ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 70423— 2022

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ КАНАЛЬНОГО РЕАКТОРА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Расчет на прочность на стадии эксплуатации блоков атомных станций

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2023

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

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

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

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2022 г. № 1652-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

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

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

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2023

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

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины, определения, сокращения и обозначения 2
4 Общие положения 3
5 Номинальные допускаемые напряжения 5
6 Расчет на статическую прочность 6
7 Расчет на циклическую прочность 6
8 Расчет на длительную циклическую прочность 7
9 Расчет на сопротивление разрушению 7
10 Расчет на прогрессирующее изменение формы и размеров 9
11 Расчет на длительную статическую прочность 9
12 Расчет на сейсмические воздействия 10
Библиография 13

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ КАНАЛЬНОГО РЕАКТОРА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Расчет на прочность на стадии эксплуатации блоков атомных станций

Technological channels of a high-power channel reactor.
Strength calculation at the stage of operation of nuclear power plants

Дата введения — 2023—02—01

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт устанавливает требования к проведению расчетов на прочность технологических каналов реактора большой мощности канального, на которые распространяется действие федеральных норм и правил в области использования атомной энергии [1].

1.2 Настоящий стандарт предназначен для применения при обосновании прочности нижней, средней и верхней частей технологических каналов на стадии эксплуатации блоков атомных станций.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

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

ГОСТ Р 59115.2—2021 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Модуль упругости, температурный коэффициент линейного расширения, коэффициент Пуассона, модуль сдвига

ГОСТ Р 59115.3—2021 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Кратковременные механические свойства конструкционных материалов

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

ГОСТ Р 59115.7 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Прибавки к толщине стенки на сплошную коррозию

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

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

ГОСТ Р 59115.11—2021 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Поверочный расчет на постпроектных стадиях

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

Издание официальное

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

3 Термины, определения, сокращения и обозначения

3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ Р 59115.1, а также следующий термин с соответствующим определением:

средняя температура по сечению $\langle T \rangle$: Температура стенки компонента технологического канала в рассматриваемом режиме нагружения, равная максимальному среднему арифметическому значению температур на ее наружной и внутренней поверхностях в одном сечении.

3.2 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

АС — атомная станция;

МРЗ — максимальное расчетное землетрясение;

ННУЭ — нарушение нормальных условий эксплуатации;

НУЭ — нормальные условия эксплуатации;

ПЗ — проектное землетрясение;

ТК — технологический канал;

УИ — условия испытаний;

УНП — ускорение нулевого периода;

УПА — условия проектной аварии;

MSK-64 — шкала сейсмической интенсивности Медведева-Шпонхойера-Карника.

3.3 Обозначения

В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

a — накопленное усталостное повреждение;

c_2 — прибавка к толщине стенки за счет сплошной коррозии, мм;

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

J_C — критическое значение J-интеграла, Н/мм;

K_I, K_J — коэффициенты интенсивности напряжений, рассчитываемые в линейной и нелинейной постанове соответственно, МПа · м$^{1/2}$;

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

K_{JC} — статическая трещиностойкость, соответствующая величине J_C, МПа · м$^{1/2}$;

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

n_m — коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению;

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

R_m^T — минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) при температуре T, МПа;

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

R_{mt}^T — минимальное значение предела длительной прочности за время t при температуре T, МПа;

s — номинальная толщина стенки компонента, мм;

T — температура, K (°C);

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

T_t — температура, при достижении которой необходимо учитывать характеристики длительной прочности, пластичности и ползучести, K (°C);

t — время, ч;

ε — деформация;

σ — напряжение, МПа;

$(\sigma)_m$ — приведенные общие мембранные напряжения, МПа;

$(\sigma)_{mL}$ — местные мембранные напряжения, МПа;

$(\sigma)_1$, $(\sigma)_2$ — группа приведенных напряжений в ТК, МПа;

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

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

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

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

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

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

τ — касательные напряжения среза в компонентах, МПа;

φ_s — коэффициент снижения циклической прочности сварного соединения.

4 Общие положения

4.1 Для обоснования прочности ТК на стадии эксплуатации атомных станций выполняют поверочный расчет на прочность, который включает в себя:

- расчет на статическую прочность;
- расчет на прогрессирующее изменение формы и размеров;
- расчет на циклическую прочность;
- расчет на сопротивление разрушению;
- расчет на длительную статическую прочность;
- расчет на длительную циклическую прочность;
- расчет на сейсмические воздействия.

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

4.3 Исходными данными к поверочному расчету являются:

- значения характеристик физических и механических свойств конструкционных материалов, с учетом данных об их изменении;
- фактические (измеренные) размеры компонентов рассматриваемого ТК;
- данные о сплошной коррозии металла компонентов ТК;
- история нагружения (температура, количество циклов, силовое нагружение, флюенс) ТК;
- данные эксплуатационного контроля ТК, в том числе выявленные на стадии эксплуатации несплошности и отклонения от проектных размеров;
- данные о произошедших изменениях в конструкции ТК;
- предыдущие программы продления срока службы (при их наличии);
- данные об изменении режимов (условий) эксплуатации ТК;
- данные о формоизменении графитовой кладки.

4.4 Учет влияния среды на утонение стенки компонента ТК за счет коррозии следует проводить на основе экспериментальных данных, допускается использование данных ГОСТ Р 59115.7 с учетом назначенного срока службы.

4.5 Поверочный расчет ТК должен учитывать как фактическую последовательность нагружения до момента определения текущего состояния, так и прогнозируемую последовательность режимов эксплуатации ТК на период от момента определения текущего состояния до окончания требуемого срока службы.

4.6 В качестве прогнозируемой последовательности нагружения используют физически возможную последовательность режимов эксплуатации ТК на период от момента определения текущего состояния до конца требуемого срока службы.

4.7 Расчет на статическую прочность проводят для определения напряжений при всех значениях нагрузок и температур в регламентированных проектом режимах работы АС и сопоставления полученных значений с допускаемыми.

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

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

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

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

4.9 Расчет на сопротивление разрушению проводят на основе сопоставления значения расчетной характеристики разрушения с допускаемым значением в целях исключения возможности хрупкого (вязкохрупкого) разрушения (нестабильного развития трещины).

4.10 Расчет на длительную статическую прочность проводят на основе сопоставления действующих напряжений во всех режимах эксплуатации с допускаемыми с целью исключения разрушения ТК при длительном статическом нагружении.

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

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

4.11 Расчет на прогрессирующее изменение формы и размеров проводят на основе анализа напряженно-деформированного состояния с целью исключения недопустимых изменений формы и размеров компонентов ТК.

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

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

4.12 Расчет на сейсмические воздействия проводят с учетом совместного действия эксплуатационных и сейсмических нагрузок. Оценку прочности ТК выполняют по допускаемым напряжениям, допускаемым перемещениям, по критериям циклической прочности.

4.13 При проведении расчетов необходимо учитывать нагрузки на компоненты ТК вследствие изменения формы и размеров графитовых блоков.

Напряжения в ТК вследствие изменения формы и размеров графитовых блоков учитывают при оценке размаха напряжения.

4.14 Максимальные напряжения, возникающие в конструкции ТК от всех действующих нагрузок, включая сейсмические воздействия, не должны превышать предел прочности материала R_m^T.

4.15 Приведенные напряжения, сопоставляемые с допускаемыми значениями, определяют по теории наибольших касательных напряжений Треска или энергетической теории Мизеса. Расчет напря-

жений без учета их концентрации проводят в предположении линейно-упругого поведения материала, за исключением особо оговоренных случаев.

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

4.17 Снижение характеристик прочности под воздействием эксплуатационных факторов должно учитываться в поверочном расчете в соответствии с 4.19 или быть обосновано в проектной (конструкторской) документации.

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

4.18 Поверочный расчет на прочность проводят с учетом всех факторов нагружения, влияющих на результаты данного расчета, для всех режимов нагружения. В один расчетный режим допускается включать группу режимов, если значения параметров нагрузок и температуры (температура — в градусах Цельсия) этих режимов не отличаются более чем на 5 % от принятых расчетных значений. При этом в качестве расчетного режима принимается режим с максимальными значениями параметров.

4.19 При поверочном расчете следует использовать значения физических и механических характеристик конструкционных материалов согласно требованиям ГОСТ Р 59115.2—2021 (раздел 4), ГОСТ Р 59115.3—2021 (раздел 4) и ГОСТ Р 59115.4—2021 (раздел 4).

4.20 При поверочном расчете толщину стенки компонентов ТК принимают равной:

- номинальному значению в случае, если установлено, что утонение толщины стенки за счет сплошной коррозии не превышает значения прибавки c_2, использованного при проведении расчета на прочность на стадии проектирования;

- фактическому (измеренному) значению s_f в период наработанного срока службы t в случае, если установленное средствами эксплуатационного контроля измеренное значение утонения толщины стенки за счет коррозии за срок службы t превышает значение c_2, установленное проведенным на стадии проектирования расчетом на прочность;

- $s = s_f - \frac{\tau c_{2f}}{t}$ в период прогнозируемого срока службы τ (отсчитываемого от наработанного срока службы t), если c_{2f} превышает c_2.

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

4.22 Определение напряжений и деформаций следует проводить в соответствии с ГОСТ Р 59115.9—2021 (раздел 6).

4.23 Классификацию напряжений следует проводить в соответствии с ГОСТ Р 59115.9—2021 (раздел 7).

5 Номинальные допускаемые напряжения

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

5.2 Номинальные допускаемые напряжения вычисляют по значениям кратковременных и длительных механических характеристик конструкционных материалов, определяемым согласно 4.19.

5.3 Номинальные допускаемые напряжения определяют в зависимости от значения температуры T_t, являющейся характеристикой конструкционного материала и определяемой по ГОСТ Р 59115.4—2021 (раздел 4).

5.4 Номинальное допускаемое напряжение для компонентов ТК определяют по формуле

$$[\sigma] = \min\left(\frac{R^{\langle T \rangle}_{p0,2}}{n_{0,2}}; \frac{R^{\langle T \rangle}_{m}}{n_m}\right), \quad (5.1)$$

где $n_{0,2} = 1,5$, $n_m = 2,6$.

Дополнительно для компонентов ТК с температурой $\langle T \rangle$, превышающей T_t, устанавливают номинальное допускаемое напряжение для расчета на длительную статическую прочность по формуле

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

где n_{mt} = 1,5.

6 Расчет на статическую прочность

6.1 При расчете компонента ТК на статическую прочность необходимо проверить выполнение условий прочности согласно 6.2—6.5 во всех расчетных режимах и условиях эксплуатации, предусмотренных проектом АС, при действии всех расчетных нагрузок, кроме сейсмических.

6.2 Напряжения расчетных групп категорий напряжений, определенные при расчете на статическую прочность компонентов ТК, не должны превышать допускаемых значений, приведенных в таблицах 6.1 и 6.2.

Значения номинальных допускаемых напряжений [σ] определяют согласно требованиям раздела 5.

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

Таблица 6.1 — Допускаемые напряжения для компонентов ТК

Режим	$(\sigma)_1$	$(\sigma)_2$	$(\sigma)_R$
НУЭ	[σ]	1,3 [σ]	$\min\left\{\left(2{,}5-\frac{R_{p0,2}^T}{R_m^T}\right)R_{p0,2}^T,\ 2R_{p0,2}^T\right\}$
ННУЭ	1,2 [σ]	1,6 [σ]	—
УИ	1,35 [σ]	1,7 [σ]	—
УПА	1,4 [σ]	1,8 [σ]	—

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

6.5 Средние касательные напряжения среза в компонентах, предназначенных для восприятия перерезывающих усилий (шпонки, кольца, бобышки), не должны превышать допускаемых значений, приведенных в таблице 6.2.

Таблица 6.2 — Допускаемые напряжения среза в компонентах ТК

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

7 Расчет на циклическую прочность

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

7.2 Определение допускаемого числа циклов по заданным амплитудам напряжений или допускаемых амплитуд напряжений для заданного числа циклов проводят:

- по расчетным кривым усталости, характеризующим в пределах их применения зависимость между допускаемыми амплитудами условных упругих напряжений и допускаемыми числами циклов;

- по уравнениям, связывающим допускаемые амплитуды условных упругих напряжений и допускаемые числа циклов, при уточненном расчете.

7.3 Выполнение расчета на циклическую прочность следует выполнять в соответствии с ГОСТ Р 59115.9—2021 (раздел 10).

7.4 Циклическая прочность переходника «сталь-цирконий» подтверждается экспериментально.

7.5 Для шва приварки технологического канала к верхнему тракту коэффициент концентрации принимают K_σ = 3,8.

7.6 В случае если на момент окончания назначенного срока службы ТК суммарное накопленное повреждение, полученное по результатам расчета, более 1, то определяют такой момент времени, при котором оно равно 1. Начиная с этого момента времени, рассматривается развитие предполагаемой зародившейся расчетной трещины в соответствии с 9.2.

8 Расчет на длительную циклическую прочность

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

8.2 Компонент, рассчитываемый на длительную циклическую прочность, должен удовлетворять условиям прочности при расчете на длительную статическую прочность.

8.3 Рекомендуемый метод расчета на длительную циклическую прочность приведен в ГОСТ Р 59115.9—2021 (приложение Г).

8.4 Минимальный коэффициент снижения циклической прочности для сварного соединения из циркониевого сплава принимают φ_s = 0,75.

8.5 В случае если на момент окончания назначенного срока службы ТК суммарное накопленное повреждение, полученное по результатам расчета, более 1, то определяют такой момент времени, при котором оно равно 1. Начиная с этого момента времени рассматривают развитие предполагаемой зародившейся расчетной трещины в соответствии с 9.2.

9 Расчет на сопротивление разрушению

9.1 Общие положения

9.1.1 Расчет на сопротивление разрушению ТК проводят в следующем порядке:

а) сбор и анализ исходной информации, необходимой для расчета (см. 4.4);

б) выбор расчетных зон в ТК (см. 9.1.2);

в) выбор расчетных трещин (тип, расположение, размеры) в соответствии с 9.2;

г) проведение расчета возможного роста расчетных трещин на конец прогнозируемого срока службы ТК в соответствии с 9.3;

д) оценка сопротивления разрушению подрощенной в соответствии с перечислением г) 9.1.1 расчетной трещины в соответствии с 9.4.

9.1.2 При расчете на сопротивление разрушению рассматривают следующие зоны ТК:

а) зоны, где возможное развитие трещин показано расчетом на циклическую прочность;

б) зоны, наиболее опасные с точки зрения хрупкого/вязкого разрушения (в частности, сварные швы и зоны, где можно ожидать наибольших значений коэффициентов интенсивности напряжений K_I, или наименьших допускаемых значений вязкости разрушения $[K_{IC}]$ ($[K_{JC}]$), или наименьшего отношения $[K_{IC}]/K_I$ ($[K_{JC}]/K_J$). Допускается использование численных методов расчета K_I и K_J.

9.1.3 При расчете на сопротивление разрушению должны быть учтены остаточные напряжения.

9.1.4 Для ТК должно быть определено распределение флюенса нейтронов по высоте канала с $E \geq 1$ МэВ.

9.1.5 Расчет на сопротивление разрушению допускается не проводить для компонентов из сталей аустенитного класса или цветных сплавов, не подвергающихся нейтронному облучению или подвергающихся облучению до флюенса не более 10^{22} нейтр/м^2 при $E \geq 0{,}1$ МэВ.

9.1.6 Расчет на сопротивление разрушению компонентов ТК проводят для всех режимов эксплуатации, включая НУЭ, ННУЭ, УПА, УИ.

9.2 Выбор расчетной трещины

9.2.1 Для зон ТК, где возможно образование трещины по результатам расчета на циклическую прочность [см. 9.1.2, перечисление а)] начальное значение расчетной трещины принимают согласно 9.2.2 и 9.2.3.

9.2.2 Расчетную предполагаемую зародившуюся трещину принимают полуэллиптической либо четвертьэллиптической, конечные размеры которой определяют расчетом подрастания трещины с начальными размерами a_0 = 1 мм, c_0 = 3 мм, (a_0, c_0 — размеры начальной предполагаемой зародившейся расчетной трещины в направлении малой и большой полуосей эллипса соответственно), если размах напряжений, равный $\Delta\varepsilon \cdot E^T$ (где $\Delta\varepsilon$ — размах деформации при циклическом деформировании), в месте зарождения трещины не превышает двух пределов текучести.

9.2.3 В случае если размах напряжений в месте зарождения трещины превышает два предела текучести, то размер глубины начальной трещины принимают:

- равной наибольшему размеру зоны циклического упругопластического деформирования в месте зарождения в случае, если этот размер больше размера a_0 (см. 9.2.2). Граница зоны упругопластического деформирования определяется из условия не превышения размаха напряжений двух пределов текучести;
- равной размеру a_0 (см. 9.2.2) в случае, если размер зоны пластического деформирования не превышает размера глубины этой трещины.

Размер c_0 принимают из условия соотношения полуосей a_0/c_0 = 1/3.

9.2.4 Для зон, рассматриваемых в соответствии с перечислением б) 9.1.2, расчетный дефект для основного металла и сварного швов цилиндрических компонентов ТК следует принимать в виде поверхностной полуэллиптической трещины (рисунок 9.1) глубиной a = 0,25 s с соотношением полуосей a/c = 1/3.

Расчетный дефект следует располагать параллельно площадкам действия максимальных нормальных напряжений.

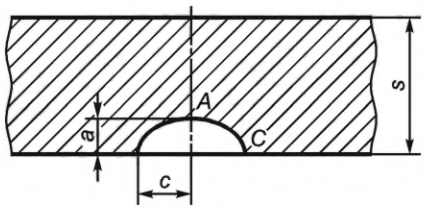

Рисунок 9.1 — Поверхностная полуэллиптическая трещина

9.3 Расчет роста расчетной трещины

9.3.1 Расчет роста расчетной трещины для ТК следует проводить в соответствии с ГОСТ Р 59115.11—2021 (приложение В).

9.3.2 Расчетную трещину ориентируют таким образом, чтобы ее рост за рассматриваемый период времени был наибольшим.

9.4 Условия прочности

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

$$K_J \le [K_J]_i, \tag{9.1}$$

или

$$K_I \le [K_I]_i, \tag{9.2}$$

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

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

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

9.4.2 Расчетом должно быть определено максимальное значение коэффициента интенсивности K_I или K_J в точках A и C (см. рисунок 9.1) расчетного дефекта в каждый рассматриваемый момент времени в каждом расчетном режиме с учетом переменного во времени распределения температур и напряжений по толщине стенки ТК в анализируемой зоне, включая остаточные напряжения в основном металле и сварном шве. Допускается принимать остаточное напряжение равным пределу текучести при температуре 20 °С.

9.4.3 Коэффициенты интенсивности напряжений K_I следует определять в соответствии с ГОСТ Р 59115.9—2021 (подраздел 12.4).

9.4.4 Расчет допускаемых значений коэффициентов интенсивности напряжений следует проводить в соответствии с ГОСТ Р 59115.9—2021 (подраздел 12.3).

9.4.5 Допускается определение K_{IC} по критическому раскрытию трещины δ_c по формуле

$$K_{IC} = \sqrt{\delta_c E^T R^T_{p0,2}}. \quad (9.3)$$

10 Расчет на прогрессирующее изменение формы и размеров

10.1 Расчет на прогрессирующее изменение форм и размеров проводят для всех компонентов ТК, для которых остаточные изменения формы и размеров в работе недопустимы или ограничены заданными пределами по условиям нормальной эксплуатации конструкции (по условиям работоспособности подвижных соединений, стабильности зазоров, обеспечивающих гидравлические характеристики).

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

$$(\sigma)_R \le \min\left\{\left(2{,}5 - \frac{R^T_{p0,2}}{R^T_m}\right)R^T_{p0,2},\quad 2R^T_{p0,2}\right\}. \quad (10.1)$$

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

11 Расчет на длительную статическую прочность

11.1 При расчете на длительную статическую прочность следует рассматривать все эксплуатационные режимы, проходящие при температурах, превышающих T_t, включая нарушения нормальных условий эксплуатации. Условия прочности компонентов ТК приведены в таблице 11.1 и пояснены в следующих пунктах.

11.2 Компонент, рассчитываемый на длительную статическую прочность, должен удовлетворять условиям прочности, принимаемым при расчете на статическую прочность, во всем интервале эксплуатационных температур.

11.3 Приведенные напряжения категорий $(\sigma)_1$, $(\sigma)_2$ и $(\sigma)_R$ при расчете на длительную статическую прочность компонентов ТК должны удовлетворять следующим условиям:

$$(\sigma)_1 \le [\sigma]_t; \quad (11.1)$$

$$(\sigma)_2 \le K_t[\sigma]_t; \quad (11.2)$$

$$(\sigma)_R \le K'_t[\sigma]_t, \quad (11.3)$$

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

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

$$K_t = 1{,}25 - 0{,}25\frac{(\sigma)_m}{[\sigma]_t} \text{ или } K_t = 1{,}25 - 0{,}25\frac{(\sigma)_{mL}}{[\sigma]_t}; \quad (11.4)$$

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

$$K_t' = 1{,}75 - 0{,}25\frac{(\sigma)_m}{[\sigma]_t} \text{ или } K_t' = 1{,}75 - 0{,}25\frac{(\sigma)_{mL}}{[\sigma]_t}. \quad (11.5)$$

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

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

$$\sum_i \frac{t_i}{[t]_i} \le 1, \quad (11.6)$$

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

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

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

Таблица 11.1 — Условия прочности компонентов ТК

Тип конструкции	Расчетная группа категорий напряжений		
	$(\sigma)_1$	$(\sigma)_2$	$(\sigma)_R$
Компоненты ТК	$\begin{cases}[\sigma]_t \\ \sum_i \frac{t_i}{[t]_i} \le 1\end{cases}$	$\begin{cases}K_t[\sigma]_t \\ \sum_i \frac{t_i}{[t]_i} \le 1\end{cases}$	$\begin{cases}K_t'[\sigma]_t \\ \sum_i \frac{t_i}{[t]_i} \le 1\end{cases}$

11.4 Допускается проводить расчет на длительную статическую прочность с использованием методик, приведенных в ГОСТ Р 59115.9—2021 (раздел 14).

12 Расчет на сейсмические воздействия

12.1 Расчет на прочность при сейсмических воздействиях (сейсмопрочность) следует проводить в соответствии с положениями федеральных норм и правил в области использования атомной энергии [2].

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

12.3 Расчет компонентов ТК следует проводить на сочетания эксплуатационных и сейсмических нагрузок, предусмотренных федеральными нормами и правилами, устанавливающими требования к обеспечению сейсмостойкости атомных станций.

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

Необходимость учета совместного воздействия сейсмических нагрузок уровня ПЗ с нагрузками режима УПА устанавливается проектной (конструкторской) организацией.

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

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

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

12.7 При определении динамической реакции компонента следует учитывать следующие факторы: массу конструкции, в том числе теплоизоляции, напряженно-деформированное состояние (в том числе от внутреннего и наружного давления), влияющее на жесткость конструкции.

12.8 Расчет на сейсмопрочность протяженных компонентов ТК реактора следует выполнять с учетом возможного различия сейсмического воздействия в точках их опирания.

12.9 Значения относительного вязкого демпфирования ξ, при отсутствии специального обоснования, для металлических компонентов ТК следует принимать равным 2,0 %.

12.10 Расчет на сейсмопрочность выполняют линейно-спектральным методом (по спектрам ответа) и/или методом динамического анализа (по зависимости сейсмического воздействия от времени).

12.11 УНП для спектра ответа определяют как значение спектрального ускорения, при котором кривая спектра ответа приближается к горизонтальной прямой, продолжающейся до сколь угодно больших частот; УНП равно максимальному по времени абсолютному значению ускорения исходного сейсмического воздействия.

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

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

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

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

12.12 При расчете на сейсмические воздействия следует учитывать высшие (не рассчитанные явно) формы колебаний.

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

12.14 Оценку сейсмопрочности ТК следует проводить по допускаемым напряжениям, по допускаемым перемещениям, по критериям циклической прочности и сопротивления разрушению.

12.15 Напряжения в компонентах ТК не должны превосходить допускаемых значений, приведенных в таблицах 12.1, 12.2. Номинальные допускаемые напряжения [σ] должны быть определены согласно 5.4, соответственно, по кратковременным механическим характеристикам материалов, в соответствии с температурой эксплуатации соответствующего компонента и с учетом эксплуатационных факторов.

Таблица 12.1 — Сочетания нагрузок и допускаемые напряжения для ТК

Категория сейсмостойкости	Сочетания нагрузок	$(\sigma_s)_1$	$(\sigma_s)_2$
I	НУЭ + МРЗ	1,4 [σ]	1,8 [σ]
	ННУЭ + МРЗ		
	НУЭ + ПЗ	1,2 [σ]	1,6 [σ]
	ННУЭ + ПЗ		

Таблица 12.2 — Значения допускаемых напряжений смятия $(\sigma_s)_s$

Категория сейсмостойкости	Сочетание нагрузок	Допускаемое напряжение
I	НУЭ + МРЗ	2,7 [σ]
	ННУЭ + МРЗ	
	НУЭ + ПЗ	2,5 [σ]
	ННУЭ + ПЗ	

12.16 Расчет на циклическую прочность при сейсмических воздействиях следует проводить с использованием кратковременных механических характеристик материалов в соответствии с положениями раздела 7.

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

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

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

12.18 Для расчетной оценки собственных частот колебаний типовых компонентов ТК и определения сейсмического отклика допускается применять методы, представленные в ГОСТ Р 59115.9—2021 (приложение Д, подраздел Д.1).

12.19 Расчет проводят для АС с сейсмичностью площадки 5 баллов по шкале MSK-64 и выше. Необходимость расчетов элементов ТК для АС с сейсмичностью площадки менее 5 баллов определяется проектной (конструкторской) организацией.

Библиография

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

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

УДК 621.039:531:006.354 ОКС 27.120.20

Ключевые слова: прочность, технологические каналы, атомные энергетические установки, поверочный расчет на прочность на стадии эксплуатации

Редактор *Л.В. Коретникова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *С.И. Фирсова*
Компьютерная верстка *И.Ю. Литовкиной*

Сдано в набор 29.12.2022. Подписано в печать 18.01.2023. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 2,32. Уч-изд. л. 2,10.

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