\min\left\{0{,}25;\ \frac{\lambda_2}{1+\lambda_2}\right\},\ \lambda_2=\frac{R^T_{p0,2}}{\sigma_{kr2}}; \tag{9.14}$$

σ_{kr2} — критическое напряжение, определяется по формуле

$$\sigma_{kr2}=E^T\cdot\frac{s-c}{D_m}; \tag{9.15}$$

A_n — коэффициент, определяется по формуле

$$A_n=0{,}5\sqrt{3n}; \tag{9.16}$$

B_n — коэффициент, определяется по формуле

$$B_n=\frac{(3n)^{n/2}A_{n3}}{(n+1)^{\frac{n+1}{2}}}; \tag{9.17}$$

l_0 — коэффициент, определяется по формуле

$$l_0=\frac{2\cdot10^{-4}D_m}{s-c}; \tag{9.18}$$

B — коэффициент ползучести, см. 9.2.4, $(1/\text{МПа})^n\cdot\text{с}^{-1}$;
n — показатель ползучести, см. 9.2.4;
A_{n3} — следует определять по графику на рисунке 9.1 в зависимости от n.

9.2.8 Устойчивость компонента следует считать обеспеченной, если выполняется условие

$$t\le[t]. \tag{9.19}$$



Рисунок 9.1 — График для определения A_{n3}

10 Расчет на циклическую прочность

10.1 Расчет на циклическую прочность при отсутствии ползучести

10.1.1 Расчет на циклическую прочность при отсутствии ползучести проводят для компонентов, температура которых не превышает T_t и в которых отсутствует радиационная ползучесть.

10.1.2 При расчете на циклическую прочность следует использовать минимальные значения кратковременных механических характеристик материала с учетом воздействия эксплуатационных факторов.

10.1.3 Определение допускаемого числа циклов по заданным амплитудам условных упругих напряжений или допускаемых амплитуд условных упругих напряжений для заданного числа циклов должно быть проведено по формулам (10.1) и (10.2), связывающим допускаемые амплитуды условных упругих напряжений и допускаемые числа циклов.

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

Если процесс нагружения состоит из ряда циклов, характеризуемых амплитудами напряжений $(\sigma_{aF})_i$ и соответствующими числами циклов N_i, то должно выполняться условие прочности по накопленному усталостному повреждению согласно 10.1.13.

10.1.5 Допускаемая амплитуда условного упругого напряжения $[(\sigma_{aF})]$ или допускаемое число циклов $[N_0]$ при $[N_0] \le 10^{12}$ равны минимальному значению из двух, определяемых по формулам (10.1) и (10.2):

$$\left.\begin{aligned}\left[\sigma_{aF}\right] &= \frac{E^T e_c^T}{\left(4n_N\left[N_0\right]\right)^m} + \frac{R_c^T - R_{p0,2}^{T\min}}{\left(4n_N\left[N_0\right]\right)^{m_e} - 1} \qquad (10.1)\\ \left[\sigma_{aF}\right] &= \frac{E^T e_c^T}{n_\sigma\left(4\left[N_0\right]\right)^m} + \frac{R_c^T - R_{p0,2}^{T\min}}{n_\sigma\left[\left(4\left[N_0\right]\right)^{m_e} - 1\right]} \qquad (10.2)\end{aligned}\right\},$$

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

m, m_e — характеристики конструкционного материала;

R_c^T — характеристика прочности, принимаемая равной

$$R_c^T = R_m^T(1 + 1{,}4 \cdot 10^{-2} Z^T); \qquad (10.3)$$

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

$$e_c^T = 1{,}15 \lg \frac{100}{100 - Z_c^T}. \qquad (10.4)$$

При использовании минимальных значений относительного поперечного сужения Z^T, при $Z^T \le 50$ % следует принимать $Z_c^T = Z^T$. При $Z^T > 50$ % следует принимать $Z_c^T = 50$ %.

Показатели степени m и m_e и предел выносливости R_{-1}^T следует принимать по таблице 10.1.

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

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

10.1.6 Значения характеристик E^T, Z^T, R_m^T для неизотермического цикла следует принимать наименьшими в интервале рабочих температур цикла. Коэффициент запаса прочности по напряжениям n_σ следует принимать равным 2, а по числу циклов n_N равным 10.

При расчете резьбовых участков шпилек и болтов с использованием упрощенного упругопластического расчета по 7.4, следует принимать коэффициенты запаса n_σ = 1,5 и n_N = 3. При использовании коэффициентов K_{ef}, определенных по 7.5, следует принимать n_σ = 1,5 и n_N = 5.

10.1.7 Допускаемую амплитуду напряжений для сварного соединения $[\sigma_{aF}]_s$ следует вычислять по формуле

$$[\sigma_{aF}]_s = \varphi_s[\sigma_{aF}], \tag{10.5}$$

где $[\sigma_{aF}]$ — допускаемая амплитуда условных упругих напряжений, определяемая по формулам (10.1) и (10.2) для основного материала при заданном числе циклов;

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

Значения φ_s приведены в таблицах 10.2 и 10.3. При отсутствии необходимых данных в таблицах 10.2 и 10.3 значение φ_s допускается принимать равным 0,5.

10.1.8 В тех случаях, когда низкочастотные циклические напряжения, связанные с пуском, остановом, изменением мощности, срабатыванием аварийной защиты или другими защитами, сопровождаются наложением высокочастотных напряжений, например, вызванных вибрацией, пульсацией температур при перемешивании потоков теплоносителя с различной температурой, расчет на циклическую прочность проводят с учетом высокочастотного напряжения.

10.1.9 Исходные данные о высокочастотном нагружении (амплитуда $\langle\sigma_a\rangle$, частота f), следует получать путем анализа результатов измерений при эксплуатации ТВС или путем их расчета.

10.1.10 Сочетания низкочастотного циклического напряжения с амплитудой (σ_{aF}) и частотой f_0 и наложенного высокочастотного напряжения с амплитудой $\langle\sigma_a\rangle$ и частотой f вызывает снижение допускаемого числа циклов низкочастотного напряжения от $[N_0]$ до $[N]$, которое следует определять по формуле

$$[N] = \frac{[N_0]}{\chi}, \tag{10.6}$$

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

Для цикла низкочастотного напряжения i-го типа повреждение a_3^* следует определять по формуле

$$(a_3^*)_i = \chi_i \frac{N_i}{[N_0]_i}. \tag{10.7}$$

Коэффициент χ независимо от степени концентрации напряжений, остаточных напряжений, максимального напряжения цикла, значения номинальных напряжений и температуры в пределах до T_t следует определять по формуле

$$\chi = \left(\frac{f}{f_0}\right)^{\eta\frac{\langle\sigma_a\rangle}{(\sigma_a)}}, \tag{10.8}$$

где $f_0 = 1/(t_1 + t_2)$ — частота цикла низкочастотных напряжений, определяемая без учета периода времени, в течение которого происходит наложение высокочастотных напряжений на постоянные напряжения (см. рисунок 10.1);

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

η — коэффициент, зависящий от конструкционного материала, принимаемый по таблице 10.4.

Таблица 10.2 — Значения коэффициента снижения циклической прочности сварных соединений φ_s

Основной металл	Метод сварки	Сварочный материал	Вид термообработки после сварки	φ_s
Стали аустенитного класса	Ручная сварка	Электрод марки ЭА-395/9	Без термообработки	1,0
		Электроды марок ЭА-400-10У, ЭА-898/21Б, ЭИО-8	Отпуск	0,8

Таблица 10.3 — Значения коэффициента снижения циклической прочности сварных соединений φ_s

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

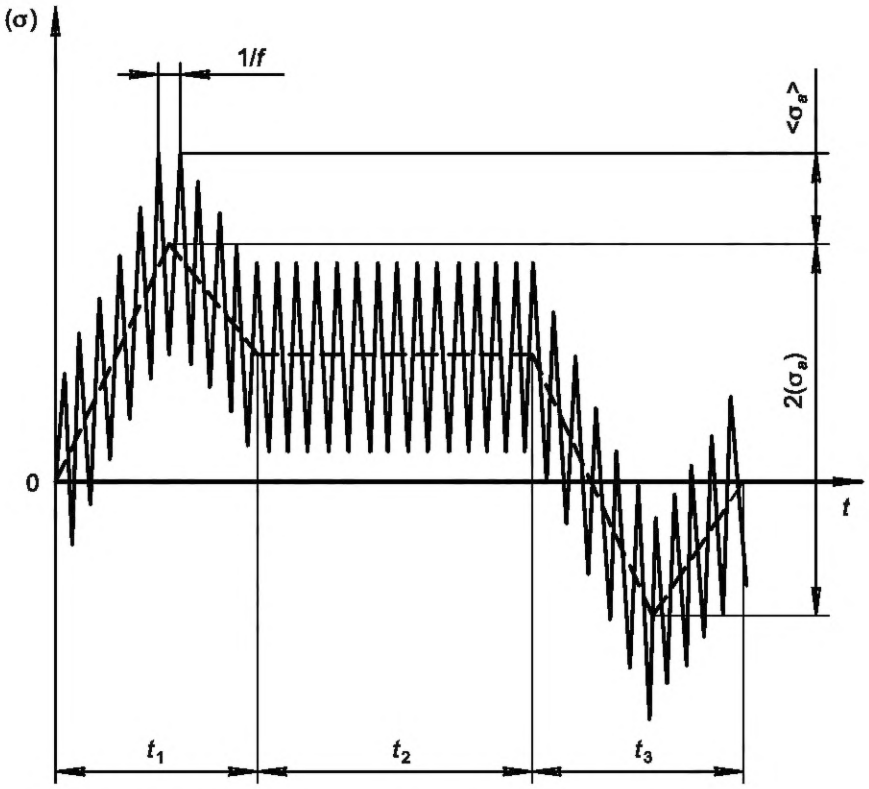


Рисунок 10.1 — Форма цикла при двухчастотном нагружении

Таблица 10.4 — Значения коэффициента η

Вид конструкционного материала	Высокохромистые стали	Стали аустенитного класса $R_m^T \le 500$ МПа
η	2,0	1,54

При отсутствии необходимых данных в таблице 10.4 используют значение $\eta = 2$.

10.1.11 Метод расчета при двухчастотном циклическом нагружении следует применять при выполнении всех следующих условий:

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

$$0 < \langle\sigma_a\rangle / (\sigma_a) \le 0{,}5; \qquad (10.9)$$

б) абсолютное значение максимального и минимального низкочастотных напряжений при двухчастотном нагружении не превышает значения $\left(0{,}2\cdot10^{-2}E^{T}+R_{p0,2}^{T}\right)$ при рассматриваемой температуре;

в) отношение f/f_0 не превышает $5\cdot10^6$;

г) число высокочастотных циклов с амплитудой $\langle\sigma_a\rangle$ в пределах времени $(t_1 + t_2)$ превышает 10 (см. рисунок 10.1).

10.1.12 Если при расчете на циклическую прочность ТВС не обеспечиваются требуемые коэффициенты запаса прочности, то оценку циклической прочности проводят на основе экспериментальных кривых усталости, полученных для рассматриваемых условий нагружения, контакта с теплоносителем, состояния поверхности компонентов ТВС с учетом соответствующих коэффициентов запаса прочности n_σ, n_N.

10.1.13 Условие прочности при наличии различных циклических нагрузок проверяют по формуле

$$\sum_{i=1}^{k}\frac{N_i}{[N]_i}=a_N\le[a_N], \tag{10.10}$$

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

k — общее число типов циклов;

$[N]_i$ — допускаемое число циклов i-го типа;

a_N — накопленное усталостное повреждение, предельное значение которого $[a_N] = 1{,}0$.

В общем случае накопленное усталостное повреждение должно удовлетворять условию

$$a=\max\left\{\begin{matrix}a_1+a_2+a_3\\ a_2^{*}\end{matrix}\right\}\le[a_N], \tag{10.11}$$

где a_1 — повреждение от низкочастотных циклов напряжения, на которые не наложены высокочастотные напряжения;

a_2 — повреждение от высокочастотных напряжений при постоянных эксплуатационных напряжениях (стационарные режимы);

a_2^{*} — повреждение типа a_2, определяемое для условий нагружения при стационарном режиме, приводящее к наибольшему повреждению за время эксплуатации;

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

В этом случае повреждение от высокочастотных напряжений в течение циклов низкочастотных напряжений следует определять по формуле

$$a_3 = a_3^{*} + a_3^{**}. \tag{10.12}$$

Накопленные повреждения a_1 и a_2 определяют по формуле (10.10).

10.2 Расчет на длительную циклическую прочность

10.2.1 Расчет на длительную циклическую прочность следует проводить для компонентов, температура которых равна или превышает T_t в целом или в отдельных зонах, в которых возникает радиационная ползучесть.

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

- условиям статической прочности;
- условиям длительной статической прочности.

При расчете на длительную циклическую прочность следует использовать средние значения длительных механических характеристик материала с учетом воздействия эксплуатационных факторов. Допускается проводить расчет по минимальным значениям длительных механических характеристик.

10.2.3 При расчете на длительную циклическую прочность следует применять положения 10.1.2, 10.1.3, 10.1.6, 10.1.9—10.1.13.

10.2.4 Допускаемая амплитуда условного упругого напряжения $[(\sigma_{aF})]$ или допускаемое число циклов $[N_0]$ для сталей при $[N_0] \le 10^7$ равны минимальному значению из двух, определяемых по формулам (10.1) и (10.2). При этом следует принимать

$$R_c^T = \frac{R_{mt}^T}{1 - 0{,}01 \cdot Z_t^T}; \tag{10.13}$$

$$e_c^T = e_{mt}^T;\ R_{-1}^T = R_{-1t}^T;\ m = 0{,}5; \tag{10.14}$$

$$m_e = 0{,}132 \cdot \lg\left(\frac{2{,}5}{1 - 0{,}01 \cdot Z_t^T}\right), \tag{10.15}$$

где t — время эксплуатации компонента при температурах, вызывающих ползучесть, ч;

R_{mt}^T — предел длительной прочности при максимальной температуре цикла нагружения за время t, МПа;

$e_{mt}^T = 1{,}15 \cdot \lg\frac{1}{1 - 0{,}01 \cdot Z_{mt}^T}$ — характеристика длительной пластичности, определяемая равномерным относительным сужением поперечного сечения Z_{mt}^T при длительном статическом разрушении;

R_{-1t}^T — предел выносливости при максимальной температуре цикла и 10^7 циклов нагружения за время t.

Если экспериментально обосновано, что $R_{-1t}^T > 0{,}4R_{mt}^T$, то показатель степени вычисляется по формуле

$$m_e = 0{,}132 \cdot \lg\left(\frac{R_{mt}^T}{R_{-1t}^T\left(1 - 0{,}01 \cdot Z_t^T\right)}\right). \tag{10.16}$$

Значения Z_{mt}^T определяется по формуле

$$Z_{mt}^T = \frac{100A_t^T}{100 + A_t^T}, \tag{10.17}$$

где A_t^T — относительное удлинение образца при длительном статическом разрушении за время t.

Z_{mt}^T принимается наименьшим в пределах температур цикла нагружения.

10.2.5 Если температура цикла находится в интервале от T_t до T_t + 50 °С, то значения e_{mt}^T для промежуточных значений температуры определяют линейной интерполяцией по температуре между значением e_c^T при $T = T_t$ и значением e_{mt}^T при $T = T_t$ + 50 °С.

10.2.6 Коэффициент запаса прочности по напряжениям n_σ следует принимать равным 2, а по числу циклов n_N равным 10.

10.2.7 Допускаемую амплитуду напряжений для сварных соединений $[(\sigma_{aF})]_s$ вычисляют по формуле

$$[(\sigma_{aF})]_s = \varphi_s[(\sigma_{aF})], \tag{10.18}$$

где $[(\sigma_{aF})]$ — амплитуда допускаемых условных упругих напряжений, определяемая для основного материала при заданном числе циклов.

10.2.8 Если рассматриваемый компонент нагружают циклическими нагрузками при температурах $T < T_t$ и $T \ge T_t$, то следует учитывать повреждения от всех циклов независимо от температуры, и условие (10.10) должно выполняться для суммы усталостных повреждений независимо от температуры цикла.

Допускается время эксплуатации разбивать на временные интервалы. Число ожидаемых циклов различного типа N_i следует распределять по интервалам пропорционально их протяженности. Допускаемое число циклов для каждого интервала времени определяют согласно 10.2.5. Значения R_{mt}^T, Z_t^T и Z_{mt}^T для расчета в каждом из временных интервалов принимаются для времени выдержки в условиях

ползучести t_i, соответствующего окончанию i-го интервала. Значение Z_{mt}^{T} должно быть не больше минимального в предшествующих интервалах. Накопленное усталостное повреждение при нагружении циклами различного типа следует определять по формуле (10.10), как сумму отношений ожидаемых чисел циклов N_i к допускаемым $[N]_i$ по всем интервалам.

10.2.9 При расчете длительной циклической прочности компонентов, работающих в условиях нейтронного облучения, за допускаемое число циклов данного типа принимают минимальное из двух значений:

- число циклов $[N_0]_F = [N_0]/\psi_F$, где $[N_0]$ — число циклов для амплитуды напряжений по формулам (10.1) и (10.2) (при расчетах для условий, не вызывающих ползучесть);
- число циклов по расчетной кривой усталости или соответствующим уравнениям для амплитуды напряжений, определенной по формулам (10.1) и (10.2) и поделенной на коэффициент φ_F.

Значения коэффициентов φ_F и ψ_F определяются в соответствии с 4.6. В случае отсутствия данных по φ_F и ψ_F допускается использовать значения, приведенные в таблице 10.5.

Таблица 10.5 — Значения коэффициентов φ_F и ψ_F

Тип материала	Температура, °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}
Высокохромистые стали	20—350	ψ	1,0	2,2	5,0	—	—	—	—	—	—	—
Стали аустенитного класса	475—00	φ	1,0	0,90	0,85	0,80	0,75	0,7	0,67	0,65	0,63	0,6
	20—600	ψ	1,0	1,6	2,6	4,2	6,5	10	17	30	—	—

Примечание — Для промежуточных значений переноса нейтронов коэффициенты φ_F и ψ_F получают линейной интерполяцией.

11 Расчет на сопротивление разрушению

11.1 Общие положения

11.1.1 Расчет на сопротивление разрушению допускается не проводить для:

- компонентов из сталей аустенитного класса, подвергающихся облучению до флюенса не более $1{,}5 \cdot 10^{25}$ нейтр./м^2 при $E \geq 0{,}1$ МэВ;
- для компонентов из высокохромистых сталей, подвергающихся облучению до флюенса не более $1{,}0 \cdot 10^{22}$ нейтр./м^2 при $E \geq 0{,}1$ МэВ.

11.1.2 Расчет на сопротивление разрушению проводится для всех режимов эксплуатации, включая НУЭ, ННУЭ, УПА, УИ.

11.1.3 Расчет проводится для зон компонента, в которых возможен нестабильный рост трещины, таких как сварные соединения, области с наибольшими значениями коэффициентов интенсивности напряжений, с наименьшими допускаемыми значениями характеристик трещиностойкости, а также с наименьшими отношениями допускаемых значений характеристик трещиностойкости к расчетным.

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

11.1.5 Расчетный дефект для основного металла и сварного швов цилиндрических, сферических, конических, эллиптических, плоских компонентов ТВС следует принимать в виде поверхностной полуэллиптической трещины (рисунок 11.1), а в окрестности отверстий — в виде поверхностной четверть эллиптической трещины (рисунок 11.2) глубиной $a = 0{,}25s$ с соотношением полуосей $c/a = 1/3$.

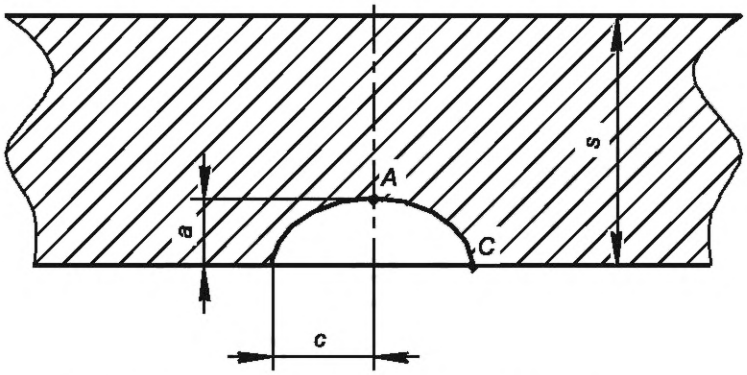


Рисунок 11.1 — Поверхностная полуэллиптическая трещина

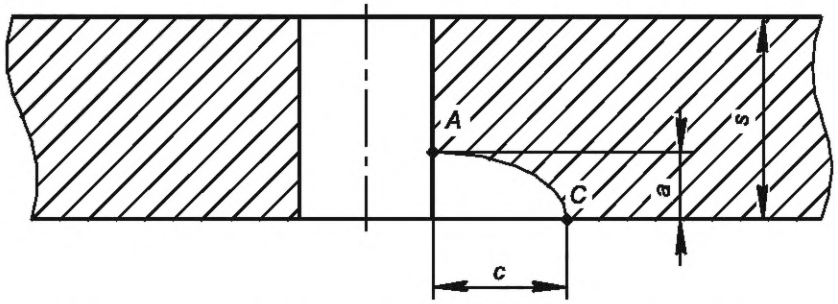


Рисунок 11.2 — Поверхностная четвертьэллиптическая трещина

Расчетный дефект следует располагать параллельно площадкам действия максимальных нормальных напряжений.

11.1.6 Коэффициент запаса прочности при расчете на сопротивление разрушению n_K принимается, в зависимости от категории расчетного режима, равным:

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

11.2 Условия прочности

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

$$K_J \le |K_J|_i, \tag{11.1}$$

или

$$K_I \le [K_I]_i, \tag{11.2}$$

где K_I, K_J — коэффициенты интенсивности напряжений, рассчитываемые в линейной или нелинейной постановке;

$[K_I]_i$, $[K_J]_i$ — допускаемые значения коэффициентов интенсивности напряжений, определяемые согласно 11.3;

i — индекс, указывающий на то, что допускаемые значения коэффициентов интенсивности напряжений различаются в зависимости от расчетного режима: $i = 1$ для НУЭ; $i = 2$ для УИ и ННУЭ; $i = 3$ для УПА.

11.2.2 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 компонента ТВС в анализируемой зоне, включая остаточные напряжения в сварном соединении. Допускается принимать остаточное напряжение равным пределу текучести при температуре 20 °С.

Коэффициенты интенсивности напряжений K_I допускается определять согласно 11.4.

11.3 Допускаемые значения коэффициентов интенсивности напряжений

11.3.1 Допускаемые значения $[K_J]$

Допускаемое значение коэффициента интенсивности напряжений K_J определяется по формуле

$$\left[K_J\right]_i = \frac{K_{Jc}}{n_K}, \tag{11.3}$$

где K_{Jc} — критическое значение коэффициента интенсивности напряжений;

n_K — коэффициент запаса, принимаемый по следующим правилам:

- для высокохромистых сталей при температуре T, не превышающей T_t, n_K определяется по 11.1.6, при температуре T, превышающей T_t, n_K = 1,1;
- для сталей аустенитного класса n_K = 1,1.

11.3.2 Допускаемые значения $[K_I]$

11.3.2.1 Допускаемые значения коэффициентов интенсивности напряжений $[K_I]$ рассчитываются на основе температурных зависимостей K_{Ic} или K_{Jc} материалов в исходном состоянии (без облучения).

11.3.2.2 Допускаемые значения коэффициентов интенсивности напряжений зависят от приведенной температуры $(T - T_к)$ и расчетного случая. Изменение свойств материалов в процессе эксплуатации учитывается введением в расчет сдвигов критической температуры хрупкости $T_к$ вследствие различных воздействий в процессе эксплуатации. Зависимость $[K_I]$ 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 ΔT.

Коэффициенты запаса n_K принимаются согласно 11.1.6.

Температурный запас ΔT принимается:

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

Значение критической температуры хрупкости $T_к$ принимается согласно подразделу 11.3.3.

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

11.3.3 Критическая температура хрупкости

11.3.3.1 Критическая температура хрупкости конструкционного материала определяется по формуле

$$T_к = T_{к0} + \Delta T_T + \Delta T_F, \tag{11.4}$$

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

ΔT_T — сдвиг критической температуры хрупкости вследствие температурного старения;

ΔT_F — сдвиг критической температуры хрупкости вследствие влияния нейтронного облучения.

11.3.3.2 Значения $T_{к0}$, ΔT_T, ΔT_F принимают в соответствии с 4.6.

11.4 Определение коэффициента интенсивности напряжений K_I

11.4.1 Расчет с использованием K_I допускается проводить, если выполняется условие

$$\sigma_{eff}^H \le 0{,}8R_{p0{,}2}^T, \tag{11.5}$$

где σ_{eff}^H — эффективные нетто-напряжения.

Значение σ_{eff}^H вычисляют по формуле

$$\sigma_{eff}^H = \frac{\sigma_{eff}}{1 - \dfrac{a/(s+s_H)}{1 + \dfrac{2}{\pi}\dfrac{s+s_H}{c}\left(1 - \dfrac{a}{s+s_H}\right)^{0,1}}}, \tag{11.6}$$

где σ_{eff} — эффективные брутто-напряжения.

Эффективные брутто-напряжения σ_{eff} определяются из условия

$$K_I\{\sigma_{eff}\} = K_I\{\sigma\}, \quad (11.7)$$

где $K_I\{\sigma\}$ — максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений в точке A (рисунки 11.1 и 11.2) при действии напряжений расчетного режима, неравномерно распределенных по толщине стенки компонента;

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

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

11.4.2 В случае невыполнения условия (11.5), расчет должен проводиться методами нелинейной механики разрушения с использованием K_J (вычислением J-интеграла) на основе НДС в компоненте, рассчитанного в упругопластической постановке.

11.4.3 Допускается в случае невыполнения условия (11.5) 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

$$r = \frac{10^3}{6\pi}\left(\frac{K_I}{R^T_{p0,2}}\right)^2, \quad (11.8)$$

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

$$K_{Ip} = \alpha K_I\sqrt{\frac{a+r}{a}}, \quad (11.9)$$

где коэффициент α следует определять по следующим правилам:

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

11.4.4 Коэффициент интенсивности напряжений K_I для выбранных расчетных трещин определяется аналитически, численно или экспериментально.

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

$$K_I = \frac{\eta\left(\sigma_p M_p + \sigma_q M_q\right)\left(\pi\frac{a}{10^3}\right)^{\frac{1}{2}}}{Q}, \quad (11.10)$$

где η — коэффициент, учитывающий влияние концентрации напряжений, определяемый согласно 11.4.8 и 11.4.9;

σ_p — составляющая напряжений растяжения, МПа;

σ_q — составляющая изгибных напряжений, МПа;

$$M_p = 1 + 0{,}12 \cdot (1 - a/c);$$
$$M_q = 1 - 0{,}64 \cdot a/h;$$

a — глубина трещины, мм;

c — полудлина трещины, мм;

h — длина зоны, в пределах которой составляющая изгибных напряжений сохраняет положительное значение, мм. При расчетах для режимов НУЭ и УИ допускается принимать $h = 0{,}5s$;

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

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

11.4.6 Составляющая напряжений растяжения (кольцевых или осевых) вычисляют по формуле

$$\sigma_{jp} = \frac{1}{s}\int_{s} \sigma_j dx, \tag{11.11}$$

где j — координата θ или Z;

θ — окружное направление;

Z — осевое направление;

σ_{jp} — функция изменения напряжений по толщине стенки;

s — толщина стенки в расчетном сечении.

11.4.7 Значение составляющей напряжений изгиба вычисляют по формуле

$$\sigma_{jq} = \sigma_{jn} - \sigma_{jp}, \tag{11.12}$$

где σ_{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. Допускается определять K_I по формуле

$$K_I = \eta(0{,}7\sigma_p + 0{,}45\sigma_q) \cdot (s/10^3)^{1/2}, \tag{11.13}$$

где σ_p и σ_q в МПа; s в мм; K_I в МПа $\cdot$ м$^{1/2}$.

11.4.8 Коэффициент η для зон перехода жесткостей определяется по формулам:

при $0 < s/R_2 \le 5$ $$\eta = 1 + (K_\sigma - 1)^{0{,}7} \cdot 1{,}8/(s/R_2); \tag{11.14}$$

при $s/R_2 > 5$ $$\eta = 1 + (K_\sigma - 1)^{0{,}7} \cdot 9/(s/R_2)^2; \tag{11.15}$$

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

K_σ — теоретический коэффициент концентрации (допускается принимать равным значению K_σ при растяжении).

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

Допускается определять η по графикам на рисунке 11.3.

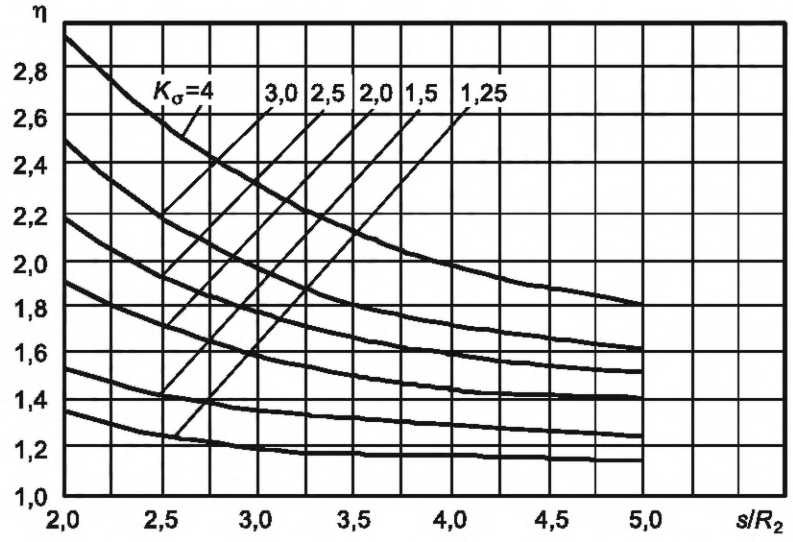
11.4.9 Коэффициент η для зон отверстий (присоединения патрубков, штуцеров, труб) определяется по формулам:

при $s/R_1 \le 0{,}8$ $$\eta = [1 + 5(K_\sigma - 1) \cdot \exp(-0{,}86s/R_1)]^{1/2}; \tag{11.16}$$

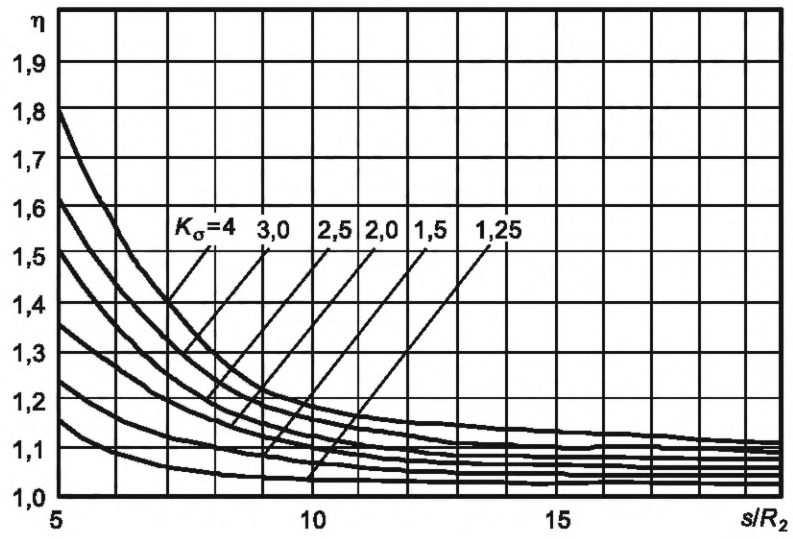
при $s/R_1 > 0{,}8$ $$\eta = [1 + 2(K_\sigma - 1)/(s/R_1)]^{1/2}, \tag{11.17}$$

где R_1 — радиус отверстия.

Допускается η определять по графикам на рисунке 11.4.

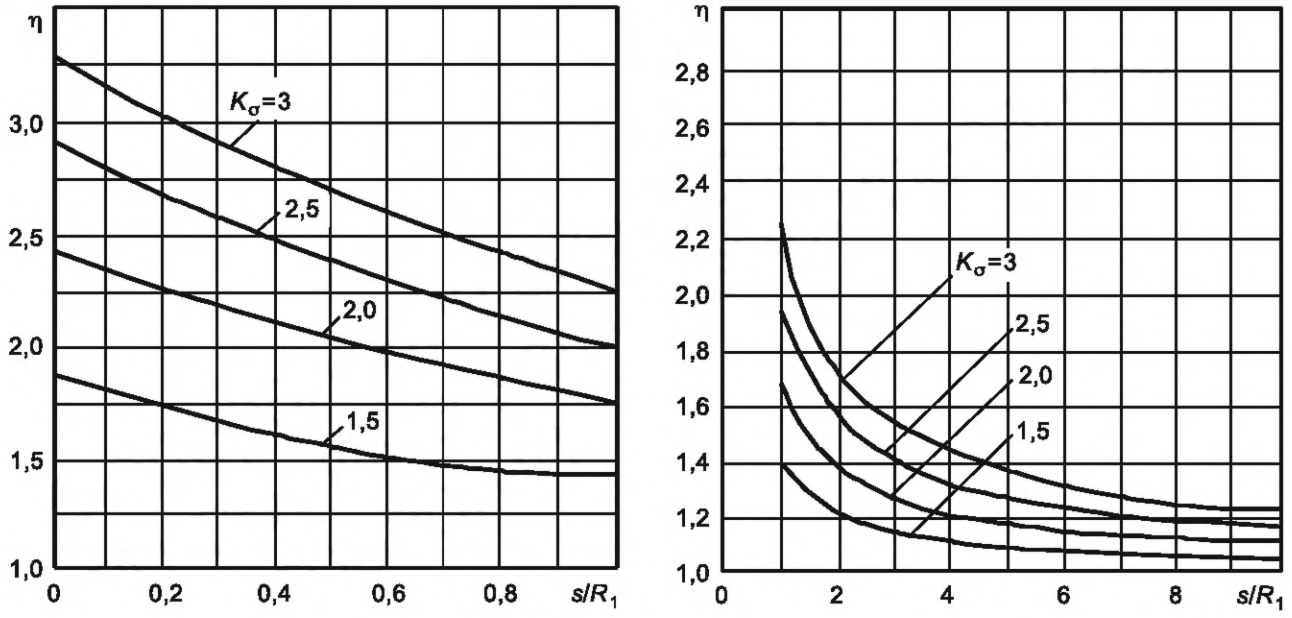


а) $2 < s/R_2 \le 5$



б) $s/R_2 > 5$

Рисунок 11.3 — Зависимость коэффициента η от отношения s/R_2 для зон перехода жесткостей



а) $s/R_1 \le 1$ б) $s/R_1 > 1$

Рисунок 11.4 — Зависимость коэффициента η от отношения s/R_1 для зон расположения отверстий

12 Расчет по предельной деформации

Значения накопленной вязкопластической деформации растяжения не должны превышать предельного допустимого значения, определяемого по формуле

$$\left[\varepsilon^{CR}\right] = \frac{\varepsilon^{CR}_{\text{пред}}}{k_\varepsilon}, \tag{12.1}$$

,

где k_ε — коэффициент запаса (k_ε = 1,5);

$\varepsilon^{CR}_{\text{пред}}$ — предельное значение накопленной деформации.

Значение $\varepsilon^{CR}_{\text{пред}}$ следует определять в соответствии с 4.6.

13 Расчет на прогрессирующее изменение формы и размеров

13.1 Расчет на прогрессирующее изменение формы и размеров ТВС (формоизменение) проводят применительно к компонентам, для которых остаточные изменения формы и размеров в работе недопустимы или ограничены заданными пределами по условиям нормальной эксплуатации ТВС.

13.2 Расчет проводят для нормальных и при нарушении нормальных условий эксплуатации с учетом всех расчетных нагрузок, указанных в 4.23.

13.3 Расчет изменения геометрических размеров компонента проводят посредством решения вязкоупругопластической задачи (с учетом термической ползучести, радиационного распухания и ползучести).

13.4 Весь рассматриваемый период эксплуатации должен быть разбит на временные интервалы Δt_i, так что $t_{i+1} = t_i + \Delta t_i$. Для каждого временного интервала Δt_i решается вязкоупругопластическая задача путем пошагового прослеживания истории нагружения на данном временном интервале, причем временные шаги $\Delta\tau_j$ для решения указанной задачи должны быть $\Delta\tau_j << \Delta t_i$.

13.5 На каждом временном интервале Δt_i следует использовать механические характеристики конструкционного материала, которые соответствуют концу рассматриваемого временного интервала Δt_i (соответствуют времени t_{i+1}). Допускается использовать данные по механическим характеристикам, соответствующие концу рассматриваемого периода эксплуатации.

13.6 Найденные расчетом значения перемещений, накопленных в компоненте в течение назначенного срока службы с учетом числа повторений эксплуатационных режимов, не должны превышать допускаемых, установленных на основании эксплуатационных требований в ПКД.

13.7 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.

13.8 Уточненная оценка приспособляемости проводится для НУЭ и ННУЭ для всех расчетных нагрузок, кроме внешних динамических и вибрационных. 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

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

$$y \le 4{,}65 \text{ в случае } x = 0{,}3, \qquad (13.3)$$

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

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

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.

УДК 621.039:531:006.354 ОКС 27.120.20

Ключевые слова: тепловыделяющие сборки, прочность, поверочный расчет, статические нагрузки

Редактор *Е.В. Якубова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *И.А. Королева*
Компьютерная верстка *Л.А. Круговой*

Сдано в набор 13.01.2025. Подписано в печать 04.02.2025. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 4,65. Уч.-изд. л. 3,95.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

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

gost.e-ecolog.ru