ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 70416— 2023

ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ЗАЩИТНЫЕ ОБОЛОЧКИ БЛОКОВ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Расчет на прочность на стадии проектирования

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2023

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Акционерным обществом «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежаля» (АО «НИКИЭТ») при участии Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» им. И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей»), Московского филиала Акционерного общества «Атомэнергопроект» («Московский проектный институт») и Санкт-Петербургского филиала Акционерного общества «Атомэнергопроект» («Санкт-Петербургский проектный институт»)

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 6 сентября 2023 г. № 807-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, обозначения 2
4 Общие положения 4
5 Физические и механические характеристики материалов железобетонных защитных оболочек 5
5.1 Нормативные и расчетные значения характеристик бетона 5
5.2 Нормативные и расчетные значения характеристик арматуры 5
5.3 Герметизирующая облицовка 6
6 Нагрузки и воздействия 6
7 Порядок проведения расчетов на прочность 11
7.1 Общие положения 11
7.2 Расчет на прочность железобетонных защитных оболочек по предельным состояниям 12
7.3 Расчет на прочность герметизирующей облицовки 14
Приложение А (рекомендуемое) Методы учета усилий преднапряжения 18
Приложение Б (справочное) Особенности расчетов напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций 19
Приложение В (рекомендуемое) Методика оценки герметизирующей стальной облицовки по деформационному критерию трещиностойкости и циклической прочности 21
Библиография 24

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ЗАЩИТНЫЕ ОБОЛОЧКИ БЛОКОВ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Расчет на прочность на стадии проектирования

Reinforced concrete safety barrieres of nuclear power plants units. Strength analysis at the design stage

Дата введения — 2023—11—30

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт распространяется на железобетонные защитные оболочки блоков атомных станций, выполняющие свои функции в соответствии с федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии [1]—[3].

1.2 Настоящий стандарт устанавливает требования к расчету на прочность железобетонных защитных оболочек блоков атомных станций, указанных в 1.1, на стадии проектирования.

1.3 Настоящий стандарт не распространяется на проекты действующих блоков атомных станций, проектирование которых завершено на момент введения его в действие.

1.4 Настоящий стандарт не регламентирует методы, применяемые для определения расчетных нагрузок, внутренних усилий, перемещений, напряжений и деформаций железобетонных защитных оболочек блоков атомных станций.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие документы:

ГОСТ 27772 Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия

ГОСТ Р 53772 Канаты стальные арматурные семипроволочные стабилизированные. Технические условия

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 59115.5—2021 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчетные характеристики циклической и длительной циклической прочности конструкционных материалов

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

ГОСТ Р 70418 Трубные и кабельные проходки атомных станций. Расчет на прочность на стадии проектирования

СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах»

СП 16.13330.2017 «СНиП II-23-81* Стальные конструкции»

СП 20.13330 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия»

Издание официальное

СП 27.13330.2017 «СНиП 2.03.04-84 Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур»

СП 28.13330 «СНиП 2.03.11-85 Защита строительных конструкций от коррозии»

СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения»

СП 88.13330.2014 «СНиП II-11-77* Защитные сооружения гражданской обороны»

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов (сводов правил) 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 документ, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого документа с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого документа с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку. Сведения о действии сводов правил целесообразно проверить в Федеральном информационном фонде стандартов.

3 Термины, определения, сокращения, обозначения

3.1 Термины и определения

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

3.1.1 **арматурный пучок:** Совокупность арматурных канатов определенной длины, расположенных в одном каналообразователе и объединенных в единый силовой элемент, имеющий на концах анкерные устройства и опорные элементы для передачи усилия растяжения в пучке на бетон.

3.1.2 **железобетонная защитная оболочка:** Защитная железобетонная оболочка реакторного здания в составе герметичного ограждения.

3.1.3

конструкции железобетонные: Конструкции, выполненные из бетона с рабочей и конструктивной арматурой (армированные бетонные конструкции); расчетные усилия от всех воздействий в железобетонных конструкциях должны быть восприняты бетоном и рабочей арматурой.

[СП 63.13330.2018, пункт 3.7]

3.1.4

коэффициенты надежности: Коэффициенты, учитывающие возможные неблагоприятные отклонения значений нагрузок, характеристик материалов и расчетной схемы строительного объекта от реальных условий его эксплуатации, а также уровень ответственности строительных объектов: коэффициенты надежности по нагрузке γ_f, коэффициенты надежности по материалу γ_m, коэффициенты условий работы γ_d, коэффициенты надежности по ответственности сооружений γ_n.

[ГОСТ 27751—2014, пункт 2.2.13]

3.1.5

коэффициент сочетаний нагрузок: Коэффициент, учитывающий уменьшения вероятности одновременного достижения несколькими нагрузками их расчетных значений.

[СП 20.13330.2016, пункт 3.3]

3.1.6

нагрузки длительные: Нагрузки, изменения расчетных значений которых в течение расчетного срока службы строительного объекта пренебрежимо малы по сравнению с их средними значениями.

[СП 20.13330.2016, пункт 3.5]

3.1.7

нагрузки кратковременные: Нагрузки, длительность действия расчетных значений которых существенно меньше срока службы сооружения.

[СП 20.13330.2016, пункт 3.6]

3.1.8

особые нагрузки: Нагрузки и воздействия (например, взрыв, столкновение с транспортными средствами, авария оборудования, пожар, землетрясение, некоторые климатические нагрузки, отказ работы несущего элемента конструкций), создающие аварийные ситуации с возможными катастрофическими последствиями.

[СП 20.13330.2016, пункт 3.8]

3.1.9

расчетное значение нагрузки: Предельное (максимальное или минимальное) значение нагрузки в течение срока эксплуатации объекта.

[СП 20.13330.2016, пункт 3.9]

3.1.10

расчетные сочетания нагрузок: Все возможные неблагоприятные комбинации нагрузок, которые необходимо учитывать при проектировании объекта.

[СП 20.13330.2016, пункт 3.10]

3.1.11 **конструктивная целостность:** Состояние строительных конструкций (железобетонных конструкций), при котором не превышается ни один из критериев проектирования по несущей способности, установленных в проекте для данного сочетания нагрузок по предельным состояниям первой группы.

3.1.12 **коэффициент условий работы бетона [арматуры]:** Коэффициент, учитывающий особенности работы бетона [арматуры] в конструкции (характер нагрузки, условия окружающей среды и другие факторы, предусмотренные проектом).

3.1.13 **железобетонная защитная оболочка:** Защитная железобетонная оболочка реакторного здания в составе герметичного ограждения.

3.1.14 **площадь сечения нетто:** Площадь сечения без учета площадей отверстий в нем.

3.2 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

АС — атомная станция;

ГО — герметичное ограждение;

ЖЗО — железобетонные защитные оболочки;

ЗПА — запроектная авария;

КИН — коэффициент интенсивности напряжений;

МКЭ — метод конечных элементов;

НДС — напряженно-деформированное состояние;

ННЭ — нарушение нормальной эксплуатациии;

НЭ — нормальная эксплуатация;

ПА — проектная авария;

РУ — реакторная установка;

СПЗО — система предварительного напряжения железобетонной защитной оболочки;

ТПР — течь перед разрушением.

3.3 Обозначения

В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

$R_{b,n}$ — нормативное значение сопротивления бетона осевому сжатию, МПа;

$R_{bt,n}$ — нормативное значение сопротивления бетона осевому растяжению, МПа;

R_b — расчетное значение сопротивления бетона осевому сжатию, МПа;

R_{bt} — расчетное значение сопротивления бетона осевому растяжению, МПа.

4 Общие положения

4.1 При проведении расчетов на прочность ЖЗО на стадии проектирования следует учитывать требования в зависимости от классификации ЖЗО по следующим признакам:

- по влиянию на безопасность — по [1];
- по уровню ответственности за радиационную и ядерную безопасность — по [3];
- по сейсмостойкости — по [4].

4.2 Расчетное обоснование ЖЗО следует проводить путем анализа их состояния на соответствие критериям предельных состояний группы I (по несущей способности) и группы II (по эксплуатационной пригодности), предусмотренных проектом АС, с учетом требований СП 63.13330 и положений, изложенных в разделах 6, 7.

Кроме оценки прочности ЖЗО по критериям, характеризующим уровень конструктивной целостности (прочности), должны быть выполнены расчеты по следующим предельным состояниям для различных режимов работы:

- по трещиностойкости;
- деформациям;
- уровню обжатия внутренней защитной оболочки;
- уровню напряжений в элементах СПЗО при натяжении и при эксплуатации оболочки с учетом всех сочетаний нагрузок, установленных проектом АС;
- предельные состояния, характеризующие работу герметизирующей облицовки, в том числе герметичность облицовки, во всех режимах, учитываемых в проекте АС, включая аварийные режимы и режимы особых внешних воздействий;
- для других расчетных случаев, требования к которым приведены в разделах 6 и 7.

4.3 При проведении расчетов на прочность ЖЗО необходимо учитывать следующие факторы, определяющие их НДС:

- особенности взаимодействия элементов ЖЗО между собой и с основанием, в том числе влияние на НДС ЖЗО трубных и кабельных проходок и технологических шлюзов;
- особенности взаимодействия ЖЗО с технологическим оборудованием;
- пространственную работу ЖЗО;
- последовательность возведения ЖЗО, включая технологию бетонирования (количество слоев, скорость бетонирования) или другие технологические мероприятия, предусмотренные проектом АС;
- историю нагружения ЖЗО, в том числе сроки обжатия оболочки для учета вторых потерь преднапряжения;
- возможность проявления геометрически и физически нелинейных свойств (пластических деформаций в металле и бетоне, трещин в ЖЗО);
- возможность проявления реологических свойств строительных материалов (релаксации напряжений в стальных элементах, ползучести и усадки бетона в ЖЗО).

4.4 Требования к учету физических и механических характеристик материалов ЖЗО, используемых при проведении расчетов на прочность для различных режимов работы, приведены в разделе 5.

4.5 Описание основных нагрузок и воздействий, учитываемых при проведении расчетов на прочность ЖЗО для различных режимов работы АС, а также методы их учета приведены в разделе 6 и приложении А.

4.6 Расчет на прочность компонентов герметичных проходок проводят в соотвествии с ГОСТ Р 70418.

4.7 Внешние элементы закладных деталей и их сварные соединения рассчитывают согласно СП 16.13330 и СП 63.13330.

4.8 Основные требования к проведению расчетов на прочность ЖЗО для различных режимов работы приведены в разделе 7.

Методы проведения и особенности расчетов для различных элементов защитных оболочек приведены:

- железобетонных конструкций — в приложении Б;
- герметизирующей стальной облицовки — в 7.3 и приложении В.

5 Физические и механические характеристики материалов железобетонных защитных оболочек

5.1 Нормативные и расчетные значения характеристик бетона

5.1.1 Нормативные значения физических и механических характеристик бетонов, используемых в расчетах на прочность, следует принимать в соответствии с требованиями федеральных норм и правил в области использования атомной энергии [2]—[4] и положений документов по стандартизации, которые определяют требования к бетонам, указанным в проекте АС. При отсутствии необходимых данных допускается использовать данные из СП 27.13330 и СП 63.13330 в зависимости от класса и вида бетонов. При этом нормативные и расчетные характеристики бетона, а также коэффициенты условий работы бетона принимают:

- для сооружений, работающих при систематическом воздействии температур не более 50 °С, — согласно СП 63.13330.2018 (раздел 6);
- для сооружений, работающих при температурах выше 50 °С — согласно СП 27.13330.2017 (раздел 5);
- для сооружений, рассчитываемых на внешние динамические воздействия (сейсмические воздействия, воздействие ударной волны), — согласно СП 14.13330.2018 (пункт 5.15) и СП 88.13330.2014 (подраздел 8.2).

5.1.2 При назначении класса бетона на прочность на сжатие нормативное значение сопротивления бетона осевому сжатию $R_{b,n}$ и нормативное значение сопротивления бетона осевому растяжению $R_{bt,n}$ следует принимать в зависимости от вида бетона и класса бетона на прочность на сжатие согласно СП 63.13330 и СП 27.13330.

5.1.3 При расчете железобетонных конструкций расчетные сопротивления бетона для предельных состояний первой группы R_b и R_{bt} следует снижать (или повышать) путем умножения на коэффициенты условий работы бетона g_{bi}, приведенные в СП 63.13330, а также на дополнительные коэффициенты, учитывающие:

- влияние двухосного напряженного состояния «сжатие—сжатие» g_{bc} (принимается от 1 до 1,2 в зависимости от НДС конструкции ЖЗО и экспериментальных данных) — при определении расчетного сопротивления R_b;
- влияние длительности действия нагрузок g_{b1} = 0,9 — при определении расчетных сопротивлений R_b и R_{bt}.

Для расчета вторых потерь предварительного напряжения следует использовать значения коэффициента ползучести и относительных деформаций усадки согласно СП 63.13330, при этом допускается принимать экспериментально обоснованные характеристики усадки и ползучести бетона с учетом его выдержки до момента приложения усилий обжатия к конструкции ЖЗО.

5.1.4 Сопротивление бетона сдвигу в швах бетонирования монолитных железобетонных конструкций следует снижать путем умножения на коэффициент g_{b3} = 0,5.

5.1.5 Значения соответствующих коэффициентов влияния при температурных воздействиях на расчетные значения сопротивления бетонов и деформационные характеристики принимают по данным документов по стандартизации в зависимости от класса и вида бетона, либо они должны быть обоснованы, в том числе на основе экспериментальных исследований. При отсутствии необходимых характеристик допускается использовать данные по СП 27.13330.2017 (пункты 5.13—5.28).

5.2 Нормативные и расчетные значения характеристик арматуры

5.2.1 Значения физических и механических характеристик арматуры, используемых в расчетах на прочность, следует принимать в соответствии с требованиями федеральных норм и правил в области использования атомной энергии [2]—[4] и положений документов по стандартизации на поставку материалов, указанных в проекте АС. При отсутствии необходимых данных допускается использовать дан-

ные по СП 27.13330 и СП 63.13330 в зависимости от класса и вида арматуры. При этом нормативные и расчетные характеристики арматуры, а также коэффициенты условий работы арматуры принимают:

- для сооружений, работающих при систематическом воздействии температур не более 50 °С, — согласно СП 63.13330.2018 (подраздел 6.2);
- для сооружений, работающих при температурах выше 50 °С — согласно СП 27.13330.2017 (раздел 5);
- для сооружений, рассчитываемых на внешние динамические воздействия (сейсмические воздействия, воздействие ударной волны), — согласно СП 14.13330.2018 (пункт 5.15) и СП 88.13330.2014 (подраздел 8.3).

5.2.2 Для основных видов стержневой и проволочной арматуры (кроме арматуры из легированной стали, коррозионно-стойкой жаростойкой и жаропрочной стали) нормативные значения сопротивления $R_{s,n}$ принимают в зависимости от вида и класса арматуры по СП 63.13330.2018 (пункт 6.2.7), а расчетное значение сопротивления осевому растяжению поперечной арматуры (хомуты и отогнутые стержни) R_{sw} — при проверке прочности наклонных сечений по СП 63.13330.2018 (пункт 6.2.9).

Расчетное значение сопротивления арматуры следует умножать на соответствующий коэффициент условий работы арматуры по СП 63.13330.

5.2.3 Значения соответствующих коэффициентов влияния при температурных воздействиях на расчетные значения сопротивления арматуры и деформационные характеристики арматуры принимают по данным документов по стандартизации в зависимости от класса и вида арматуры, либо они должны быть обоснованы, в том числе на основе экспериментальных исследований. При отсутствии необходимых характеристик допускается использовать данные по СП 27.13330.2017 (пункты 5.31—5.37).

5.3 Герметизирующая облицовка

5.3.1 Значения физических и механических характеристик материалов стальной герметизирующей облицовки следует принимать в соответствии с требованиями федеральных норм и правил в области использования атомной энергии [2]—[4] и положений документов по стандартизации на поставку материалов. При отсутствии в этих документах необходимых данных следует руководствоваться данными, приведенными в ГОСТ Р 59115.2—2021 (раздел 4), ГОСТ Р 59115.3—2021 (раздел 4) и ГОСТ Р 59115.5—2021 (раздел 4) с учетом влияния на них эксплуатационных факторов.

Если в документах по стандартизации отсутствуют данные по влиянию факторов, предусмотренных в проекте АС (взаимодействие с рабочими средами, температурные воздействия и другие факторы, предусмотренные в проекте АС), на значения физико-механических характеристик материала стальной герметизирующей облицовки, используемых при расчетах на прочность, то данное влияние должно быть обосновано, в том числе на основе экспериментальных исследований или конструктивных решений и технологических мероприятий, предусмотренных проектом АС.

6 Нагрузки и воздействия

6.1 Нагрузки и воздействия на ЖЗО принимают в соответствии со строительными нормами и правилами и техническими заданиями на проектирование, а также требованиями, изложенными в настоящем разделе.

6.2 Расчетное обоснование ЖЗО предельных состояний групп I и II при различных режимах эксплуатации, включая аварии, должно быть выполнено с учетом постоянных и временных (длительных, кратковременных и особых) нагрузок и воздействий в соответствии с СП 20.13330.

6.3 При выполнении расчетных обоснований для каждого вида воздействия необходимо учитывать все нагружающие факторы для ЖЗО, которые сопровождают это воздействие с учетом последовательности их реализации во времени.

6.4 Особые нагрузки и воздействия следует принимать в соответствии с СП 20.13330, [3] и [5].

6.5 При определении параметров расчетных сейсмических воздействий, воздействия воздушной ударной волны и падения летательного аппарата следует учитывать требования [3]—[5].

6.6 При проведении расчетов на прочность необходимо рассматривать весь спектр учитываемых в проекте АС сценариев проектных и запроектных аварий. Наиболее неблагоприятное сочетание особых нагрузок, включающее проектную и запроектную аварии, определяют сопоставлением вариантов воздействия температуры и давления (разрежения) в течение аварии и в послеаварийный период.

Расчет защитной оболочки необходимо проводить с учетом изменения аварийных нагрузок во времени.

6.7 Для элементов ЖЗО, облицованных стальным листом, в каждом из расчетных сочетаний необходимо учитывать дополнительную нагрузку от распора листа, обусловленного его сжатием от преднапряжения железобетонной конструкции, усадки и ползучести бетона, прогрева и других факторов, предусмотренных проектом АС.

6.8 В числе технологических нагрузок, возникающих в режимах ННЭ, включая ПА, при расчетах ЖЗО необходимо учитывать:

- значения давления и температуры при ННЭ и ПА;
- локальные динамические воздействия, обусловленные разрывами трубопроводов, для которых не обоснована концепция ТПР, включая воздействия реактивных усилий трубопроводов, струй, ударных волн, летящих предметов, сопровождающих аварию, биения труб.

6.9 При анализе последствий ЗПА во время проведения расчетов на прочность и оценке устойчивости ЖЗО необходимо учитывать следующие нагрузки и воздействия:

- возникающие при ЗПА, представленных в проекте АС в соответствии с [1];
- внешние воздействия с частотой реализации ниже критериев, установленных в [5] (пункт 2.7), которые могут стать исходным событием ЗПА, учет которых предусмотрен требованиями федеральных норм и правил в области использования атомной энергии [3]—[5], и в случае если учет таких воздействий предусмотрен заданием на проектирование.

6.10 При расчете железобетонных строительных конструкций ЖЗО, входящих в состав ГО РУ, значение давления при ПА следует принимать с учетом коэффициента надежности по нагрузке не менее 1,1 по отношению к давлению, полученному на основании теплогидравлических расчетов. Для нагрузок при ЗПА, представленных в проекте АС в соответствии с [1], коэффициенты надежности по нагрузке допускается принимать равными 1,0. В других случаях, предусмотренных проектом АС, коэффициенты надежности по нагрузке для особых нагрузок принимают согласно требованиям СП 20.13330.

6.11 При выполнении расчетных обоснований прочности, устойчивости, герметичности ЖЗО при воздействиях от экстремальных ветров, ураганов, смерчей необходимо учитывать ударные нагрузки от летящих предметов, сопровождающих эти воздействия и предусмотренные в проекте АС.

6.12 При расчете ЖЗО на падение летательного аппарата должны быть рассмотрены следующие факторы:

- силовое воздействие на наружные конструкции ЖЗО, вызываемое ударом конструктивных элементов летательного аппарата, как деформируемых (типа фюзеляжа и крыльев), так и жестких (типа двигателя);
- при рассмотрении удара на внешние конструкции здания, не являющиеся ЖЗО, динамическое (вибрационное) воздействие на конструкции ЖЗО, передаваемое через строительные конструкции;
- воздействие взрыва облака топливно-воздушной смеси на ЖЗО;
- воздействие пожара, обусловленного горением топливно-воздушной смеси, и другой пожарной нагрузки.

6.13 Для ЖЗО, входящих в состав ГО, устанавливают три уровня критериев предельного состояния по конструктивной целостности:

а) уровень I, который характеризуется следующими условиями:
   1) напряжения в элементах ЖЗО достигают значений расчетных сопротивлений материалов;
   2) элементы ЖЗО находятся в области упругих и условно-упругих (с допускаемыми трещинами растяжения в бетоне) в основном обратимых деформаций;
   3) конструктивная целостность должна быть обеспечена с учетом требований, изложенных в 5.1.1 и 5.2.1, для коэффициентов надежности по материалу для предельных состояний группы I;
   4) на участках многослойного (два и более слоев арматуры одного направления) армирования, а также в зонах локальных включений для внутренних защитных оболочек допускаются ограниченные (без возможности дальнейшего развития) пластические деформации, соответствующие достижению расчетных характеристик прочности (расчетное сопротивление), установленных согласно требованиям, изложенным в 5.2.1;

б) уровень II, который характеризуется следующими условиями:
   1) напряжения в элементах ЖЗО достигают нормативных сопротивлений материалов;
   2) допускаются ограниченные малые (в соответствии с положениями раздела 7) остаточные (необратимые) деформации;

3) конструктивная целостность обеспечена, при этом ее запас меньше установленных пределов для уровня 1;

в) уровень III характеризуется возникновением больших (в соответствии с положениями раздела 7) остаточных (необратимых) деформаций и перемещений, при этом допускаются местные повреждения, но гарантированно сохраняется конструктивная целостность ЖЗО.

6.14 Для ЖЗО, входящих в состав ГО, помимо уровней предельных состояний по конструктивной целостности, устанавливают уровни предельных состояний по герметичности:

- уровень I, для которого скорость утечки из защитной оболочки не превышает принятого для ПА значения;
- уровень II, устанавливающий ограниченное увеличение скорости утечки, которая может превысить значение, принятое для ПА, но ограничивается расчетным значением скорости утечки, допускаемым для ЗПА и представленным в проекте АС в соответствии с [1].

6.15 Сочетания нагрузок, которые следует учитывать при проведении расчетного анализа ЖЗО в зависимости от уровня по конструктивной целостности и герметичности, а также коэффициенты расчетных сочетаний принимают по таблице 6.1 и с учетом требований СП 20.13330.

Значок «+/-» в таблице Б.1 означает, что должны рассматриваться как сочетание, включающее в себя данную нагрузку (воздействие), так и сочетание, в котором данная нагрузка (воздействие) отсутствует.

Под каждым воздействием, приведенным в таблице 6.1, следует понимать все сопутствующие нагрузки (явления). Например, смерч W_{torn} или воздушная ударная волна W_{wave} могут сопровождаться ударными нагрузками со стороны поднятых в воздух и переносимых воздушным потоком летящих предметов. При падении летательного аппарата F_c могут возникать ударная нагрузка от падения его фрагментов и ударная волна от взрыва авиационного топлива.

6.16 Методика учета усилий преднапряжения ЖЗО и подходы к их оценке приведены в приложении А.

6.17 При проведении расчетов на прочность герметизирующей облицовки должны быть учтены следующие нагрузки:

- нагрузки и эффекты их приложения в строительный период (явления, сопутствующие процессу сварки; давление бетонной смеси, интегральные испытания избыточным давлением герметизируемого объема);
- внешние нагрузки и воздействия, воспринимаемые конструкцией облицовки как часть сооружения, в основном в виде интегрально совместных с бетонным массивом мембранных деформаций через дискретные связи — анкера и закладные детали;
- дополнительные эффекты от проектных воздействий, действующих непосредственно на листы облицовки.

Расчетные нагрузки и воздействия на герметизирующую облицовку необходимо принимать в соответствии со следующими требованиями:

- внешние нагрузки и их сочетания — по [3];
- действующие внутри герметизируемого объема — на основании теплогидравлических расчетов с учетом требования 6.10;
- циклические нагрузки — по техническому заданию на проектирование;
- строительные нагрузки в зависимости от принимаемой технологии возведения.

Нагрузки, возникающие в режимах нарушения нормальной эксплуатации и в аварийных режимах (нагрев, избыточное давление, послеаварийный вакуум и другие нагрузки, которые принимают на основании теплогидравлических расчетов), следует анализировать с учетом изменения соотношения величин этих нагрузок в течение рассматриваемого режима.

Таблица 6.1 — Расчетные сочетания нагрузок

Номер сочетания	Нагрузки и воздействия																					
	Постоянные нагрузки D	Длительные нагрузки D_L	Кратковременные нагрузки L	Характерные климатические воздействия W_0	Испытательное давление P_t	Технологические нагрузки							Экстремальные нагрузки и воздействия природного и техногенного происхождения								Уровень критерия предельного состояния по конструктивной целостности	Уровень критерия предельного состояния по герметичности
						Нагрузки нормальной эксплуатации R_0	Нагрузки при нарушении нормальной эксплуатации R_{AOO}	Нагрузки и воздействия проектной аварии			Нагрузки и воздействия запроектной аварии		Сейсмические воздействия			Экстремальный ветер W_w	Смерч W_{torn}	Экстремальная температура W_t	Экстремальный снег W_s	Воздушная ударная волна W_{wave}	Падение летательного аппарата F_c		
								Давление P_{dba}	Температура T_{dba}	Реакция трубопроводов F_{dba}	Давление P_{bdba}	Температура T_{bdba}	проектное землетрясение	максимальное расчетное землетрясение	запроектное землетрясение							
1 Учет условий строительства и пред-пусковых испытаний	+	+	+	+	+/–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2 Учет условий нормальной эксплуатации																						
2.1	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2.2	+	+	+	+	–/+	+	–	–	–	–	–	–	+/–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3 Учет нарушений нормальной эксплуатации, включая ПА и ЗПА																						
3.1	+	+	+	–	–	–	+	–	–	–	–	–	+/–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3.2	+	+	+	–	–	–	–	+	+	+	–	–	–	+/–	–	–	–	–	–	–	–	–
3.3	+	+	+	–	–	–	–	$1{,}5p_{dba}$	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	*
3.4	+	+	+	–	–	–	–	$1{,}25p_{dba}$	+	–	–	–	1,25 проектное землетрясение	–	–	–	–	–	–	–	–	*

Окончание таблицы 6.1

Номер сочетания	Нагрузки и воздействия																				Уровень критерия предельного состояния по конструктивной целостности	Уровень критерия предельного состояния по герметичности
	Постоянные нагрузки D	Длительные нагрузки D_L	Кратковременные нагрузки L	Характерные климатические воздействия W_0	Испытательное давление P_t	Технологические нагрузки							Экстремальные нагрузки и воздействия природного и техногенного происхождения									
						Нагрузки нормальной эксплуатации R_0	Нагрузки при нарушении нормальной эксплуатации R_{AOO}	Нагрузки и воздействия проектной аварии			Нагрузки и воздействия запроектной аварии		Сейсмические воздействия		Экстремальный ветер W_w	Смерч W_{torn}	Экстремальная температура W_t	Экстремальный снег W_s	Воздушная ударная волна W_{wave}	Падение летательного аппарата F_c		
								Давление P_{dba}	Температура T_{dba}	Реакция трубопроводов F_{dba}	Давление P_{bdba}	Температура T_{bdba}	проектное землетрясение	максимальное расчетное землетрясение	запроектное землетрясение							
3.5	+	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	II	II
4 Учет экстремальных внешних воздействий																						
4.1	+	+	+	–	–	+/–	–/+	–	–	–	–	–	–	+	–	–	–	–	–	–	I	I
4.2					–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–	–	–	–	II	II
4.3	+	+	+	+	–	+/–	–/+	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–	–	–	I	I
4.4	+	+	+	+	–	+/–	–/+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–	–	I	I
4.5	+	+	+	+	–	+/–	–/+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–	I	I
4.6	+	+	+	+	–	+/–	–/+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	I	I
4.7	+	+	–	+	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	I	I
4.8	+	+	–	+	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	I/III**	I

* Для данных сочетаний воздействий рассматривается только конструктивная целостность конструкций.

** Для внутренней оболочки — уровень по конструктивной целостности I. Для наружной оболочки — уровень по конструктивной целостности III.

Примечание — В настоящей таблице использованы следующие обозначения: «+» и «–» — нагрузки и воздействия, которые соответственно учитывают/не учитывают в расчетном сочетании; значок «+/-» означает, что следует рассматривать как сочетание, включающее в себя данную нагрузку (воздействие), так и сочетание, в котором данная нагрузка (воздействие) отсутствует.

7 Порядок проведения расчетов на прочность

7.1 Общие положения

7.1.1 ЖЗО следует рассчитывать с учетом требований федеральных норм и правил в области использования атомной энергии [2]—[5], требований настоящего раздела и в соответствии со следующими строительными нормами и правилами в зависимости от условий работы и расчетных нагрузок:

- для конструкций, работающих при систематическом воздействии температур до 50 °С включительно, — на основе положений СП 63.13330.2018 (разделы 5—7);
- для конструкций, работающих при систематическом воздействии температур от 50 °С до 200 °С включительно, — на основе положений СП 27.13330.2017 (разделы 5—8);
- для конструкций, рассчитываемых на внешние динамические воздействия техногенного происхождения (воздействие ударной волны), — на основе СП 88.13330.2014 (подразделы 8.1—8.4);
- для конструкций, рассчитываемых на сейсмические воздействия, — на основе СП 14.13330.2018 (пункты 5.15 и 6.7.2).

При расчете на падение летательного аппарата на ЖЗО прочностные характеристики материалов следует назначать в зависимости от скорости деформирования материала.

7.1.2 Расчет на прочность следует проводить при действии наиболее неблагоприятных сочетаний внутренних и внешних нагрузок, возникающих в особых режимах и при испытаниях внутренним давлением (см. таблицу 6.1).

7.1.3 При проведении расчетов на прочность ЖЗО необходимо учитывать деформации и внутренние усилия, вызываемые релаксацией напряжений в напрягаемой арматуре, ползучестью и усадкой бетона во времени и вызванные этим процессы:

- снижение растягивающих усилий в напрягаемой арматуре;
- накопление сжимающих/растягивающих усилий в металлоконструкциях, заанкеренных в бетоне (стержневая арматура, облицовка);
- изменение пространственного положения опорных конструкций основного технологического оборудования, в том числе кругового крана.

7.1.4 Для расчета ЖЗО по предельным состояниям групп I и II допускается применять линейные и нелинейные методы расчета. Расчет по предельной несущей способности, а также на локальные динамические воздействия рекомендуется выполнять нелинейными методами.

7.1.5 Расчет преднапряженной защитной оболочки следует проводить для всех этапов ее жизненного цикла, с учетом изменения свойств бетона и снижения уровня обжатия.

7.1.6 Растягивающие радиальные усилия, возникающие при преднапряжении внутренней оболочки, должны полностью восприниматься хомутами поперечной арматуры, устанавливаемыми в дополнение к поперечной арматуре, предназначенной для восприятия усилий общего сдвига. При этом следует учитывать частные коэффициенты условий работы поперечной арматуры (см. 7.2.2).

7.1.7 При выполнении расчетного анализа должны быть обоснованы прочность бетона на местное сжатие и прочность железобетона на продавливание на участках передачи нагрузок от напрягаемых элементов СПЗО. Методика учета нагрузок преднапряжения приведена в приложении А.

7.1.8 Температурные усилия в бетоне во всех режимах рекомендуется определять с учетом его кратковременной и длительной ползучести и процесса трещинообразования в нем. При выполнении расчета в линейной постановке изгибающие моменты, возникающие от тепловых воздействий, в случае трещинообразования в бетоне уменьшаются в два раза.

7.1.9 В расчете герметизирующей облицовки ЖЗО необходимо учитывать ее начальную погибь, последовательность ее нагружения при строительстве и предпусковых испытаниях, а также в течение всего срока эксплуатации с последовательным суммированием пластических деформаций листа и вызванных этими деформациями изменений его формы. Если облицовку используют в качестве несъемной опалубки, на первой стадии нагружения к облицовке следует прикладывать нагрузки от давления свежеуложенной бетонной смеси.

7.1.10 При проведении расчета на прочность герметизирующую облицовку не рассматривают как силовой (конструктивный) элемент ЖЗО, кроме процесса бетонирования при строительстве. Расчетом на прочность должно быть подтверждено, что облицовка сохраняет свою герметичность в соответствии со следующми критериями:

- деформационный критерий трещиностойкости листа в зоне сварных швов и основного металла, определяемый на основе анализа достигнутых мембранных и изгибных деформаций;

- циклическая прочность (количество циклов до разрушения) по допускаемому значению подроста трещины для элементов облицовки, работающих в условиях пластического деформирования при циклическом нагружении;

- предельные перемещения сдвига (или предельные сдвигающие усилия) в наиболее напряженных анкерах, в случае если их превышение создает возможность начала прогрессирующего нарастания деформаций в листе или цепного нарастания усилий сдвига в смежных анкерах.

Основные подходы к расчету облицовки ЖЗО приведены в 7.3.

7.1.11 Для железобетонных конструкций и стальной облицовки ЖЗО расчетные модели должны учитывать:

- контактные взаимодействия между облицовкой и бетоном в процессе сооружения, при НЭ и ННЭ, включая ПА и ЗПА;

- воздействие герметизирующей облицовки на бетон с учетом разности коэффициентов линейного расширения стали и бетона, а также различия температуры прогрева бетона и облицовки, особенно при температурных воздействиях в особых режимах;

- влияние на характеристики прочности бетона плоского или объемного НДС.

7.1.12 Для ЖЗО должен быть выполнен анализ последствий ЗПА, представленных в проекте АС в соответствии с [1], на основе реалистического (неконсервативного) подхода.

При применении реалистического (неконсервативного) подхода допускается:

- использовать нормативные значения нагрузок;
- использовать нормативные характеристики прочности материалов;
- не учитывать в анализе коэффициент надежности по ответственности;
- учитывать повышенные значения демпфирования в материалах;
- учитывать неупругую работу элементов ЖЗО и материалов.

7.2 Расчет на прочность железобетонных защитных оболочек по предельным состояниям

7.2.1 При проведении расчетов на прочность должно быть подтверждено, что мембранные напряжения в бетоне железобетонных конструкций преднапряженной ЖЗО в кольцевом и в меридиональном направлениях должны ограничиваться величинами, приведенными в таблице 7.1, с целью обеспечения работы бетона в области линейной ползучести (области, в которой деформации ползучести пропорциональны действующим напряжениям сжатия). Данные ограничения не распространяются на зоны, в которых имеются растягивающие напряжения, и на зоны концентрации напряжений (зоны трубных закладных деталей, закладных деталей для подкрановых консолей и другие части конструктивных элементов ЖЗО, где могут наблюдаться концентрации напряжений по результатам расчетов НДС).

Таблица 7.1 — Максимальные мембранные напряжения в бетоне

Номер сочетания нагрузок в соответствии с таблицей 6.1		Мембранные напряжения, при которых обеспечивается работа бетона в области линейной ползучести*
1 Учет условий строительства и предпусковых испытаний		$\sigma_b \le 0{,}5R_{b,n}$
2 Учет условий нормальной эксплуатации	2.1	$\sigma_b \le 0{,}45R_{b,n}$
	2.2	$\sigma_b \le 0{,}55R_{b,n}$
3 Учет нарушений нормальной эксплуатации (без аварийных и сейсмических нагрузок)		$\sigma_b \le 0{,}55R_{b,n}$
* В расчетах учитывают площадь сечения нетто. Критерии могут не удовлетворяться для сечений, пересекающих каналообразователь по всей длине.		

7.2.2 Расчетные сопротивления и предельные относительные деформации бетона и арматуры по критериям предельного состояния по конструктивной целостности приведены в таблице 7.2.

Для внешних воздействий, рассматриваемых как исходные события запроектных аварий, предельные состояния назначают исходя из реалистической (неконсервативной) оценки работы конструкции ЖЗО.

Коэффициенты условий работы стержневой арматуры и бетона (γ_s, γ_b) являются произведениями частных коэффициентов условий работы (γ_{si}, γ_{bi}), учитывающих влияние характера нагрузки, окружающей среды, напряженного состояния, конструктивных особенностей, технологических факторов и других условий работы, не отражаемых непосредственно в расчетах.

Частные коэффициенты условий работы (γ_{si}, γ_{bi}) принимают в зависимости от рассматриваемого расчетного случая в соответствии со строительными нормами и правилами, приведенными в 7.1.1. При проверке прочности наклонных сечений в соответствии с СП 63.13330 для поперечной стержневой арматуры в числе других следует учитывать частный коэффициент условий работы γ_{sl} = 0,8 (при явном моделировании арматурных стержней допускается 1,0), при этом расчетное сопротивление поперечной стержневой арматуры не должно превышать 300 МПа.

Допускается учитывать упрочнение бетона при многоосном сжатии.

Если падение летательного аппарата на ЖЗО рассматривается как исходное событие запроектной аварии, при проведении расчетов следует:

- принимать характеристики материалов с обеспеченностью 0,5 (средние значения);
- учитывать увеличение прочности бетона на сжатие по сравнению с заданным в проекте АС классом умножением на коэффициент 1,2;
- предельные деформации продольной и поперечной арматуры не должны превышать 5 %.

При аварийном падении летательного аппарата, рассматриваемого в качестве исходного события проектной аварии, допускается принимать предельные значения деформаций продольной и поперечной арматур до 1 %.

Таблица 7.2 — Значения критериев для уровней предельного состояния по конструктивной целостности

Уровень по конструктивной целостности	Растянутая стержневая арматура	Сжатый бетон	Напрягаемые арматурные пучки	Примечание
I	$\gamma_s \cdot R_s$	$\gamma_b \cdot R_b$	$\gamma_{sp} \cdot R_{sp,n}$ *	Критерии устанавливают по напряжениям
II	$\gamma_s \cdot R_{s,n}$	$\gamma_b \cdot R_{b,n}$	$R_{sp,n}$	Критерии устанавливают по напряжениям
	$\frac{\gamma_s \cdot R_{s,n}}{E_s} + 0{,}002$	0,002	$\frac{R_{sp,n}}{E_{sp}}$	Критерии устанавливают по относительным деформациям
III	**	Допускаются локальные разрушения	—	Критерии устанавливают по относительным деформациям

* γ_{sp} принимают не более:

- 0,9 — для расчетных сочетаний нагрузок 3.3 и 3.4 по таблице 6.1;
- 0,84 — для арматурных канатов по ГОСТ Р 53772;
- 0,8 — для прочих случаев.

**1 % — для продольной и поперечной стержневой арматуры при падении летательного аппарата, рассматриваемого в качестве исходного события проектной аварии;

5 % — для продольной и поперечной арматуры при падении летательного аппарата, рассматриваемого в качестве исходного события запроектной аварии.

Примечание — В настоящей таблице использованы следующие обозначения:

E_s, E_{sp} — модули упругости соответственно ненапрягаемой стержневой арматуры и напрягаемого арматурного каната, МПа;

$R_{s,n}$, R_s — соответственно нормативное и расчетное сопротивление стержневой арматуры растяжению, МПа;

$R_{sp,n}$ — нормативное сопротивление напрягаемого арматурного каната, соответствующее остаточному удлинению 0,1 %, МПа.

7.2.3 Расчетное обоснование герметичности ЖЗО, имеющих герметизирующую облицовку, необходимо выполнять с учетом следующих факторов:

- разрежения в объеме ГО при испытаниях, при НЭ и ННЭ, включая ПА;
- вынужденных перемещений анкеров облицовки, обусловленных общими деформациями железобетонных конструкций ЖЗО, в которые закреплена облицовка;
- сдвиговых перемещений анкеров при потере устойчивости формы облицовки;
- двухосного НДС листа облицовки;
- наличия в листе герметизирующей облицовки начальных дефектов;
- возможности работы листа облицовки после потери устойчивости формы при сжатии;
- развития пластических деформаций растяжения и сжатия в листе облицовки.

7.2.4 По результатам расчетов на прочность ЖЗО, для которой установлены требования по герметичности, должно быть обосновано:

- отсутствие сквозных трещин в листе и в сварных швах облицовки;
- целостность анкеровки.

7.2.5 Категории требований к трещиностойкости, а также значения предельно допускаемой ширины раскрытия трещин в условиях неагрессивной среды применительно к железобетонным конструкциям в соответствии с СП 63.13330 приведены в таблице 7.3. В зависимости от условий работы ЖЗО при приведении расчетов дополнительно следует учитывать требования СП 28.13330. При этом при определении категории требований к трещиностойкости под непродолжительным раскрытием трещин понимается их раскрытие при действии нагрузок, входящих в состав предпусковых или кратковременных эксплуатационных режимов, а под продолжительным — раскрытие трещин при действии нагрузок, входящих в состав длительных эксплуатационных режимов.

7.2.6 При расчете ширины раскрытия трещин следует учитывать дополнительную ширину раскрытия, которая может вызываться:

- усадкой бетона при его твердении;
- податливостью винтовых муфтовых соединений растянутых стыков стержневой арматуры;
- нарушением сцепления ранее уложенного бетона со стержневой арматурой в стыках с бетоном, укладываемым позднее.

7.2.7 При особых нагрузках и воздействиях ширина раскрытия трещин не ограничивается при обеспечении герметичности герметизирующей стальной облицовкой.

Сквозное трещинообразование при всех расчетных сочетаниях нагрузок, кроме сочетаний 3.3—3.5 по таблице 6.1, не допускается, при этом в сочетании 4.8 по таблице 6.1 сквозное раскрытие трещин допускается при условии закрытия трещин после окончания воздействия.

Таблица 7.3 — Значения предельно допускаемой ширины раскрытия трещин

Условия эксплуатации	Категория требований к трещиностойкости железобетонных конструкций и предельно допустимая ширина непродолжительного a_{crc1} и продолжительного a_{crc2} раскрытия трещин, обеспечивающая сохранность арматуры, мм	
	Ненапрягаемая стержневая арматура и арматурная проволока	Напрягаемая стержневая арматура и высокопрочная арматурная проволока диаметром 3,5 мм и более
В закрытом помещении	3-я категория: a_{crc1} = 0,4; a_{crc2} = 0,3	3-я категория: a_{crc1} = 0,3; a_{crc2} = 0,2
На открытом воздухе	3-я категория: a_{crc1} = 0,4; a_{crc2} = 0,3	3-я категория: a_{crc1} = 0,3; a_{crc2} = 0,2

7.2.8 При проведении расчетов на прочность при падении летательного аппарата на ЖЗО должно быть подтверждено, что не происходит тыльных отколов (если в проекте АС не предусмотрены специальные мероприятия по их исключению) и остаточных сквозных трещин.

7.3 Расчет на прочность герметизирующей облицовки

7.3.1 При проведении расчетов на прочность герметизирующей облицовки должно быть подтверждено, что не происходит нарушения ее герметичности с учетом всех видов нагрузок и принуди-

тельных деформаций (через анкера в бетоне) во всех режимах, учитываемых в проекте АС. Нарушение герметичности облицовки характеризуется предельными деформациями в листе, при превышении которых в нем происходит появление трещин растяжения, главным образом, в дефектах сварных швов и зонах термического влияния.

7.3.2 Достижение предельных деформаций в листе, соответствующих началу роста трещины (дефекта) в сварном шве или в зоне термического влияния, является предельным состоянием облицовки по герметичности. При этом потеря устойчивости и/или достижение ограниченных пластических деформаций в листе облицовки не являются предельными состояниями в любом режиме, кроме процесса бетонирования при строительстве.

Предельные деформации в облицовке и усилия в анкерующих элементах облицовки определяют на основе нелинейного моделирования. При этом расчет облицовки (работающей за пределами упругости) следует проводить в предположении нелинейного (физически и геометрически) деформирования материала.

7.3.3 При расчете конструкции облицовки, в которой возможна потеря устойчивости листа в одном или нескольких пролетах, сопровождающаяся появлением пластических деформаций, следует рассматривать наиболее неблагоприятную из предполагаемых последовательностей ее нагружения в течение срока службы проектными сочетаниями нагрузок. При этом расчет следует проводить для всех этапов нагружения с последовательным суммированием пластических деформаций листа и вызванных этими деформациями изменений его формы.

7.3.4 При расчете облицовки в аварийных режимах следует учитывать различия в температурах нагрева панелей облицовки, сохранивших контакт с бетоном и потерявших устойчивость, в течение начального периода времени развития аварийной ситуации. Кроме того, необходимо учитывать, что в этих режимах температуры нагрева облицовки могут значительно отличаться в различных зонах сооружения (вблизи мест возможного выброса теплоносителя, в куполе оболочки и другие части конструктивных элементов ЖЗО, где по результатам теплотехнических расчетов будут выявлены указанные зоны).

При отсутствии данных специального расчета распределения температур в листах облицовки в проектном аварийном режиме рекомендуется принимать, что максимальная температура листа в потерявших устойчивость пролетах больше, чем в сохранивших устойчивость, на плюс 10 °С в тонкостенной коррозионно-стойкой стали (для листов толщиной от 3 до 5 мм) и на плюс 15 °С — в относительно толстостенной (для листов толщиной от 6 до 8 мм) углеродистой облицовке с защитным покрытием.

7.3.5 При проведении расчетов на прочность герметизирующей облицовки следует учитывать:

- возможность наличия в листе начальных несовершенств, в том числе в виде прогибов волнового характера. Значение прогиба следует принимать равным допуску по отклонению от плоскостности, нормированному для принятого типа листов;
- формирование выгиба в листе и принудительных перемещений в анкерах в строительный период под влиянием давления бетонной смеси;
- сжатие бетона в месте контакта с облицовкой в результате преднапряжения, усадки и ползучести;
- срез наиболее напряженного локального анкера, привариваемого к линейному анкеру;
- пластическое деформирование и изменение механических характеристик металла листа при двуосном напряженном состоянии в зависимости от температуры;
- нелинейный характер жесткостных характеристик анкеров при сдвиге, которые следует принимать, как правило, на основе экспериментальных исследований, а для анкеров с несимметричным поперечным сечением — также с учетом предполагаемого направления сдвига.

Значения жесткостных характеристик листа (толщина листа, модуль упругости, диаграмму деформирования) допускается принимать равными средним значениям для всей расчетной области.

7.3.6 Если максимальные главные мембранные плюс изгибные напряжения от давления бетонной смеси в листе герметизирующей облицовки и его сварных соединениях в процессе строительства не превышают 2/3 значения расчетного сопротивления по пределу текучести стали облицовки, то начальные деформации, вызванные процессом бетонирования, допускается не учитывать при проведении дальнейших расчетов с учетом истории нагружения конструкции. Расчетные сопротивления листа герметизирующей облицовки и его сварных соединений определяют согласно СП 16.13330.2017 (раздел 6).

7.3.7 Расчет анкеров закладных деталей, являющихся частью конструкции герметизирующей облицовки, по несущей способности в основных проектных режимах следует проводить с учетом со-

вместного приложения всех нагрузок, действующих на эту закладную деталь, с учетом требований СП 63.13330 и в соответствии со строительными нормами и правилами, приведенными в 7.1.1.

7.3.8 При расчете на устойчивость облицовки с анкерами из прокатных профилей, привариваемых одной полкой к облицовке двумя параллельными швами, допускается расчетный шаг анкеров в направлении, нормальном к продольной оси прокатных профилей, уменьшить на ширину полок, обращенных внутрь расчетного пролета.

7.3.9 Анкера герметизирующей стальной облицовки необходимо проверять:

- на срез и растяжение;
- сдвиг при смятии бетона;
- выдергивание — анкера без усиления;
- продавливание и смятие бетона при растяжении — анкера с усилениями (шайбами, пластинами, высаженными головками).

Анализ предельного состояния при сдвиге анкера осуществляют по допускаемому предельному усилию или по перемещению.

7.3.10 При использовании точечных (стержневых) анкеров герметизирующие свойства герметизирующей облицовки должны сохраняться в случае отказа одного точечного анкера.

7.3.11 При расчете герметизирующей облицовки следует учитывать характеристики деформирования анкеров при сдвиге (нормативные значения предельных усилий сдвига F_u или перемещений сдвига u_{lim}), принимаемые в соответствии с технической документацией, разработанной на основе экспериментальных данных. Допускается характеристики деформирования анкеров при сдвиге учитывать прямым расчетным моделированием взаимодействия анкеров с окружающим бетоном рассчитываемого участка облицовки (без экспериментальных обоснований).

7.3.12 Предельные расчетные усилия сдвига или предельные расчетные перемещения сдвига в анкерах герметизирующей облицовки ЖЗО определяют делением нормативных значений, принятых на основании 7.3.11, на соотвествующие коэффициенты надежности по нагрузке (γ_f — коэффициент надежности анкера по усилию или γ_u — коэффициент надежности анкера по перемещению), приведенные в таблицах 7.4 и 7.5 соответственно по рассматриваемому расчетному сочетанию нагрузок.

Таблица 7.4 — Коэффициенты надежности анкеров по усилию при сдвиге

Номер сочетания в соответствии с таблицей 6.1	Коэффициенты надежности анкеров по усилию при сдвиге γ_f
1, 2, 3.1, 4	1,4
3.2	1,2
3.5	1,0

Таблица 7.5 — Коэффициенты надежности анкеров по перемещению при сдвиге

Номер сочетания в соответствии с таблицей 6.1	Коэффициенты надежности анкеров по перемещению при сдвиге γ_u
1, 2, 3.1, 4	2,5
3.2	2,0
3.5	1,7

7.3.13 Предельное расчетное сопротивление сдвигу комбинированного линейного анкера (уголка с приваренными стержневыми анкерами) F_{cd}, кН/м, допускается определять по формуле

$$F_{cd} = \frac{A_{a1} + 0{,}5 n_a A_{a2}}{\gamma_t}, \qquad (7.1)$$

где A_{a1} — нормативное сопротивление сдвигу линейного анкера на единицу длины, кН/м;

A_{a2} — нормативное сопротивление сдвигу стержневого анкера (сопротивление стержневых анкеров в комбинированном анкере должно обеспечивать не менее 10 % его общего сопротивления сдвигу), кН/м;

n_a — количество стержневых анкеров, приваренных на единице длины линейного анкера.

7.3.14 В двухосном сжатом бетоне предельное перемещение сдвига (или предельное сдвигающее усилие) в анкерах увеличивают на 20 %.

При наличии трещин в бетоне в зоне расположения анкеров предельное перемещение сдвига в анкерах (или предельное сдвигающее усилие) уменьшают на 10 %.

7.3.15 Зависимость перемещения анкеров при сдвиге от приложенной силы $F(u)$, кН/м, допускается аппроксимировать формулой

$$F(u) = A_a(1 - e^{-Bu})^C, \quad (7.2)$$

где A_a — нормативная предельная несущая способность анкера рассматриваемого типа, кН/м;

u — перемещение точки сопряжения анкера с листом в направлении сдвига, м;

B (1/м) и C — постоянные, определяемые экспериментально для каждой конструкции анкера;

e — математическая константа (число Эйлера).

Для некоторых конструктивных решений (бетон В40, двойной сплошной шов) при сдвиге линейного анкера в сторону от обушка к перу значения величин в формуле (7.2) допускается принимать по таблице 7.6.

При сдвиге в обратном направлении значение A_a необходимо уменьшать на 10 .

Таблица 7.6 — Значения постоянных в формуле (7.2) для различных видов анкеров

Номинальные размеры анкера в зависимости от его конструкции, мм	A_a, кН/м*	B, 1/м**	C
дюбеля			
∅12	58	2,11	0,87
∅16	94	1,83	0,98
уголки ***			
∠50х5	1300	1,23	0,75
∠60х6	1430	1,35	0,69
∠80х8	1960	1,01	0,57

* Для перехода к бетону других классов постоянные A_a умножают на корень квадратный из соотношения начальных модулей упругости принятого бетона и бетона В40. Для более высоких марок принимают начальный модуль упругости бетона В40.

** Значения коэффициентов A_a, B и C приведены для уголков, привариваемых полкой к листу облицовки. При применении в конструкции облицовки уголков, привариваемых пером к листу облицовки, требуется экспериментальное получение значений коэффициентов.

*** Для перехода к другой высоте полки уголка, направленной в тело бетона, необходимо скорректировать несущую способность пропорционально 3/4 степени соотношения двух высот. Предельная учитываемая высота полки — не более 15 ее толщин.

7.3.16 Рекомендуемый метод оценки герметизирующей стальной облицовки по деформационному критерию трещиностойкости и методика определения предельных деформаций, превышение значений которых приводит к нарушению герметичности облицовки, приведены в приложении В.

При отсутствии экспериментальных данных значения характеристик статической трещиностойкости допускается принимать согласно ГОСТ Р 59115.6—2021 (разделы 5 и 13).

Допускается проведение оценки герметизирующей стальной облицовки по деформационному критерию трещиностойкости с применением других методик при их соответствующем обосновании.

7.3.17 Рекомендуемый метод расчета герметизирующей стальной облицовки по критерию циклической прочности (количество циклов до разрушения) облицовки приведен в В.6 приложения В.

При отсутствии экспериментальных данных значения характеристик циклической трещиностойкости допускается принимать согласно ГОСТ Р 59115.6—2021 (разделы 5 и 14).

Допускается проведение оценки циклической прочности герметизирующей стальной облицовки с применением других методик при их соответствующем обосновании.

Приложение А
(рекомендуемое)

Методы учета усилий преднапряжения

А.1 Минимальный допустимый уровень обжатия устанавливают таким, чтобы при проведении предпусковых приемо-сдаточных испытаний внутренней защитной оболочки избыточным давлением, при проведении повторных испытаний избыточным давлением, а также при любом из особых проектных режимов (кроме расчетных сочетаний нагрузок 3.3 и 3.4 по таблице 6.1 настоящего стандарта) усилия в любом сечении оболочки, за исключением зон локальных включений, не были растягивающими, а растягивающие напряжения в бетоне хотя бы на одной из поверхностей оболочки не превышали значения $R_{bt,n}/2$.

А.2 Система преднапряжения, как правило, должна быть спроектирована исходя из требования обеспеченности минимально допустимого уровня обжатия защитной оболочки в течение всего срока эксплуатации АС без подтяжки и замены напрягаемых элементов.

А.3 При проведении расчетов необходимо определять отношение прочности арматурного пучка к суммарной прочности арматурных канатов ψ (коэффициент агрегатной прочности). Оно должно составлять не менее 0,95 ($\psi \geq 0,95$). При выполнении проверки прочности арматурных канатов допускается принимать $\psi = 0,95$.

А.4 При определении напряжений в арматурных канатах следует учитывать их прогрев в различных режимах.

А.5 Напряжения в арматурных канатах следует определять с учетом общего деформирования защитной оболочки в различных режимах ее эксплуатации. Значения критериев для напрягаемых арматурных пучков в процессе натяжения приведены в таблице А.1.

При выполнении проверки указанного условия необходимо учитывать следующие факторы:

- погрешность измерения усилия натяжения арматурного пучка;
- неравномерность распределения напряжений в поперечном сечении арматурного пучка.

А.6 Усилия в напрягаемых элементах СПЗО при проведении расчетного анализа их прочности необходимо определять с учетом:

- возможной погрешности их измерения в процессе натяжения;
- совместного деформирования напрягаемых элементов СПЗО и железобетонной строительной конструкции защитной оболочки под нагрузкой;
- прогрева напрягаемых элементов СПЗО в различных режимах эксплуатации защитной оболочки.

Таблица А.1 — Значения критериев для напрягаемых арматурных пучков в процессе натяжения

Предельные напряжения в арматурном пучке, МПа	Предельные напряжения для арматурных пучков, МПа
$[\sigma_{sp}]$	$\min (0,8R_{sp,u}; 0,9R_{sp,n})$
Примечание — В настоящей таблице использованы следующие обозначения: $R_{sp,u}$ — временное сопротивление арматурной стали. $R_{sp,n}$ — нормативное сопротивление арматурной стали, соответствующее $\sigma = 0,1$ %.	

А.7 Для преднапряженных оболочек необходимо учитывать уровень обжатия с учетом потерь преднапряжения для начала и конца срока эксплуатации блока АС.

Приложение Б
(справочное)

Особенности расчетов напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций

Б.1 Расчеты железобетонных конструкций ЖЗО в общем случае следует производить в соответствии с СП 63.13330 по предельным состояниям, включающим:

- предельные состояния первой группы, приводящие к полной непригодности эксплуатации конструкции ЖЗО;
- предельные состояния второй группы, затрудняющие нормальную эксплуатацию конструкции ЖЗО или уменьшающие ее долговечность по сравнению с предусматриваемым сроком службы.

Б.2 Расчеты по предельным состояниям первой группы включают:

- расчет на прочность;
- расчет по устойчивости формы;
- расчет по устойчивости положения (опрокидывание, скольжение, всплывание).

Б.3 Расчеты на прочность железобетонных конструкций следует проводить из условия, по которому усилия, напряжения и деформации в элементах железобетонных конструкций от различных воздействий с учетом начального напряженного состояния (преднапряжение, температурные и другие воздействия) не должны превышать допускаемых предельных значений, установленных соответствующими строительными нормами и правилами, приведенными в 7.1.1 настоящего стандарта.

Б.4 Расчеты по устойчивости формы железобетонной конструкции, а также по устойчивости положения (с учетом совместной работы железобетонной конструкции и основания, их деформационных свойств, сопротивления сдвигу по контакту с основанием и других особенностей) следует проводить согласно соответствующим строительным нормам и правилам, приведенным в 7.1.1, на отдельные виды конкретных железобетонных конструкций.

Б.5 В зависимости от вида и назначения железобетонной конструкции должны быть проведены расчеты по предельным состояниям, связанным с явлениями, при которых возникает необходимость прекращения эксплуатации здания и сооружения (чрезмерные деформации, сдвиги в соединениях и другие явления).

Б.6 Расчеты по предельным состояниям второй группы включают:

- расчет по образованию трещин;
- расчет по раскрытию трещин;
- расчет по деформациям.

Расчеты по предельным состояниям второй группы следует проводить на действие постоянных, длительных и кратковременных нагрузок.

Б.7 Расчет железобетонных конструкций по образованию трещин следует проводить из условия, по которому усилия, напряжения или деформации в элементах железобетонных конструкций от нагрузок не должны превышать их предельных значений, воспринимаемых элементами железобетонных конструкций при образовании трещин и установленных соответствующими строительными нормами и правилами, приведенными в 7.1.1.

Б.8 Расчет железобетонных конструкций по раскрытию трещин проводят из условия, по которому ширина раскрытия трещин в элементах железобетонных конструкций от нагрузок не должна превышать предельно допустимых значений, устанавливаемых в зависимости от требований, предъявляемых к железобетонным конструкциям, условий их эксплуатации, воздействия окружающей среды и характеристик материалов с учетом особенностей коррозионного поведения арматуры.

Б.9 Расчет железобетонных конструкций по деформациям следует проводить из условия, по которому прогибы, углы поворота, перемещения и амплитуды колебания железобетонных конструкций от нагрузок не должны превышать предельно допустимых значений, установленных соответствующими строительными нормами и правилами, приведенными в 7.1.1.

Расчет по образованию трещин проводят для определения необходимости расчета по раскрытию трещин и учета трещин при расчете по деформациям.

Б.10 Расчет железобетонных конструкций (линейных, плоскостных, пространственных, массивных) по предельным состояниям первой и второй групп проводят по напряжениям, усилиям, деформациям и перемещениям, вычисленным от внешних воздействий в элементах железобетонных конструкций и образуемых ими системах зданий и сооружений с учетом физической нелинейности (неупругих деформаций бетона и арматуры), возможного образования трещин и в необходимых случаях – анизотропии, накопления повреждений и геометрической нелинейности (влияние деформаций на изменение усилий в железобетонных конструкциях).

Физическую нелинейность и анизотропию следует учитывать в определяющих соотношениях, связывающих между собой напряжения и деформации (или усилия и перемещения), а также в условиях прочности и трещиностойкости материала.

В статически неопределимых железобетонных конструкциях следует учитывать перераспределение усилий в элементах системы вследствие образования трещин и развития неупругих деформаций в бетоне и арматуре вплоть до возникновения предельного состояния в элементе. Усилия и напряжения в статически неопределимых железобетонных конструкциях и системах допускается определять в предположении упругой работы железобетонных элементов. При этом влияние физической нелинейности учитывают путем корректировки результатов линейного расчета на основе данных экспериментальных исследований, нелинейного моделирования, результатов расчета аналогичных объектов и экспертных оценок.

При расчете железобетонных конструкций на прочность, по деформациям, образованию и раскрытию трещин на основе метода конечных элементов должны быть проверены условия прочности и трещиностойкости для всех конечных элементов, составляющих железобетонную конструкцию, а также условия возникновения чрезмерных перемещений железобетонной конструкции. При оценке предельного состояния на прочность допускается считать отдельные конечные элементы разрушенными, в случае если это не влечет за собой разрушения железобетонной конструкции.

Б.11 Расчет усилий в железобетонных элементах ЖЗО следует проводить с учетом напряженного состояния и деформаций оснований и плитных фундаментов.

Б.12 При расчете усилий в оболочках, в которых отношение толщины к радиусу не превышает 1/8, рекомендуется использовать технические приложения теории тонких оболочек. При расчете зон приложения локальных нагрузок и утолщений следует учитывать объемное напряженное состояние бетона.

Б.13 В предварительно напряженных оболочках усилия предварительного натяжения в напрягаемой арматуре следует назначать с учетом требований, изложенных в приложении А.

Б.14 При расчете сечений сферической и цилиндрической частей оболочки следует использовать различные расчетные схемы для сечений в краевых зонах и для сечений, в которых влиянием краевых эффектов можно пренебречь.

Б.15 Параметры используемых моделей нелинейного деформирования бетонов должны быть обоснованы для используемых типов бетона, в том числе на основе экспериментальных исследований. При отсутствии экспериментальных данных допускается использовать обобщенные параметры моделей нелинейного деформирования бетонов из документов по стандартизации в зависимости от классов бетонов. Диаграммы деформирования бетонов допускается принимать в соответствии с рекомендациями СП 27.13330.2017 (пункты 5.21, 5.22) и СП 63.13330.2018 (пункты 6.1.19—6.1.21, приложение Г).

Приложение В
(рекомендуемое)

Методика оценки герметизирующей стальной облицовки по деформационному критерию трещиностойкости и циклической прочности

В.1 Критерием оценки герметизирующей стальной облицовки по предельному состоянию по герметичности является ограничение максимального уровня накопленных пластических деформаций, возникающих при потере устойчивости облицовки и не приводящих к нарушению герметичности облицовки.

В.2 Максимальный уровень накопленных пластических деформаций оценивают по деформационному критерию трещиностойкости. Нарушение герметичности определяется началом роста несплошности в условиях сложного напряженного состояния.

В общем случае предельные деформации для сварных соединений из углеродистых и аустенитных сталей листа облицовки, превышение значений которых приводит к нарушению герметичности облицовки, зависят от класса стали, типа сварного соединения, типа дефекта, толщины листа, а для углеродистых сталей и от температуры. Предельные деформации листа в зоне сварного шва определяют на основе методов механики разрушения в зависимости от коэффициентов запаса по значению *J*-интеграла и коэффициента двухосности β, который вычисляют как соотношение главных напряжений по формуле

$$\beta = \sigma_2/\sigma_1, \qquad (В.1)$$

где σ_1 — напряжения, раскрывающие трещину, МПа;

σ_2 — напряжения, перпендикулярные к σ_1 и действующие вдоль фронта трещины, МПа.

Методика определения предельных деформаций для оценки герметизирующей стальной облицовки по деформационному критерию трещиностойкости приведена в В.3—В.5.

Допускается определять условие сохранения герметичности облицовки без вычисления предельных деформаций из условия того, что значение *J*-интеграла не превышает критического значения для рассматриваемого дефекта ($J < [J_c]$) с учетом коэффициентов запаса.

Коэффициенты запаса по значению *J*-интеграла, используемые при определении предельных значений деформаций, для соответствующих режимов приведены в таблице В.1.

Таблица В.1 — Коэффициент запаса по значению *J*-интеграла

Номер сочетания в соответствии с таблицей 6.1	Коэффициент запаса по значению *J*-интеграла
1, 2, 3.1, 4	1,4
3.2	1,2
3.5	1,0

В.3 Приварку листов облицовки к линейным анкерам и пластинам закладных деталей и соединение их между собой осуществляют с помощью различных сварных швов. В результате сварки возможно появление конструкционных зазоров (мест непровара на контакте листа и прокатного профиля) и поверхностных трещиноподобных дефектов в самих швах, что является причиной концентрации напряжений и деформаций в этих зонах. Следовательно, при оценке деформационной способности сварного соединения следует исходить из наличия в сварном соединении какого-либо из указанных двух дефектов.

В.4 При проведении расчетов рассматривают два типа нагружения сварного соединения:

- тип 1 — торцевое продольное растягивающее усилие;
- тип 2 — изгиб моментом *M* (в области растяжения).

Тип 1 моделирует наличие в листе однородных (мембранных) деформаций, тип 2 — наличие в листе изгибных деформаций.

Рассматривают два вида дефектов: конструкционный зазор (непровар) и поверхностный трещиноподобный дефект сварочного происхождения (подрез). Оба вида дефектов схематизируют как острые трещины, т. е. концентраторы с радиусом притупления, равным нулю. Глубину дефекта рекомендуется принимать не более 0,5 мм для листов из углеродистых сталей толщиной от 6 до 8 мм и для листов из аустенитных сталей толщиной от 3 до 5 мм.

Прочностной анализ проводят в двумерной постановке в условиях плоско-деформированного состояния.

С помощью МКЭ определяют напряженно-деформированное состояние в окрестностях дефекта при действии внешней нагрузки. В качестве номинальной деформации ε^H при нагружении по типу 1 рассматривают равномерно распределенную продольную деформацию в сечении, находящемся от вершины трещины на расстоянии, равном 1,5—2,0 значения толщины листа t (на этом расстоянии возмущения от сварного шва практически затухают). При нагружении по типу 2 в качестве номинальной деформации рассматривают максимальную по сечению листа деформацию изгиба вдали от трещины.

Проводят численный расчет J-интеграла (Эшелби—Черепанова—Райса) для двух различных постулируемых трещин: конструкционного зазора (непровар) и поверхностного трещиноподобного дефекта. Выполняют построение зависимости вида $J(\varepsilon^H)$, т. е. J-интеграла от величины номинальной деформации ε^H_f при нагружении. При обеспечении условия $J < [J_c]$ гарантируется отсутствие подрастания трещины, что обеспечивает герметичность конструкции облицовки. При этом следует учитывать:

- в качестве допускаемого значения J-интеграла $[J_c]$ принимают величину вязкости разрушения материала в терминах J_c, для соответствующей моды нагружения I или II, т. е. $[J_c] = J_{Ic}$ или $[J_c] = J_{IIc}$. Значения J_{Ic} или J_{IIc} определяют экспериментально или принимают по нормативной документации;
- для перлитной стали значение $[J_c]$ принимают с учетом температуры листа. Для аустенитных сталей значение $[J_c]$ принимают не зависящим от температуры;
- при необходимости осуществляют корректировку значения $[J_c]$ с учетом двухосности нагружения металла облицовки;
- для рассматриваемого режима эксплуатации вводят соответствующий коэффициент запаса на величину $[J_c]$.

В.5 В качестве расчетного значения критической деформации для рассматриваемого сварного соединения принимают минимальное значение ε^H_f из двух величин:

- $\left(\varepsilon^H_f\right)_1$ — критическая деформация, отвечающая началу развития трещины от конструкционного зазора;
- $\left(\varepsilon^H_f\right)_2$ — критическая деформация, отвечающая началу развития трещины от трещиноподобного поверхностного дефекта.

Полученное таким образом значение критической номинальной деформации принимают как предельное для данного сварного соединения при соответствующем типе нагружения.

Определение значения деформации ε^H_{max} при циклическом нагружении, отвечающей максимальной температуре нагрева листов, при которой начинается рост трещины, следует проводить с помощью нелинейной механики разрушения на основе J-интеграла.

В.6 При оценке циклической прочности облицовки расчет допускается проводить по следующей методике, приведенной в В.6.1—В.6.5.

В.6.1 При наиболее жестком режиме нагружения определяют значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) K_I^{max}, МПа · м$^{1/2}$, по формуле

$$K_I^{max} = \sqrt{EJ}, \tag{В.2}$$

где E — модуль упругости, МПа;

J — значение J-интеграла при номинальной деформации ε^H_{max}, отвечающей максимальной температуре нагрева листов, МПа · м.

В.6.2 Консервативно принимают, что размах КИН ΔK, МПа · м$^{1/2}$, при термических пульсациях равен K_I^{max}:

$$\Delta K = K_I^{max}. \tag{В.3}$$

В.6.3 Оценивают скорость роста усталостной трещины dl/dN, метров за цикл нагружения, по формуле Пэриса

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^n, \tag{В.4}$$

где C, n — константы материала;

N — количество циклов нагружения;

l — длина трещины, м.

В.6.4 Консервативно принимают, что герметичность конструкции облицовки не нарушается, если подрост трещины будет не более $\Delta l = \Delta l_{crit}$.

Рекомендуется принимать Δl_{crit} = 0,5 мм для листов из углеродистых сталей толщиной от 6 до 8 мм и для листов из аустенитных сталей толщиной от 3 до 5 мм.

В.6.5 Тогда циклическую прочность сварного соединения N_f определяют по формуле

$$N_t = \frac{\Delta l_{crit}}{\left(\frac{dl}{dN}\right)}, \tag{В.5}$$

где Δl_{crit} — подрост трещины, м.

Тогда с учетом формул (В.2), (В.3), (В.4)

$$N_t = \frac{\Delta l_{crit}}{C(EJ)^{n/2}}. \tag{В.6}$$

Дополнительно для выражения в формуле (В.6) должно выполняться условие $J < [J_c]$ для дефекта глубиной 1 мм. При этом консервативно принимают, что амплитуда (диапазон) циклических деформаций рассчитывается от 0 до максимума.

Параметры C и n для материалов в условиях воздействия водной среды имеют следующие значения (верхние огибающие экспериментальных данных):

- для углеродистых сталей типа Ст3 и их сварных швов $C = 4{,}2 \cdot 10^{-12}$, $n = 3{,}5$;
- для аустенитных коррозионно-стойких сталей типа 18-8 и их сварных швов $C = 5{,}2 \cdot 10^{-11}$, $n = 3{,}3$.

Библиография

[1] Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии НП-001-15 — Общие положения обеспечения безопасности атомных станций

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

[3] Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии НП-041-22 — Требования по безопасности к строительным конструкциям зданий и сооружений атомных станций

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

[5] Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии НП-064-17 — Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии

УДК 621.039:531:006.354 ОКС 27.120.20

Ключевые слова: прочность, железобетонные конструкции, герметичное ограждение, оборудование и трубопроводы, атомные энергетические установки, поверочный расчет на прочность

Редактор *Н.В. Таланова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *О.В. Лазарева*
Компьютерная верстка *А.Н. Золотаревой*

Сдано в набор 08.09.2023. Подписано в печать 20.09.2023. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,26. Уч.-изд. л. 2,95.

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